

6
2oj.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**"LA HIDROGEOQUIMICA Y SU APLICACION EN LA
REGION DE IXTAPAN DE LA SAL - TENANCINGO,
ESTADO DE MEXICO"**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO GEOLOGO

P R E S E N T A:

JOSE ANGEL JUAN PEREZ



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D. F.

1994

1993



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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA

SR. JOSE ANGEL JUAN PEREZ
P r e s e n t e

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Héctor L. Macías González, - y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de ingeniero geólogo.

"LA HIDROGEOQUIMICA Y SU APLICACION EN LA REGION DE
IXTAPAN DE LA SAL-TENANCINGO, ESTADO DE MEXICO"

RESUMEN

- I INTRODUCCION
- II PROPIEDADES QUIMICAS Y FISICOQUIMICAS DEL AGUA SUBTERRANEA
- III GEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA
- IV REPRESENTACION GRAFICA DE LOS ANALISIS QUIMICOS DEL AGUA SUBTERRANEA
- V MARCO GEOLOGICO DEL AREA DE ESTUDIO
- VI APLICACION DE LA HIDROGEOQUIMICA EN EL AREA DE ESTUDIO
- VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- APENDICE
- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Coordinación de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

A t e n t a m e n t e

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Ciudad Universitaria, a 17 de febrero de 1989

EL DIRECTOR

DANIEL RESENDIZ NUNEZ

A MIS PADRES CON ENORME
CARIÑO POR SU AMOR, APOYO Y
CONFIANZA QUE SIEMPRE ME HAN
MANIFESTADO, ELEMENTOS
FUNDAMENTALES EN MI FORMACION.

A TI GRACIELA CON AMOR,
ESTE TRABAJO ES PARTE
DE TU ESFUERZO.

A MIS HERMANOS, BLANCA LIDIA
Y RUBEN. EL CARIÑO QUE
ME BRINDAN ES PARA MI
UNA GRAN MOTIVACION.

A MIS AMIGOS. GRACIAS
POR SU AMISTAD Y POR LA
CONFIANZA CON LA QUE
ME HAN DISTINGUIDO.

AGRADECIMIENTOS

A LOS SEÑORES SINODALES:

ING. HECTOR MACIAS GONZALEZ.
ING. EMILIANO CAMPOS MADRIGAL.
ING. RAUL MORALES ESCALANTE.
ING. FERNANDO ROSIQUE NARANJO.
ING. DIONISIO VALDEZ MENDOZA.
POR TODAS LAS FACILIDADES QUE ME BRINDARON
EN LA ELABORACION DE ESTE TRABAJO.

AL ING. HECTOR MACIAS G.
POR SU ORIENTACION
EN LA REALIZACION DE ESTE
TRABAJO.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO, EN ESPECIAL A LA FACULTAD
DE INGENIERIA POR TODOS LOS
CONOCIMIENTOS TRANSMITIDOS.

LA HIDROGEOQUIMICA Y SU APLICACION EN LA REGION DE IXTAPAN
DE LA SAL-TENANCINGO, ESTADO DE MEXICO

INDICE

Página

RESUMEN

I INTRODUCCION.....	1
I.1 GENERALIDADES.....	1
I.1.1 OBJETIVOS.....	1
I.1.2 LOCALIZACION Y VIAS DE ACCESO.....	2
a) Localización	
b) Vías de acceso	
I.2 DEFINICION DE HIDROGEOQUIMICA.....	2
I.3 IMPORTANCIA DE LA HIDROGEOQUIMICA EN ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS.....	3
II PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL AGUA.....	5
II.1 LA MOLECULA DEL AGUA.....	5
II.2 PROPIEDADES FISICAS.....	7
II.2.1 TEMPERATURA (t).....	7
II.2.2 CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (CE).....	10
II.2.3 COLOR, OLOR Y SABOR.....	11
II.3 PROPIEDADES QUIMICAS.....	11
II.3.1 POTENCIAL DE HIDROGENO (pH).....	11
II.3.2 DUREZA DEL AGUA.....	12
II.3.3 SOLIDOS TOTALES DISUELTOS.....	13
III GEOQUIMICA DEL AGUA.....	15
III.1 COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA.....	15
III.1.1 CATIONES.....	16
a) Ion Sodio	
b) Ion Calcio	
c) Ion Magnesio	
d) Ion Potasio	
e) Ion Fierro	
f) Ion Litio	
III.1.2 ANIONES.....	20
a) Ion Cloro	
b) Ion Sulfato	
c) Iones Bicarbonato y Carbonato	
d) Ion Nitrato	
III.2 CICLO GEOQUIMICO DEL AGUA.....	23
III.2.1 GEOQUIMICA DEL AGUA DE LLUVIA.....	24
III.2.2 GEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA.....	24
III.2.3 GEOQUIMICA DEL AGUA DE MAR.....	27
III.3 FENOMENOS MODIFICADORES DE LA COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA.....	28
III.3.1 OXIDACION-REDUCCION.....	28
III.3.2 CAMBIO DE BASES.....	28
III.3.3 CONCENTRACIONES Y PRECIPITACIONES.....	30

III.4 CALIDAD DEL AGUA PARA SU USO.....	31
III.4.1 CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO.....	31
III.4.2 CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO.....	34
III.5 CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA.....	34
IV REPRESENTACION GRAFICA DE LOS ANALISIS QUIMICOS DEL AGUA SUBTERRANEA.....	38
IV.1 TECNICA DE MUESTREO DEL AGUA SUBTERRANEA.....	38
IV.2 ANALISIS QUIMICO DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS.....	40
IV.3 INDICES HIDROGEOQUIMICOS.....	43
IV.3.1 RELACION $rCl/rHCO_3$	43
IV.3.2 RELACION rSO_4/rCl	44
IV.3.3 RELACION rMg/rCa	44
IV.3.4 INDICE DE CAMBIO DE BASES (icb) E INDICE DE DESEQUILIBRIO (idd).....	44
IV.3.5 RELACION rNa/rCa , $rNa/r(Ca+Mg)$, rCa/rCl , rMg/rCl , $r(Ca+Mg)/rCl$, $r(Na+K)/rCl$ y rSr/rCa	44
IV.3.6 RELACION $rK = \sqrt{rCa(rHCO_3) \text{ exp. } 2}$	45
IV.3.7 RELACION rSO_4/rCa	45
IV.4 DIAGRAMAS PARA REPRESENTAR LOS ANALISIS QUIMICOS DEL AGUA SUBTERRANEA.....	45
IV.4.1 DIAGRAMA DE COLLINS (DIAGRAMA COLUMNAR).....	45
IV.4.2 DIAGRAMA DE STIFF.....	45
IV.4.3 DIAGRAMA SEMILOGARITMICO (SCHOELLER- BERKALOFF).....	46
IV.4.4 DIAGRAMA DE PIPER.....	47
IV.4.5 DIAGRAMA DE CLASIFICACION DE AGUAS PARA RIEGO.....	48
IV.5 MAPAS HIDROGEOQUIMICOS.....	51
V GEOLOGIA.....	52
V.1 GEOLOGIA REGIONAL.....	52
V.2 GEOLOGIA DEL AREA DE ESTUDIO.....	53
V.2.1 GEOMORFOLOGIA.....	53
V.2.2 ESTRATIGRAFIA.....	55
a) COMPLEJO METAMORFICO (Js-Ki)	
b) FORMACION ACUITLAPAN (JKa)	
c) FORMACION MORELOS	
d) FORMACION MEZCALA (Ksm)	
e) GRANITO (Tgr)	
f) FORMACION RIOLOTA TILZAPOTLA (Tot)	
g) FORMACION TEPOZTLAN (Tomt)	
h) FORMACION ANDESITA ZEMPOALA (Tmzp)	

i) FORMACION CHONTALCOATLAN (Tpch)	
j) FORMACION ZINACANTEPETL (Qz1)	
k) BASALTO (Qb)	
l) PRODUCTOS PIROCLASTICOS BASALTICOS	
m) PRODUCTOS PIROCLASTICOS INTERMEDIOS	
n) TRAVERTINO (Qtr)	
o) ALUVION (Qal)	
V.3 TECTONICA Y GEOLOGIA ESTRUCTURAL.....	66
VI APLICACION DE LA HIDROGEOQUIMICA EN EL AREA DE ESTUDIO.....	71
VI.1 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS.....	71
VI.2 CONFIGURACION DEL NIVEL ESTATICO (NE) Y LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (CE).....	75
VI.3 CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA.....	79
VI.4 FAMILIAS DE AGUA.....	87
VI.4.1 INTERPRETACION DEL DIAGRAMA DE PIPER.....	92
VI.5 CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO.....	93
VI.6 CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO.....	96
VI.7 EL MANANTIAL DE IXTAPAN DE LA SAL.....	98
VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	104
BIBLIOGRAFIA.....	110
ANEXO: MAPA GEOLOGICO	

RESUMEN

La aplicación de los conceptos teóricos de la Hidrogeoquímica son la base de este trabajo. La región de estudio se localiza en la porción sur del Estado de México; incluye los municipios de Tenancingo, Zumpahuacán, Villa Guerrero, Ixtapan de la Sal y Tonicato, cubriendo un área de 611 Km².

Las principales formaciones rocosas que afloran en la región son en orden cronológico: El Complejo Metamórfico que involucra el Esquisto Taxco y la Roca Verde Taxco Viejo; la secuencia de lutitas, areniscas y calizas de la Formación Acuitlapán; la caliza de la Formación Morelos; un cuerpo intrusivo de composición granítica; los derrames y material piroclástico de la Formación Tepoztlán; la secuencia volcánica de materiales de composición intermedia de la Formación Andesita Zempoala; el conglomerado de la Formación Chontalcoatlán; el material volcánico de la Formación Zinacantépetl; los basaltos y productos piroclásticos de composición basáltica e intermedia aún no descritos formalmente; el travertino de la región de Ixtapan y Tonicato y los depósitos recientes derivados del intemperismo y erosión de unidades más antiguas.

Los principales rasgos estructurales que se identifican en la región son las cinco fases de deformación que actúan en el Mesozoico y Cenozoico, descritas por Campa y Ramírez en 1979 y el sistema de fallas y fracturas San Miguel de Allende-Taxco, que tiene una orientación casi N-S y define localmente un graben que involucra a las localidades de Ixtapan de la Sal y Tonicato.

La configuración de los valores de la conductividad eléctrica determina que el flujo del agua subterránea es predominantemente hacia el centro del área de estudio, donde el Río Tenancingo (Río San Jerónimo) la bisecta de norte a sur, y por lo tanto drena los acuíferos en esa dirección.

Los bajos valores de la conductividad eléctrica y el bajo contenido del ion cloro en el agua de los acuíferos estudiados, demuestra que generalmente ésta es de reciente infiltración y procede directamente del agua de lluvia, asimismo, la reducida presencia del resto de los iones determinados confirman lo anterior.

Se determinó que la mayoría de las muestras de agua analizadas pertenecen a la familia bicarbonatada, a excepción del manantial de Ixtapan y del acuífero de Tonicato que son aguas cloruradas; se demuestra también que en el agua subterránea de la región se llevan a cabo tres procesos geoquímicos como son la disolución, la dilución y la mezcla.

Este último proceso sucede en la región de Ixtapan y Tonicato, auspiciado por las características litológicas del travertino que provoca la mezcla del agua clorurada-sódica del manantial con la bicarbonatada-cálcica del agua de lluvia.

El agua para consumo humano se considera de buena calidad en la mayor parte de la región, sin embargo, en las ciudades de Tonicato y Tenancingo se aprecia con incipiente contaminación orgánica por el contenido de nitratos, provocado por el uso de fertilizantes en el primer caso y en el segundo posiblemente por fugas en la red de drenaje y cuya materia orgánica es distribuida fácilmente debido a la permeabilidad excesiva del travertino. Además, el agua subterránea de Tonicato, así como la de Ixtapan tiene un exceso en contenido salino.

En general, el agua de la región es apta para ser usada en el riego, excepto la del área de Ixtapan y Tonicato por su elevado contenido salino, destacando la abundante presencia del ion sodio.

Se establece la teoría de un modelo geohidrológico para el manantial termal de Ixtapan de la Sal y que explica también su relativamente alto contenido de litio (16 ppm). En este modelo se considera que el aporte principal de agua procede de un flujo regional profundo asociado al sistema de fallas san Miguel de Allende-Taxco; el cuerpo emisor de la elevada temperatura del agua corresponde a un magma de tipo ácido debido al alto contenido en dicha agua de iones alcalinos como el K, Na y Li; la temperatura elevada del agua que se suscita a profundidad, provoca que por convección ascienda lentamente a la superficie a través de las fracturas relacionadas con el Graben de Ixtapan y, por lo tanto, que descienda su temperatura a 40 grados centígrados hasta llegar a la superficie.

El esquema propuesto apoya la teoría estructural de Campa y Ramírez (1979), en relación al cabalgamiento de las rocas metamórficas sobre las calizas del Mesozoico, debido a la abundancia de los iones calcio y bicarbonato en el agua termal.

I INTRODUCCION

El presente trabajo está basado en una parte del "Estudio de Prospección Geohidrológica de la zona de Malinalco-Tenancingo, Estado de México", que fue realizado en 1985 en el marco de un convenio de colaboración realizado entre la Facultad de Ingeniería de la UNAM y la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Durante el desarrollo del estudio, el autor de esta tesis participó como alumno de la asignatura de Geología de Campo Avanzada, realizando trabajos de campo y gabinete. Dentro de los límites del área de estudio referida, se escogió para la siguiente investigación la porción que abarcala poblaciones de Tenancingo de Degollado, Ixtapan de la Sal, Tonicato, Villa Guerrero y Zumpahuacán, entre otras.

En la primera parte de este trabajo de tesis se resumen los elementos principales que conforman el marco teórico de la ciencia de la Hidrogeoquímica. En el último capítulo, este marco de referencia es aplicado a la investigación realizada en el área de estudio y se determinan la caracterización hidrogeoquímica de los acuíferos de la zona estudiada, tratando todos sus parámetros posibles y la calidad del agua para riego y consumo humano; especial atención se presta en el estudio del manantial termal de Ixtapan de la Sal y se intenta definir el marco hidrogeológico de la región.

Finalmente, se espera que la aplicación del marco teórico de la hidrogeoquímica realizada en este trabajo sea de utilidad para los alumnos de la carrera de Ingeniero Geólogo y que esto motive entre ellos el estudio de este apartado de la hidrogeología.

I.1 GENERALIDADES

I.1.1 OBJETIVOS

1.- Exponer los principales elementos teóricos de la ciencia de la Hidrogeoquímica y su aplicación en estudios hidrogeológicos.

2.- Definir el esquema hidrogeológico de funcionamiento de los acuíferos de la zona estudiada, con apoyo en el análisis hidrogeoquímico.

3.- Establecer el modelo hidrogeológico de funcionamiento del manantial de Ixtapan de la Sal.

I.1.2 LOCALIZACION Y VIAS DE ACCESO

a) Localización.

La región de estudio se localiza en la porción sur del Estado de México, cubriendo un área de 611 kilómetros cuadrados. Se encuentra enclavada entre las latitudes 99 grados 35 minutos y 99 grados 32 minutos y las longitudes 19 grados 00 minutos y 18 grados 45 minutos, incluyendo a los municipios de Tenancingo de Degollado, Zumpahuacán, Villa Guerrero, Ixtapan de la Sal y Tonatico, todos pertenecientes al Estado de México (figura 1.1).

El límite norte del área corresponde a la parte sur de las faldas del volcán Nevado de Toluca; el límite sur está determinado por la delimitación estatal con el estado de Guerrero; el límite oriental es conformado por una serranía de calizas de la Formación Morelos en su parte sur y por otra de rocas ígneas extrusivas de la Formación Tepoztlán en su parte norte; a su vez, el extremo occidental está limitado por una mesa de rocas riolíticas donde se encuentra ubicada la población de Porfirio Díaz, municipio de Villa Guerrero.

b) Vías de Acceso.

A partir de la ciudad de México, la zona de estudio está comunicada por la autopista México-Toluca tomando la desviación en el Parque Nacional La Marquesa hacia Santiago Tianguistenco, hasta llegar al entronque con la carretera federal número 55 que corresponde a la carretera Toluca-Ixtapan de la Sal, de este punto hacia el sur se encuentra a 30 Km el límite norte del área estudiada en este trabajo.

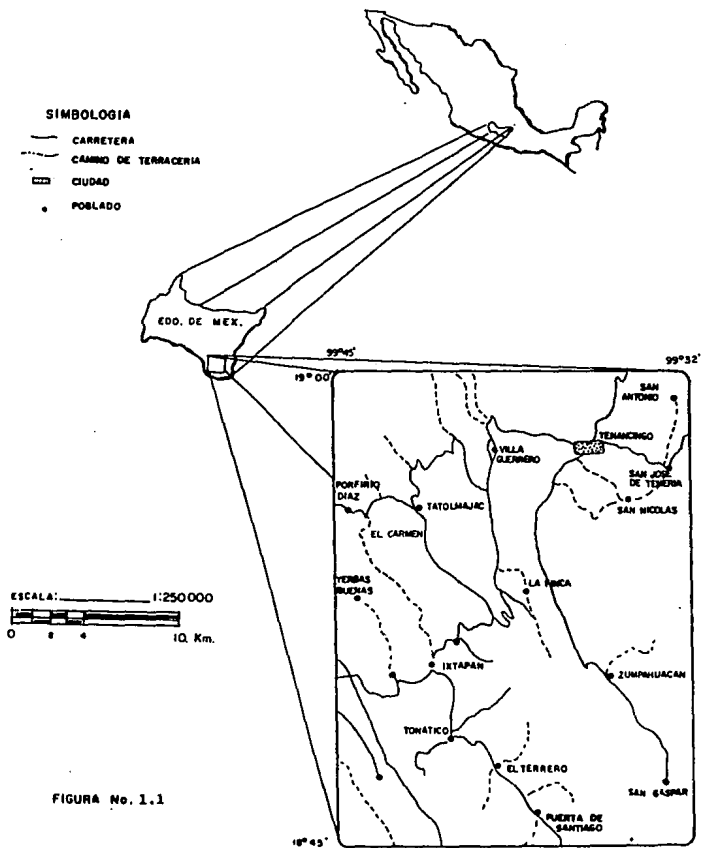
La distancia a Tenancingo desde la ciudad de México es de aproximadamente 92 Km y desde la ciudad de Toluca 65 Km.

I.2 DEFINICION DE HIDROGEOQUIMICA

La Hidrogeoquímica estudia los caracteres y el comportamiento de la composición química del agua subterránea, su dispersión y concentración y las relaciones que guarda con las rocas de la corteza terrestre (7).

La hidrogeoquímica del agua subterránea se utiliza junto con la Geología, Hidrogeología y Geofísica, para conocer y entender el funcionamiento de los acuíferos y la planeación de una mejor y más racional explotación.

LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO



La principal herramienta de la Hidrogeoquímica es la interpretación geoquímica del agua. El carácter químico del agua está estrechamente relacionado con las condiciones climatológicas, la geología regional y el funcionamiento hidrogeológico; por lo tanto, para realizar la interpretación geoquímica se debe tomar en cuenta que el agua que forma los acuíferos proviene principalmente de la lluvia, de la que una parte se infiltra iniciando su recorrido a través de las formaciones geológicas. Al circular por el subsuelo, el contacto con las rocas la hacen disolver las sales minerales que las forman, produciendo cambios en su composición química, ésta dependerá entonces de la solubilidad y composición de las rocas por las que circula el agua y de los factores que afecten la solubilidad, como son: las temperaturas del agua y las rocas, el tiempo y el área de contacto con las rocas, la velocidad de circulación, la distancia del recorrido, la previa composición química del agua y otros factores.

I.3 IMPORTANCIA DE LA HIDROGEOQUIMICA EN ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS

La importancia de la Hidrogeoquímica radica en que es una herramienta de especial interés para el estudio de la Hidrogeología, ya que con ayuda de la Geología, permiten definir el marco hidrogeológico de una región. Además, apoyándose en el conocimiento del marco hidrogeológico regional es posible planear la explotación racional de los acuíferos.

Como es sabido, la composición química del agua está en íntima relación con el funcionamiento general del acuífero. Para evaluar la composición química se efectúan en el laboratorio análisis químicos de muestras de agua obtenidas en pozos, norias, galerías filtrantes y manantiales en los que se determinan los sólidos totales disueltos, la dureza total y las concentraciones de los iones más importantes como son el Ca, Mg, Na, K, SO₄, Cl, HCO₃ y NO₃. Además de estos parámetros, se determinan otros en el campo obtenidos al momento de la toma de la muestra, estos son los siguientes: la conductividad eléctrica, la temperatura del agua, el pH, la alcalinidad y los aspectos físicos del agua como el color, olor y sabor.

Con los resultados de los análisis químicos y las determinaciones de campo se configuran los índices más representativos, deduciéndose a partir de estas configuraciones la ubicación de las zonas de recarga, las cuales suelen coincidir con los puntos de menor concentración de sales, la dirección de flujo del agua subterránea indicada por el enriquecimiento de sales en su composición conforme avanza, el tipo de roca que forma el acuífero mostrado por los iones más abundantes; así, el agua que circula a través de calizas tendrá en solución abundante calcio y carbonatos, en contraste con el agua que circula a través de basaltos, la cual tendrá abundancia en iones de Mg y Fe.

De gran importancia es la aplicación de la Hidrogeoquímica a lo largo de las líneas de costa donde existe el peligro latente de contaminación de los acuíferos por el agua de mar si no son explotados racionalmente. El contacto entre el agua dulce y el agua salada se encuentra en equilibrio y las modificaciones producidas en las condiciones naturales del acuífero originan cambios en la posición de dicho contacto, y debido a las diferencias de concentración y composición química entre los dos tipos de agua, la Hidrogeoquímica ayuda a conocer la posición y la velocidad de avance de la intrusión salina.

Para obtener la calidad del agua para sus diferentes usos -doméstico, riego e industrial- se comparan los resultados de los análisis químicos con los límites máximos permisibles ya establecidos; así, las aguas de uso doméstico se comparan con las tablas propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) principalmente; las de riego se clasifican de acuerdo con Wilcox, donde según las concentraciones de sodio, magnesio, calcio y la conductividad eléctrica, se conoce la calidad de agua para riego de cada muestra analizada, así como las recomendaciones del tipo de suelo en que debe usarse, las prácticas del control de la salinidad y los tipos de cultivo más adecuado; las aguas utilizadas para la industria, se clasifican inicialmente por su dureza para después cumplir requisitos establecidos dependiendo del tipo de industria.

Especial atención presta la Hidrogeoquímica al aspecto de la contaminación de las aguas subterráneas por los efectos de las actividades agrícolas, industriales y desechos urbanos principalmente.

II PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL AGUA

En este capítulo se tratarán las propiedades físicas y químicas del agua que inciden preponderantemente en un estudio hidrogeoquímico según diversos autores (5), (7) y (9).

II.1 LA MOLECULA DEL AGUA

El comportamiento de una sustancia depende de su estructura molecular principalmente, la cual es la base de sus propiedades físicas y químicas; así, las propiedades peculiares del agua están relacionadas con su especial estructura molecular.

El átomo de oxígeno con dos niveles u órbitas y seis electrones en ésta última es inestable porque tiene espacio para ocho; de igual forma, el átomo de hidrógeno con una sola órbita y un electrón en ella es inestable porque tiene cabida para dos. En estos dos casos, los átomos siguen el modelo atómico de Rutherford-Bohr, en el cual está incluida la distribución simétrica de los electrones en las órbitas. La expresión básica de este modelo es la siguiente (14):

$$2n^2 = e$$

donde:

n = número de orden de la órbita (el cual va del uno al seis).

e = número de electrones que deben existir en cada órbita.

El átomo de oxígeno se une a dos átomos de hidrógeno para llenar su última capa, al mismo tiempo que dos átomos de hidrógeno se unen a uno de oxígeno. De esta manera se origina una molécula de agua de enlace covalente, de gran estabilidad y forma irregular, pues los átomos de hidrógeno quedan a los lados del átomo de oxígeno en un ángulo de 104 grados 27 minutos (5) (figura 2.1).

Uno de los efectos de esta estructura deforme es el poder de solvente del agua debido a la desigual distribución de cargas eléctricas convirtiéndose en una estructura bipolar con la carga negativa del lado del oxígeno y la carga positiva del lado del hidrógeno, de tal forma que el oxígeno atraerá fuertemente a las cargas positivas de otras sustancias y los hidrógenos las negativas, principalmente cuando los átomos que forman las moléculas de dichas sustancias están unidos por enlace iónico, que se diferencia del enlace covalente en que éste se forma cuando

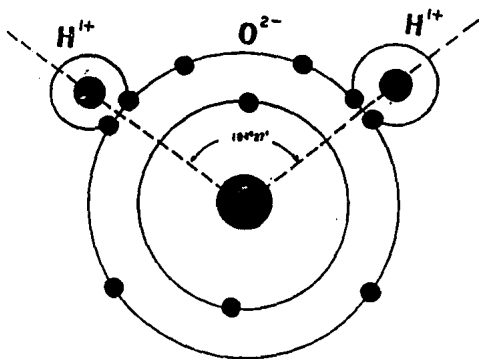


Figura 2.1 . Molécula de agua de enlace covalente, de gran estabilidad y forma irregular, donde los átomos de hidrógeno (H^{1+}) quedan a los lados del átomo de oxígeno (O^{2-}) en un ángulo de 104 grados 27 minutos.

los átomos se unen compartiendo uno o más electrones dando origen a una unión estable y fuerte, y aquel se forma por la atracción electrostática de los iones negativos y positivos, resultando un enlace bastante débil. Es así como los iones que antes formaban algún compuesto quedan disueltos en el agua; siendo esta la razón por la cual no existe agua pura en la naturaleza.

La unión firme entre moléculas de agua establecida por la distribución de las cargas eléctricas en sus lados opuestos recibe el nombre de enlace de hidrógeno (38). Este tipo de unión origina que dichas moléculas al estar sometidas a una temperatura de 4 grados centígrados establezcan un sistema de uniones que produce un cristal sólido de forma alargada pero vacío en su interior, y por lo tanto muy ligero de peso. Al seguir descendiendo la temperatura hasta llegar al punto de congelación (0 grados centígrados), las moléculas del agua están unidas con mayor firmeza, su densidad es cada vez menor y su estructura se ha dilatado. Esta es la razón por la cual el hielo flota y su volumen es aproximadamente 9% mayor que el agua líquida (38).

El enlace de hidrógeno (la unión de moléculas más fuerte que se conoce) también es la causa de otras particularidades del agua. Así, se tiene que su capacidad calórica (la cantidad de calor que necesita para entrar en ebullición); es enorme debido a las grandes cantidades de energía que se necesita para romper dicho enlace. De igual manera, el calor latente(*) es tan excesivo que supera al de la mayoría de los compuestos comunes, incluido el hierro.

Una característica más del agua, producto del comportamiento de sus moléculas, es la anomalía en su temperatura de ebullición y congelación. La mayoría de las sustancias estructuralmente similares con el agua hierven y se congelan a temperaturas conocidas que aumentan a medida que se incrementa el peso molecular, no así el agua, que por tener su peso molecular relativamente bajo e igual a 18, deberá congelarse a -100 grados centígrados y hervir a 91 grados centígrados (tabla 2.1); pero como se sabe, su temperatura de congelación es de 0 grados centígrados y la de ebullición de 100 grados centígrados al nivel del mar.

(*) Es la cantidad de calor que determina el cambio de estado de una sustancia sin una elevación simultánea de su temperatura (14).

De lo anterior, se observa que el agua es una sustancia anormal, tanto en su estructura como en su comportamiento, en relación con otras sustancias similares. De ahí su actitud en la naturaleza.

TABLA 2.1 AUMENTO DE LAS TEMPERATURAS DE EBULLICION Y CONGELACION DE LOS ELEMENTOS QUIMICOS DE ACUERDO A SU PESO MOLECULAR

SUSTANCIA	PESO MOLECULAR	t DE EBULLICION	t DE CONGELACION
H ₂ Te	129	-4 grados C	-46 grados C
H ₂ Se	80	-39 grados C	-61 grados C
H ₂ S	34	-51 grados C	-66 grados C
H ₂ O	18	-100 grados C	91 grados C

Tomado de (38)

donde:

t = Temperatura
C = Centígrados

NOTA: La MASA O PESO MOLECULAR es la suma de las masas o pesos atómicos de todos los átomos que forman una molécula del compuesto.

II.2 PROPIEDADES FISICAS

II.2.1 TEMPERATURA (t)

Una de las constantes físicas de gran importancia en el desarrollo de los diversos fenómenos que ocurren en el agua es la temperatura, que se define como el potencial calorífico referido a un cierto origen (7).

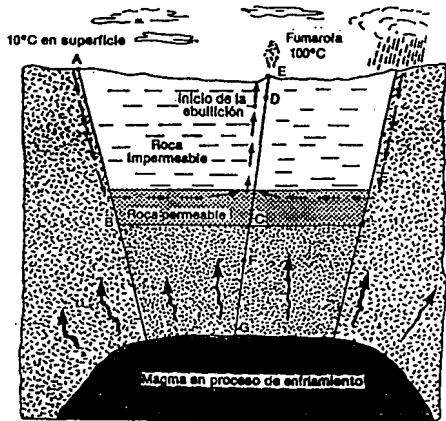
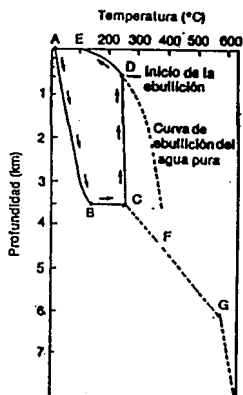
Esta constante determina la tendencia que tienen las propiedades del agua, bien sean físicas, químicas o biológicas, por ejemplo: la solubilidad de los gases, la concentración de los carbonatos y el desarrollo de organismos.

Las aguas subterráneas tienen una temperatura poco variable, más constante mientras mayor sea la profundidad del acuífero, y depende de los cambios de la temperatura atmosférica anual del lugar y se incrementa de acuerdo a la profundidad por el gradiente geotérmico (6).

En las áreas geotérmicas cuya presencia superficial se manifiesta en fuentes de agua en fase de vapor (géiser) o líquida (sistema hidrotermal), el estudio de la temperatura requiere especial atención. Generalmente, los sistemas hidrotermales se localizan en zonas de la corteza terrestre con fracturas recientes en relación con la tectónica de placas, principalmente en las dorsales o áreas de subducción y con frecuencia, aunque no siempre, van asociados a fenómenos volcánicos; en estas áreas el gradiente geotérmico es elevado (como se recordará, el gradiente geotérmico se define como la profundidad a que hay que desplazarse para que la temperatura media aumente un grado centígrado y su valor medio terrestre es de 33 m) (6).

El modelo de un sistema hidrotermal incluye el flujo convectivo descendente, producto de la percolación del agua superficial, bien sea del agua de lluvia o de río, necesario para mantener la cantidad de agua que al llegar a una determinada profundidad, en las cercanías del foco caliente o emisor de temperatura (cámara magmática localizada a profundidad en proceso de solidificación y enfriamiento) (25), recibe elevadas cantidades de calor, agua y vapores termales profundos, para después ascender a la superficie generalmente a través de fracturas.

Así, la temperatura de una fuente termal depende principalmente del grado de enfriamiento del cuerpo emisor y de la distancia a que se encuentra el flujo convectivo del agua descendente con respecto a él, así como de la naturaleza y estructura de las rocas por la que atraviesa el agua termal hacia la superficie; este último factor es muy importante, ya que una alta permeabilidad derivada de una gran fractura, falla o sistema de fracturas permiten que el fluido caliente ascienda con facilidad y por lo tanto con rapidez, de tal manera que su temperatura en superficie sea casi similar o tan sólo un poco más baja que la que adquiere a profundidad; por ejemplo, en el caso de un modelo de un sistema geotérmico cualquiera propuesto por McBirney (27) (figura 2.2), la fuente de calor corresponde a un magma estacionado a una profundidad de entre 6 y 7 Kms y su temperatura es de aproximadamente 600 grados centígrados (punto G). El calor de este magma se transmite por conducción hacia la roca impermeable que lo rodea (punto F) elevando su temperatura hasta 400 grados centígrados.



MODELO ESQUEMATICO DE UN SISTEMA GEOTERMICO.

TOMADO DE (27)

FIGURA No. 2.2

Al encontrar un paquete de rocas permeables, el agua fría que desciende desde la superficie a 10 grados centígrados (punto A) es calentada entonces por las rocas impermeables hasta temperaturas superiores a 200 grados centígrados (punto C), después de lo cual asciende con pérdidas mínimas de calor (punto D). En este momento empieza la ebullición del agua, que finalmente sale a la superficie en forma de vapor de agua a 100 grados centígrados (punto E), manifestándose como fumarola. Como se observa, el sistema geotérmico requiere de una capa superior de rocas impermeables o de muy baja permeabilidad con el fin de que el calor no se disipe más que a través de zonas puntuales, como la fumarola del punto E. Ahora bien, la existencia de un sistema geotérmico no va necesariamente acompañado de manifestaciones de vapor puesto que éstas requieren conductos rápidos ascensionales que no siempre existen, además de que son necesarias altas temperaturas y presiones.

Las clasificaciones que se han propuesto para las temperaturas del agua subterránea de fuentes y de manantiales son numerosas. En este trabajo se adoptará la clasificación de Schoeller (35) y es la siguiente:

Fuentes hipertermales: t mayor que $t_m + 4$ grados centígrados, o bien, t mayor que $t_s + 2$ grados centígrados.

Fuentes ortotermales: $t = t_m$ a $t_m + 4$ grados centígrados, o bien, t mayor que $t_s + 2$ grados centígrados.

Fuentes hipotermales: t menor que t_m , o bien, t menor que $t_s - 2$ grados centígrados.

donde:

t_m = temperatura media anual del aire
 t_s = temperatura solar
 t = temperatura del agua

Su determinación se efectúa con termómetro de mercurio o con el conductímetro portátil modelo PC18, marca Conductronic que incluye el electrodo para temperatura. Debe medirse en el campo lo antes posible al momento de la toma de la muestra para evitar enfriamiento o calentamientos.

II.2.2 CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (CE)

La conductividad eléctrica del agua queda formalmente definida como la conductancia que presenta el volumen de este líquido comprendido entre 1 cm² de superficie de dos electrodos separados por 1 cm de distancia (5); pero para uso práctico esta constante se define como la capacidad de un agua para conducir electricidad y su unidad de medida es el micromhos/cm (Mmhos/cm); la palabra mhos representa la lectura inversa de la palabra ohm que es la unidad de medida de la resistividad eléctrica de los cuerpos, concepto inverso al de la conductividad eléctrica (7).

La conductividad eléctrica es un parámetro indicativo de la salinidad del agua y es función de la temperatura, del tipo de iones presentes y de su concentración, aunque su determinación a temperatura constante aproxima aun más la estimación del contenido de sales (9). La temperatura de referencia suele ser 18 grados C ó 25 grados C y se cuantifica en el laboratorio (7). En el campo, la conductividad eléctrica se mide al momento del muestreo y a la temperatura ambiente del agua tomando en cuenta el crecimiento del 2% de la conductividad por cada grado centígrado que se incremente la temperatura (7).

En hidrogeoquímica la selección de la conductividad eléctrica como parámetro representativo de la calidad química y de la salinidad del agua se debe, además de lo anteriormente mencionado, a las siguientes consideraciones:

a) La simplicidad del método promueve menor incertidumbre en las mediciones resultantes.

b) Se determina en forma directa y depende únicamente de la salinidad contenida en el agua.

Según Custodio y Llamas (6), la conductividad eléctrica de las aguas dulces del subsuelo varía entre 100 y 2000 Mmhos/cm a 18 grados centígrados. Con respecto al límite máximo, el autor de esta tesis considera que es muy elevado, ya que en zonas cársticas costeras como las de la región de Cancún en el estado de Quintana Roo, donde está presente el fenómeno de intrusión marina, conductividades por arriba de 1600 Mmhos/cm se registran en aguas mezcladas con el agua de mar y por lo tanto sensiblemente saladas.

El aparato utilizado para realizar las mediciones en el campo con errores máximos del 5% es el conductímetro o resistímetro portátil.

II.2.3 COLOR, OLOR Y SABOR

El color, olor y sabor son características físicas de importancia exclusiva para el agua de consumo humano.

En general, las aguas son incoloras. Cuando poseen cierta coloración se debe a la presencia de las materias disueltas y suspendidas, de origen orgánico e inorgánico, como podría ser el caso de aquellas con tintes rojizos por el Fe, negros por el Mn, verdosas por las rocas calcáreas y tono amarillento debido a los ácidos húmicos (20). La determinación del color se realiza en el laboratorio utilizando la escala de unidades de platino-cobalto y conviene hacerlo lo más pronto posible después de la toma de la muestra, pues el color puede variar con el tiempo.

El olor y sabor del agua es una determinación organoléptica subjetiva íntimamente ligadas, aunque a veces las sustancias minerales disueltas pueden dar sabores al agua sin olor alguno, por ejemplo las sales de cobre, zinc, hierro, etc.

Con respecto al sabor, las aguas dependen en gran medida de su temperatura, ya que a más de 14 grados centígrados el sabor ya no es grato (20). De igual manera se tienen cantidades establecidas de iones disueltos, así, con más de 300 ppm de Cl tienen gusto salado, las que tienen más de 400 ó 500 ppm de SO_4 tienen gusto salado y amargo, las que tienen mucho CO_2 libre tienen gusto picante, etc.

Son muchas las fuentes de olores y sabores en el agua. Estas se pueden dividir en naturales o artificiales que a su vez son de origen orgánico o inorgánico.

II.3 PROPIEDADES QUÍMICAS

II.3.1 POTENCIAL DE HIDROGENO (pH)

El pH de una sustancia se refiere al logaritmo (base 10) del recíproco de la concentración de hidrógenos (H^+) (9), por ejemplo, si tenemos 10×10^{-6} moles por litro de H, el pH vale 6.

El origen del pH en el agua puede ser natural o artificial. Como causa natural se encuentra el anhídrido carbónico (CO_2), donde el pH depende de la relación de esta sustancia con el contenido total de minerales disueltos, el ácido sulfúrico (H_2SO_4), el ácido sulfhídrico (H_2S), el carbonato de calcio ($CaCO_3$) y otros menos comunes. Entre las causas artificiales se tiene principalmente la contaminación de desechos industriales.

El CaCO_3 y el CO_2 son estabilizadores del pH del agua, debido a que reaccionan entre sí formando el bicarbonato de calcio $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, produciendo un sistema tampón (*) (4), ésta es la razón por la que los valores más comunes del pH varían en un intervalo limitado, entre 6.5 y 8.0 (7).

Las determinaciones del pH deben hacerse in situ, debido a la influencia que ejerce el CO_2 . La solubilidad de esta sustancia depende de la presión y de la temperatura y por lo tanto, al entrar en contacto con la atmósfera se libera y disminuye el pH (7); o bien, el CO_2 de la atmósfera puede aumentar el pH de la muestra (5).

Según Davis y De Wiest (9) los valores de pH por arriba de 8.5 generalmente están asociados a aguas sódico-carbonato-bicarbonatadas. Los valores moderados de pH pertenecen a aguas bicarbonatadas. Los valores que están por abajo de 4.0 están asociadas con aguas que se encuentran en contacto con gases volcánicos que contienen ácido sulfhídrico, o bien con aguas que contienen ácidos derivados de sulfuros oxidantes como la piritita.

En el campo, el pH se determina por medio del conductímetro portátil, marca Conductronic modelo PC18, que incluye el electrodo para pH.

II.3.2 DUREZA DEL AGUA

La dureza es una propiedad importante a determinar para el uso del agua, principalmente en el ramo doméstico e industrial. Se debe a la presencia de cationes en solución, esencialmente Ca y Mg, con influencias también de Fe, Sr, Mn y Al, y mide la capacidad de un agua para consumir jabón o producir incrustación en calderas y tuberías.

Actualmente, para expresar el grado de dureza se indica únicamente la cantidad de calcio y magnesio presente en un agua en mg/l o ppm en términos de carbonato de calcio (5):

$$\text{Dureza Total (DT) (ppm CaCO}_3) = (\text{Ca ppm}/20 + \text{Mg ppm}/12) \times 50$$

(*) Las disoluciones cuyo pH tiende a mantenerse constante cuando se les añade pequeñas cantidades de ácido o álcali, se llaman disoluciones tampón o amortiguadores (14).

Aguas con menos de 50 ppm en CaCO_3 se llaman blandas, hasta 100 ligeramente duras, hasta 200 moderadamente duras y por encima de esta cantidad muy duras; aunque esta escala varía de lugar a lugar, ya que en zonas con rocas carbonatadas la dureza total es mayor que el límite máximo mencionado y no causa mayores perjuicios, tal es el caso de la zona costera oriental de la Península de Yucatán, cuya dureza del agua es en promedio de 300 ppm en CaCO_3 . Aunque para fines de uso sólo importa la evaluación del calcio y el magnesio para determinar la dureza (dureza total), se cree interesante mencionar las distintas clases que existen:

Dureza Total: Es la que da la totalidad de las sales de calcio y de magnesio disueltas en un agua, expresadas en carbonato de calcio (5).

Dureza Temporal: También llamada de carbonatos, es la que corresponde a la dureza que proporciona el bicarbonato de calcio y el de magnesio. Esta desaparece por ebullición, ya que al desprenderse el anhídrido carbónico que mantenía disueltos en forma de bicarbonatos a los carbonatos de calcio y de magnesio, transforma a aquellos en carbonatos solubles que precipitan, disminuyendo así la dureza (20).

Dureza Permanente: También llamada "de no carbonatos", es la que queda después de la ebullición y es debida a la presencia de sulfatos, cloruros y nitratos de calcio y de magnesio disueltos en el agua (5).

Catalán Lafuente (5), menciona que se debe tener mucho cuidado en el ablandamiento de las aguas, ya que se desconoce en gran medida la relación causa-efecto de la dureza del agua y de igual manera, destaca que el agua de consumo humano no es recomendable ablandarla porque desequilibra su contenido mineral natural.

La Secretaría de Salud (34.9), considera que la Dureza Total máxima permitida es de 300 ppm de CaCO_3

II.3.3 SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS

Los sólidos totales disueltos corresponden a la suma de elementos que el agua ha incorporado en solución en su trayectoria.

El agua de lluvia al precipitarse sobre la corteza terrestre arrastra una cierta cantidad de partículas que se encuentran suspendidas en la atmósfera además de incorporar gases como el bióxido de carbono. Por ello, el agua de lluvia presenta una cierta cantidad de sales disueltas, la cual se caracteriza por concentraciones bajas, entre las que predomina el calcio, sodio y los bicarbonatos. Al tener contacto con la superficie terrestre, el agua, que además posee ácido carbónico, disuelve las sales y minerales que constituyen a las rocas con las cuales tiene contacto, por lo que incrementa su contenido salino, éste será mayor conforme el agua circula por el subsuelo o permanece un mayor tiempo en contacto con las rocas. La cantidad y tipo de elementos disueltos dependerá de la composición y solubilidad de las rocas con las que tiene contacto (25).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera que la cuantía de sólidos totales disueltos (STD) en el agua, principalmente para el consumo humano, no debe exceder las 1500 ppm (28), y la Secretaría de Salud establece un límite máximo de 1000 ppm.

III GEOQUIMICA DEL AGUA

III.1 COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA

La composición química del agua subterránea está constituida principalmente por sustancias en estado iónico, entre las cuales destacan las llamadas fundamentales, esto es, las que en su conjunto representan casi la totalidad de los iones presentes. Las sustancias que complementan la composición química del agua se agrupan para su estudio en elementos menores y elementos traza; los primeros son llamados así porque se encuentran formando menos del 1% del contenido iónico total y los segundos son aquellos que aunque presentes, están por lo general en cantidades difícilmente medibles por medios químicos usuales. Entre los gases, se consideran como fundamentales al bióxido de carbono (CO₂) y al oxígeno disuelto (O₂), aunque para el caso de aguas subterráneas la determinación de estos no es importante (7).

Los tres grupos de iones mencionados están constituidos como se muestra en la tabla 3.1.

TABLA 3.1 CLASIFICACION IONICA

	CATIONES	ANIONES
Iones fundamentales	Sodio Na Calcio Ca Magnesio Mg	Cloruros Cl Sulfatos SO Bicarbonatos (HCO ₃)
Iones menores (más importantes, entre 0.01 - 10 ppm)	Potasio K Fierro Fe Amonio NH ₄ Estroncio Sr Litio Li Manganeso Mn	Nitratos NO ₃ Carbonatos CO Nitritos NO ₂ Flúor F Fósforo PO ₄
Iones traza (de mayor concentración, más de 0.0001 ppm)	Son los iones metálicos derivados del As, Pb, Cu, Zn, Ba, Hg, U, etc.	

Si las aguas subterráneas contienen como máximo 2000 ppm de sustancias disueltas se les llama dulces; si el contenido es de 2000 a 5000 ppm reciben el nombre de salobres; de 5000 hasta 40000 ppm saladas y mayor de esta cantidad salmueras. Estas últimas pueden estar asociadas a depósitos salinos, aguas de yacimientos petrolíferos, etc (7).

A continuación se describirán las propiedades geoquímicas de los iones que el autor considera de mayor importancia en la Hidrogeoquímica de un estudio hidrogeológico.

III.1.1 CATIONES

a) Ion Sodio.

Este ion es un constituyente fundamental de los minerales de las rocas. Su presencia en el agua subterránea se debe principalmente a la descomposición meteórica de los feldespatos, en especial las plagioclasas sódicas. También puede ser aportado, aunque en menor cantidad, por los minerales del grupo de las arcillas (montmorillonita, illita, caolinita, etc.) por medio del fenómeno químico llamado intercambio iónico (9 y 7) y por la concentración de agua de lluvia. Está ampliamente contenido en el agua de mar como cloruro sódico y como sulfato de sodio en cantidad aproximada a las 10000 ppm.

En las aguas dulces el contenido de sodio varía entre 1 y 150 ppm. Para el consumo doméstico es recomendable que el agua no contenga más de 20 ppm (5) y para la agricultura, el agua de riego con altas concentraciones es nocivo porque reduce la permeabilidad del suelo, principalmente si las concentraciones de calcio y magnesio son bajas (7).

b) Ion Calcio.

El calcio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre. Las aguas del subsuelo obtienen la mayor parte de su contenido de calcio de los minerales de las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias de origen marino como el apatito, la fluorita, wollastonita, calcita, dolomita, aragonito, yeso, algunos minerales del grupo de las plagioclasas, anfíboles y piroxenos. El agua de lluvia también es portadora de este elemento, principalmente en los terrenos que se encuentran alejados del agua marina, como se verá más adelante.

Su solubilidad depende en gran medida de la presencia del CO₂ en el agua. El contenido de este compuesto en el agua, debido a la aportación de la actividad ígnea, al metamorfismo de los carbonatos y a la diagénesis de los depósitos orgánicos, contribuye a incrementar el poder disolvente del agua frente al calcio.

La concentración de calcio en un agua subterránea dulce está entre los 10 y 250 ppm (7). Los efectos que producen estas concentraciones en la salud del hombre son nulos, por el contrario, juegan un papel importante como protector de iones tóxicos en los intestinos. En la industria, el calcio es indeseable en concentraciones muy altas porque va asociado al aporte de dureza y producción de incrustaciones (5) como ya se vio en el capítulo anterior.

c) Ion Magnesio.

El magnesio no existe libre en la naturaleza. Se le encuentra combinado con carbonatos, sulfatos, cloruros y silicatos en los minerales de las rocas sedimentarias (dolomita y calcita en menor cantidad), rocas ígneas (olivino, biotita, hornblenda y augita) y rocas metamórficas (serpentina, talco, dióxido y tremolita).

La solubilidad de las sustancias de magnesio está controlada, al igual que el calcio, por la presencia del CO₂, aunque existe en menor concentración que este elemento en las aguas naturales debido probablemente a la lenta solubilidad de la dolomita, así como a la mayor abundancia de calcio en la corteza terrestre (9). Sucede lo contrario en el agua de mar, el magnesio es más abundante que el calcio debido a la asimilación de este último por las plantas y animales que lo utilizan para formar sus partes duras.

Las concentraciones de magnesio en las aguas subterráneas en situaciones normales varían entre 1 y 150 ppm (7), siendo más frecuentes las que fluctúan entre 1 y 40 ppm. En ocasiones, el contenido de Ca y Mg son muy bajos; esto ocurre en aguas que sufren un proceso de ablandamiento natural originado por el fenómeno de intercambio iónico, como es el caso de las aguas que están en contacto con terrenos arcillosos, los cuales intercambian iones sodio por iones calcio y magnesio.

Por lo que concierne al uso del agua, para consumo humano debe tener menos de 125 ppm de Mg; por encima de esta cantidad actúa como laxante y diurético y adquiere un sabor amargo (5). En relación con la industria, el agua con altos contenidos de Mg produce, junto con el Ca, incrustaciones en tuberías y calderas.

d) Ion Potasio.

La descomposición meteórica de la ortoclasa, microclina, biotita, leucita y nefelinas es la fuente más común del potasio. Cuando las aguas subterráneas están en contacto con

depósitos de evaporitas, la disolución de la silvita es la principal aportadora de potasio.

A pesar de que la distribución del potasio en la corteza terrestre es similar a la del sodio, el potasio se encuentra en menor cantidad que el sodio en las aguas subterráneas, debido a que las arcillas en su formación tienden a fijar en su estructura al potasio ya que la mayor parte de los 60 minerales que contienen potasio (8) presentan una gran resistencia a la disolución, siendo este fenómeno contrario en los minerales de sodio (aproximadamente 140 según Dana y Ford, páginas 877 y 878).

Las concentraciones de potasio en las aguas dulces fluctúan entre 0.1 y 10 ppm (7).

e) Ion Hierro.

La presencia del hierro en el agua subterránea se debe a la descomposición meteórica de la hematita, magnetita, pirita, biotita, piroxenos, anfíboles y el granate. Estos minerales son la fuente principal de hierro en el agua.

La química del Fe es relativamente compleja, pues puede existir como Fe (+2) y Fe (+3). En las aguas subterráneas normalmente se tiene disuelto Fe en forma de bicarbonato ferroso $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ (5 y 7). A veces su origen no es natural, sino que proviene de la disolución de tuberías fabricadas con este metal.

Las concentraciones de Fe son reducidas y variables en las aguas subterráneas. Si estas contienen pequeñas cantidades de Fe adquieren un sabor astringente, pero esto no quiere decir que sean impropicias, excepto que contengan más de 0.5 ppm (7).

f) Ion Litio.

Los minerales que tienen abundante litio en su composición son la lepidolita y el espodumeno. Es un elemento muy soluble. Su concentración en el agua subterránea varía entre 0.001 y 1 ppm (5 y 7). En algunas aguas termales y geotérmicas, el contenido de este elemento varía de muy alto a excesivo; por ejemplo, el agua del manantial termal de Ixtapan de la Sal que se trata más adelante en este trabajo, tiene arriba de 15 ppm y algunos otros manantiales de este tipo en los Estados Unidos de Norteamérica alcanzan las 500 ppm (16); en el agua de mar, el litio ocurre en valores de 0.17 ppm (23).

Con respecto al origen del litio, White (40) estableció que las altas concentraciones de litio en aguas volcánicas saladas de tipo sódico-cloruradas, se explican por la presencia abundante de este elemento en magmas residuales y su subsecuente transporte como haluros solubles en una densa fase de vapor. Takamatsu et. al. (37) determinaron a partir de experimentos de disolución de minerales de litio en soluciones salinas, que algunas aguas de tipo sódico-cloruradas no volcánicas con alto contenido de litio, pueden ser derivadas de la interacción entre rocas y soluciones salinas tales como el agua de mar y no requieren una contribución de aguas magmáticas; así, Takamatsu, et. al. en estudios realizados en 1986, encontró litio en cantidades de hasta 62 ppm contenido en aguas de manantiales de baja temperatura (19 grados centígrados), dichas aguas son marinas fósiles confinadas en las zonas de fracturas de esquistos y que emigraron de rocas volcánicas por la deformación de la corteza. Custodio y Llamas (7) afirma que el litio cedido por suelos arcillosos es debido al fenómeno de cambio de bases.

Dibble et. al. (15) realizó experimentos sobre la interacción de rocas graníticas y agua a diversas temperaturas y presiones altas y mostraron que el litio puede ser removido de esas rocas y alcanzar concentraciones similares a las encontradas en aguas hidrotermales naturales. Los resultados de estos experimentos muestran que el litio es removido por el agua del polvo de roca a temperaturas de 275 grados centígrados y 500 bars de presión después de 5 días de interacción en proporciones de 1.3 ppm, en una relación roca/agua de 1:1; con estas condiciones de presión y temperatura, pero después de 6 meses y en una relación roca/agua de 1:5, la solución contenía 2.5 ppm. En otro experimento realizado a una temperatura de 70 grados centígrados y un bar de presión, con relaciones roca/agua de 1:1, la solución tuvo concentraciones de litio en 0.3 ppm después de 2 meses.

Estos experimentos muestran que el litio, según Dibble et.al. puede ser adquirido de una roca granítica cristalina en altas cantidades, con muy poca alteración hidrotermal. Este factor indica que elevadas cantidades de litio pueden estar contenidas en superficies intergranulares de rocas o en grietas de su estructura, quizás como remanentes de soluciones originales.

Así pues, el origen del litio en el agua en altas concentraciones es todavía discutido, pero depende principalmente de las características geológicas de la zona, de la composición de las rocas que rodean a la fuente de agua, así como de la interacción de estos dos componentes.

III.1.2 ANIONES

a) Ion Cloruro.

La sodalita, el apatito, las micas, hornblendas, el vidrio volcánico, los depósitos de evaporitas y el agua marina atrapada en el interior de los sedimentos son las principales fuentes de cloro contenido en las aguas subterráneas.

Cuantitativamente hablando, el cloro de las aguas subterráneas proviene del agua de lluvia que a su vez toma este elemento químico de la corteza terrestre a través de las emanaciones de vapor, constituyendo un ciclo que será explicado en el subcapítulo siguiente. El contenido en cloruros de la mayor parte de las aguas de lluvia en las proximidades costeras oscila entre 3 y 6 ppm. Estos valores disminuyen a medida que se avanza hacia el interior de los continentes. A una distancia de 150 Km de la costa, la concentración de cloro es de hasta 1.0 ppm y a distancias del orden de 800 Km las concentraciones fluctúan alrededor de 0.3 ppm.

Las concentraciones de cloro en el agua subterránea oscilan entre 10 y 250 ppm, siendo las más comunes entre 10 y 30 ppm. Estas cantidades son relativamente pequeñas si se compara con las de 19000 ppm que contiene el agua de mar.

Los efectos en la salud humana por las altas concentraciones de cloro son nulos, únicamente producen sabor salino al agua de bebida cuando éstas rebasan las 500 ppm. El interés de atender a los altos contenidos de cloro en las aguas subterráneas se debe a la posible contaminación por el efecto de aguas residuales o de aguas negras de origen humano o animal. Para el caso de aguas de riego, las aguas cloruradas atacan a determinados cultivos y a largo plazo inutilizan las tierras de cultivo. La presencia del cloro en las aguas naturales es estudiada ampliamente por Catalán L. (5), Davis y De Wiest (9), Custodio y Llamas (7) y Rafael Heras (20).

b) Ion Sulfato.

Los sulfatos provienen de la disolución del yeso, la anhidrita y de las arcillas orgánicas mediante la oxidación de la marcasita y de la pirita; sin embargo, el principal aportador de sulfatos del agua subterránea es el agua de lluvia.

Una de las causas más eficientes de la movilización del sulfato en el agua es la reducción de este ion por la acción de las bacterias (5 y 9), las cuales toman su oxígeno a partir de él. El producto que resulta de este proceso es la formación de sulfuro de hidrógeno (H₂S, gas cuya presencia en el agua se percibe por un olor a huevo podrido) y ácido sulfhídrico, sustancias tóxicas a pH ácidos y mucho menos nocivas a pH básicos.

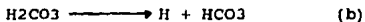
Las concentraciones del ion sulfato en las aguas subterráneas normales fluctúan entre 2 y 150 ppm (7), considerándose como potables a aquellas que contienen menos de 400 ppm (de acuerdo con la legislación de la Organización Mundial de la Salud, OMS) y 250 ppm según la Secretaría de Salud (34.a), y con efectos laxantes a las que tienen en disolución más de 750 ppm (5).

Con respecto a las obras públicas, las aguas que contienen más de 300 ppm (aguas selenitosas) son perjudiciales porque atacan al cemento (7).

La agricultura también puede ser afectada si el agua utilizada contiene gran cantidad de sulfatos.

c) Iones Bicarbonato y Carbonato.

La mayoría de los iones bicarbonato y carbonato de las aguas subterráneas provienen de las reacciones que el CO₂ procedente de la atmósfera, del suelo y de la disolución de las rocas carbonatadas tiene con el agua según las siguientes reacciones (5):



En el agua pura el CO₂ se disuelve permaneciendo en disolución, una parte en forma de gas y la otra con el agua para formar ácido carbónico H₂CO₃ (a), el cual, al disociarse como ácido débil que es, originan los iones bicarbonato HCO₃ (b) y carbonato CO₃ (c) a la vez que el pH se incrementa. Ahora bien, las reacciones anteriores son ideales ya que se supone que el agua es pura. En la naturaleza el bicarbonato y el carbonato se encuentran asociados a los cationes calcio, magnesio y sodio, que son los más frecuentes.

En la figura 3.1 se relaciona la existencia del H_2CO_3 , HCO_3 y CO_3 con el pH del agua, donde se observa que a un pH inferior a 4.3 no habrá en solución iones bicarbonato; a valores de pH en el intervalo de 5.5 a 8.5, rango que poseen la mayoría de las aguas subterráneas, el bicarbonato estará disuelto hasta constituirse en el total de iones presentes a un pH de 8.3. Por otro lado, los carbonatos aparecerán en el momento en que desaparezca el H_2CO_3 , es decir, por encima de un pH igual a 8.3.

Las aguas subterráneas generalmente contienen entre 10 y 800 ppm de bicarbonatos y las concentraciones más frecuentes oscilan entre 50 y 400 ppm (9); sin embargo, en zonas cársticas como en la Península de Yucatán, se alcanzan valores entre 1000 y 2000 ppm.

d) Ion Nitrato.

La mayor parte de este ion presente en las aguas subterráneas procede de la descomposición de materia orgánica o de elementos químicos de origen agrícola o industrial.

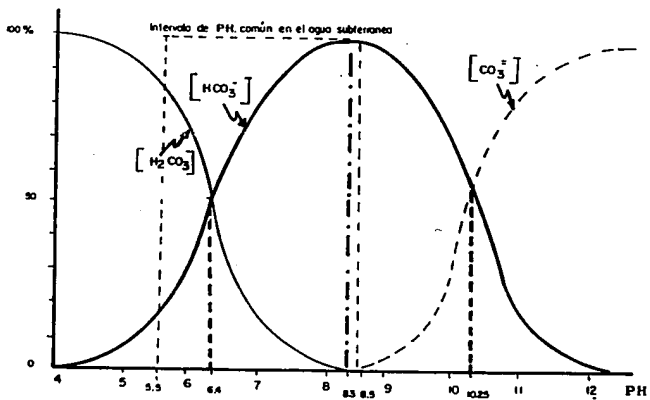
Cuando la materia orgánica se descompone por la acción bacteriana, las proteínas se transforman sucesivamente en aminoácidos, amoníaco (NH_3), nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3). Los nitratos son posteriormente lavados por el agua que se infiltra a través del suelo hasta alcanzar los mantos acuíferos.

En las aguas subterráneas la concentración de nitratos tiende a aumentar hoy en día como consecuencia del incremento del uso de fertilizantes en el suelo agrícola.

Las concentraciones comunes de nitratos en las aguas subterráneas oscilan entre 1 y 10 ppm (7).

En cantidades normales, como la que se mencionó anteriormente, los nitratos contenidos en el agua de bebida no son nocivos, por el contrario, le proporcionan un sabor agradable; sin embargo, en cantidades excesivas de nitratos en el agua de bebida, provocan en los niños, principalmente en los menores de seis meses de edad, la enfermedad llamada cianosis o niños azules debido a que en el aparato gástrico donde impera un ambiente reductor favorece la reducción del ion nitrato a nitrito (NO_2).

De acuerdo con la OMS, la cantidad máxima permitida en el agua para consumo humano debe ser de 45 ppm y la Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA, hoy Secretaría de Salud), establece el límite máximo permitido en 5 ppm.



RELACION DEL H_2CO_3 , HCO_3^- Y $CO_3^{=}$ CON EL PH DEL AGUA

NOTA: COMBINADA POR EL AUTOR DE ESTE TRABAJO, CON EL INTERVALO DE PH COMUNES EN EL AGUA SUBTERRANEA.

TOMADO DE [5]

FIGURA No. 3.1

III.2 CICLO GEOQUIMICO DEL AGUA

En forma similar al ciclo hidrológico se explicará el ciclo geoquímico del agua; se inicia con el agua de lluvia, la cual se infiltra (o escurre en el suelo como corrientes superficiales) y constituye el agua subterránea que será descargada en el océano o en el continente a través de obras naturales y artificiales como manantiales y pozos, para formar nuevamente agua de lluvia por medio de la evaporación.

En la tabla 3.2 se establecen las cantidades medias de los iones principales que a juicio de varios autores contiene el agua de lluvia, el agua subterránea normal y el agua de mar, y en forma ilustrada se hace hincapié en la figura 3.2.

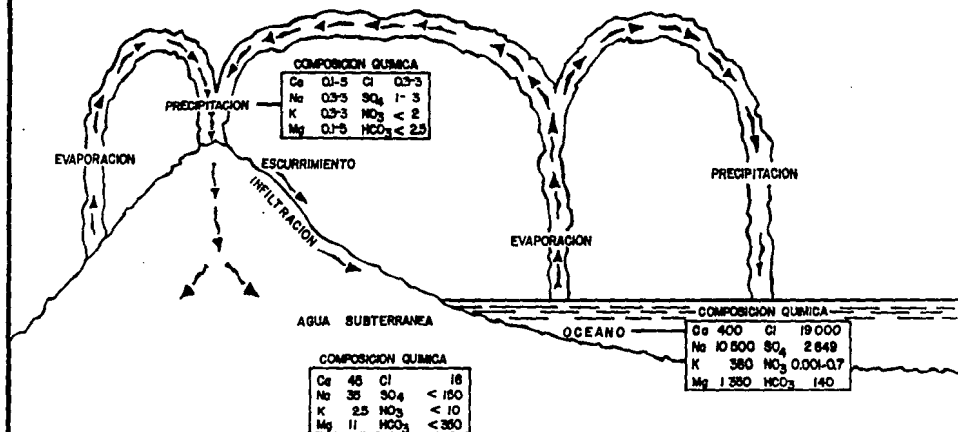
Asimismo, en la figura 3.3 se muestra la distribución de frecuencias de diversos elementos químicos contenidos en el agua subterránea considerada como potable.

TABLA 3.2 COMPOSICION PROMEDIO DE TRES TIPOS DE AGUA (ppm)

TIPO DE ION	AGUA DE LLUVIA	AGUA SUBTERRANEA NORMAL	AGUA DE MAR	OBSERVACIONES PARA EL AGUA DE LLUVIA
Ca	0.1 - 5	45	400	
Na	0.3 - 3	35	10500	Los valores son más elevados cerca de la costa.
K	0.3 - 3	2.5	380	Las cantidades son similares al Na.
Mg	0.1 - 5	11	1350	
Cl	0.3 - 3	16	19000	Cerca de la costa se pueden tener entre 10 y 40 ppm.
NO ₃	2	10	0.001-0.7	En áreas industriales los valores son mayores.
HCO ₃	25	350	140	
SO ₄	1 - 3	150	2649	Los valores son mayores en áreas industriales.
NH ₄	0.2-4	0.1	0.05-0.005	

Estos datos proceden de (7), (9), (20), (24) y (33).

CICLO HIDROLÓGICO Y COMPOSICIÓN MEDIA DEL AGUA DE LLUVIA, SUBTERRANEA Y DE MAR (PPM) †



† Los datos proceden de Custodio y Llamas, Davis y De Wiest, Lesser Illades y Ransome y Seham.

FIGURA No. 3.2

III.2.1 GEOQUIMICA DEL AGUA DE LLUVIA

Las sales que el agua de lluvia adquiere proceden en parte del agua de mar y se deben a la intensa evaporación que se suscita en el océano y en consecuencia, al transporte de una parte del vapor de agua por el viento hacia el interior del continente donde se precipita. Otra parte es de origen continental con contribuciones importantes, especialmente en zonas con mayor área de exposición acuosa, que facilita la evaporación como en los lagos y ríos o en áreas industriales donde directamente emanan hacia la atmósfera diferentes sustancias químicas.

El contenido en sólidos totales disueltos (STD) en el agua de lluvia varía entre 15 y 50 ppm (7) y (24) y su composición química difiere de acuerdo a la distancia de la costa. Cuando la precipitación ocurre cerca de la costa, los iones dominantes son el Cl, Na y K. Hacia el interior del continente domina la presencia del ion SO_4 y más lentamente el ion Ca o HCO_3 . La proporción de la presencia de este último ion depende de la disociación del H_2CO_3 ;

esta reacción es similar a la que se explicó en este capítulo. Con respecto al contenido de cloro, éste será mayor mientras más cerca esté la costa del área de precipitación; por ejemplo, en la zona costera de México se tienen contenidos de cloro aproximados de 25 ppm y en el D.F. de 0.5 ppm (7). Otros factores que determinan el aporte del ion cloro en el continente son la velocidad y dirección del viento y la topografía del terreno. En zonas industriales donde la atmósfera se contamina con emanaciones de desechos, el agua de lluvia puede adquirir gases tales como SH_2 , CO_2 , etc, proporcionándole acidez y por lo tanto agresividad. El pH en zonas sin contaminación industrial es en promedio de 5.7 (24).

III.2.2. GEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA

Quando el agua de lluvia alcanza el suelo, la parte que se infiltra lo hace lentamente a la vez que su composición química se va enriqueciendo. La composición química que el agua adquiere durante su infiltración hacia el acuífero y ya en él, en su movimiento local o regional, está influida por el clima, la superficie de contacto, la longitud del trayecto recorrido, la composición litológica por la que fluye, el tiempo de contacto con la roca, la temperatura y la presión a que está sometido, la geología del área y la geomorfología.

La formación de un suelo bien desarrollado (*), atravesado por el agua de infiltración en su viaje hacia el acuífero, depende de la naturaleza de la roca madre y el clima. En la parte más superficial de este suelo, formado por la acumulación de materia orgánica descompuesta, el agua ocupa los poros del terreno en forma total o parcial, disolviendo CO_2 y ácidos húmicos y adquiere así, un carácter ácido con suficiente capacidad para atacar los materiales del suelo en su parte más interna, tomando de ellos productos solubles y dejando un residuo insoluble. Si la materia orgánica existente consume una gran cantidad de oxígeno disuelto se puede llegar a producir un medio reductor que permite una serie de reacciones produciéndose la solubilización del hierro, la reducción del nitrato a NO_2 , NH_4 y N_2 , y otras modificaciones químicas que serán tratadas posteriormente.

En el caso de que el nivel freático esté cercano a la superficie, el agua subterránea contiene iones en cantidad mínima, sólo algo superior a la del agua de lluvia, un poco más bicarbonatada o algo más sódica según el tipo de roca.

Con respecto a las condiciones climáticas, si la lluvia es mayor que la evapotranspiración, el terreno aporta mayor cantidad de sales debido a su intenso lavado, en concentraciones que son mayores mientras menor sea la diferencia entre el agua de lluvia y el agua que se evapotranspira. En el caso contrario, cuando la evapotranspiración es mayor que la lluvia, la concentración de sales en el terreno procedentes de él mismo y de la lluvia es elevada y por lo tanto la poca cantidad de agua que alcanza el acuífero tendrá también altas concentraciones de sales (7).

(*) En las bibliografías de Geología Física se establece que un suelo bien desarrollado se distingue por:

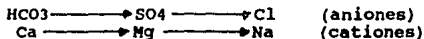
- a) Un horizonte A: compuesto por la acumulación de materia orgánica descompuesta.
- b) Un horizonte B: compuesto por la acumulación del ataque del material anterior.
- c) Un horizonte C: constituido por la roca madre disgregada y sin sufrir transporte.
- d) Un horizonte D: formado por la roca madre intacta.

La geología y la geomorfología condicionan la circulación del agua subterránea y la distribución del agua de recarga y descarga, produciendo sistemas de flujo locales y regionales (figura 3.3) que difieren en cuanto a recorrido y profundidad, y por lo tanto, en tiempo de permanencia del agua en el acuífero, dando como resultado variaciones en su composición química aún cuando circule por el mismo tipo de roca.

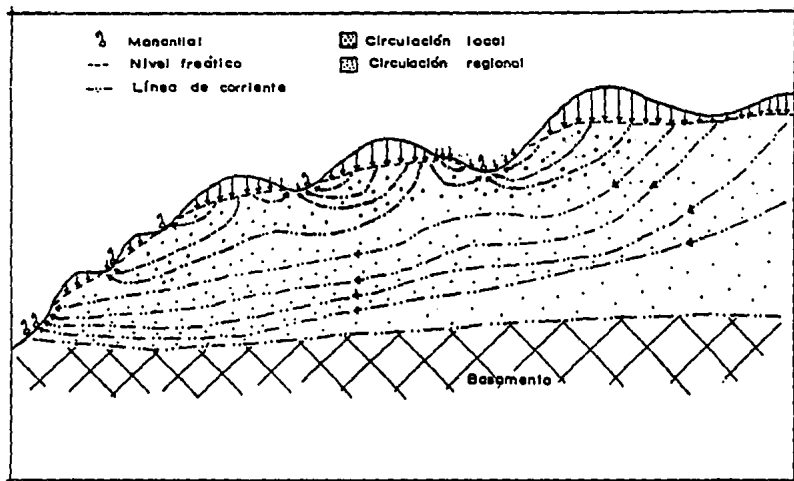
Cuando el agua de infiltración alcanza el acuífero, su salinidad dependerá principalmente de la distancia del recorrido (flujo local o regional), de las características permeables de la roca-acuífero y del tiempo de contacto con ella. En cuanto a los dos últimos parámetros, se tiene que mientras menor sea la permeabilidad de la roca por la que circula el agua, mayor será el tiempo de contacto y mayor será, también, la oportunidad de ésta de adquirir sales (figura 3.4).

En el caso del agua de circulación local, ésta tiene una interacción mínima con el terreno y mantiene la composición química adquirida durante la infiltración, excepto en zonas muy próximas a la superficie donde la evapotranspiración es un factor determinante para la concentración de sales, o que circule por terrenos que pueden aportar sales con gran facilidad, o bien, se mezcle con un agua más profunda.

Cuando el agua está incluida en el sistema de flujo de circulación regional, ésta tiende a ir enriqueciendo su configuración química hasta irse saturando en los diferentes iones ya que así, van dominando sucesivamente los siguientes (7):



Entre los aniones, el primero que satura es el HCO_3 y posteriormente el SO_4 , mientras que el Cl no llega a saturar normalmente elevando más su contenido en el agua cuanto mayor es el recorrido; esta es la razón por la cual al Cl se le utiliza como índice indicativo de la dirección de flujo (ver el siguiente capítulo). Entre los cationes primero satura el ion Ca , después el Mg y el Na no llega a saturar normalmente; a este último ion también se le utiliza como índice indicativo del flujo, pero con mayores limitaciones que el Cl .



Esquema de la circulación del agua en un conjunto de terrenos permeables recargados por la lluvia en los que se establece circulación local y circulación regional.
 TOMADO DE (7)

FIG.3.4

Esta regla supone que en el agua de infiltración dominan los iones HCO_3 y Ca. Esto puede no ser así y en este caso puede empezar la secuencia con los iones SO_4 y Mg o Cl y Na y volver posteriormente a la evolución normal. Además, no considera que si el medio es fuertemente reductor el SO_4 puede sufrir una reducción por la acción bacteriana, disminuyendo su presencia a sólo unas ppm; también no toma en cuenta que si al acuífero se aporta CO_2 , el contenido de HCO_3 y Ca puede aumentar inesperadamente.

De cualquier manera, al ir aumentando la concentración de sales (cualquiera que éstas sean), aumenta la fuerza iónica, incrementándose también las solubilidades y los iones que antes saturaban, su concentración es ligeramente mayor.

Con respecto a los parámetros temperatura y presión, estos tienen una gran influencia en la solubilización de las sales. Cuando la temperatura aumenta, todas las sales aumentan su solubilidad, excepto el CaCO_3 y el (Ca, Mg) CO_3 que les ocurre lo contrario; cuando la presión parcial de CO_2 aumenta, favorece la solubilidad de los carbonatos (5). En lo que concierne a la influencia de la litología en la adquisición de sales por el agua, ésta es limitada debido a que es ejercida principalmente por los factores que se han expuesto en esta sección.

Finalmente, se observa que para el estudio de la geoquímica del agua subterránea no puede establecerse un patrón, por el contrario, depende de muchos factores (algunos de ellos externos) para definirla tan sólo en una pequeña región. De cualquier manera, la geoquímica del agua subterránea, por muy local que ésta sea, es parte del ciclo geoquímico del agua el cual está supeditado también a un mayor número de factores.

III.2.3 GEOQUIMICA DEL AGUA DE MAR

El agua de mar es considerada en este trabajo como la fase final del ciclo geoquímico del agua.

El aporte de sales al agua de mar es a través de los flujos de agua subterránea que en él descargan y del agua superficial en forma de ríos, y la concentración depende de el grado de evaporación que en él se suscita y de los fenómenos químicos ocurridos en su interior.

La evaporación del agua de mar es un fenómeno determinante para el ciclo geoquímico del agua, porque aporta una parte de los iones que constituyen la fase inicial del ciclo: el agua de lluvia.

III.3 FENOMENOS MODIFICADORES DE LA COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA

La composición química de un agua cambia a lo largo de su recorrido por la corteza terrestre, desde que se infiltra hasta que surge nuevamente a la superficie, como consecuencia de la acción de fenómenos químicos. Estos fenómenos capaces de modificar la composición de un agua son (5), (7) y (9):

- Oxidación-Reducción.
- Cambio de bases.
- Concentraciones y precipitaciones.

III.3.1 OXIDACION-REDUCCION

Este fenómeno se realiza fundamentalmente en la zona de infiltración (zona de aereación). La oxidación ocurre cuando las condiciones del terreno permiten la coexistencia del agua y el aire, facilitando la disolución del oxígeno en el agua hasta llegar en ocasiones a la saturación. De esta forma, los sulfuros del terreno pueden oxidarse a ion SO_4 , aumentando considerablemente la concentración del mismo. De igual manera sucede con el ion NH_4 al ser oxidado a $NO_2(1-)$ y $NO_3(1)$. Para el caso del ion $Fe(2+)$, un medio oxidante lo hace precipitar con mucha facilidad, y en forma similar sucede para el ion $Mn(2+)$ aunque su abundancia es menor. La reducción se da cuando la presencia de abundante materia orgánica y las bacterias que la componen consumen parcial o totalmente el oxígeno disuelto en el agua. En consecuencia, sucede un fenómeno contrario a la oxidación; los iones $SO_4(1)$ y $NO_3(1-)$ pierden oxígeno reduciéndose a $S(2-)$, $S_2O_3(2-)$, $NO_2(1-)$, N_2 y $NH_4(1+)$ respectivamente. El $Fe(2+)$ y el $Mn(2+)$ son disueltos y pasan a formar parte de la configuración química del agua hasta que sean precipitados si ocurre un medio oxidante.

III.3.2 CAMBIO DE BASES

Este fenómeno también llamado intercambio iónico es uno de los que más influyen en la modificación química del agua, sobre todo en determinados iones como el $Na(1+)$ y el $K(1+)$, además del $Ca(2+)$, $H(1+)$, $Li(1+)$, $NH_4(1+)$ y $Sr(2+)$.

La explicación del fenómeno se hará con un ejemplo empleando la relación de los iones sodio y potasio.

Un agua con una relación rK/rNa (r se da en meq/l) alcanza el equilibrio con un terreno cuyas sales absorbidas tienen también una relación determinada rK/rNa . Si en el agua crece esa relación, es decir, que el contenido de potasio es mayor que el de sodio, el terreno se opone a la modificación cediendo iones sodio y tomando iones potasio.

En el caso específico del ion potasio, el terreno lo fija irreversiblemente; esta es la razón por la que este ion existe, en la mayoría de los casos, en menor proporción que el ion sodio.

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

Para evaluar el fenómeno de cambio de bases se utiliza la siguiente relación llamada índice de cambio de bases (icb):

$$icb = \frac{rCl - r(Na + K)}{rCl}; r \text{ en meq/l}$$

Esta relación no adquiere valores absolutos sino que se mide por una variación. Así, cuando hay cambio del sodio y del potasio del agua, por el calcio y el magnesio del terreno, el agua se va enriqueciendo en calcio y magnesio y el icb será positivo. Si el icb es negativo, implica que sucede lo contrario, el calcio y el magnesio son retenidos por el terreno a la vez que cede iones sodio al agua (como ya se mencionó el potasio es fijado irreversiblemente); pero cuando sucede este caso es más conveniente utilizar la relación del índice de desequilibrio (idd):

$$idd = \frac{rCl - r(Na + K)}{r(SO_4 + HCO_3 + NO_3)}$$

En ambos casos, cuando los valores de los índices están más próximos a cero indican que el intercambio iónico se verifica con menos intensidad.

En ocasiones esos índices no tienen aplicación porque ya existía en el agua una predominancia de los iones involucrados sin que haya habido cambio de bases, por ejemplo, en el agua de mar el contenido de Cl siempre es mayor que el de Na+K, o en el agua proveniente de rocas cristalinas como el granito donde la presencia del Na+K predomina sobre el Cl. Otra de las limitaciones en la evaluación de cambio de bases sucede cuando los iones SO₄ y HCO₃ empleados como denominador en el íd sufren fenómenos de reducción o de precipitación.

En general, el intercambio iónico o cambio de bases tiene lugar en un agua en contacto con materia orgánica o con minerales arcillosos, o sea, que puede suceder al inicio de la infiltración o en acuíferos con fracciones arcillosas.

III.3.3 CONCENTRACIONES Y PRECIPITACIONES

Las concentraciones tienen lugar cuando el agua, debido a su interacción con el terreno, se va enriqueciendo en determinadas sales hasta alcanzar su producto de solubilidad (*). El aumento de la concentración química del agua, obedece principalmente al incremento del tiempo de contacto con el terreno durante su recorrido y a su fuerza iónica, que se hace mayor al ir disolviendo más sales; por lo tanto, las concentraciones dependen también de las características físicas de la roca.

La concentración por evaporación, como se explicó anteriormente, ocurre sólo en acuíferos muy superficiales sobre los que actúa directamente la evapotranspiración o en ciertos acuíferos profundos influenciados por condiciones especiales como por ejemplo, aporte de gases calientes procedentes de emanaciones volcánicas, etc.

(*) Cuando una sustancia soluble está en contacto con el agua, se va disolviendo hasta un cierto valor límite; la concentración máxima alcanzable es el producto de solubilidad (14).

Durante el proceso de concentración se pueden producir precipitaciones conforme se van alcanzando los productos de solubilidad de las distintas sales disueltas; una de las primeras sales precipitadas por causa de este efecto es el CaCO_3 .

Otro proceso de precipitación es producido al romperse el equilibrio CO_2 , $\text{HCO}_3(1-)$ y $\text{Ca}(2+)$ por cambios de temperatura y de la tensión de CO_2 , es decir, al salir a la superficie aguas del tipo bicarbonatada cálcica (la clasificación de las familias de agua se verá en el siguiente capítulo), se puede precipitar CaCO_3 porque existe una disminución en la tensión de CO_2 (disminuye la presión) formando el travertino (21).

Pueden ocurrir otros procesos de precipitación como por ejemplo la mezcla de aguas de diferente composición o el enfriamiento de aguas termales o cambios de pH en aguas ricas en sílice.

III.4 CALIDAD DEL AGUA PARA SU USO

Como ya se ha mencionado, es imposible encontrar el agua como un líquido químicamente puro en la naturaleza; el tipo y cantidad de materia disuelta que contenga dependerá de la etapa en que se encuentre dentro del ciclo hidrológico y de las características propias del lugar.

La calidad del agua es un concepto relativo, el calificativo de buena o mala se dará en función del uso al que se le destine. Su composición y el conocimiento de los efectos que pueda causar cada uno de sus componentes, permitirá establecer su posible utilización. Así, las aguas subterráneas que son utilizadas para consumo humano, agrícola, ganadero o industrial, necesitan cumplir con ciertos requisitos respecto a su contenido de elementos químicos en solución, propiedades físicas y a la presencia de materia orgánica.

III.4.1 CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO

Se dice que un agua es potable cuando puede ser bebida por el hombre sin peligro alguno para su salud.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) en su International Standards for Drinking Water (28), adopta el criterio de dividir en cuatro grupos las características que afectan la calidad del agua, éstas son:

1.- Características físicas y químicas.

- Sustancias químicas que afectan la potabilidad del agua (tabla 3.3).
- Sustancias químicas que pueden afectar a la salud.
- Sustancias tóxicas (tabla 3.4).
- Indicadores químicos de contaminación.

2.- Características bacteriológicas.

3.- Características biológicas.

4.- Características radioactivas.

Para conocer la calidad de cierta agua destinada al consumo humano, se comparan los resultados de los análisis químicos con los límites que permiten las normas que hayamos adoptado como patrón.

Por los objetivos de este trabajo, sólo nos concretaremos a determinar la calidad del agua en función de las sustancias y elementos químicos principales que afectan a la potabilidad; dos casos especiales entre ellos son el potasio (K) y el sodio (Na), que no son incluidos en las normas internacionales y en las establecidas por cada país, debido a que se considera que estos elementos son desechados por el organismo, aunque en opinión del autor de esta tesis, sus límites de contenido en el agua deberán fijarse ya que existen personas cuyos organismos son afectados por el sodio si se ingiere en grandes cantidades; la excepción es la norma de la Comunidad Económica Europea (CEE), que limita el contenido del sodio a 175 ppm y el potasio a 12 ppm (5). El método que aquí utilizaremos para comparar el contenido químico con las normas establecidas consistirá en el uso del diagrama de Schoeller-Berkaloff (ver el apartado IV.4.3).

TABLA 3.3 CARACTERISTICAS QUIMICAS QUE AFECTAN LA POTABILIDAD DEL AGUA

CARACTERISTICAS QUIMICAS	O.M.S (1971)	SECRETARIA DE SALUD (1988)	
	CONCENTRACION MAXIMA ACEPTABLE (ppm)	CONCENTRACION MAXIMA PERMITIDA (ppm)	CONCENTRACION MAXIMA PERMITIDA (ppm)
pH #	7 a 8.5	6.5 a 9.2	----
Dureza Total (CaCO ₃)	----	----	300
S.T.D.	500	1500	1000
Sodio (Na) *	20	175	----
Potasio (K) *	10	12	----
Calcio (Ca)	75	200	----
Magnesio (Mg)	50	150	125
Fierro (Fe)	0.3	1	0.3
Sulfatos (SO ₄)	200	400	250
Cloruros (Cl)	200	600	250
Nitratos (NO ₃)	----	45	5

NOTAS:

Sus unidades son adimensionales.

* Los límites de estos elementos son incluidos en las normas de la Comunidad Económica Europea (CEE) (7).

@ Secretaría de Salud (SS) (34.a).

TABLA 3.4 SUSTANCIAS TOXICAS

SUSTANCIA	CONCENTRACION MAXIMA PERMISIBLE
Plomo	0.05
Arsénico	0.05
Selenio	0.01
Cromo	0.05
Cianuro	0.20
Cadmio	0.01
Bario	1.00
Plata	0.05

III.4.2 CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO

Para conocer la calidad del agua para riego, se ha optado por utilizar la clasificación de Wilcox (5), que evalúa la concentración total de sales solubles y la concentración relativa del sodio respecto al calcio y al magnesio. Estas dos características influyen en la permeabilidad del suelo.

Así, una agua con alta salinidad afecta notoriamente a los cultivos y la absorción de sodio por el suelo produce la dispersión de la fracción arcillosa, disminuyendo su permeabilidad y conduce a la formación de una costra superficial que influye negativamente en la germinación de las semillas y en la salida del tallo, además la toxicidad del sodio, que disminuye en presencia de calcio, se manifiesta por su concentración en las hojas debido a la evapotranspiración (5).

El uso del diagrama de la clasificación de Wilcox que evalúa la calidad del agua para su uso en el riego es tratado en el capítulo IV.

En la tabla 3.5 se enlistan algunos cultivos de acuerdo a su tolerancia a las sales.

III.5 CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

La contaminación del agua subterránea, bien puede ser considerada como un fenómeno no químico modificador de su composición química, con la diferencia de que no depende de la interacción terreno-agua sino, paradójicamente hasta nuestros días, de los avances tecnológicos e industriales que el hombre se procura.

La contaminación agrava aún más el problema de la escasez del agua subterránea, que tiende a hacer crítica la situación en todo el territorio del país.

Debido a las múltiples actividades del ser humano, los orígenes de la contaminación de los acuíferos también son variados, siendo los principales las labores agrícolas, las actividades industriales, las actividades mineras y las actividades domésticas (7).

La contaminación por las labores agrícolas es provocada por la salinidad que puede tener el agua de riego, por el uso excesivo de abonos y pesticidas y por el cultivo de ciertas plantas.

TABLA 3.5 TOLERANCIA RELATIVA DE DIFERENTES CULTIVOS A LAS SALES

MUY TOLERANTES	MEDIANAMENTE TOLERANTES	POCO TOLERANTES
FRUTALES		
Palma datilera	Granada Higuera Olivo Vid Melón	Peral Manzano Naranja Toronja Ciruela Almendro Chabacano Durazno Fresa Limonero Aguacate
HORTALIZAS		
Betabel Espárragos Espinacas	Jitomate Brócoli Col Coliflor Lechuga Papas Zanahoria Cebolla Chicharos Calabaza Pepinos	Rábano Apio Ejotes
CULTIVOS COMUNES		
Cebada Remolacha azucarera Algodón	Centeno (grano) Trigo (grano) Arroz Sorgo (grano) Girasol Higuerilla	Alubias

El agua de riego puede tener orígenes varios y ser diferente y más salina que el agua de lluvia local, por lo que el agua que alcanza el nivel freático, es el resultado de una concentración de sales del agua de riego más las que se añaden en procesos en el suelo. Si la zona de regadío utiliza el agua del acuífero subyacente, se tiene el siguiente ciclo:

Extracción - evaporación - concentración - infiltración - extracción, es decir, el agua se va concentrando en sales debido a su uso cíclico, con la dilución única del agua de lluvia formándose zonas con un agua de alta dureza y con elevados contenidos en nitratos, sulfatos y cloruros. La importancia de la contaminación por el agua de riego es mayor cuando se utiliza en zonas mal drenadas y con escasa recarga natural, y más cuando se utilizan aguas residuales, las cuales aportan desechos orgánicos y contaminantes biológicos.

Asimismo, el agua subterránea se contamina cuando se utilizan abonos y pesticidas en el cultivo de plantas agrícolas; los abonos pueden ser a base de estiércol produciendo una contaminación debido al aporte de nitratos, además de que se suscita un aumento en la agresividad del agua de infiltración por la liberación de CO₂ de la materia orgánica y con ello un aumento en el contenido de sales.

Los pesticidas (insecticidas, herbicidas, plaguicidas, etc.), son con frecuencia muy nocivos y pueden ser detectados en el agua subterránea aun después de varios años de haber sido aplicado al terreno; si la infiltración se realiza lentamente a través del terreno no saturado puede existir retención y una cierta degradación por la acción biológica, pero si llega directamente al acuífero (aunque también lentamente) a través de fracturas o por una excesiva permeabilidad, la eliminación de los pesticidas por la acción biológica es casi nula. Una vez en el acuífero, la movilidad de los pesticidas depende de su composición química y de su estructura acuífera; así algunos pesticidas como el DDT son retenidos por el terreno pero pueden ser cedidos de nuevo si se tienen condiciones favorables, o bien, aguas no contaminadas por pesticidas pueden resultarlas en el futuro aunque se suspenda su utilización ya que se transporta los empleados en el pasado.

La contaminación por el cultivo de ciertas plantas, por ejemplo de legumbres, se debe al aporte de grandes cantidades de nitratos en el terreno, que posteriormente pasan al acuífero como tales si en el suelo se tiene baja actividad biológica, o en su forma reducida (N_2 , NO_2 o NH_4) si se tiene un medio reductor apropiado.

Las actividades industriales producen contaminaciones variadas según el tipo de industria que los origina. Así, la industria metalmeccánica puede contaminar con metales pesados y grasas y la industria química y petroquímica con sustancias orgánicas e inorgánicas. De igual manera, las actividades mineras contaminan con las evacuaciones de aguas de minas y con lavaderos de mineral principalmente los que contienen materiales oxidables como sulfuros y materia carbonosa.

La contaminación por las labores domésticas es esencialmente orgánica y biológica producida por el contenido de fosas sépticas y pozos negros, fugas de sistemas de alcantarillado, acumulaciones de basura que son lavadas por el agua de lluvia, etc, además de la utilización de productos químicos de uso doméstico, tales como los detergentes.

IV. REPRESENTACION GRAFICA DE LOS ANALISIS QUIMICOS DEL AGUA SUBTERRANEA

En este capítulo se tratan las herramientas, que a juicio del autor, se consideran esenciales en un estudio hidrogeoquímico. Estas consisten en la construcción de gráficas y mapas, utilizando los elementos que arrojan como resultado los análisis químicos de las muestras de agua de los acuíferos.

Los índices hidrogeoquímicos, como primer herramienta, basados en la relación entre iones, permiten construir configuraciones que delatan una serie de caracteres de interés hidrogeoquímico e hidrogeológico. Así también, los diagramas de Collins, Stiff, Schoeler-Berkaloff y Piper, son útiles para construir las gráficas que caracterizan hidrogeoquímicamente el agua de los acuíferos.

Cabe hacer notar que a pesar de la antigüedad de los postulados de Collins (1923), Stiff (1951), Schoeler (1938) y Piper (1944), sus diagramas hidrogeoquímicos han sido los de mayor utilidad hasta la actualidad.

IV.1 TECNICA DE MUESTREO DEL AGUA SUBTERRANEA

Como ya se mencionó, el contenido químico del agua se conoce a través de los análisis que se practican a un pequeño volumen de agua que representa al total de donde fue tomada. A este volumen se le llama muestra.

Las muestras de agua pueden tener por objeto el estudio de un acuífero o zona, el control de las variaciones temporales en su composición, la definición de ciertas características locales con vistas a su uso, o en general cualquier estudio hidrogeoquímico; de ahí la importancia de que el muestreo se realice con sumo cuidado, ya que de ello depende el grado de veracidad de los resultados que arroje el laboratorio para hacerlos extensivos a la fuente que representan. Esto implica también el cuidado en el manejo de las muestras hasta que lleguen al laboratorio.

Otro factor importante en el muestreo, es la selección de las fuentes donde se deben tomar las muestras tomando en consideración su distribución espacial, que dependerá de las circunstancias y del tipo de aprovechamiento, ya sea pozo, noria, manantial, galería, etc; por ejemplo, en ocasiones basta con una muestra cada 10 km² y en ocasiones una muestra cada 1 km² puede ser insuficiente (7).

Los principales factores a considerar en un programa de muestreo de agua para análisis químico, exceptuando limitaciones de carácter administrativo, son las siguientes:

- 1) Tipo, importancia y calidad requerida del estudio.
- 2) Complejidad hidrogeológica del área.
- 3) Extensión superficial del área.
- 4) Zonas en las cuales se conoce la existencia de agua de mala calidad o contaminada o en las que se considera probable que así ocurra (zonas industriales y distritos de riego entre otras).
- 5) Número, tipo y distribución de obras de captación de agua.

Con respecto a cada muestra individual es necesario cuidar los siguientes aspectos (7):

a) El recipiente donde se colectará la muestra, deberá ser de vidrio o polietileno, éste último es de uso más común, aunque depende del elemento que se investiga, por ejemplo, para grasas y aceites se pide que sea de vidrio.

b) El volumen de la muestra deberá ser suficiente para un análisis químico completo, entre 1 y 2 litros.

c) El frasco deberá enjuagarse con agua de la fuente a muestrear dos o tres veces antes de proceder al muestreo.

d) La botella deberá llenarse completamente para evitar los escapes de gases que pueden alterar la composición química de la muestra.

e) Cuando la fuente a muestrear sea un pozo de bombeo equipado, es necesario que transcurra cierto tiempo entre el inicio del bombeo y la toma de la muestra.

f) Deben de tomarse en el campo las medidas correspondientes al pH, temperatura y conductividad eléctrica del agua.

g) Las fuentes de muestreo deberán enumerarse en el campo y localizarse en el plano.

h) A cada muestra deberá adherirse una etiqueta en las que será preciso indicar:

- Nombre del lugar.
- Localización exacta.
- Medidas de la temperatura, pH y conductividad de agua.
- Profundidad del nivel del agua (nivel estático).
- Fecha de muestreo y si es necesario la hora.

Asimismo, es recomendable anotar estos mismos datos en hojas previamente elaboradas, en donde se reserve un espacio de observaciones para incluir todas aquéllas notas que ayuden en la interpretación de los análisis.

IV.2 ANALISIS QUIMICO DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, la composición química del agua se expresa en aniones. Así, a un análisis químico se le puede considerar completo cuando contiene la determinación de los aniones bicarbonato, cloro, sulfato, nitrato y de los cationes sodio, potasio, calcio y magnesio; en algunos casos se determinan el fierro, el carbonato, el sílice, el contenido de materia orgánica y algunos iones menores como el litio, el amonio, etc. Este análisis también debe contener las determinaciones de la conductividad eléctrica, el pH y la dureza.

En general, la determinación iónica y de parámetros físicos y químicos del agua en un análisis químico depende del tipo de estudio a realizar.

En un análisis químico, la concentración de los diferentes iones y sustancias disueltas pueden expresarse en distintas formas; las más comunes son las partes por millón (ppm), el miligramo por litro (mg/l) y el miliequivalente por litro (meq/l).

La parte por millón es una expresión de peso y es la forma más usual; se puede traducir como un gramo en un millón de gramos, es decir, un mg/kg o un g/Ton.

El mg/l es en términos generales, equivalente a la ppm; si la concentración total de sales es menor de 5000 ppm la densidad del agua es aproximadamente de 1 y entonces, 1 ppm es igual a 1 mg/l; pero para concentraciones mayores la densidad del agua es mayor a 1 y la ppm es algo menor al mg/l, aunque la diferencia es muy pequeña se consideran medidas equivalentes.

El meq/l es una expresión química donde se sustituye el peso de la sustancia por el número de equivalentes. Así, si se quiere convertir una expresión en peso a meq/l se aplican las siguientes igualdades:

$$\text{Número de equivalentes (meq/l)} = \frac{\text{Peso de la sust (ppm o mg/l)}}{\text{Peso equivalente}}$$

$$\text{Peso equivalente} = \frac{\text{Peso molecular (peso atómico del ion) (*)}}{\text{Valencia del ion}}$$

Si se desea convertir ppm en meq/l únicamente se realiza la operación contraria:

$$\text{Peso de la sust (ppm)} = (\text{Num. de equiv.}) \times (\text{Peso equiv.})$$

Ahora bien, estas operaciones pueden ser sustituidas por tablas de conversión de unidades de expresiones químicas (tabla 4.1). También existe el Diagrama de Schoeller-Berkaloff, donde se incluye una escala de conversión de ppm a meq/l y viceversa, éste se describirá más adelante.

(*) Recordemos que el peso atómico de un elemento químico está definido como la suma de protones más neutrones que existen en un núcleo y que el concepto de peso molecular está referido a un compuesto e indica la suma de los pesos atómicos de los elementos que lo forman (12).

TABLA 4.1 FACTOR DE CONVERSION DE LOS PRINCIPALES IONES

IONES	Y
Sodio (Na ⁺)	0.04350
Potasio (K ⁺)	0.02557
Calcio (Ca ⁺²)	0.04990
Magnesio (Mg ⁺²)	0.08226
Fierro (Fe ⁺²)	0.05372
Litio (Li ⁺)	0.14411
Manganeso (Mn ⁺²)	0.03640
Estroncio (Sr ⁺²)	0.02283
Zinc (Zn ⁺²)	0.03060
Cloruro (Cl ⁻)	0.02821
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	0.01639
Sulfato (SO ₄ ⁻²)	0.02082
Nitrato (NO ₃ ⁻)	0.01613
Carbonato (CO ₃ ⁻²)	0.03333
Fluoruro (F ⁻)	0.05264
Nitrito (NO ₂ ⁻)	0.02174

NOTAS:

Miligramos por litro (mg/l) o ppm a miliequivalentes por litro (meq/l), multiplicar por Y.

Miliequivalentes por litro (meq/l) a miligramos por litro (mg/l), dividir entre Y (5).

Por otro lado, para que un análisis químico tenga un alto grado de confiabilidad debe cumplirse que:

Suma de meq/l de cationes = Suma de meq/l de aniones

En la práctica, esta igualdad no se cumple pues siempre existe una diferencia entre ambas cifras debido a los errores acumulados de cada una de las determinaciones de iones y a la influencia de los iones menores que no se determinan. Una diferencia muy notoria puede ser debida a la existencia de cantidades elevadas de iones menores o a un grave error de análisis. Así pues, el error de un análisis químico se determina mediante la siguiente expresión (7):

$$\text{Error (\%)} = 200 \frac{\text{Suma de cationes} - \text{Suma de aniones}}{\text{Suma de cationes} + \text{Suma de aniones}}$$

El error así obtenido será admisible si cumple la siguiente relación con la concentración química (7):

Conductividad eléctrica (Mmhos/cm)	Error admisible
50	30 %
200	10
500	8
2000	4
Mayor 2000	4

IV.3 INDICES HIDROGEOQUIMICOS

Las relaciones aritméticas entre los iones disueltos en un agua se les llama índices hidrogeoquímicos y guardan cierta relación con las rocas por donde fluye el agua, o indican la acción de los fenómenos modificadores, o expresan alguna característica específica del agua considerada. Los valores de los índices hidrogeoquímicos (r) se dan en meq/l.

Se han establecido muchos índices hidrogeoquímicos que se utilizan según los objetivos del estudio; los más utilizados son los siguientes (7):

IV.3.1 RELACION r_{Cl}/r_{HCO_3}

Esta relación sirve para determinar el sentido del flujo subterráneo según el incremento de su valor, es decir, de acuerdo al aumento de concentración de cloro puede describirse el sentido del movimiento del agua subterránea. También es de utilidad en la caracterización de la intrusión marina, ya que en aguas continentales la relación adquiere valores entre 0.1 y 5.0, mientras que en el agua de mar fluctúa entre 20 y 50.

No conviene utilizarla si existe aporte de CO_2 , porque puede aumentar el contenido de HCO_3 y por lo tanto disminuye el valor de la relación.

En muchos casos, para la configuración del sentido del flujo subterráneo se utiliza únicamente el ion cloro de acuerdo al incremento de su valor, pues como ya se mencionó en el Capítulo II, a este ion se le considera un trazador natural.

IV.3.2 RELACION rSO_4/rCl

Es de utilidad similar a la relación anterior si el contenido del ion SO_4 tiende a hacerse constante. No es útil cuando existe el fenómeno de reducción de sulfatos y en este caso la relación puede servir para determinar dicho fenómeno.

IV.3.3 RELACION rMg/rCa

Esta relación es indicativa del tipo de roca por la que atraviesa el agua. En las aguas continentales su valor varía entre 0.3 y 1.5; los valores próximos a 1 indican el contacto del agua con terrenos dolomíticos y los valores superiores a 1 indican la relación con rocas ricas en silicatos magnésicos como los gabros y basaltos. Así también, esta relación indica la circulación del agua por terrenos de formación marina cuando adquiere valores elevados que pueden llegar hasta alrededor de 5, que es el valor de la relación en el agua de mar.

La elevación de los valores de esta relación y de la $rCl/rHCO_3$ en las zonas costeras pueden indicar una intrusión marina.

Esta relación no es de utilidad cuando existen fenómenos de precipitación de carbonatos o de disolución de calizas porque aumenta o disminuye su valor confundiendo la información requerida. De igual manera sucede con los fenómenos de intercambio iónico que producen ablandamiento del agua, donde el calcio es mayormente fijado por el terreno que el magnesio.

IV.3.4 INDICE DE CAMBIO DE BASES (icb) E INDICE DE DESEQUILIBRIO (idd)

Ver la sección III.3.

IV.3.5 RELACIONES rNa/rCa , $rNa/r(Ca+Mg)$, rCa/rCl , rMg/rCl , $r(Ca+Mg)/rCl$, $r(Na+K)/rCl$ y rSr/rCa

Generalmente el único interés en el uso de estas relaciones es para seguir los posibles procesos de cambios de bases, con el inconveniente de que las precipitaciones o disoluciones de Ca alteran las relaciones sin producirse ningún cambio de bases.

IV.3.6 RELACION $rK = \sqrt[3]{(rCa)(rHCO_3) \exp. 2}$

El valor rK tiende a ser un valor constante. En zonas de regadío o contaminadas el K crece y se convierte en indicador siempre que no existan fenómenos de reducción de sulfatos y aportes o desprendimientos de CO_2 .

IV.3.7 RELACION $\sqrt{rSO_4(rCa)}$

El único interés de obtener el valor de esta relación es para verificar la disolución o precipitación de yeso.

IV.4 DIAGRAMAS PARA REPRESENTAR LOS ANALISIS QUIMICOS DEL AGUA SUBTERRANEA

IV.4.1 DIAGRAMA DE COLLINS (DIAGRAMA COLUMNAR)

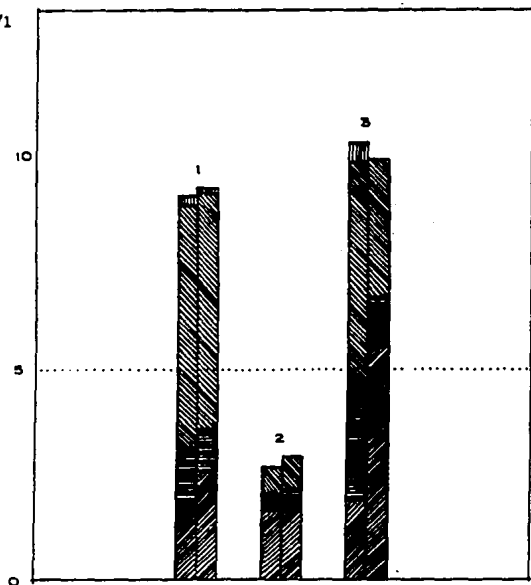
Consiste de dos columnas, una junto a la otra, en donde se representan a partir de una base común los aniones y los cationes en el orden HCO_3 , SO_4 , Cl , NO_3 , Ca , Mg , Na y K respectivamente en meq/l (figura 4.1).

Esta gráfica permite caracterizar los análisis químicos de agua en base a los iones dominantes y comparar de manera sencilla un análisis con otro. Sus ventajas de uso según Collins (6), es el orden de arreglo de los iones dispuestos de acuerdo a su solubilidad y la fácil comparación de las columnas, por el diferente rayado de líneas o diferente color en que se denota cada ion. Su desventaja es de que en la teoría las alturas de las columnas deben ser iguales, es decir, la suma en meq/l de cationes es igual a la suma de aniones, pero en la práctica esas alturas difieren debido al error de análisis y a la omisión de elementos menores, por lo que puede provocar equivocaciones en las comparaciones.

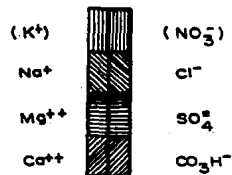
IV.4.2 DIAGRAMA DE STIFF

Consiste en el trazo de cuatro líneas horizontales y paralelas cortadas en partes iguales por otra perpendicular a ellas, la cual tiene la función de ser el origen o cero; hacia la izquierda de esta recta y sobre cada una de las líneas se establecen los cationes K , Na , Mg y Ca de arriba hacia abajo, de la misma forma, a la derecha de la recta origen están los aniones NO_3 , Cl , SO_4 y HCO_3 . Sobre cada recta se toma una escala proporcional a los meq/l (figura 4.2). Así, al representar un análisis se obtienen una serie de puntos que indican las cantidades en cationes y aniones que al unirse forman una figura geométrica, la forma resultante es más o menos característica de cada clase de agua.

meq/l



LEYENDA



1.- AGUA CLORURADA SODICA.

2.- AGUA BICARBONATADA CALCICA.

3.- AGUA BICARBONATADA SODICA.

DIAGRAMAS COLUMNARES DE COLLINS.

FIG.4.1

DIAGRAMAS DE STIFF

% MILIEQUIVALENTES

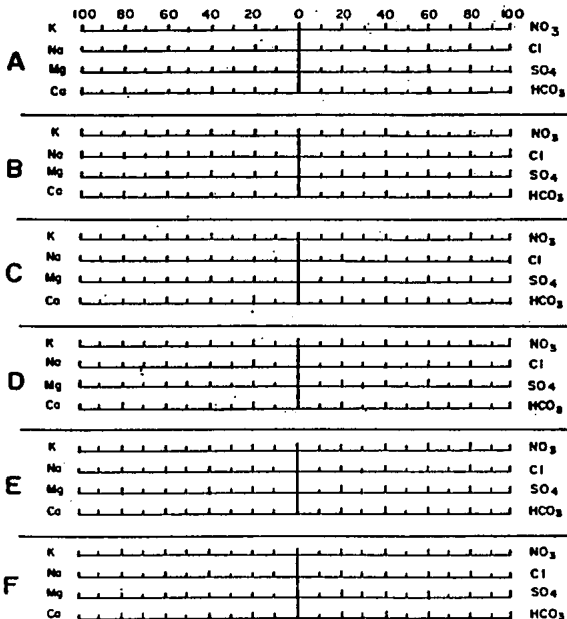


DIAGRAMA	NO. DE OBRA
A	
B	
C	
D	
E	
F	

OBSERVACIONES

FIGURA No. 4.2

La utilidad de este diagrama es que se pueden comparar las figuras geométricas de los análisis químicos y establecer así, diferencias entre los tipos de agua en estudio (7 y 36).

IV.4.3 DIAGRAMA SEMILOGARITMICO (SCHOELLER-BERKALOFF)

Este diagrama permite obtener para cada análisis de agua una facies o familia característica y comparar directamente varias aguas entre sí, así también es posible determinar gráficamente la calidad de un agua para el consumo humano.

El diagrama semilogarítmico se compone de escalas colocadas verticalmente con el orden Ca, Mg, dureza total (en términos de CaCO_3), Na, K, Cl, SO_4 , HCO_3 , CO_3 , pH y NO_3 . Todas las escalas, excepto la del pH, tienen una graduación logarítmica y los iones se expresan en ppm o mg/l; la escala del pH es aritmética y se representa con sus unidades adimensionales (figura 4.3). Existe otra escala logarítmica en ambos extremos del diagrama que representan las concentraciones en meq/l, ubicadas de tal manera que se pueden realizar las conversiones de ppm a meq/l o viceversa con sólo trazar una línea horizontal que parta de esta escala a cualquier otra de los iones establecidos. Así, se observa que una particularidad de este tipo de diagramas consiste en que cada escala tiene cierto desnivel vertical con respecto a las otras, de tal forma, que los respectivos valores en ppm o mg/l para cada escala corresponden a los valores (11):

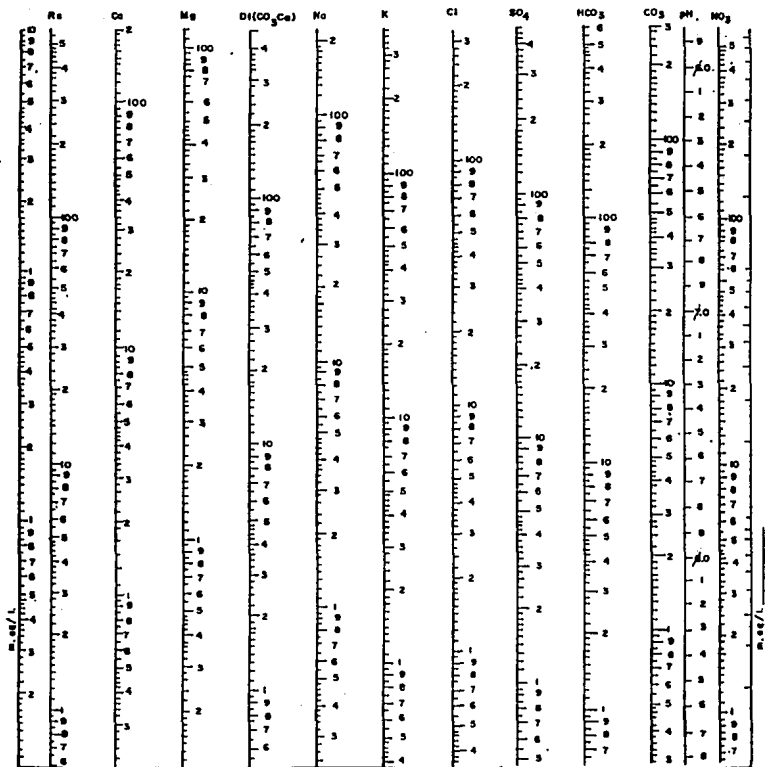
20 para el Ca
 12 para el Mg
 50 para la dureza
 23 para el Na
 35.5 para el Cl
 48 para el SO_4
 61 para el HCO_3 y NO_3

Estos valores a su vez, están alineados con el valor 1 de la escala de meq/l que sirve de referencia.

En este diagrama también puede representarse el contenido del ion CO_3 ; para construir la columna de este ion su valor 30 deberá corresponder al 1 de la columna de meq/l.

La construcción de la gráfica del diagrama semilogarítmico se realiza llevando directamente los resultados del análisis de agua en ppm o mg/l a su escala correspondiente y uniéndose, posteriormente, los puntos

**DIAGRAMA SEMI LOGARITMICO
DE SCHOELLER-BERKALOFF**



No. DE OBRA	REPRESENTACION

OBSERVACIONES

FIGURA No. 4.3

obtenidos por medio de segmentos de recta. De esta manera resulta una línea quebrada que es la línea representativa de la composición química del agua en estudio. Así, las gráficas de los análisis de agua que pertenezcan a una misma familia o facie serán paralelas, en otras palabras, el paralelismo de las líneas quebradas de las gráficas de los análisis químicos de agua que se comparan, sucede cuando dichas aguas tienen la misma composición, aún cuando posean diferente concentración.

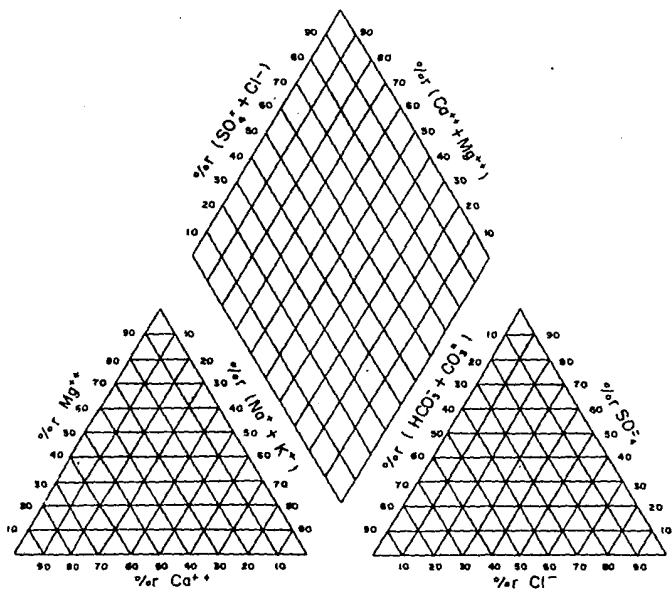
Las ventajas de utilizar este tipo de diagrama es que se emplean una mayor cantidad de iones, por lo que es más representativo de los análisis químicos del agua y porque la representación de esos análisis se pueden efectuar en ppm o meq/l; su desventaja es que las diferencias de concentraciones entre un análisis y otro se acentúan poco.

Otra utilidad de este diagrama es su empleo en la determinación gráfica de la calidad de un agua para el consumo humano. Para este fin, primero se establece la gráfica patrón con los valores de las normas establecidas por algún organismo o institución nacional o internacional como puede ser la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), que corresponden a las concentraciones máximas permitidas; una vez hecho esto, se dibuja la gráfica de la concentración química del agua en cuestión. Si esta última rebasa la línea quebrada de la gráfica patrón, estamos ante un agua no recomendable para ser bebida por el hombre y la sustancia química excedente es fácilmente detectable.

IV.4.4 DIAGRAMA DE PIPER

Consiste en la combinación de tres figuras: dos triángulos equiláteros situados uno frente al otro y un romboide ubicado arriba de ellos (figura 4.4). En el triángulo de la derecha se representan en porcentaje de meq/l los aniones HCO_3 , SO_4 y Cl , y de la misma forma, en el triángulo de la izquierda los cationes Na , Ca y Mg . El CO_3 puede ser adicionado en el lado del HCO_3 y el K en el lado del Na estableciéndose las sumas ($\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$) y ($\text{Na} + \text{K}$) (29). En casos especiales se pueden tomar otros aniones o cationes, como en algún estudio de contaminación del agua por industrias potásicas donde conviene tomar como vértices de los cationes al Na , K y $\text{Ca}+\text{Mg}$. En cada uno de los triángulos se obtiene un punto que indica la composición química del agua, al trazar una paralela al lado opuesto al vértice se representa a un ion desde la cantidad de su porcentaje indicado. Esta forma de trazado tiene una excepción con el Mg y el SO_4 cuyas líneas se trazan horizontalmente (figura 4.5).

DIAGRAMA DE PIPER



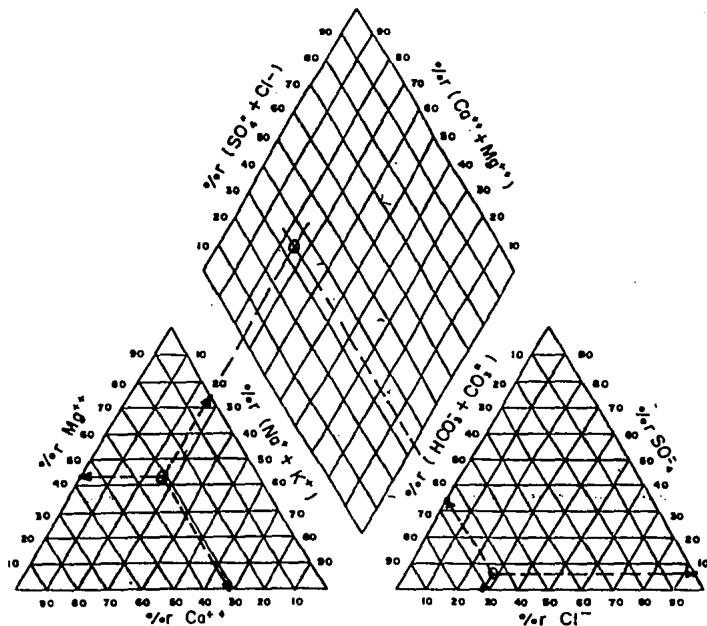
%r = PORCENTAJE DE MILIEQUIVALENTES

NO. DE OBRA	REPRESENTACION

OBSERVACIONES

FIGURA No. 4.4

DIAGRAMA DE PIPER



Forma de ubicar un análisis químico en los triángulos y su proyección al rombo.

CATIONES			ANIONES		
ION	meq/l	%	ION	meq/l	%
Na + K	0.0847	26.5	SO ₄	0.0208	6.0
Ca	0.0985	30.8	Cl	0.0963	27.3
Mg	<u>0.1368</u>	<u>42.7</u>	HCO ₃	<u>0.2344</u>	<u>66.7</u>
	0.3200	100.0		0.3515	100.0

FIGURA No. 4.5

De esta manera, los puntos que representan a las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas (figura 4.6) (7).

Los puntos situados en los triángulos pueden ser proyectados a la figura romboidal para sintetizar en un sólo punto la representación geoquímica del agua. Para proyectarlos se trazan líneas que parten de los puntos de cada triángulo de la siguiente manera: en el triángulo de los cationes la línea será paralela a su lado izquierdo (lado correspondiente al Mg), y para el triángulo de los aniones la línea será paralela a su lado derecho (lado correspondiente al SO_4); así, el punto de intersección de las dos rectas será el obtenido en el romboide y estará situado en un área definida (figura 4.5).

El Diagrama de Piper, además de ser útil en la caracterización hidrogeoquímica, sirve para determinar fenómenos de dilución, disolución y mezcla. En la figura 4.7, se observan cinco zonas hidrogeoquímicas bien definidas: la zona A corresponde a una dilución del agua subterránea provocada generalmente por el agua de lluvia, por lo que se le considera agua de reciente infiltración; la evolución hacia las zonas B y C es considerada una disolución de las rocas por el agua subterránea conforme ésta fluye; en la zona D se ubica el agua producto de una mezcla de aguas de diferente composición y en la zona E se ubican las aguas saladas que pueden ser de origen volcánico o marino.

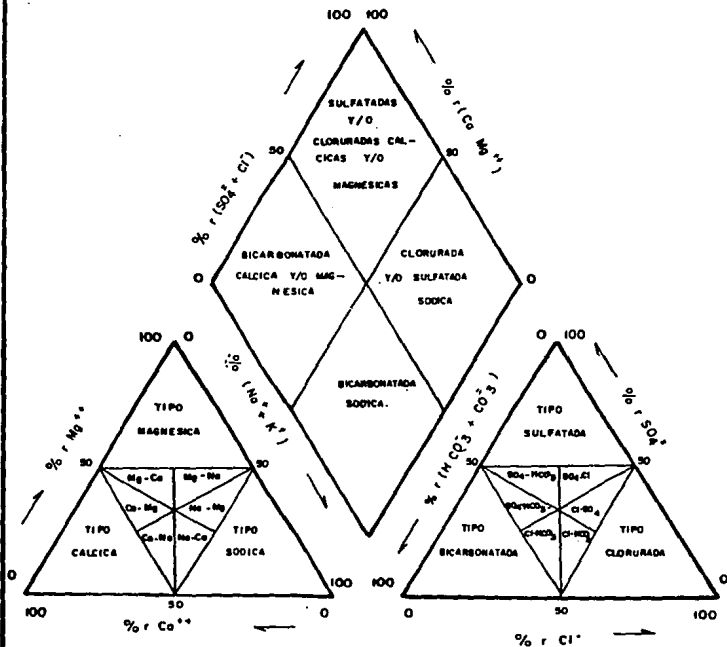
Las ventajas de uso del Diagrama de Piper se observan con lo dicho anteriormente. Su desventaja, desde el punto de vista del autor, es que utiliza valores reducidos a porcentajes y por lo tanto, no se pueden representar concentraciones absolutas.

IV.4.5 DIAGRAMA DE CLASIFICACION DE AGUAS PARA RIEGO

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, para conocer la calidad del agua para riego se utiliza la clasificación de Wilcox, que involucra la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS, SAR en inglés) (figura 4.8).

También como ya sabemos, la conductividad eléctrica es directamente proporcional a la concentración de sólidos totales disueltos, expresada en micromhos/cm.

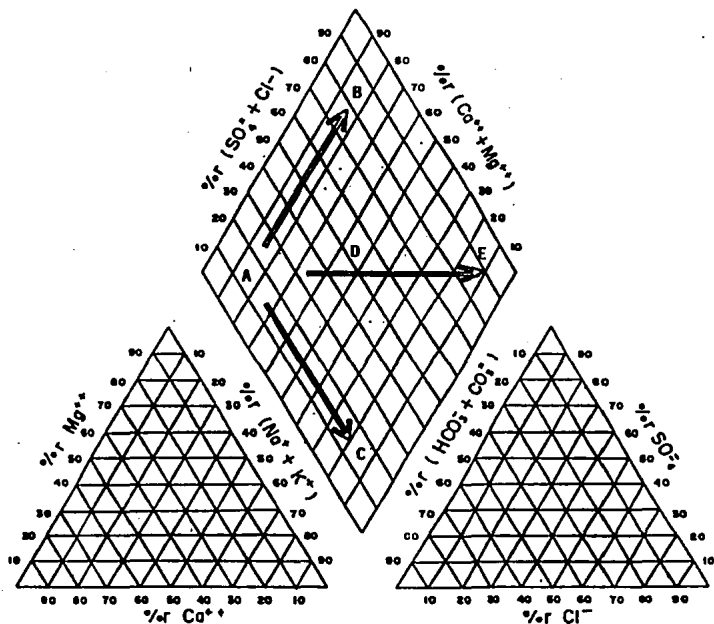
TIPOS DE AGUAS DEDUCIDAS DE UN DIAGRAMA TRIANGULAR DE PIPER.



TOMADO DE [7]

FIGURA No. 4.6

DIAGRAMA DE PIPER



%r = PORCENTAJE DE MILIEQUIVALENTES

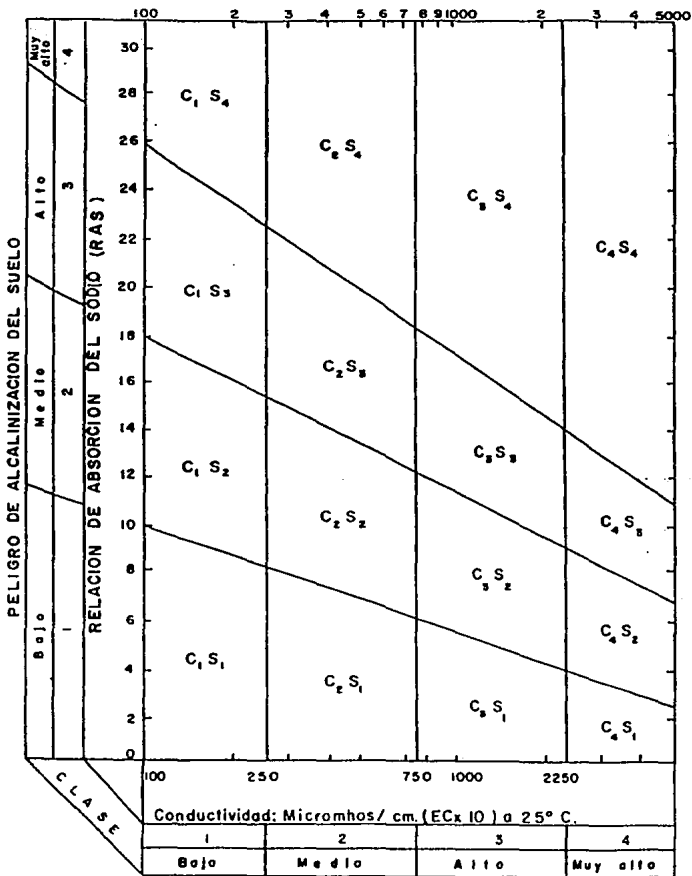
ZONA A: DILUCION (AGUA DE RECIENTE INFILTRACION):

ZONA B: DISOLUCION.

ZONA C: DISOLUCION.

ZONA D: MEZCLA.

ZONA E: AGUA SALADA DE COMPOSICION VOLCANICA O MARINA.



PELIGRO DE SALINIZACION DEL SUELO

FIGURA No. 4.8

Diagrama para la clasificación de las aguas para riego, según procedimiento del U.S. Salinity Laboratory Staff

La relación de adsorción de sodio se obtiene por medio de la fórmula:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}}{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}$$

En donde las concentraciones de Na, Ca y Mg están dadas en meq/l.

Con esta relación se evalúa la calidad del agua para riego, que como puede apreciarse en la fórmula, queda supeditado a las concentraciones de los principales cationes.

Los valores de CE y RAS, son graficados en el monograma de clasificación, obteniéndose de esta manera la clase de agua para riego, la cual está definida por los parámetros C y S y sus respectivos subíndices.

El significado de las diferentes clases de agua, así como algunas recomendaciones para el uso en riego, se comentan a continuación (4):

- C1 Salinidad baja.

Puede usarse para riego en la mayoría de los suelos y para casi todas las plantas, con pocas probabilidades de que aumente la salinidad.

- C2 Salinidad media.

Puede usarse si se hacen lavados moderados. Procurando cultivar plantas moderadamente tolerantes a las sales, puede usarse sin excesivo control de la salinidad.

- C3 Altamente salina.

No puede usarse en suelos de drenaje deficiente. Aun con drenaje adecuado, se requiere un manejo especial para el control de la salinidad, además de seleccionar plantas que sean bastante tolerantes a las sales.

- C4 Muy altamente salina.

No es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias, aunque ocasionalmente puede usarse bajo circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables y con drenaje adecuado y el agua para riego debe aplicarse en exceso con el fin de llevar a cabo un lavado fuerte. Las plantas que se cultiven deberán ser muy tolerantes a las sales.

- S1 Con poco sodio.

Puede usarse para riego en casi todo tipo de suelos, con poco peligro de que el sodio intercambiable llegue a niveles perjudiciales. Sin embargo, las plantas sensitivas al sodio, como algunos frutales (fruto con hueso) y aguacate, pueden llegar a niveles de concentración dañinos.

- S2 Con contenido medio de sodio.

Representa peligro en suelos de textura fina y en aquellos que contengan una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavados leves, a menos que haya yeso en el suelo. Este tipo de agua puede usarse en suelos orgánicos o de textura gruesa con buena permeabilidad.

- S3 Con alto contenido de sodio.

Conducirá a altos contenidos de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos, por lo cual se requerirá de un manejo especial, lavados fuertes, buen drenaje y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos no desarrollarán niveles perjudiciales de sodio intercambiable. Los mejoradores químicos deberán usarse para el reemplazo de sodio intercambiable, excepto en el caso de que no sea factible el uso de mejoradores químicos en aguas de muy alta salinidad.

- S4 Muy alto contenido de sodio.

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

IV.5 MAPAS HIDROGEOQUIMICOS

Consisten en colocar sobre un plano de la región en estudio unos símbolos, cifras o figuras que representen la composición química del agua en cada fuente del que se tengan datos (7).

Las cifras a utilizar pueden ser la concentración de algún o algunos iones, los valores de conductividad eléctrica, sólidos totales, relaciones hidrogeoquímicas o algún tipo de clasificación geoquímica del agua. Entre las figuras que se pueden asociar a cada punto analizado, la más útil es el diagrama de Stiff.

Estos mapas pueden estar constituidos por isolíneas de valores de iones que dan una idea clara de las cuestiones hidrogeoquímicas del acuífero en cuestión; así también suelen ser indicativos curvas de igual conductividad o igual contenido en sólidos totales disueltos principalmente para determinar la dirección del flujo del agua.

Estos mapas son útiles para obtener información de interés, ya que a veces es posible deducir ciertas condiciones geológicas, las zonas de recarga, zonas de contaminación, etc. Así, las características y relaciones que se resalten en un mapa hidrogeoquímico dependerá del tipo de estudio que se realice.

V. GEOLOGIA

V.1 GEOLOGIA REGIONAL

La zona de estudio, de acuerdo a la clasificación de provincias fisiográficas de E. López Ramos (26), queda ubicada dentro de la provincia de la Cuenca Morelos-Guerrero, la cual tiene como límites en sus porciones Este-Oeste y Sur a la Sierra Madre del Sur y como límite Norte al Eje Neovolcánico.

La provincia de la Cuenca Morelos-Guerrero, se localiza dentro de una región con alta complejidad estructural, que presenta tres dominios tectónicos yuxtapuestos, como el Complejo Mazateco del Paleozoico-Mesozoico, el Complejo Xolapa del Paleozoico-Mesozoico y el Complejo Teloloapan-Ixtapan del Mesozoico. Este último se localiza en la porción occidental de la zona de estudio. Algunos de los afloramientos que constituyen esta provincia están formados por secuencias de rocas mesozoicas, tanto sedimentarias de plataforma como volcánico-sedimentarias de tipo arco insular volcánico-mar marginal (38).

El elemento más antiguo lo compone el complejo volcánico y sedimentario Teloloapan-Ixtapan que se desarrolla durante el Jurásico Superior-Cretácico Inferior; este elemento se considera como un complejo parcialmente metamorfozido constituido principalmente por una alternancia de rocas sedimentarias y volcánicas; muestra efectos de metamorfismo de bajo grado, en facies de esquistos verdes, con la presencia de clorita, calcita, epidota y cuarzo. La deformación de esta unidad es notable por el desarrollo de pliegues y de foliación en casi todas las rocas que la comprenden. Este grupo de rocas se extiende más allá de la porción suroeste de la zona de estudio y se ha propuesto su continuidad hacia el norte. A este complejo se le atribuye un origen de mar marginal en un arco de islas, como resultado de los movimientos de subducción en un margen convergente activa durante el Jurásico Superior y el Cretácico Inferior (3).

El segundo elemento, sobrepuesto de manera discordante al conjunto anterior, consiste de un espesor considerable de rocas carbonatadas y clásticas desarrolladas durante el Cretácico; este paquete se inicia con una secuencia de calizas delgadas, de aguas profundas que corresponden a las Formaciones Acuitlapán y Xochicalco; posteriormente se manifiestan ambientes someros en facies de plataforma, en la que se desarrolla un grueso espesor de caliza con cuerpos arrecifales, definidas por la Formación Morelos, que se han relacionado con la plataforma Guerrero-Morelos.

Después de un periodo de transgresión sobreviene el depósito de un paquete de rocas clásticas en un ambiente tectónico tipo flysch, definido por la Formación Mexcala. Este conjunto se encuentra deformado dando lugar a pliegues amplios que conforman sierras altas, resultado de la competencia de las calizas a la deformación, mientras que las rocas clásticas se encuentran profundamente deformadas en pliegues fuertes y cerrados. Estas rocas se encuentran ampliamente expuestas en la porción sur y sureste del área.

Superpuesto a los dos anteriores, se encuentra el tercer elemento constituido por un complejo volcánico heterogéneo, compuesto por la Riolita Tilzapotla, rocas piroclásticas y lahares de la Formación Tepoztlán, así como por derrames lávicos y tobas de la Formación Zempoala; estas unidades se encuentran distribuidas en la porción norte del área conformando los rasgos topográficos más prominentes. Las rocas volcánicas de la Formación Tilzapotla, se han relacionado con las manifestaciones más alejadas hacia el sur de la Sierra Madre Occidental; las otras unidades tienen sus orígenes en diversos centros eruptivos, como los de Buenavista y Zempoala, que paulatinamente se desarrollaron como eventos volcánicos que forman la parte inicial de la Faja Volcánica Transmexicana. Posterior al volcanismo, predominan procesos exógenos donde las rocas antes mencionadas, fueron la fuente de aporte para acumular un gran espesor de roca clástica, como la Formación Chontalcoatlán, que modificó el paisaje con una morfología de planicies ahora fuertemente disectadas.

En general, la secuencia estratigráfica de esta provincia es variada, como se muestra en la tabla estratigráfica de la figura 5.1.

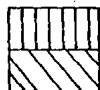
V.2 GEOLOGIA DEL AREA DE ESTUDIO

V.2.1 GEOMORFOLOGIA

En la región están presentes las grandes geoformas de origen sedimentario marino y metamórfico de la Sierra Madre del Sur y las originadas por los eventos volcánicos de las estribaciones septentrionales del Sistema Volcánico Transversal.

TABLA ESTRATIGRAFICA.

ERA	SISTEMA	SERIE	PISO	FORMACION	
GENOZOICO	CUATERNARIO		RECIENTE	TRAVERTINO ALUVION Qpb, Qpl, Qb.	
			PLEISTOCENO	FM. ZINAN-CANTEPET FM. CHONTALCOATLAN FM. CUERNAVACA	
	TERCIARIO		PLIOCENO	ANDESITA ZEMPOALA	
			MIOCENO	FM. TEPOZTLAN	
			OLIGOCENO	RIOLITA TILZAPOTLA	
			EOCENO	GRANITO	
			PALEOCENO	FM. BALSAS	
			MAESTRICHIANO		
			CAMPANIANO		
			SANTONIANO		
MESOZOICO	CRETACICO		CONIACIANO	FM. MEXCALA	
			TURONIANO		
			CENOMANIANO	?	
			ALBIANO	FM. MORELOS	
			APTIANO	FM. XOCHICALCO	
		NEOCOMIANO		BARREMIANO	
				HATERIVIANO	FM. AGUILAPAN
				VALANGNIANO	
				BERRIACIANO	
TRIASICO	JURASICO	SUPERIOR			
		MEDIO			
	SUPERIOR				
		MEDIO			
PALEOZOICO					
PR.					



FALTA DE DEPOSITO.

FALTA DE AFLORAMIENTO.

FIGURA No. 5.1

En lo que respecta a la Sierra Madre del Sur, se han establecido dos grandes divisiones:

1.- Montañas plegadas de origen sedimentario marino, caracterizadas por estar asociadas a amplios plegamientos de tipo anticlinal-sinclinal, que han sido afectadas por movimientos tectónicos posteriores, manifestados a través de fallas normales e inversas. Sus expresiones topográficas son de formas redondeadas en donde se aprecia la escasez de rasgos fluviales acentuada por el predominio de estructuras cársticas, desarrolladas a través del fracturamiento de las rocas, y favorecidas por la disolución de las mismas. Esto trae como consecuencia que el proceso de escurrimiento sea menor que el de infiltración.

2.- Serranías menores de origen metavolcánico y metasedimentario caracterizadas por la presencia de importantes rasgos de alteración, producidos por un intemperismo avanzado. En este tipo de unidades son comunes los desniveles topográficos fuertes, donde el proceso de escurrimiento predomina sobre la infiltración.

El relieve asociado a las rocas volcánicas también puede ser dividido en dos grupos:

a.- Las sierras de origen volcánico del Terciario Superior constituidas principalmente por rocas de composición básica e intermedia. Se caracterizan por una expresión muy compleja, donde predominan fuertes desniveles topográficos debido a la gran disección que sobre ellas ha actuado.

Los escurrimientos fluviales son muy abundantes, dado que predominan las rocas intemperizadas con espesores variables de piroclastos alterados a arcilla, por lo que la infiltración no es relevante. Este proceso erosivo ha dado lugar a un gran desarrollo de barrancos.

En este grupo se incluyen las sierras de origen volcánico del Cuaternario Inferior y Medio, compuestas principalmente de andesitas, basaltos y amplios espesores de piroclásticos. Su expresión morfológica manifiesta formas suaves y cónicas, donde aún pueden reconocerse los rasgos estructurales. Los ejemplos más claros los encontramos al norte de Tenancingo. Sobre este tipo de unidades predominan los procesos de erosión fluvial, aunque por la permeabilidad de los piroclásticos también es importante la infiltración. El escaso desarrollo de barrancos es un indicador de su edad, ya que en la medida que las unidades son más antiguas aumenta la disección.

b.- Conos y coladas de lava del Cuaternario Superior caracterizadas por su morfología de malpais y conos bien conformados, donde la disección fluvial no es tan importante debido a que la infiltración es el proceso predominante.

Finalmente, un elemento sobresaliente en la región, importante desde el punto de vista geomorfológico, es el que corresponde a la Formación Chontalcoatlán, considerada geomorfológicamente como antigua superficie de nivelación acumulativa conformada por depósitos continentales intermontanos y de piedemonte. Esta formación indica importantes etapas de acumulación, condiciones que actualmente han cambiado, ya que ahora predomina el régimen erosivo sobre el acumulativo. La presencia de valles profundos indica una acción erosiva por parte de las corrientes, que además permiten así, la infiltración a niveles profundos.

V.2.2 ESTRATIGRAFIA

La estratigrafía expuesta en el área de estudio se discute originalmente en el trabajo "Prospección Geohidrológica del área de Tenancingo-Malinalco, Estado de México" (34), en el cual el autor formó parte del grupo de alumnos que participaron en su elaboración.

La columna estratigráfica comprende una gran variedad litológica definida por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, cuyas edades abarcan del Jurásico al Cuaternario, y están agrupadas en unidades litoestratigráficas definidas por diversos autores en trabajos anteriores; en algunas unidades aun no clasificadas se utilizan nombres informales para identificarlas.

La unidad más antigua en el área corresponde a un complejo de rocas volcánicas y sedimentarias que fue metamorfozido durante el Jurásico Superior y el Cretácico Inferior.

Durante el Mesozoico Medio se desarrollan rocas sedimentarias químicas y clásticas, en espesores considerables, que comprenden a las Formaciones Acuitlapán, Morelos y Mexcala; la Formación Xochicalco, ampliamente distribuida en la región, no aflora en la zona de estudio.

Las unidades litoestratigráficas restantes son volcánicas o volcanosedimentarias y comprenden a las Formaciones Riolita Tilzapotla, Tepoztlán, Andesita Zempoala, Chontalcoatlán, Zinacantépetl, así como a basaltos y tobas no definidas formalmente; estas unidades abarcan un rango geocronológico del Oligoceno al Pleistoceno y son resultado de un período largo de volcanismo originado por los movimientos en la margen convergente del Pacífico y el desarrollo de la Faja Volcánica Transmexicana.

Los depósitos más recientes del Cuaternario Superior, son principalmente aluviales e indicativos de un proceso sedimentario actual.

a) COMPLEJO METAMORFICO (Ja-Ki)

Esta unidad, propuesta en el trabajo "Prospección Hidrológica en el área de Tenancingo-Malinalco" (34), comprende dos unidades definidas aisladamente pero con similitud en sus características físicas. Las unidades involucradas son el Esquisto Taxco y la Roca Verde Taxco Viejo, definidas originalmente por Carl Fries Jr. (1960); estas mismas unidades fueron estudiadas por Campa (1979) asignándoles el nombre de Complejo Volcánico Teloloapan-Ixtapan.

Este complejo está constituido por una alternancia de metalavas, metatobas, metareniscas y metalutitas, que fueron sometidas a presiones y temperaturas que corresponden a la facies de esquistos verdes. Tiene desarrollos parciales de esquistos de sericita y de clorita, foliados en una dirección del rumbo de echado de SE 73 grados; su mineralogía corresponde a feldespatos, clorita, sericita y epidota, que constituyen una textura porfidoblástica con abundantes segregaciones de cuarzo lechoso. Las metalavas son de color verde, con una mineralogía compuesta principalmente por feldespatos y epidota.

El intemperismo presente es bajo y se manifiesta en tonos verdes y pardos; el fracturamiento es moderado en las rocas metavolcánicas y escaso en las metasedimentarias, en ambas es discontinuo y se encuentra relleno por material derivado de la misma roca.

El área de distribución es principalmente en los alrededores de Ixtapan de la Sal, en los poblados conocidos como El Refugio, Yauतेpec, Tlacoachaca y al W de Salinas.

Esta unidad es la más antigua del área de estudio y se le considera como el basamento sobre el que evolucionó la secuencia mesozoica con la que se relaciona por un límite discordante. Su edad es la considerada por Campa et.al. (1974) y abarca un lapso comprendido del Jurásico Superior (Tithoniano) al Cretácico Inferior.

b) FORMACION ACUITLAPAN (Jka)

Esta formación está constituida por una secuencias de lutitas filíticas, areniscas y calizas; las lutitas se encuentran sericitizadas y se manifiestan en estratos de 10 a 15 cm. de espesor. Las areniscas tienen su mineralogía constituida por cuarzo y feldespatos, cementada por CaCO_3 que caracteriza una textura psammítica; su espesor es de hasta 10 cm. Las calizas tienen estratos delgados y discontinuos de 5 a 10 cm, presentan textura packstone y abundantes vetillas de CaCO_3 .

Esta unidad se encuentra sumamente deformada por pliegues y fallas no cartografiables. Su fracturamiento es escaso y está relleno por material de alteración de la misma roca; su intemperismo es bajo, principalmente de tipo mecánico y se manifiesta en un color café claro. La morfología de la formación se identifica rápidamente, por constituir lomeríos y pendientes suaves y redondeadas, así como disección poco profunda.

Sobreyace discordantemente al Complejo Metamórfico y subyace de igual manera a las Formaciones Morelos, Tepoztlán y Chontalcoatlán; se le observa en contacto concordante con la formación Xochicalco en un área muy reducida al sur de Zumpahuacán. Su distribución es al sureste y norte del poblado de Zumpahuacán, así como al noroeste y noreste de Ixtapan de la Sal.

Su edad fue determinada por De Cserna y Fries (10) y corresponde a la parte alta del Jurásico Superior y a la parte baja del Cretácico Inferior.

c) FORMACION MORELOS (Kim)

Las características litológicas de la caliza de la Formación Morelos varían en algunas de las localidades donde se encuentra mayormente expuesta, aunque un rasgo común es la carsticidad que se manifiesta en todas las áreas en donde aflora, aunque con diferentes grados de desarrollo.

En los poblados de Tlacochaca y Salinas, al noreste de Ixtapan de la Sal, las calizas de esta unidad son de color gris claro, de textura mudstone a wackestone, con fracturas que tienen aberturas de hasta 2 cm y que en algunos casos están rellenas de calcita. La disolución en esta zona tiene un regular desarrollo y se manifiesta por rasgos como lapiaz principalmente. En una gran parte de esta área, la caliza se encuentra recristalizada, como resultado de la acción de cuerpos ígneos intrusivos de composición intermedia, los cuales no fueron cartografiados por su reducida área de afloramiento.

Hacia el sur de la zona de estudio, en las grutas de la estrella, la caliza es de color gris oscuro, con estratificación mediana que varía de 20 a 25 cm. El fracturamiento es moderado y en la mayoría de los casos las aberturas están rellenas de calcita.

En la porción oriental de la zona de estudio, en las inmediaciones del poblado de San Gaspar, el grado de disolución que presenta la caliza es intenso, lo que provoca que sus afloramientos estén reducidos a bloques y fragmentos de roca, incluidos en acumulaciones de "terra rosa"; debido a este fenómeno se tiene también la presencia de dolinas que llegan a tener varios metros o decenas de metros de diámetro.

En las áreas mencionadas, donde la disolución es intensa coinciden con el desarrollo de facies arrecifales; esta determinación, basada en los análisis petrográficos y paleontológicos realizados en el "Estudio de Prospección Geohidrológica del área Tenancingo- Malinalco" (34), está apoyada en la presencia de fragmentos de moluscos, *Biloculina* sp., así como *Coalcomana* y *Toucasia* sp., entre otros fósiles.

La Formación Morelos sobreyace en forma discordante al Complejo Metamórfico y a la Formación Acuitlapán. Se infiere que sobreyace concordantemente a la Formación Xochicalco y subyace en la misma relación a la Formación Mexcala. Otros contactos discordantes los manifiesta con las Formaciones Balsas, Tepoztlán, Zempoala y con unidades informales como el basalto cuaternario, que la cubren.

Esta formación se encuentra distribuida ampliamente en la zona de estudio; su expresión morfológica se manifiesta como amplias sierras alargadas, que alcanzan las mayores altitudes de la región. Su edad ha sido determinada en base a su fauna y corresponde al rango Albiano-Cenomaniano.

d) FORMACION MEXCALA (Km)

Esta unidad está constituida por una alternancia de lutitas, areniscas y calizas. Las areniscas están conformadas por cuarzo de grano fino a medio y feldespatos, cementados por carbonato de calcio; el espesor de los estratos es de 15 a 20 cm. Las lutitas son friables, presentan un color negro al fresco y café al intemperismo. Las calizas son escasas, tienen textura wackestone y presentan color gris en estratos de aproximadamente 10 cm de espesor.

La formación se encuentra sumamente plegada, desarrollando pequeños pliegues isoclinales no cartografiados, así como fallas inversas y normales muy locales; su fracturamiento e intemperismo es muy bajo, siendo el segundo principalmente de tipo mecánico.

Esta unidad sobryace a la Formación Morelos de manera concordante, subyace concordantemente a las Formaciones Balsas y Chontalcoatlán, así como a los basaltos cuaternarios.

Aflora en las inmediaciones de la población de Zumpahuacán, manifestándose como una serie de lomeríos de pendientes suaves y formas redondeadas.

Su edad corresponde al Turoniano del Cretácico Superior según Ontiveros-Tarango (10).

e) GRANITO (Tgr)

Este cuerpo presenta formas topográficas conspicuas debido a su resistencia a la erosión; fue clasificado como un granito de hornblenda, su mineralogía está conformada por fenocristales de cuarzo, feldespatos y hornblenda. También se observan algunos xenolitos de la misma composición. Su textura es fanerítica con cristales que miden del orden de 5 mm. Su intemperismo es escaso y principalmente de tipo físico; el fracturamiento también es bajo.

Se encuentra intrusionando al Complejo Metamórfico y es cubierto discordantemente por la Formación Chontalcoatlán. Sus afloramientos están restringidos a una sola localidad en la porción suroeste del área de estudio al oeste de Malinaltenango. Su edad según Zoltán de Cserna (10), corresponde al Eoceno Medio. Además del granito, existen otros cuerpos intrusivos que no fueron cartografiados por su reducida área de afloramiento; su composición es intermedia

(diorítica) y se encuentra afectando a calizas en el Cerro Salinas al este de Tonatico, a la Formación Balsas y al Complejo Metamórfico en el poblado Sauz, al suroeste de Pilcaya, Guerrero al sur de los límites del área de estudio. No existen dataciones para estos intrusivos, pero se consideran del Terciario Inferior-Terciario Medio ya que no se observa afectando a formaciones del Terciario Superior.

f) FORMACION RIOLITA TILZAPOTLA (Tot)

Está constituida por derrames y material piroclástico, ambos de composición ácida; los primeros presentan una textura afanítica y los piroclastos que son los más abundantes, contienen líticos, cuarzo, feldespatos y vidrio; su color es café, amarillo y verde al intemperismo, y rosa pálido al fresco. El intemperismo químico es intenso, de tal forma que la roca que se encuentra en la superficie se desmorona muy fácilmente constituyendo un suelo residual. El fracturamiento es moderado y continuo con aberturas de 1 cm en promedio, sin estar rellenas.

Esta unidad se le observó sobreyaciendo discordantemente al Esquisto Taxco, al sureste de Porfirio Díaz, y es cubierta en la misma relación por las Formaciones Chontalcoatlán y Zinacantépetl. Aflora en las zonas altas, al occidente del área de estudio, en los alrededores del poblado de Porfirio Díaz. Su edad corresponde al Oligoceno (Jaffe et.al., 1959 en 17).

g) FORMACION TEPOSTLAN (Tomt)

Esta formación está constituida por una secuencia volcanoclástica en la que se observan depósitos de arenisca, lahares, tobas líticas y cristalinas, además de algunos depósitos de conglomerados.

Las areniscas están constituidas por arenas finas y medias bien clasificadas, compuestas por cuarzo y feldespato, encontrándose bien consolidadas y en algunas partes cementadas por carbonato de calcio, aunque en algunas otras presentan una matriz arcillosa.

Los lahares están formados por una gran cantidad de clastos subangulosos a angulosos de tamaños variables, teniéndose desde bloques hasta arenas de composición basáltica, andesítica y riolítica, empacados en una matriz limo-arenosa. Se encuentran en estratos gruesos de hasta 20 m de espesor perfectamente consolidados pero muy mal clasificados; en ocasiones se acuñan o sólo forman lentes.

Los horizontes de conglomerados de esta formación fueron observados al norte del poblado de San Gaspar. Estos depósitos presentan fragmentos de 0.5 a 3 cm, subangulosos y subredondeados, medianamente clasificados y de composición variada, teniendo clastos ígneos y en menor proporción metamórficos, contenidos en una matriz limo-arcillosa que proporciona una buena compactación a la roca.

Es la roca más fracturada del área de estudio; esta conclusión se deduce de los escarpes de las montañas conformadas por esta unidad y en las fotografías aéreas.

Su morfología es característica, forma cerros altos de cimas redondeadas con fuertes escarpes seguidos de terrazas, lo que le da un aspecto escalonado con bordes redondeados, constituyendo así geoformas que llegan a alcanzar grandes alturas en donde predomina un relieve contrastante.

Esta formación se encuentra sobreyaciendo discordantemente al Complejo Metamórfico al sur de Tenancingo y a la Formación Acuitlapán al noroeste de Zumpahuacán. Aflora en los alrededores del poblado de San Gaspar, al norte y noroeste del poblado de Zumpahuacán y en toda la zona noreste del área de estudio. Su edad corresponde al Oligoceno-Mioceno inferida sólo por posición estratigráfica (10).

b) FORMACION ANDESITA SEMPOALA (Taps)

Esta unidad es constituida por una secuencia de materiales que contienen derrames, tobas, lahares y brechas de composición intermedia.

Los derrames presentan texturas que varían de afanítica a porfirítica, en el segundo caso se observan cristales de feldespatos y algunos ferromagnesianos. Su color de intemperismo es gris rosáceo y al fresco gris oscuro; su espesor es variable según la localidad, de 3 a 70 m. El intemperismo en las coladas también varía de profundo a somero, predominando el segundo. El fracturamiento es de moderado a escaso. Los análisis petrográficos realizados en el estudio anterior (34), revelan que estos derrames son de composición andesítica y basáltica. En algunas localidades se observó un desarrollo dendrítico de óxido de manganeso.

Los depósitos piroclásticos que son la litología más abundante de la formación, están constituidos por tobas líticas y cristalinas de composición intermedia y algunos horizontes ácidos en pseudoestratos de 3 a 10 m de espesor; presentan un intemperismo muy avanzado lo que les proporciona

un color anaranjado o rojizo, debido a la oxidación de minerales de hierro que contiene; los materiales resultantes del intemperismo son limos y arcillas.

Ocasionalmente se encuentran brechas volcánicas intermedias, también con intemperismo intenso, en las que aun se reconocen fragmentos de diversos tamaños, originalmente soldados en una pasta en la que se encuentran vesículas.

Los lahares son de la misma composición y están intercalados con los derrames, su clasificación es muy mala pues coexisten en una matriz arenosa fragmentos que varían de 5 cm a más de 1 m; en ocasiones, alternados a éstos se encuentran horizontes de areniscas.

Esta unidad subyace discordantemente a la Formación Tepoztlán y es cubierta de la misma forma por la Formación Chontalcoatlán y por unidades informales como el Basalto y los Productos Piroclásticos Basálticos del Cuarternario. Aflora en la región noreste del área de estudio. Su edad corresponde al Mioceno-Plioceno, determinada por su posición estratigráfica (10).

1) FORMACION CHONTALCOATLAM (Tpch)

Esta unidad consiste de horizontes de conglomerados mal clasificados, cuyos fragmentos varían en tamaño desde gravas hasta grandes bloques de más de 1 m de diámetro, su grado de redondez es variable, de anguloso hasta redondeado; normalmente se encuentran mal consolidados pero bien compactados. Alternando con estos se observan paquetes de areniscas de grano medio a grueso bien clasificadas, desde angulosas a subredondeadas, bien compactadas y sin cementante, en algunos sitios se les aprecia estratificación cruzada, aunque en general es paralela. En esta formación también existen capas de tobas líticas y cristalinas, con piroclastos que varían en tamaño de cenizas a lapilli, medianamente compactados. Además de la litología mencionada hay depósitos laháricos constituidos por clastos de rocas ígneas, cuyo tamaño varía de 5 cm hasta bloques de más de 1 m, empacados en una matriz limo-arenosa que les proporciona una gran compactación; en general la composición de los clastos ígneos es básica e intermedia.

Los contactos entre lahares, tobas ácidas y la secuencia detrítica son discordantes, como se pudo observar al sureste de Pilcaya. El intemperismo observado es muy bajo, lo que entre otros factores da una morfología de amplias mesas, en las que se ha desarrollado una gran disección, que da lugar a profundos barrancos de paredes totalmente verticales, algunos con más de 150 m de profundidad.

Esta formación sobreyace discordantemente al Complejo metamórfico y a las Formaciones Acuitlapán, Balsas y Tilzapotla, y subyace aparentemente en forma concordante a la unidad de travertino, como se observa en el sitio conocido como El Salto, al sur de Tonicato. También es cubierto por los materiales volcánicos del Cuaternario, pero en relación discordante. Aflora ampliamente en toda la zona de estudio. Su edad corresponde al Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior, inferida por posición estratigráfica y por restos de fósiles de elefantes del género *Cuvieronus* (Bonet, 1971 en 10).

j) FORMACION SIMACANTEPETL (Qs1)

Está constituida por rocas que varían de brechas formadas por fragmentos de dacita porfídica azul hasta pómez, entremezcladas con arenas y gravas de origen fluvial. En general no presentan estratificación, a excepción de las arenas.

Presenta espesores variables entre 150 y 200 m en la parte septentrional de la Sierra de Ixtapan-Tonicato (10).

Esta formación, sobreyace discordantemente a las Formaciones Riolita Tilzapotla, Tepoztlán y Andesita Zempoala; además, en algunas ocasiones sobreyace a la Formación Chontalcoatlán y en otras se encuentra interdigitada con ésta.

La única área de afloramiento que se tiene de esta unidad dentro de la zona de estudio, está ubicada en la parte noroccidental de la misma, al norte de Zacango.

Su edad no está bien definida, sin embargo, por encontrarse interdigitada en la parte superior de la Formación Chontalcoatlán del Pleistoceno Inferior, se considera que sus partes inferiores pudieran ser de esta misma edad.

k) BASALTO (Qb)

Esta unidad no ha sido descrita formalmente por lo que a las rocas de esta composición y de edad Cuaternaria se les asignó la clave Qb (34), distinguiéndolas de sus productos piroclásticos a los que se les dio otra clave.

Las rocas que componen a esta unidad son en general de color negro a gris claro cuando están intemperizadas y de color negro en superficies inalteradas; normalmente presentan vesículas que en algunos casos están rellenas por sílice,

otras estructuras son: brechas en los frentes de las coladas y entre ellas; fracturas provocadas por enfriamiento que en algunos sitios como en el área de Los Cerritos, al suroeste de Tenancingo, dan lugar a basaltos prismáticos; este fracturamiento varía de moderado a intenso y manifiesta aberturas de 1 a 3 cm, en ocasiones rellenas por productos piroclásticos. El intemperismo es habitualmente bajo. En cuanto a su textura, va de porfídica a afanítica, predominando ésta última, en el primer caso se observan cristales de olivino y plagioclasas alteradas.

Según análisis petrográficos realizados por De Cserna (10), en esta unidad se encontraron andesitas basálticas y basaltos. Los espesores de las coladas varían de menos de 1 m a más de 80 m como al noreste de Malinalco (localidad fuera del área de estudio, hacia el noreste de su límite oriental).

Se relaciona estratigráficamente de manera discordante con las Formaciones Morelos, Tepoztlán y Chontalcoatlán y es cubierta en la misma relación por unidades volcánicas contemporáneas, Qpb y Qpi, descritas a continuación.

Esta unidad aflora en áreas reducidas al suroeste de Tenancingo y al suroeste de Pilcaya, esta última localidad fuera del límite sur del área de estudio.

Con respecto a su edad, Zoltán De Cserna y Fries (10) correlacionan esta unidad con el Grupo Chichinautzin y la consideran como la parte más suroccidental de esta secuencia volcánica en donde las rocas se formaron entre 8390 +/- 100 y 40000 años.

1) PRODUCTOS PIROCLASTICOS BASALTICOS

Estos cuerpos están formados por una secuencia de piroclastos de composición basáltica pseudoestratificada, constituidos por bloques y lapilli. Su color varía de negro a café rojizo; su grado de intemperismo es bajo. La porosidad de los depósitos es muy alta y debido a su edad y grado de consolidación no se encuentran fracturados.

Los edificios volcánicos que aportaron el material de estos cuerpos llegan a tener alturas de 60 m y se encuentran bien conservados.

Se les encuentra al suroeste de Tenancingo, en el área de Los Cerritos, en donde constituyen los focos de emisión de extensas coladas de lava, las cuales culminaron en una etapa explosiva que dio lugar a estos conos cineríticos.

Estos depósitos se encuentran descansando discordantemente sobre la Formación Chontalcoatlán y sobre las coladas basálticas que los precedieron.

Por su posición estratigráfica se consideran prácticamente de la misma edad que los basaltos, que de acuerdo a De Cserna (10), son pleistocénicos.

m) PRODUCTOS PIROCLASTICOS INTEREDIOS

Estos materiales están constituidos por una secuencia de piroclastos de composición intermedia-ácida, compuesta por fragmentos de roca y minerales en pequeños cristales de feldespatos y ferromagnesianos, todos agrupados sin matriz y con un grado muy bajo de compactación, lo que le proporciona una muy alta porosidad. Su mayor volumen se encuentra conformando conos cineríticos de hasta 160 m de altura, aunque cubre también con una delgada capa a la porción sur del Valle de Tenancingo, el cual debe su origen a estas estructuras que cerraron el flujo de agua en esta dirección.

Este tipo de materiales sólo se observaron en la parte norte del área de estudio, a escasa distancia de la población de Tenancingo, descansando discordantemente sobre las Formaciones Tepoztlán, Zempoala y Chontalcoatlán, así como sobre los basaltos cuaternarios, y sólo es cubierta en la misma relación por el aluvién. Por su posición estratigráfica sobre los basaltos y por la casi total preservación de sus geoformas, se le asigna la misma edad que a los productos piroclásticos basálticos, esto es, del Pleistoceno.

n) TRAVERTINO (Qtr)

Esta unidad no ha sido definida formalmente y sólo es mencionada en forma muy breve por Zoltán De Cserna (10). Así también, de manera informal se le asigna la clave Qtr (34).

La unidad está formada por un paquete de rocas evaporíticas carbonatadas, depositadas en una antigua cuenca endorreica de reducida extensión, lo cual puede comprobarse al observar el área escasa en que se encontraron sus afloramientos y el tipo de drenaje que desarrolla. El color de estas rocas es café claro e intemperiza a blanco. Presenta en algunas localidades contaminación de fragmentos clásticos, que varían en tamaño de arenas a arcillas. Sus espesores son

variables detectándose en El Salto San Manuel, al sur de Tonicaco, 5 m de estas rocas. En algunas ocasiones son masivas y en otras manifiestan estratos medianos de más de 30 cm; se encuentran estructuras bandeadas y moldes de vegetación, así como formas aciculares y radiales y otras muy similares a estalactitas. Intercalados con estos depósitos se tienen horizontes delgados restringidos de arenas y gravas muy bien seleccionadas. En general, el travertino es muy poroso y no presenta fracturamiento pero si huellas de disolución.

La extensión de estos afloramientos es reducida a unos 15 Km cuadrados, en los alrededores de las poblaciones de Ixtapan de la Sal y Tonicaco.

Se encuentra descansando discordantemente sobre el Complejo Metamórfico. Asimismo, se le observó en contacto con la Formación Chontalcoatlán, éste es muy regular y aparentemente concordante.

Por su relación estratigráfica con la Formación Chontalcoatlán fechada del Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior, se la ha asignado al Travertino una edad Olocénica.

c) ALUVIOM (Qal)

Esta unidad se encuentra constituida por depósitos recientes derivados del intemperismo y erosión de unidades más antiguas; los clastos así originados fueron posteriormente acumulados en pequeñas cuencas, en donde ocurrió la sedimentación debido al bloqueo del drenaje de los valles preexistentes por episodios volcánicos cuaternarios. La granulometría de estos materiales varía de lugar a lugar, en algunos sitios se compone de gravas y arenas y en otros principalmente de arcillas, pero en todos los casos se encuentran mal consolidados y con espesores reducidos, que de acuerdo a información de la exploración geofísica (34), no sobrepasan los 20 m. Sus afloramientos son en general escasos y se localizan al este de la población de Tenancingo.

V.3 TECTONICA Y GEOLOGIA ESTRUCTURAL

El área de estudio está enclavada en una zona en donde afloran rocas de edades que varían desde el Jurásico Superior hasta el Reciente, con deformaciones diferentes que demuestran una historia compleja.

Según Campa y Ramírez (1979 en 34), en la región noroccidental de Guerrero y regiones colindantes con otros estados, se reconocen cinco fases de deformación que actúan en el Mesozoico y Cenozoico.

La primera de ellas ocurrió a finales del Jurásico (Finijurásica), afectó los depósitos vulcano-sedimentarios jurásicos, que muestran pliegues replegados en dos generaciones, con un aumento relativo del metamorfismo en algunas zonas. El metamorfismo que afecta a dicha secuencia es del tipo regional de bajo grado correspondiente a facies de esquistos verdes.

La segunda fase (Mesocretácica) ocurrida en el Cenomaniano, se manifiesta en el área Teloloapan-Ixtapan por el metamorfismo que plegó y folió la secuencia vulcano-sedimentaria de nueva cuenta; esta fase originó la emersión de los terrenos de arco volcánico y mar marginal conformando a la Sierra Madre del Sur, que así aportó sedimentos terrígenos a la zona oriental en la que continuó la sedimentación marina.

La tercera fase (Paleocénica), es la que da lugar a la deformación de la carpeta mesozoica.

Durante y al finalizar el Cretácico Temprano, la secuencia vulcano-sedimentaria se estaba depositando, al mismo tiempo que ocurría sedimentación en las plataformas de Guerrero-Morelos y Michoacán, y por lo tanto no se trataba de un basamento o zócalo premesozoico. Campa y Ramírez (op. cit.), proponen dos modelos alternativos para explicar esto; en uno de ellos sugieren la existencia de un arco insular entre ambas plataformas; sin embargo, la plataforma de Guerrero-Morelos no muestra influencia volcánica en su sedimentación y tampoco puede explicar el metamorfismo de la secuencia vulcano-sedimentaria entre las secuencias no metamorfoseadas de las dos plataformas. En el otro modelo, se sugiere que el conjunto de Ixtapan-Teloloapan pudiera ser un alóctono tectónico producto de la deformación paleocénica. Este último modelo es considerado como más aceptable en el "Estudio de Prospección Geohidrológica SARH-FI" (34), aunque establecen como necesario la realización de estudios geológicos de detalle que identifiquen las trazas de las estructuras que desplazan al supuesto alóctono.

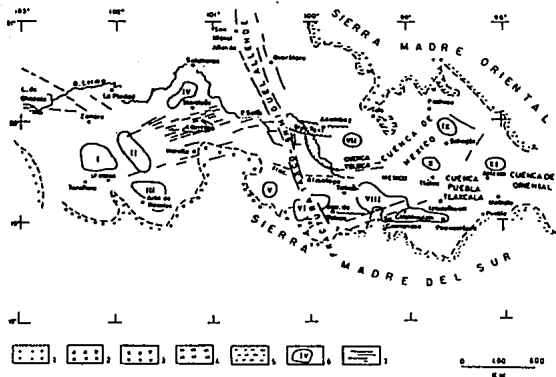
La cuarta fase de deformación (Finimiocénica), corresponde a una fase compresional que se superpone a las anteriores y que produjo los combamientos que se observan en la región de Arcelia- Altamirano, así como la posición anormalmente elevada de la secuencia metamórfica y de las unidades pre-miocénicas. Esta fase de deformación además explica el intenso fracturamiento de la Formación Tepoztlán, como resultado del relajamiento de la unidad al culminar los esfuerzos compresionales. Se le atribuye a esta deformación una edad de límites Mioceno-Plioceno.

La quinta y última fase de deformación (Pliocuaternaria), ha producido en la región fallamientos normales y un sistema de roturas o diaclasas, a través de las cuales fueron emitidos los materiales volcánicos cuaternarios. Se conservan semifosas y pilares, además de terrazas superficiales de erosión y valles relictos.

Con respecto al fallamiento normal asociado al área de estudio de esta última fase de deformación, es posible que esté vinculado a la gran falla de San Miguel de Allende-Taxco, descrita por Demant (13) (figura 5.2).

La gran falla San Miguel de Allende-Taxco, se extiende desde San Miguel de Allende, Guanajuato, hasta la Ciudad de Taxco, Guerrero, cuyas trazas se observan hacia el poniente de las ciudades de Querétaro y Toluca, siguiendo una orientación casi N-S. Esta es una de las diversas fallas que dieron origen al vulcanismo pliocuaternario del Eje Neovolcánico Transmexicano (13).

Las fallas normales que ocurren en el área de estudio y que están asociadas al Sistema San Miguel Allende-Taxco son: la localizada al occidente de Zumpahuacán y otras dos más, importantes por su posible relación con manantiales termales, localizadas al oriente y poniente de Ixtapan de la Sal; la primera con el bloque caído hacia el oriente y las restantes con el bloque caído hacia el poniente y oriente respectivamente, de tal manera que definen un pequeño graben que involucra a las localidades de Ixtapan y Tonatico. Las extensiones de estas fallas parece ser que son de muchos kilómetros, pero en las fotografías aéreas no es posible continuarlas; el rumbo de las tres estructuras es en términos generales NNW-SSE.



Porción central del Sistema Volcánico Transversal. 1 a 5, Límites geológicos: 1, Rocas intrusivas mesozoicas; 2, Molassa continental terciaria; 3, Vulcanitas terciarias; 4, Rocas metamórficas mesozoicas; 5, Rocas sedimentarias mesozoicas. 6, Zonas de mayor actividad volcánica: I, III, VI, VIII, IX, de quinto grado de intensidad; II, de cuarto grado; IV, V, VII, X, XI, de tercer grado. 7, Lineamientos principales (con base en Demani, 1979).

FIGURA No. 5.2 SISTEMA DE FRACTURAS SAN MIGUEL DE ALLENDE-TAXCO

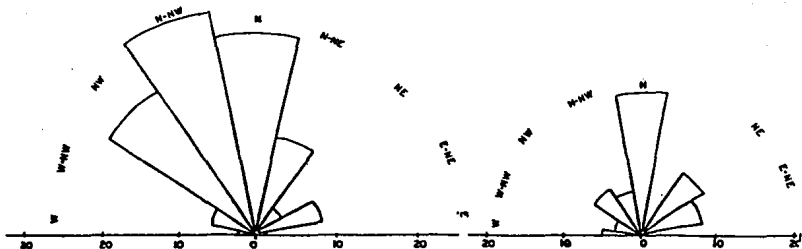
Al respecto, García Palomo A. (comunicación escrita) manifiesta a partir de observaciones realizadas en imágenes de Satélite Landsat que "el área de estudio se encuentra dentro del límite de dos provincias geológicas importantes, por un lado la denominada Cuenca Guerrero-Morelos con un basamento paleozoico, y por el otro lado el Eje Neovolcánico Transmexicano con depósitos piroclásticos, vulcanoclásticos y derrames, que constituyen las edificaciones más importantes de la porción central del país y las cuales le atraviesan de una manera general en una orientación E-W".

"En esta porción limítrofe en donde coexisten ambas provincias, se observa una complejidad estructural muy marcada, sobresaliendo por sus dimensiones una discontinuidad perfectamente bien definida en la imagen de satélite, dispuesta en una orientación general N-NNW, con una amplitud que varía de 13 kilómetros al norte del área, en las faldas del volcán Nevado de Toluca, a 8 kilómetros hacia el sur; su longitud es considerable por lo que puede estar relacionado al sistema de fracturas San Miguel de Allende-Taxco (Demant, 1978) o al sistema de fallas Taxco- Querétaro (Nixon y colaboradores, 1978; en Sutter, et. al., 1988)".

"La parte axial está constituida principalmente por rocas metamórficas del Jurásico-Cretácico Inferior, en la porción norte se bifurca formando pequeños grabens, los cuales están rellenos por los lahares de la Formación Chontalcoatlán; de acuerdo a la morfología observable, indican que la estructura se encontraba ya formada cuando estos depósitos la rellenaron".

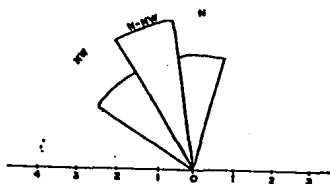
"Las implicaciones tectónicas y vulcanológicas en esta región de las fallas San Miguel de Allende-Taxco son de gran importancia, ya que posiblemente son las causantes de la manifestación volcánica que dio origen al Nevado de Toluca (Sutter, op. cit.). Dicho sistema caracteriza al sector central del Eje Neovolcánico Transmexicano".

Existen otras discontinuidades de menor magnitud en la región, pero que son de gran interés geohidrológico. En el estudio SARH- FI (op. cit.) se hizo un análisis estructural basado principalmente en las rosetas de fracturas, de las cuales únicamente se muestran en la figura 5.3 algunas que relacionan a las unidades geológicas que afloran principalmente en el área de interés de esta tesis.

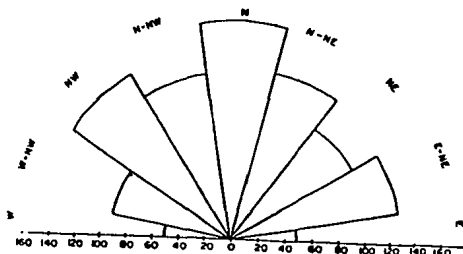


Formación Chontácoatl
(Total 116 fracturas)

Formación Andesita Zempoala
(Total 65 fracturas)



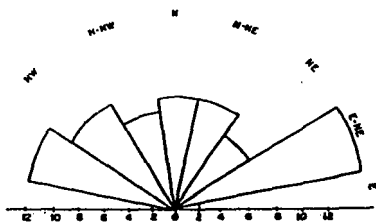
Formación Zinacantepetl
(Total 10 fracturas)



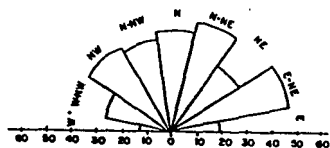
ROSETA GENERAL
(Total 991 fracturas)

FIGURA 5.3 ROSETAS DE FRACTURAS DE LAS FORMACIONES QUE AFLORAN EN LA REGION.

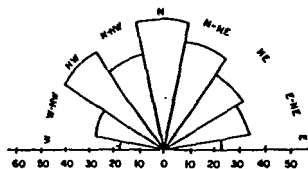
FIGURA 5.3 (CONTINUACION)



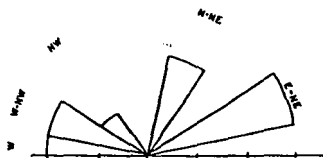
Complejo Metamórfico
(Total 74 fracturas)



Formación Morelos
(Total 275 fracturas)



Formación Tepoztlán
(Total 321 fracturas)



Formación Riolita Tilzapotta
(Total 10 fracturas)

TOMADA DE (34)

En la figura citada destaca la roseta de fracturas de la unidad Complejo Metamórfico que no presenta ninguna orientación preferencial, debido a las diferentes fases de deformación que han actuado sobre ella; por el contrario, en las rosetas de las Formaciones Chontalcoatlán y Zinacantépetl se observa una tendencia predominante hacia el N-NW, asociado a un desarrollo estructural en esa dirección que se relaciona con las fallas de San Miguel de Allende-Taxco. Las discontinuidades del resto de las formaciones geológicas, según se puede apreciar en las rosetas de fracturas respectivas, muestran orientaciones en todas direcciones, excepto la Formación Andesita Zempoala con una tendencia principal hacia el norte.

VI APLICACION DE LA HIDROGEOQUIMICA EN EL AREA DE ESTUDIO

VI.1 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS

En este apartado se mencionan los rasgos geohidrológicos que distinguen a la región, definiendo las unidades hidrogeológicas a través de su permeabilidad, evaluada en función de sus características litológicas y estructurales. En algunas ocasiones, formaciones con un comportamiento hidrogeológico específico, al variar su posición topográfica y espesor, fueron clasificadas como otra unidad hidrogeológica (34).

UNIDAD I

En ésta se incluyen formaciones con buena permeabilidad; entre las que se encuentran las siguientes:

Formación Morelos.

Presenta normalmente muy buena permeabilidad, producida por un fracturamiento continuo con aberturas de aproximadamente 2 mm y por la excesiva disolución, que en ocasiones permite la formación de grandes cavernas como las de la Gruta de la Estrella, situadas a unos cientos de metros al sur del área de estudio.

En el área del poblado El Zapote, se determinaron las calizas de esta formación por medio de geofísica, a profundidades que van de 60 a 250 m (figura 6.1), posiblemente delimitadas en su parte inferior por rocas impermeables de la Formación Acuitlapán.

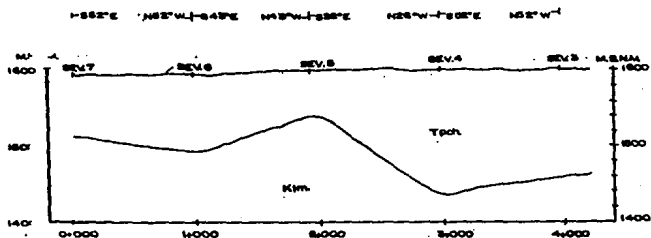
Debido a las características hidrogeológicas de las rocas de esta formación y a su posición estratigráfica, se le considera potencialmente acuífera, con características de semiconfinamiento en los alrededores del poblado mencionado, cuya alimentación la recibe de ella misma en las zonas donde aflora y de la Formación Chontalcoatlán que la sobreyace.

Formación Chontalcoatlán.

La permeabilidad de esta formación la originan la porosidad y la existencia de abundantes fracturas; sin embargo, las características de su litología, alternancia de paquetes permeables con otros de muy baja permeabilidad, hace suponer que su funcionamiento hidrogeológico sea principalmente como acuífero libre y como acuitardo en la región de El Zapote y Zumpahuacán (figuras 6.1, 6.2 y 6.3).

SECCION GEOLOGICA ESQUEMATICA AREA EL ZAPOTE

PERFIL 1*

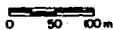


* Obtenida por SEV. (FI-SARH, 1987.)

SIMBOLOGIA

- | | |
|--------|---|
| Tsch. | FM. CHIOTALDOTALAN.
PREDOMINAN CONGLOMERADOS MAL CLASIFICADOS
Y ARENISCAS MEDIAS A FINAS CON INTERCALA-
CIONES DE TOSAS Y PIROCLASTOS. |
| Km. | FM. MORELOS.
CALIZAS COLOR GRIS CLARO CON INTERCALA-
CIONES DE DOLOMITAS FRACTURADAS Y CON ES-
TRUCTURAS CARSTICAS. |
| ~ ~ ~ | CONTACTO LITOLOGICO. |
| SEV. 5 | SONDEO ELECTRICO VERTICAL. |

Escala Vertical



Escala Horizontal:

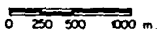
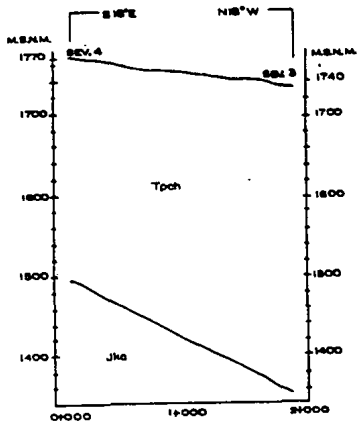


FIGURA No. 6.1

SECCION GEOLOGICO ESQUEMATICA
 AREA ZUMPAHUACAN. PERFIL 2 1/2



1/2 OBTENIDO POR SEV (PI-SAPH, 1967).

SIMBOLOGIA

FM. CHOTALCOATLAN.



PRINCIPALMENTE CONGLOMERADOS MAL CLASIFICADOS Y ARENISCAS DE GRANULOMETRIA MEDIA A FINA, CON INTERCALACIONES DE TUBAS Y PIROCLASTOS



FM. ACUITLAPAN.

SECUENCIA DE LUTITAS FILITICAS ARENISCAS Y CALIZAS.

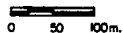


CONTACTO LITOLOGICO.



SEV. 3 SONDEO ELECTRICO VERTICAL.

Escala Vertical :



Escala Horizontal :

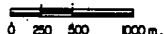
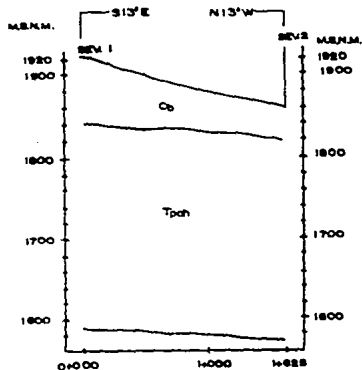


FIGURA No. 6.2

SECCION GEOLOGICA ESQUEMATICA
 AREA ZUMPAHUACAN. PERFIL 1^o

SIMBOLOGIA.



DIABASE DE BASALTO FRACTURADO DE COLOR NEGRO INTERCALADO CON BRECHAS.



FMA. TONALCOATLAN. PREDOMINAN CONGLOMERADOS MAL CLASIFICADOS Y ARENISCAS MEDIAS A FINAS CON INTERCALACION DE TOSAS Y PIROCLASTOS.



FMA. ACUITLAPAN. SECUENCIA DE LUTITAS FILITICAS, ARENISCAS Y CALIZAS.

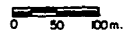


CONTACTO LITOLOGICO.



SONDEO ELECTRICO VERTICAL.

Escala Vertical:



Escala Horizontal:



OBTENIDA POR SEV. (FI-SARH, 1987).

FIGURA No. 6.3

En la parte norte del área de estudio, en la zona de la población de Villa Guerrero, las rocas de esta formación se comportan como acuífero libre, con niveles piezométricos que se manifiestan de 2 a 7 m en las norias. Además, posiblemente se comporte a profundidad como un acuífero semiconfinado por sus características litológicas mencionadas y por sus relaciones estratigráficas con rocas impermeables que la limitan en sus partes laterales y en su base.

Formación Tepostlán.

La porosidad no es uno de los atributos de esta formación debido a su constitución litológica, compuesta de lahares y conglomerados mal clasificados y con matriz limo-arcillosa, tal como se describió en el capítulo anterior de este trabajo; sin embargo, su permeabilidad es ocasionada por el excesivo fracturamiento que presenta, aunque en algunos sitios esta estructura no es continua a profundidad como lo demuestra la presencia de diversos manantiales al oriente y sur-oriente del área de estudio, en los poblados de San José Chalmita y San Gaspar respectivamente.

Normalmente, esta formación aflora en zonas topográficamente elevadas y de relieve montañoso, por lo que su funcionamiento hidrogeológico es fundamentalmente de zona de recarga, transmitiendo el agua a la Formación Morelos en las localidades mencionadas donde ésta última la subyace.

Sin embargo, cuando esta formación se localiza en el subsuelo, puede ser que conforme acuíferos si es que las fracturas que la caracterizan son continuas a profundidad. Así, en el subsuelo del Valle de Tenancingo la Formación Tepostlán se ubicó, por medio de geofísica, a profundidades que varían de 180 a 250 m (figura 6.4) y su recarga se debe llevar a cabo a partir de los afloramientos localizados al este y sureste de este valle; también es posible que se alimente de agua a profundidad a través de la Formación Chontalcoatlán al oeste del valle citado (plano geológico).

Formación Andesita Zempoala.

Presenta una permeabilidad variable, debido a que está conformada por derrames andesíticos fracturados de permeabilidad media a alta, así como lahares y productos piroclásticos intemperizados de permeabilidad baja. Cuando los derrames afloran, es posible que constituyan áreas de recarga.

SECCION GEOLOGICA ESQUEMATICA
 AREA TENANCINGO. PERFIL 1^o

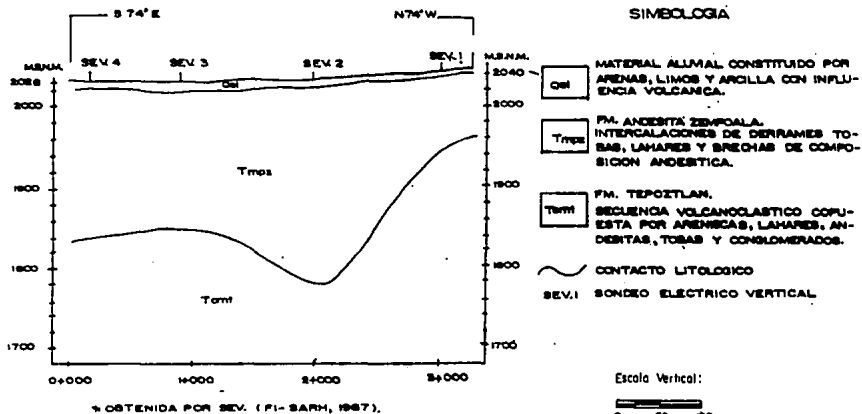


FIGURA No. 6.4

En el Valle de Tenancingo el espesor de esta formación, cubierta por aluvión, se determinó por medio de sondeos eléctricos con una variación de 90 a 245 m (figura 6.4), en donde se tiene la seguridad de que forman acuíferos por la presencia de obras de captación como son pozos y norias.

Las áreas de recarga de agua para esta formación pueden ser las rocas aluviales, las rocas piroclásticas intermedias y los afloramientos de las rocas en cuestión que rodean a dicho valle (ver plano geológico anexo).

Basaltos.

Estas rocas deben su permeabilidad al alto grado de fracturamiento que presentan.

Aflora en la zona localizada al sur-occidente del Valle de Tenancingo, donde conforman áreas de recarga que transmiten sus aguas a otras formaciones permeables, como la Chontalcoatlán, localizadas en niveles topográficos inferiores.

Productos piroclásticos e intermedios.

Estos materiales manifiestan muy alta permeabilidad debido a que sus componentes (cenizas, lapilli y bloques) no están consolidados. Normalmente se encuentran conformando conos volcánicos, por lo que su funcionamiento hidrogeológico es como zona de recarga.

Travertino.

Esta unidad manifiesta alta permeabilidad inducida por el alto grado de disolución que presenta. Debido a que su espesor es reducido y a que descansa sobre la Formación Chontalcoatlán, se considera que funciona hidrogeológicamente como área de recarga. Su extensión de afloramiento es muy reducida.

Aluvión.

La potencia de estos sedimentos varía de 2 a 11 m en el Valle de Tenancingo, según la información de los sondeos eléctricos (figura 6.4). En dicho valle, las abundantes norias emplazadas en esta formación comprueban su capacidad acuífera, al igual que en algunos casos funciona como área de recarga para la Formación Zempoala según sea la secuencia litológica de esta última.

En general, la composición de gravas y arenas arcillosas mal consolidadas del aluvión, le proporcionan una buena permeabilidad.

UNIDAD II

Esta unidad agrupa materiales de permeabilidad baja, capaces de conformar acuitardos.

Formación Riolita Tilsapotla.

El intemperismo de esta formación, constituida principalmente por piroclastos, da lugar a la formación de potentes espesores de material residual, en el que las arcillas son la litología más abundante; esto ha propiciado que en los niveles superiores de la formación se desarrollen acuitardos. La recarga en esta área se debe al agua de lluvia, donde existen abundantes norias que se secan rápidamente cuando son explotadas, teniendo que esperar un tiempo a que ocurra una recuperación suficiente para una nueva extracción.

UNIDAD III

Esta unidad la componen materiales que por su baja permeabilidad o abrupta topografía, conforman acuífugos o acuícludos.

Las formaciones geológicas que aquí se incluyen son el Complejo Metamórfico, Acuitlapán, Mexcala, las rocas graníticas y la Formación Zinacantépetl.

Las tres primeras formaciones ofrecen un área de escurrimiento al agua de lluvia y una barrera impermeable al flujo del agua subterránea cuando están en el subsuelo, debido a la baja e inexistente porosidad y a la presencia de arcillas en su litología que limita aun más la escasa permeabilidad. Las rocas graníticas también conforman zonas en donde predomina el escurrimiento sobre la infiltración, producida por el nulo fracturamiento y la baja degradación de sus materiales.

Un caso particular de esta unidad hidrogeológica es la Formación Zinacantépetl, en la cual, aunque se observa en algunos de sus horizontes buena permeabilidad, presenta pendientes muy fuertes, lo que propicia que predomine el

escurrimiento superficial. Así también, el Complejo Metamórfico presenta particularidades en los alrededores de Ixtapan de la Sal, por la presencia de discontinuidades asociadas con fallas de gran extensión, que permiten la circulación de agua vertical y horizontalmente a través de él.

VI.2 CONFIGURACION DEL NIVEL ESTATICO (NE) Y LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (CE)

En este trabajo se intenta determinar las zonas de recarga, dirección de flujo y descarga del área de estudio a partir del análisis de los datos de la altura del nivel estático, obtenidos en el mes de Octubre de 1986 y de la conductividad eléctrica medida en el mes de Marzo de 1989, así como de las características hidrogeológicas de las rocas.

Los datos analizados pertenecen únicamente al Valle de Tenancingo y a la región de "El Zapote" de la zona Tonicato.

Las razones fundamentales que restringieron la aplicación de el análisis de la conductividad y del nivel piezométrico, fueron el reducido número de obras de captación que existen en la región y la menor cantidad de aprovechamientos muestreados; por lo tanto, la determinación de las aguas de recarga, dirección de flujo y zonas de descarga no se realizó en la totalidad de la región de estudio.

Aunado a lo anterior, los resultados obtenidos a partir de los datos del nivel piezométrico que aquí se discuten, se deben tomar con reserva, ya que la altura de este nivel con respecto al nivel del mar, fueron obtenidos por medio de las curvas de nivel de las cartas topográficas de DETENAL, a escala 1:50,000 y no con las nivelaciones topográficas de los aprovechamientos que se deben realizar; aunque la dirección de flujo determinada se corrobora con el análisis de la conductividad eléctrica.

Como ya se dijo, la conductividad eléctrica es directamente proporcional a la salinidad del agua subterránea, y que el agua, conforme avanza en su recorrido por el subsuelo incrementa su contenido de sales, por lo tanto, la práctica de utilizar la conductividad eléctrica como indicador de la dirección de flujo del agua, consiste en ubicar en un plano del área de estudio las obras muestreadas con sus respectivos valores de conductividad y mediante interpolación de estos, se determinan los puntos de igual valor que posteriormente se grafican con curvas.

Una vez hecho lo anterior, la dirección de flujo se marca a partir de las curvas de menor valor hacia las de mayor valor, considerando la curvatura de éstas tal y como si fueran líneas equipotenciales, es decir, las líneas que marcan la dirección de flujo serán perpendiculares a las curvas configuradas.

Es preciso tomar en cuenta para evitar determinaciones erróneas, la topografía y las características hidrogeológicas de las rocas (principalmente la permeabilidad) por las que aparece el agua.

Para comprobar la dirección del flujo determinada con la conductividad eléctrica, se aplicó el método de análisis de la elevación del nivel estático que consiste primero en el trazado de las líneas equipotenciales, o sea, líneas que nos marcan los niveles de agua sometidos a la misma presión y que equivalen a los niveles del agua de un acuífero localizados a la misma altura con respecto al nivel del mar; una vez hecho esto, se configuran las líneas de corriente o de dirección de flujo, que deben ser perpendiculares a las líneas equipotenciales.

Los dos métodos empleados, con las restricciones ya enunciadas, proporcionan resultados similares.

En el Valle de Tenancingo, el flujo procede de las porciones ESTE y SUR hacia la parte central, a partir de aquí conserva una dirección ESTE-OESTE hacia el Río Tenancingo, cuyo cauce bisecta la región de estudio en su zona central y sus aguas fluyen de NORTE a SUR de tal manera, que el agua del acuífero que no es captada es drenada por este río (figuras 6.5 y 6.6). Las curvas de igual elevación de nivel estático tienen como valor máximo 2045 msnm al oriente del valle y como mínimo 2015 msnm en las inmediaciones de la Ciudad de Tenancingo; los valores de la conductividad eléctrica son mínimos, de 150 mhos/cm en el SUR del valle y aumenta hasta 400 mhos/cm en la parte central. Cabe resaltar que la muestra P-1 posee un valor elevado de 1500 mhos/cm, lo que puede llevar a la suposición de que el agua de dicho aprovechamiento pertenece a otro sistema acuífero más profundo; esto no es posible ratificarlo con la profundidad del nivel estático, ya que no se pudo medir.

Lo anterior indica que el agua discurre a través de las rocas piroclásticas intermedias que delimitan el extremo sur del valle, así como del aluvión y en ocasiones por las andesitas de la formación Zempoala, como sucede en la parte central del valle dentro de un área reducida, donde de acuerdo a la información geofísica, el aluvión apenas alcanza 2 m de espesor y sobreyace a las rocas andesíticas.

Las áreas de recarga de este acuífero no son bien definidas, pero de acuerdo a los valores relativamente bajos de conductividad eléctrica, a la poca profundidad de los niveles estáticos de los aprovechamientos (figuras 6.5 y 6.6) y a las características hidrogeoquímicas del agua, es posible dilucidar que el agua del acuífero es de reciente infiltración y el acuífero es de tipo libre muy superficial y por lo tanto, se está recargando directamente por el agua de lluvia.

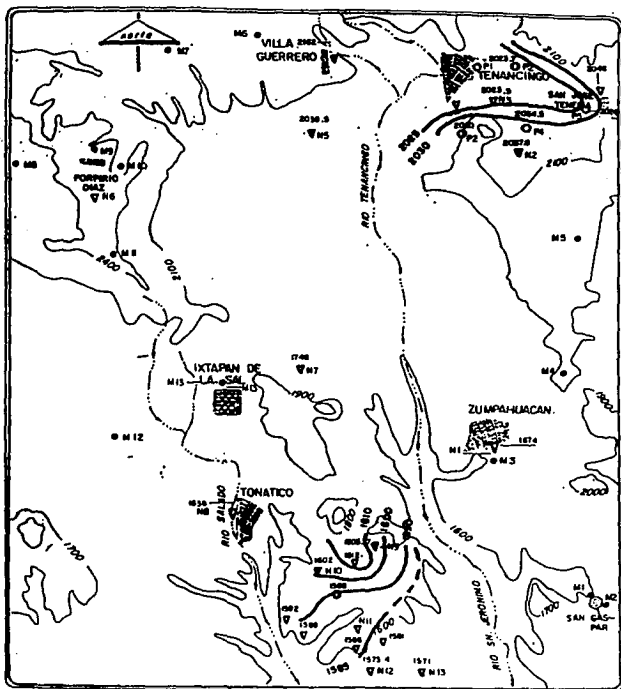
De la misma forma, la conductividad y la elevación de los niveles estáticos, nos definen el movimiento de flujo del agua de la región de "El Zapote", con una dirección hacia el SE hasta el Río Tenancingo, que en esta zona se le conoce con el nombre de Río San Jerónimo (figuras 6.5 y 6.6), es decir, el agua que no es captada es drenada por este río al ser descargada en él.

La mayor altura del nivel estático detectada es de 1610 msnm en la porción norte y la menor de 1580 msnm en la porción sur; así mismo, los valores mínimos de la conductividad eléctrica son en la porción poniente del valle y los máximos en la parte norte (figuras 6.5 y 6.6).









El agua fluye a través de la Formación Chontalcoatlán, pero contenidos altos de Ca y HCO_3 delatan que las calizas de la formación Morelos tienen contacto con ella; posiblemente en el límite norte del valle el agua que se infiltra en las rocas del Cerro Salinas sea transmitida al acuífero, así también, las calizas que bordean el límite sur del valle se consideran con una actitud similar.

El acuífero de este valle, recibe la recarga principalmente a partir de la infiltración del agua de lluvia que se precipita sobre las rocas que lo conforman (Formación Chontalcoatlán) y sobre los flancos de las calizas del Cerro Salinas en el Norte y de las partes altas de la porción Sur.

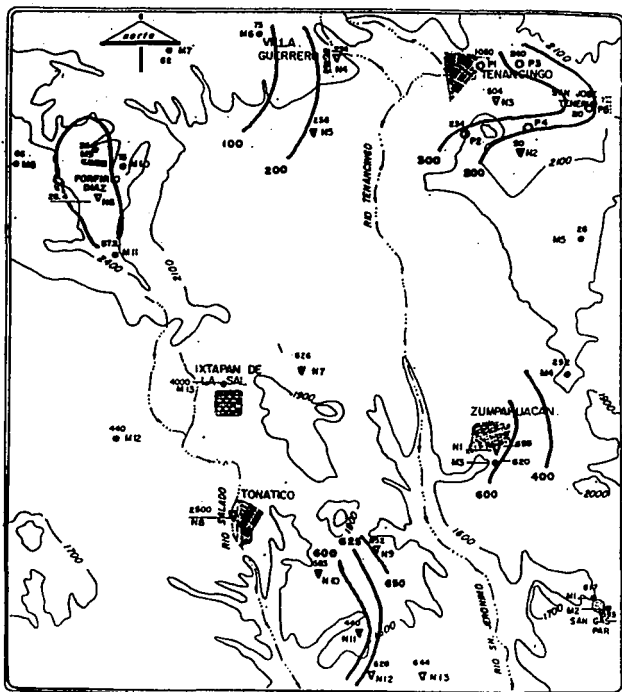
En algunas otras zonas de la región de estudio, se analizaron únicamente los datos de conductividad eléctrica debido a la carencia de datos del nivel piezométrico. Los resultados así obtenidos en la zona de Zumpahuacán y Villa Guerrero son muy generales, por ser reducido el número de fuentes medidas, pero demuestra una vez más que el uso de la conductividad es de gran ayuda en la determinación del funcionamiento de un acuífero.











SIMBOLOGIA

-  CIUDAD
-  POBLADO
-  RIO
-  CURVA DE NIVEL
-  CURVA DE IGUAL VALOR (m s n m)
-  MANANTIAL
-  NORIA
-  POZO

U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA.	
	CONFIGURACION DE ALTURA DE NIVEL ESTatico	
	TERCER PROFESIONAL JOSE ANGEL JUAN PEREZ	
	ENERO-93	Esc: 1:150000



SIMBOLOGIA

-  CIUDAD
-  POBLADO
-  RIO
-  CURVA DE NIVEL
-  CURVA DE IGUAL VALOR (PPM)
-  MANANTIAL
-  NORIA
-  P.O.Z (I)

U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA.	
	CONFIGURACION DE C.E.	
	TITUL. PROFESIONAL. JOSE ANGEL JUAN PEREZ	
	ENERO - 93	Esc: 1:150000

En la zona Zumpahuacán se infiere la determinación de las curvas de igual valor de conductividad a partir de dos manantiales y una noria; ésta última se toma en cuenta por considerarse, al igual que los manantiales, incluida en un flujo de circulación local, caracterizada así por la poca profundidad de su nivel estático y por las características geoquímicas de su agua.

Así, el flujo del agua también inferido, procede de la serranía de calizas localizadas al oriente y se desplaza en una dirección general hacia el poniente.

En la zona Villa Guerrero, al igual que la zona anterior, se determina una dirección de flujo inferida a partir de dos norias y un manantial. El movimiento del agua es a través de la formación Chontalcoatlán en una dirección Oeste-Este, hacia el Río Tenancingo.

En la misma zona anterior, en los alrededores de Porfirio Díaz, los valores de conductividad eléctrica definen una curva cerrada de 50 mhos/cm; este valor tan bajo indica que el agua del subsuelo de esta porción tiene muy poco contenido en sales y por consiguiente, se trata de un agua de reciente infiltración con un corto recorrido por el subsuelo. Además, considerando que la roca (Riolita Tilzapotla) que contiene a esta agua es de muy baja permeabilidad, de tal manera que no permite el almacenamiento de grandes volúmenes de agua, sino por el contrario, satisface en mínimas cantidades las necesidades de esa población (comunicación verbal con los habitantes), es posible establecer con seguridad que se trata de una circulación de agua muy local, cuya manifestación superficial es a través de manantiales, o bien a partir de la captación en norias que se secan después de cierta cantidad extraída en un día.

Así, tomando en cuenta la ubicación de los manantiales en los extremos de la población, se puede inferir un flujo radial a partir del centro de la mesa donde se localizan las partes más altas.

Los valores más elevados de conductividad eléctrica se obtuvieron en el manantial de Ixtapan de la Sal y en el acuífero de Tonatico, que corresponden a 3084 y 1233 mhos/cm respectivamente, por lo tanto son estas localidades las que poseen el agua más salina de la región de estudio.

VI.3 CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA

El resultado de los análisis químicos de las muestras de agua que sirven de fundamento para la caracterización hidrogeoquímica de la región, se muestra en la tabla 6.1.

CALCIO.

Es común encontrar a este elemento disuelto en el agua. Dentro de la región estudiada se considera que el calcio proviene de la disolución de los feldespatos cálcicos y cálcico-sódicos que constituyen a las rocas volcánicas y de la calcita de las rocas calcáreas.

En la figura 6.7 se muestra la configuración de este elemento, observándose en el Valle de Tenancingo que las concentraciones más bajas se localizan en las porciones sur y oriente en cantidades de 10 ppm. Su presencia se incrementa hacia el centro del valle, en cantidades de hasta 30 ppm.

En las áreas de Villa Guerrero y Tonicato en la localidad de El Zapote, donde el agua fluye a través de la Formación Chontalcoatlán se esperarían contenidos similares de calcio, sin embargo existe una gran diferencia entre ellos; el valor mínimo en el agua de Villa Guerrero es de 30 ppm y el mínimo de El Zapote es de 130 ppm. En este último sitio puede suponerse que parte del agua del acuífero de esta localidad fluye en primera instancia a través de las calizas de la porción norte y sur, de donde adquiere elevadas concentraciones de este elemento. El flujo del agua a través de las calizas involucradas en esta área se supuso en el campo, en el momento de la toma de la muestra al observarse un afloramiento de calizas, a escasos 50 m al poniente de la noria N-13, ubicada en el Rancho "Ojo de Agua" y emplazada en la Formación Chontalcoatlán.

En los manantiales de la localidad de Porfirio Díaz de la zona de Villa Guerrero, así como en la muestra M-5 del manantial de la zona de Tenancingo, se determinaron los valores más bajos de calcio (5 y 2 ppm respectivamente) en el agua, similares al contenido en el agua de lluvia y por lo tanto, se puede determinar que el agua que se precipita en estos terrenos permanece por muy corto tiempo en el subsuelo y no alcanza a disolver sales de las rocas.

Los más altos contenidos de calcio se localizan en el agua del manantial de Ixtapan de la Sal y en el acuífero de Tonicato, los cuales corresponden a 762 y 229 ppm respectivamente, en ambos casos la mayor parte de este elemento la adquiere del contacto con el travertino, ya que esta roca calcárea y altamente permeable aflora en esas localidades.

TABLA 6.1 RESULTADOS DE LOS ANALISIS FISICO-QUIMICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA

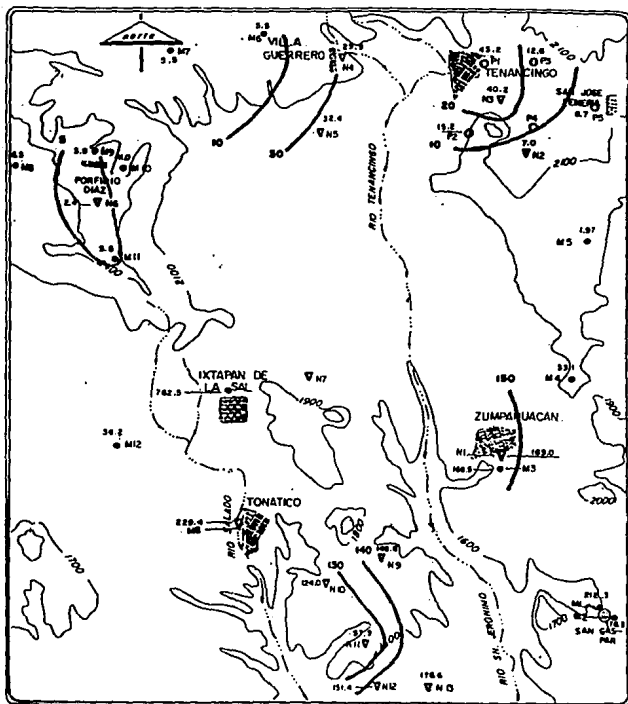
No. DE LOCALIDAD MUESTRA	FECHA DE MUESTREO	C.E. Mahos/cm	pH	DUREZA TOTAL	Ca (ppm)	
M-1	Sn. Gaspar	25-02-89	617.0	6.8	341.1	212.3
M-2	Sn. Gaspar	25-02-89	593.0	6.4	272.7	176.3
M-3	Zumpahuacán	25-02-89	620.0	5.9	178.5	168.5
M-4	S.J. Chalmita	17-10-86	252.0	6.4	110.2	33.1
M-5	El Carmen	30-10-86	28.0	5.5	11.8	2.0
M-6	Santiago Oxt.	17-10-86	75.0	5.0	31.5	5.5
M-7	Zacango	30-10-86	62.0	5.5	27.6	5.5
M-8	Coatepec	16-10-86	66.0	5.0	33.5	6.3
M-9	Porfirio Díaz	14-10-86	26.4	4.0	15.6	3.9
M-10	Porfirio Díaz	14-10-86	75.0	5.5	39.4	11.0
M-11	Plan S Miguel	15-10-86	57.2	5.0	25.6	5.5
M-12	El Refugio	16-10-86	440.0	7.5	204.7	36.2
M-13	Ixtapan Sal	26-02-89	3084.0	8.0	1285.0	762.5
N-1	Zumpahuacán	25-02-89	658.0	6.6	380.8	169.0
N-2	Ixpuchiapan	25-02-89	50.0	5.4	35.7	7.0
N-3	Cieneguilla	21-10-86	504.0	6.0	188.9	40.2
N-4	V. Guerrero	26-02-89	234.0	5.5	123.8	29.9
N-5	Buenavista	26-02-89	236.0	5.7	157.1	32.4
N-6	Porfirio Díaz	15-10-86	26.4	5.0	11.8	2.4
N-7	S. D. Alcalá	26-02-89	826.0	7.0	595.0	120.0
N-8	Tonatico	26-02-89	1233.0	7.2	499.0	229.4
N-9	S. Bartolo	26-02-89	652.0	6.4	392.7	146.6
N-10	El Terrero	26-02-89	583.0	6.2	241.6	124.0
N-11	El Zapote	15-10-86	440.0	7.0	204.7	57.9
N-12	Desv. G. Est.	26-02-89	628.0	7.0	202.3	151.4
N-13	R. Ojo Agua	26-02-89	644.0	6.2	321.3	176.6
P-1	Tenancingo	21-10-86	1050.0	6.5	324.7	43.2
P-2	Quetzalapa	25-02-89	234.0	6.6	138.0	15.0
P-3	Rancho Vergel	25-02-89	240.0	6.4	114.2	12.6
P-4	Tampacán	22-10-86	1050.0	6.4	134.4	27.4
P-5	S. J. Tenería	23-10-86	210.0	6.5	53.1	8.7

TABLA 6.1
(Continuación)

No. DE MUESTRA	Mg (ppm)	Na (ppm)	K (ppm)	Li (ppm)	H₂CO₃ (ppm)
M-1	11.6	8.5	5.4	0.9	324.1
M-2	5.8	7.0	3.0	0.6	298.0
M-3	23.2	9.5	1.7	0.3	248.4
M-4	6.7	9.9	2.9	4.6	194.0
M-5	1.7	1.6	0.5	0.2	14.3
M-6	4.3	5.8	0.6	1.3	57.7
M-7	3.4	4.0	1.1	0.1	41.8
M-8	4.3	3.9	0.3	0.7	38.5
M-9	1.5	1.6	0.1	0.4	24.5
M-10	2.9	2.1	1.0	2.1	61.5
M-11	2.9	2.3	10.4	1.1	26.0
M-12	27.8	19.7	0.1	2.1	223.0
M-13	107.0	1310.0	153.4	15.4	1359.0
N-1	34.7	11.0	0.9	0.8	235.5
N-2	2.0	3.5	0.9	0.3	24.4
N-3	21.5	30.0	1.5	4.4	142.0
N-4	18.0	10.2	2.4	1.1	50.3
N-5	19.1	11.0	3.2	0.3	80.6
N-6	1.4	3.2	0.8	1.9	38.5
N-7	89.7	36.5	7.6	0.8	317.2
N-8	23.2	327.0	30.6	3.3	480.6
N-9	40.5	12.0	2.6	0.7	268.6
N-10	21.1	19.5	2.6	0.5	288.9
N-11	14.6	14.5	2.2	4.1	311.0
N-12	11.6	8.0	1.3	0.8	399.1
N-13	11.6	4.0	1.8	0.9	192.2
P-1	52.7	126.0	8.3	14.4	826.0
P-2	22.6	10.0	3.2	0.4	105.0
P-3	20.9	10.0	3.3	0.3	108.0
P-4	15.8	18.9	1.8	3.3	211.0
P-5	7.7	19.5	1.0	10.2	212.0

TABLA 6.1
(Continuación)

NO. DE MUESTRA	SO4 (ppm)	Cl (ppm)	NO3 (ppm)	Fe (ppm)
M-1	16.2	14.2	3.9	---
M-2	0.8	0.5	0.5	---
M-3	24.5	8.7	24.9	---
M-4	4.4	4.8	7.5	---
M-5	1.0	3.5	1.5	---
M-6	6.6	2.4	0.4	---
M-7	1.0	3.7	0.4	---
M-8	5.1	3.1	11.1	---
M-9	0.7	0.3	0.1	---
M-10	1.3	0.3	8.0	---
M-11	0.7	3.9	17.7	---
M-12	53.6	10.8	41.6	---
M-13	896.0	2159.0	0.1	---
N-1	46.0	12.7	47.4	---
N-2	4.1	0.5	4.7	---
N-3	28.2	31.8	151.0	---
N-4	5.4	9.4	45.8	---
N-5	22.4	7.4	0.3	---
N-6	2.2	0.3	0.4	---
N-7	51.2	57.1	0.1	---
N-8	196.3	458.9	53.6	---
N-9	6.5	1.2	17.0	---
N-10	7.2	1.1	8.6	---
N-11	2.6	1.2	14.2	---
N-12	13.9	11.8	45.0	---
N-13	5.8	0.8	4.2	---
P-1	1.2	60.6	0.4	0.4
P-2	0.9	2.7	1.5	---
P-3	1.7	3.0	2.2	---
P-4	8.0	15.6	6.4	2.1
P-5	3.1	0.2	4.8	---



SIMBOLOGIA

- CIUDAD
- POBLADO
- RIO
- CURVA DE NIVEL
- CURVA DE IGUAL VALOR (PPM)
- MANANTIAL
- NORIA
- POZO

U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA.
	CONFIGURACION DE CALCIO
	TESIS PROFESIONAL JOSE ANSEL JUAN PEREZ
	EMERO-93 Esc: 1:150000 Fig. 6.7

MAGNESIO.

Las rocas volcánicas como los basaltos y andesitas, están constituidas por minerales ferromagnesianos entre los que se encuentran los piroxenos y anfíboles. Esta es la principal fuente de magnesio en el área de estudio, además de la disolución de otros minerales como la biotita y la dolomita contenidos en una gran parte de las rocas de la región. La configuración de este elemento se observa en la figura 6.8.

En el Valle de Tenancingo, los valores más bajos se localizan en sus porciones sur y oriente, hacia las estribaciones de las elevaciones topográficas. Los valores se incrementan hacia la porción central. Las rocas que aportan el magnesio son los productos piroclásticos intermedios y basálticos que afloran en la parte sur de esta localidad, así como la Andesita Zempoala que tiene contacto con el agua subterránea en la porción central, donde se registran las mayores cantidades y en la parte nororiental donde aflora esta roca.

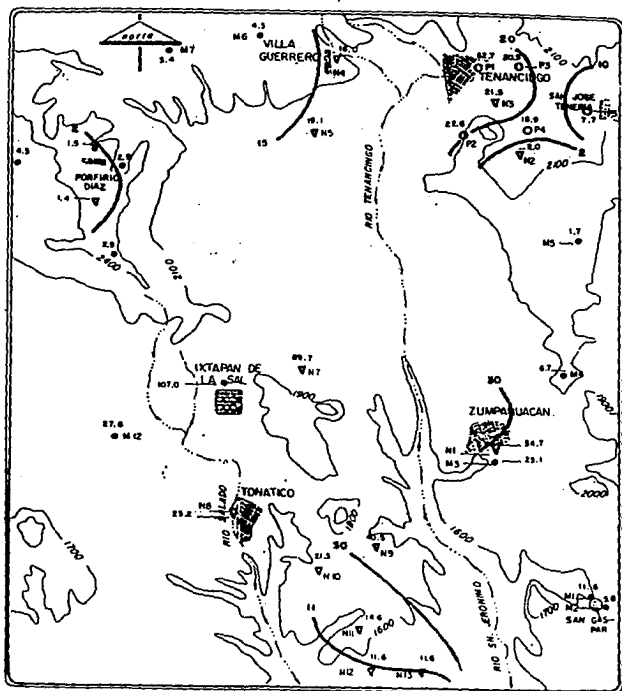
Asimismo, en las zonas de Villa Guerrero y El Zapote, Tonatico, el enriquecimiento de magnesio es de acuerdo al flujo subterráneo, cuya recarga principal en la primera zona nos indica que sucede hacia las elevaciones topográficas de las porciones norte y norponiente.

Los valores más bajos de la región estudiada ocurren en la localidad de Porfirio Díaz, Villa Guerrero y en la muestra M-5 de la zona Tenancingo, ratificando para ambas porciones un flujo de agua muy local.









Las cantidades más altas para este elemento se detectaron en la zona de Ixtapan de la Sal, tanto en el manantial termal (107 ppm), como en la muestra N-7 de San Diego Alcalá (89 ppm). En esta localidad, el índice hidrogeoquímico Mg/Ca aplicado, nos denota la presencia de rocas dolomíticas que proporcionan tal cantidad de magnesio.

SODIO.

El sodio junto con el calcio y el magnesio, corresponden a los principales cationes encontrados en la naturaleza. En la región de trabajo, el sodio proviene de la disolución de los minerales que forman a las rocas volcánicas, principalmente de la andesina, así como de los minerales de las fracciones arcillosas que forman a las rocas de origen volcánico.



SIMBOLOGIA

-  CIUDAD
-  POBLADO
-  RIO
-  CURVA DE NIVEL
-  CURVA DE IGUAL VALOR (PPM)
-  MANANTIAL
-  NORIA.
-  POZO

U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA
	CONFIGURACION DE MAGNESIO
	TESIS PROFESIONAL JOSE ANGEL JUAN PEREZ
	ENERO-93 Esc: 1:150000 Fig. 6.8

En la figura 6.9 se muestra la configuración de este elemento.

En el Valle de Tenancingo, el contenido de sodio en el agua aumenta desde las porciones sur y noreste hacia el centro del valle; muestra un comportamiento casi similar al enriquecimiento salino general, es decir, de acuerdo a las direcciones de flujo del agua. El valor más bajo en esta localidad es de 5 ppm en las inmediaciones del límite sur del valle. Igual comportamiento tiene el sodio en el agua de Villa Guerrero y de "El Zapote", Tonicato, cuyos valores mínimos determinados son 10 y 15 ppm respectivamente.

Los bajos valores de este elemento, parecidos al intervalo que contiene el agua de lluvia (0.1-3 ppm), nos indican que el agua de toda la región de estudio muestreada, es de reciente infiltración a partir de la precipitación; sobre todo en la localidad de Porfirio Díaz, Villa Guerrero, donde el contenido alcanza como máximo 3 ppm.

Los contenidos más elevados detectados se tienen en el agua del manantial de Ixtapan de la Sal (1310 ppm) y en el acuífero de Tonicato (327 ppm). En el primer caso se trata de un agua termal que no procede del agua de lluvia, sino que posiblemente pertenece a un sistema geotérmico que será visto en páginas posteriores; en el segundo caso, el alto contenido de sodio obedece a que parte del origen del agua de este acuífero proviene del manantial de Ixtapan, a través de un acueducto hasta un pequeño "bordo" localizado en la parte norte de Tonicato, donde es referida o almacenada para su distribución por tubería como agua potable (información verbal de habitantes de Tonicato); es de suponer que esta agua tenga algún proceso de filtrado, el cual se cree es deficiente. Ahora bien, considerando la alta permeabilidad del travertino, la infiltración del agua retenida en superficie es con relativa facilidad, mezclándose con el agua del acuífero y el agua meteórica, la cual ayuda a disminuir la salinidad.

POTASIO.

El potasio en la región estudiada ocurre en bajas cantidades; las menores cuantías de 0.1 ppm se detectan en el manantial M-9 de Porfirio Díaz y en el manantial M-5 de la zona de Tenancingo, y puesto que el agua de la fuente de estas localidades se ha considerado de muy reciente infiltración, es decir, con contenido químico similar al agua de lluvia, se puede determinar entonces que el contenido de potasio, así como de todos los iones analizados en estas dos muestras, es equivalente al disuelto en el agua meteórica.

Como se hizo mención en el Capítulo III, el potasio y el sodio se ven afectados por un intercambio iónico entre el terreno principalmente arcilloso y el agua, reduciendo su contenido en este líquido, pero no obstante que la mayoría de las rocas por las que fluye el agua presentan fracciones arcillosas, el fenómeno de cambio de bases o intercambio iónico se detectó únicamente en tres muestras; por el contrario, la presencia del potasio en el agua se incrementa conforme al flujo, aunque en pequeñas cantidades (figura 6.10).

Las muestras que indican la presencia de un intercambio de bases son la M-10, P-2 y la M-5 en menor intensidad. Este fenómeno se verifica en mayor grado en las fracciones arcillosas de la Riolita Tilzapotla (M-10), donde el potasio y sodio principalmente están siendo incluidos en la estructura del terreno y éste a su vez proporciona iones magnesio y calcio.

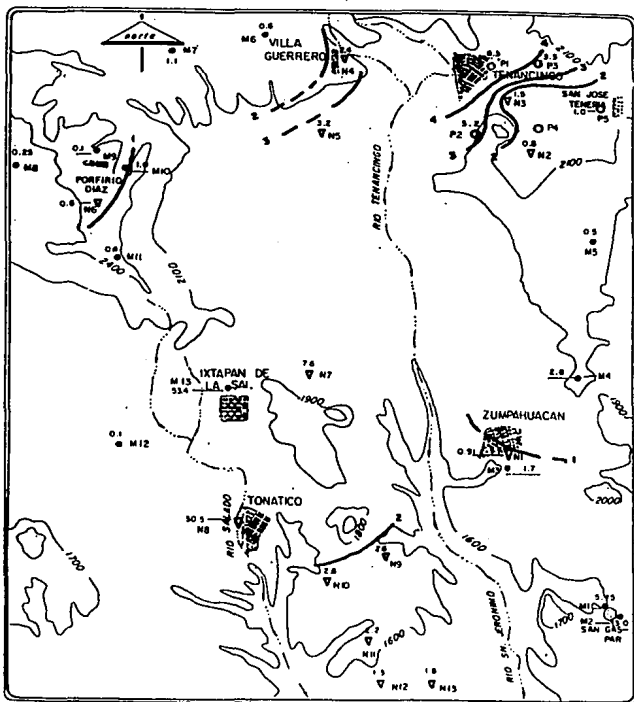
Los valores más altos se registran en el manantial de Ixtapan (153 ppm) y en Tonatico (30 ppm).

CLORUROS.









Este ion es un índice establecido del flujo subterráneo, por lo que utilizándose como tal, ratifica una vez más la dirección de éste en todas las zonas de la región estudiada (figura 6.11).

En el Valle de Tenancingo los valores más bajos corresponden al agua de las obras N-2 (0.52 ppm) y P-5 (0.5 ppm) al sur y oriente respectivamente, ratifican que dichas regiones están cercanas a zonas de recarga. El contenido de cloro de la muestra P-1 (60 ppm) se diferencia por mucho de los del resto de las muestras de esta zona, confirmando que esta agua pertenece a otro sistema acuífero más profundo. En la localidad de Porfirio Díaz, Villa Guerrero, se define una curva cerrada en la configuración de este elemento, con el valor más bajo de la región (0.25 ppm).

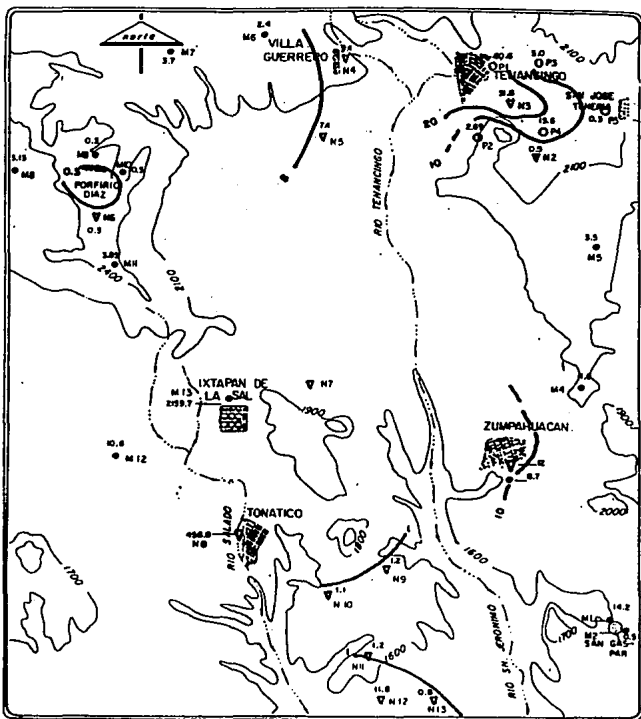
El valor extremadamente alto se registra en el manantial de Ixtapan con 2159 ppm; esta agua, como ya se mencionó, no es de origen meteórico. Otro valor elevado de cloro se localiza en el acuífero de Tonatico (459 ppm), cuya presencia en esta cantidad obedece al contacto del agua con el travertino y a la supuesta mezcla de esta agua con la procedente del manantial de Ixtapan, o también cierta proporción puede ser aportada por las aguas residuales que se cree se infiltran a partir de fugas en la red de drenaje (ver nitratos).











SIMBOLOGIA

-  CIUDAD
-  POBLADO
-  RIO
-  CURVA DE NIVEL
-  CURVA DE IGUAL VALDR (PPM)
-  MANANTIAL
-  NORIA
-  POZO

U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA.
	CONFIGURACION DE POTASIO
	TESIS PROFESIONAL JOSE ANGEL JUAN PEREZ
	ENERO -93 Esc: 1:150000 Fig.6.10



SIMBOLOGIA

-  CIUDAD
-  POBLADO
-  RIO
-  CURVA DE NIVEL
-  CURVA DE IGUAL VALOR (PPM)
-  MANANTIAL
-  NORIA
-  POTO

U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA.
	CONFIGURACION DE CLORO
	TESIS PROFESIONAL JOSE ANGEL JUAN PEREZ
	ENERO-93 Esc: 1:50000 Fig. 6.11

BICARBONATOS.

A diferencia del resto de los iones analizados, los cuales provienen principalmente de la disolución de las rocas, el bicarbonato es una consecuencia de reacciones químicas producidas, como ya se dijo, por la interacción entre el agua, gases y rocas.

Otras fuentes de bicarbonato, que ocurren también en la región estudiada, corresponden a la disolución de los minerales de las rocas ígneas, principalmente las plagioclasas y micas.

En el Valle de Tenancingo el valor más bajo ocurre en el agua de la noria N-2 (24 ppm) ubicada en un área de recarga, o bien en las estribaciones de ella. La cantidad más alta corresponde al agua de la obra P-1 con 826 ppm, caracterizada ya por los iones anteriores como perteneciente a un acuífero más profundo.

En toda la región estudiada, el contenido de bicarbonatos aumenta conforme avanza el flujo (figura 6.12).

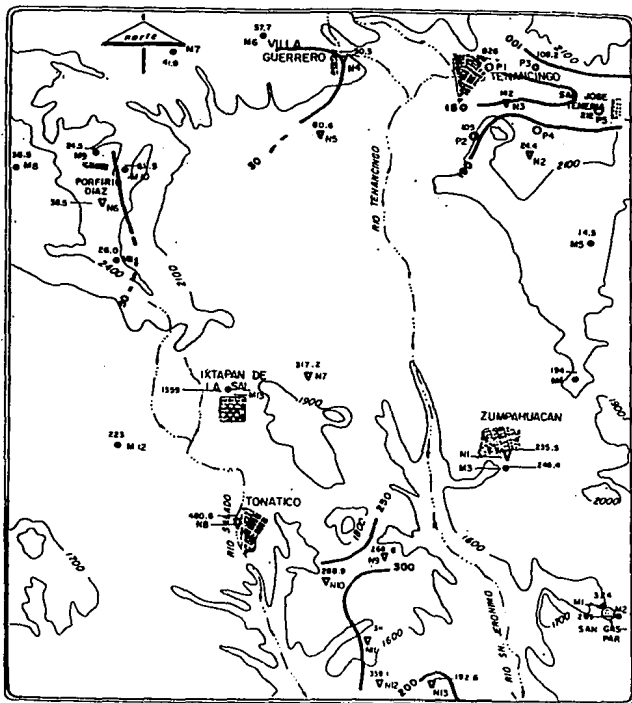
En la zona de El Zapote, Tonatico, la configuración de bicarbonatos revela que la recarga procede de tres áreas principalmente, del cerro situado al sur poniente del poblado El Zapote, del cerro ubicado frente al Rancho "Ojo de Agua" y del Cerro Salinas localizado al norte de esta zona.

NITRATOS.

La presencia de este ion en las aguas subterráneas procede de la descomposición de materia orgánica o de la contaminación de origen industrial.

La cantidad de nitratos en el agua de la región es en promedio de 12 ppm, aunque se detectaron valores excesivos de hasta 151 ppm en la N-3, ubicada en las cercanías de Tenancingo y otras cantidades que fluctúan entre los 25 y 45 ppm en las zonas de Zumpahuacán, Tonatico y Villa Guerrero, posiblemente asociadas a contaminación orgánica.

Existen valores menores a 1 ppm, localizados en las muestras de agua consideradas de muy reciente infiltración, tales como las recabadas en las localidades de Porfirio Díaz, El Carmen y Santiago Oxtotitlán.



SIMBOLOGIA

- CIUDAD
- POBLADO
- RIO
- CURVA DE NIVEL
- CURVA DE IGUAL VALOR (PPM)
- MANANTIAL
- NORIA
- POZO

U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA.
	CONFIGURACION DE BICARBONATOS
	TESIS PROFESIONAL JOSE ANGEL JUAN PEREZ
	ENERO-93 Esc: 1:150000 Fig. 6.12

SULFATOS.

Este anión está distribuido en el agua subterránea de la región en un promedio de 47 ppm, con valores mínimos menores a 1 ppm, presentes en los aprovechamientos que se localizan en las partes topográficamente altas, tales como Porfirio Díaz, El Carmen y Zacango, y valores máximos de 196 y 896 ppm en Tonicato y el manantial de Ixtapan respectivamente (figura 6.13).

Los valores intermedios se encuentran distribuidos en el resto de la región y van desde 2 hasta 50 ppm.

VI.4 FAMILIAS DE AGUA

Las familias de agua que caracterizan el área de estudio fueron determinadas a partir de la representación gráfica de los análisis químicos en el Diagrama de Piper (figuras 6.14.1, 6.14.2, 6.14.3, 6.14.4 y 6.14.5).

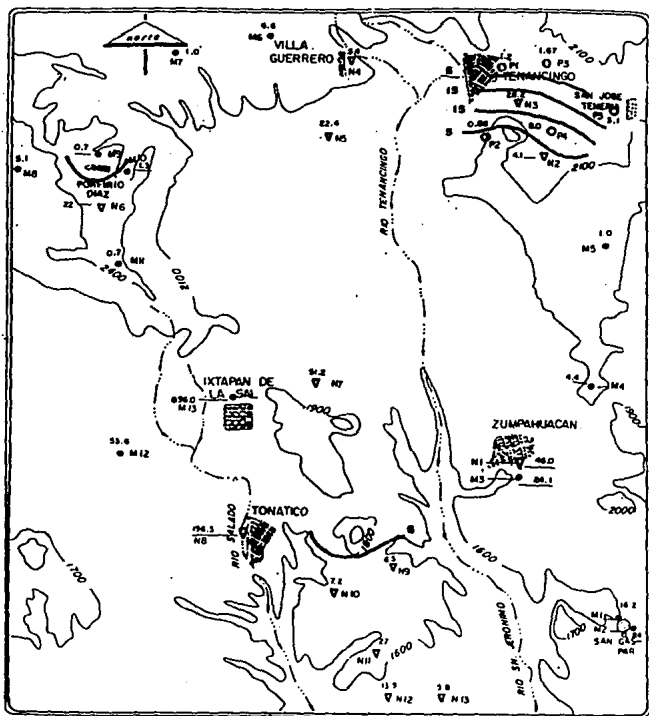
Con respecto al contenido de aniones, la mayoría de las aguas pertenecen a la familia bicarbonatada, a excepción del manantial de Ixtapan de la Sal y del acuífero de Tonicato, que son aguas cloruradas.

La distribución de las familias de agua en el área tiene relación directa con la litología que atraviesa y con los fenómenos geoquímicos mencionados en el capítulo IV, producto de la relación agua-roca. La distribución es la siguiente:

Zona Zumpahuacán.

M-1	bicarbonatada cálcica	San Gaspar
M-2	bicarbonatada cálcica	San Gaspar
M-3	bicarbonatada cálcica	Zumpahuacán
M-4	bicarbonatada cálcica	San José Chalmita
N-1	bicarbonatada cálcica	Zumpahuacán

Como se observa, todas las aguas muestreadas en esta zona pertenecen a la familia bicarbonatada cálcica, que suele ser característica de aguas que discurren en calizas. Aún cuando las fuentes muestreadas están ubicadas en las Formaciones Tepoztlán (M-1, M-2 y M-4) y Chontalcoatlán (M-3 y N-1), el agua fluye inicialmente por las fracturas de las rocas carbonatadas de la Formación Morelos, que aflora muy cerca de donde adquiere gran parte de su composición química;

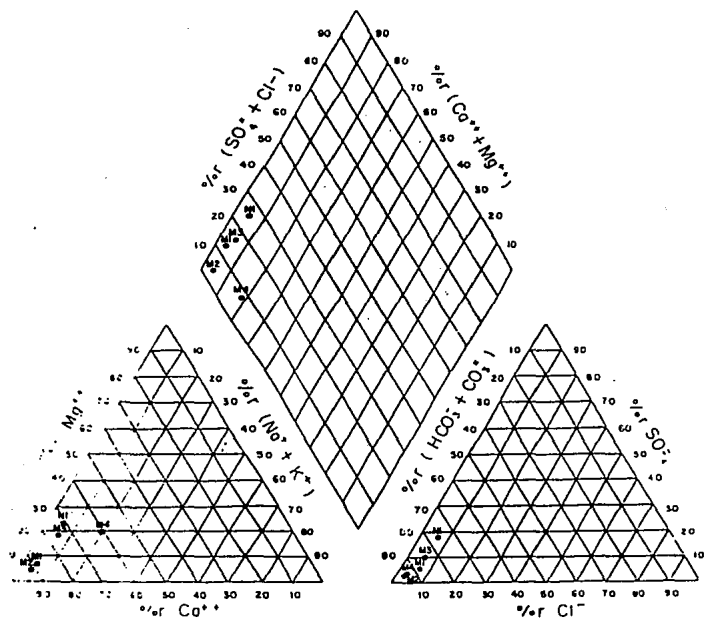


SIMBOLOGIA

- | | |
|--|----------------------------|
| | CIUDAD |
| | POBLADO |
| | RIO |
| | CURVA DE NIVEL |
| | CURVA DE IGUAL VALDR (PPM) |
| | MANANTIAL |
| | NORIA |
| | POZO |

U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA.
	CONFIGURACION DE SULFATOS
	TESIS PROFESIONAL JOSE ANGEL JUAN PEREZ
	ENERO -93 Esc: 1:150 000 Fig 6.13

DIAGRAMA DE PIPER



...PORCENTAJE DE MILIEQUIVALENTES

FIGURA No. 6.14.1 FAMILIAS DE AGUA ZONA ZUMPAHUACAN

al encontrar horizontes semipermeables e impermeables y estructuras como son las fracturas continuas hacia la superficie, el agua que se encuentra en esta situación desvía su dirección hacia la superficie manifestándose como manantiales de composición bicarbonatada cálcica. La misma composición del agua en la noria de Zumpahuacán confirma la dirección general de flujo de oriente a poniente, es decir, proveniente de las calizas.

Zona Tenancingo.

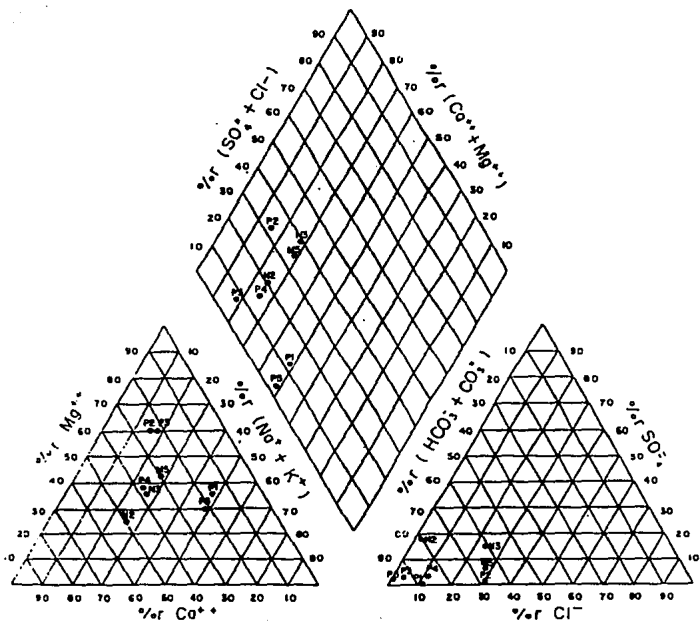
N-2	bicarbonatada cálcica	Ixpuchiapan
N-3	bicarbonatada cálcica-magnésica	Cieneguilla
P-1	bicarbonatada sódica-magnésica	Tenancingo
P-2	bicarbonatada magnésica	Quetzalapa
P-3	bicarbonatada magnésica	Rancho Vergel
P-4	bicarbonatada cálcica-magnésica	Tenancingo
P-5	bicarbonatada sódica-magnésica	San José
M-5	bicarbonatada magnésica-cálcica	El Carmen

La composición de la muestra N-2 difiere de las otras; tomando en cuenta su valor bajo de conductividad eléctrica (50 mhos/cm), es posible que esta agua sea de reciente infiltración procedente del agua de lluvia y ésta a su vez pertenezca a la familia bicarbonatada cálcica.

Las muestras M-5, N-3, P-2, P-3 y P-4 pertenecen a las familias bicarbonatada cálcica-magnésica y bicarbonatada magnésica. El contenido en magnesio obedece a que posiblemente el agua atraviese horizontes de rocas volcánicas o bien se verifique un intercambio iónico. Lo primero se corrobora al analizar las características de las obras y comparar las profundidades de los niveles estáticos con la información del subsuelo obtenida por geofísica, demostrando que los horizontes de roca volcánica supuestos, pertenecen a la Formación Andesita Zempoala para las muestras P-3, P-4 y N-3, al paquete Piroclástico Intermedio la muestra P-2 y a la Formación Tepoztlán la muestra M-5; la comprobación de estos resultados se realiza con la aplicación de el índice hidrogeoquímico rMg/rCa , que como ya se mencionó, nos indica si el agua discurre sobre rocas volcánicas o dolomíticas cuando su valor es igual o mayor que uno, siendo las muestras M-5, P-1, P-2, P-3 y P-5 las que rebasan la unidad y la muestra P-4 la que casi alcanza ese valor (0.95) (tabla 6.2).

El índice de cambio de bases (icb) se hace verificativo en el agua de las muestras P-2 y M-5 (tabla 6.2); como ya se discutió en el Capítulo IV, el icb nos indica que existe un intercambio entre el Ca y el Mg del terreno por el Na y el K del agua en la zona de aereación del terreno cuando su valor es positivo.

DIAGRAMA DE PIPER



$\%r$: PORCENTAJE DE MILIEQUIVALENTES

FIGURA No. 6.14:2 FAMILIAS DE AGUA ZONA TENANCINGO

Las muestras P-1 y P-5 pertenecen a la familia bicarbonatada sódica-magnésica; el contenido alto en sodio se debe tal vez, a que el agua atraviesa por pequeños horizontes de rocas con concentraciones altas en ese elemento; así lo evidencia el índice de desequilibrio (idd), que nos indica que existe durante la infiltración el intercambio del Ca y Mg del agua por el Na del terreno (recordemos que el idd es el índice contrario al icb, tal como se vio en el Capítulo IV), ya que los valores de este índice son altos en relación con las muestras de toda la región (P-1 = -0.29 y P-2 = -0.27), aunque como ya se dijo, la composición del agua del P-5 se debe tomar con reservas por sus características constructivas.

Zona Villa Guerrero.

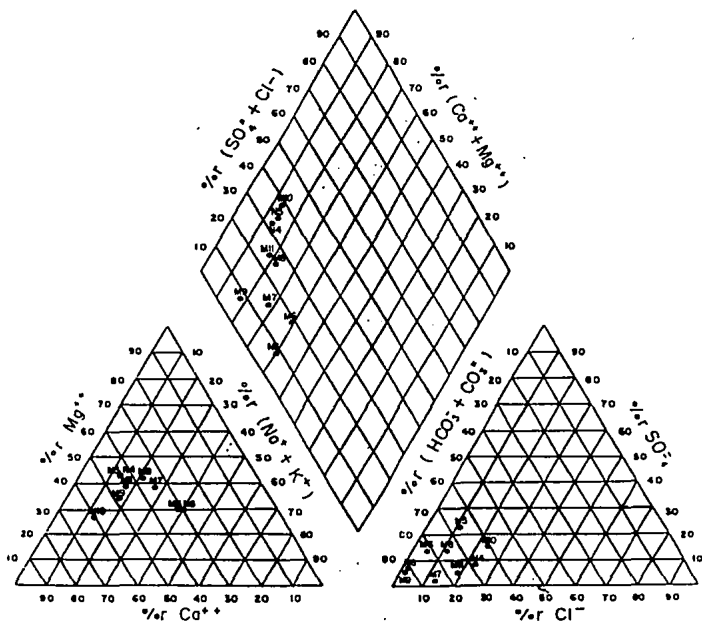
M-6	bicarbonatada magnésica-cálcica	Santiago Oxt.
M-7	bicarbonatada magnésica-cálcica	Zacango
M-8	bicarbonatada magnésica-cálcica	Coatepec
M-9	bicarbonatada cálcica-magnésica	Porfirio Díaz
M-10	bicarbonatada cálcica	Porfirio Díaz
M-11	bicarbonatada magnésica-cálcica	P. Sn. Miguel
N-4	bicarbonatada cálcica-magnésica	Villa Guerrero
N-5	bicarbonatada cálcica-magnésica	Buenavista
N-6	bicarbonatada sódica-cálcica	Porfirio Díaz

Las muestras M-6, M-7, M-8 y M-11 de esta zona pertenecen a la familia bicarbonatada magnésica-cálcica. La relación hidrogeoquímica rMg/rCa revela que el agua de las muestras M-6 y M-7 atraviesan horizontes de rocas ígneas de la Formación Chontalcoatlán; de igual manera, la relación rMg/rCa de las muestras M-8 y M-11 demuestra que la composición química de ellas está influenciada por las rocas volcánicas riolíticas de la Formación Tilzapotla.

El agua de las muestras M-9, N-4 y N-5 que pertenecen a la familia bicarbonatada cálcica-magnésica fluyen igual que las anteriores, entre las rocas ígneas de la formación Tilzapotla la primera de ellas y entre los componentes ígneos de la Formación Chontalcoatlán las restantes, aun cuando el ion calcio predomine sobre el ion magnesio.

La mayor cuantía del sodio en la muestra N-6 se debe posiblemente a un intercambio iónico entre el Ca del agua por el Na del terreno; el índice de desequilibrio (idd) así lo demuestra (tabla 6.2).

DIAGRAMA DE PIPER



%r : PORCENTAJE DE MILIEQUIVALENTES

FIGURA No. 6.14.3 FAMILIAS DE AGUA ZONA GUERRERO

TABLA 6.2 INDICES HIDROGEOQUIMICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA

No. DE MUESTRA	Mg/Ca	INDICE SAR	i.c.b.	i.d.d.	rCl/rHCO ₃	
M-1	0.09	0.21	---	---	-0.02	0.07
M-2	0.05	0.18	---	---	-0.04	0.04
M-3	0.23	0.20	---	---	-0.04	0.06
M-4	0.33	0.48	---	---	-0.11	0.04
M-5	1.38	0.25	0.11	---	---	0.41
M-6	1.28	0.48	---	---	-0.18	0.07
M-7	1.01	0.38	---	---	-0.14	0.15
M-8	1.12	0.30	---	---	-0.10	0.14
M-9	0.68	0.16	---	---	-0.14	0.02
M-10	0.43	0.19	0.87	---	---	0.38
M-11	0.85	0.22	---	---	---	0.25
M-12	1.26	0.60	---	---	-0.10	0.08
M-13	0.23	13.39	---	---	-0.10	2.69
N-1	0.34	0.21	---	---	-0.02	0.09
N-2	0.48	0.34	---	---	-0.29	0.02
N-3	0.88	0.98	---	---	-0.08	0.38
N-4	0.99	0.41	---	---	-0.15	0.31
N-5	0.98	0.44	---	---	-0.19	0.16
N-6	1.00	0.47	---	---	-0.22	0.01
N-7	1.24	0.69	---	---	-0.03	0.30
N-8	0.17	5.80	---	---	-0.16	1.62
N-9	0.46	0.26	---	---	-0.11	0.01
N-10	0.28	0.46	---	---	-0.17	0.01
N-11	0.41	0.48	---	---	-0.12	0.01
N-12	0.13	0.19	---	---	-0.01	0.06
N-13	0.11	0.10	---	---	-0.06	0.01
P-1	2.00	3.16	---	---	-0.29	0.13
P-2	2.49	0.45	0.32	---	---	0.43
P-3	2.73	0.48	---	---	-0.23	0.04
P-4	0.95	0.75	---	---	-0.12	0.13
P-5	1.45	1.37	---	---	-0.27	---

La muestra M-10 pertenece a la familia bicarbonatada cálcica, que como ya se dijo anteriormente es el tipo de agua al que corresponde el agua de lluvia de la región; por lo tanto, se deduce que el agua de esta muestra, de reciente infiltración igual que todas las anteriores de esta zona, no ha reaccionado lo suficiente con el terreno.

Zona Ixtapan de la Sal.

M-12	bicarbonatada magnésica-cálcica	El refugio
M-13	clorurada sódica	Ixt de la Sal
N-7	bicarbonatada magnésica-cálcica	Sn D Alcalá

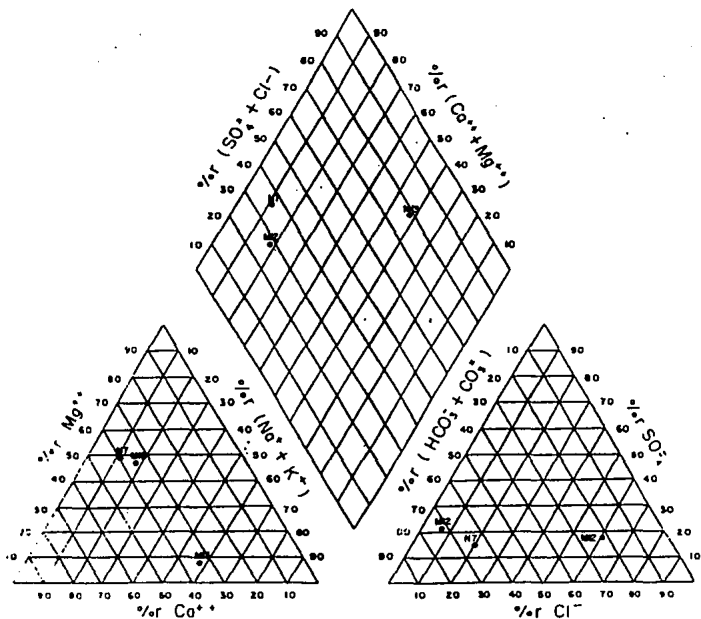
Las muestras M-12 y N-7 pertenecen a la familia bicarbonatada magnésica-cálcica, tales muestras fueron obtenidas en las rocas más antiguas de la región, formaciones Complejo Metamórfico y Acuitlapán, respectivamente. Como ya se sabe, el Complejo Metamórfico está compuesto por metalavas y metatobas, por lo que el índice rMg/rCa del agua es mayor que uno; asimismo, la muestra colectada en la Formación Acuitlapán tiene su índice rMg/rCa mayor que la unidad debido a que esta roca tiene entre su composición a dolomías, con las cuales el agua está en contacto proporcionándole el ion magnesio.

La muestra M-13 del manantial termal de Ixtapan de la Sal es de tipo clorurada sódica. Como se observa, esta agua corresponde a una familia completamente disímil a la que caracteriza la región (tipo bicarbonatada), y por lo tanto, su origen también es diferente, es decir, el agua de la muestra M-13 no procede del agua de lluvia o cuando menos no en su totalidad, sino que las cuantías elevadas de cloro y sodio evidencian que el agua tiene su posible origen relacionado con el foco emisor del termalismo en el subsuelo, o bien, que dicha agua pertenezca a aguas marinas fósiles atrapadas a profundidad, ya que la familia clorurada sódica es típica del agua de mar. El origen del agua de este manantial será discutido más adelante.

Zona Tonatico.

N-8	clorurada sódica
N-9	bicarbonatada cálcica
N-10	bicarbonatada cálcica
N-11	bicarbonatada cálcica
N-12	bicarbonatada cálcica
N-13	bicarbonatada cálcica

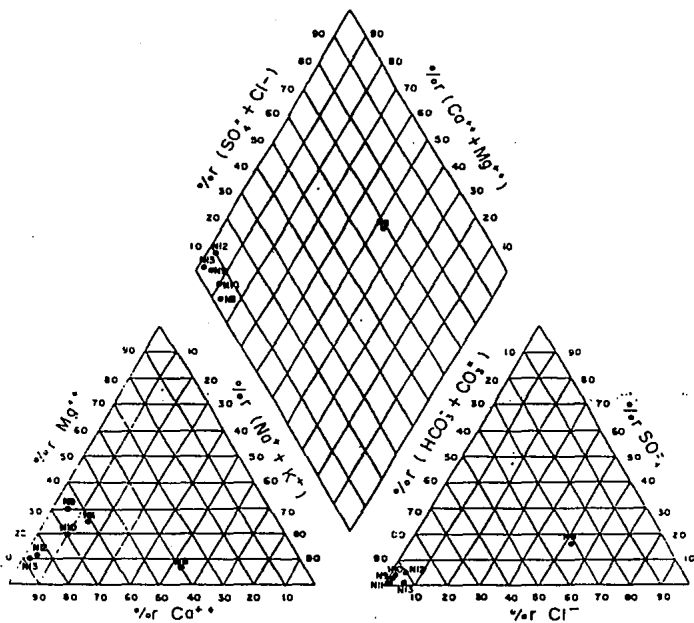
DIAGRAMA DE PIPER



%r = PORCENTAJE DE MILIEQUIVALENTES

FIGURA No. 6.14.4 FAMILIAS DE AGUA ZONA IXTAPAN DE LA SAL

DIAGRAMA DE PIPER



%: PORCENTAJE DE MILIEQUIVALENTES

FIGURA No. 6.14.5 FAMILIAS DE AGUA ZONA TONATICO

La familia bicarbonatada cálcica que caracteriza a las muestras N-9, N-10, N-11, N-12 y N-13, demuestra que las rocas calcáreas de la formación Morelos que rodean a esta porción de la zona, tiene influencia directa sobre el agua subterránea, aún cuando el acuífero está contenido en la formación Chontalcoatlán, las elevadas cantidades del bicarbonato y calcio sobre los demás iones, indican que el agua de este acuífero proviene tanto del agua infiltrada en los pequeños cerros de calizas, como del agua de lluvia considerada para toda la región, como se mencionó anteriormente, de la familia bicarbonatada cálcica, ya que es posible que recargue directamente al acuífero por la posición topográfica y las características hidrogeológicas de la formación que lo contiene.

El agua de la muestra N-8 es similar en su tipo y por tanto en su composición al agua del manantial termal de Ixtapan de la Sal.

Se podría considerar, de acuerdo a la posición topográfica y a la excesiva permeabilidad de la roca (travertino) que contiene al acuífero, que el agua de éste es de procedencia meteórica, pero la familia a la que pertenece nos indica un origen diferente, de ahí que según el parecido con el agua de Ixtapan de la Sal se suponga proceda de esta localidad.

Al comparar las cantidades de los iones analizados del agua en cuestión con las del agua de Ixtapan, y darnos cuenta que las primeras superan a las segundas en proporción de 4:1, se deduce que el agua del acuífero de Tonatico es una mezcla formada por el agua de lluvia y la del manantial termal, es decir, es producto de la dilución entre éstas dos.

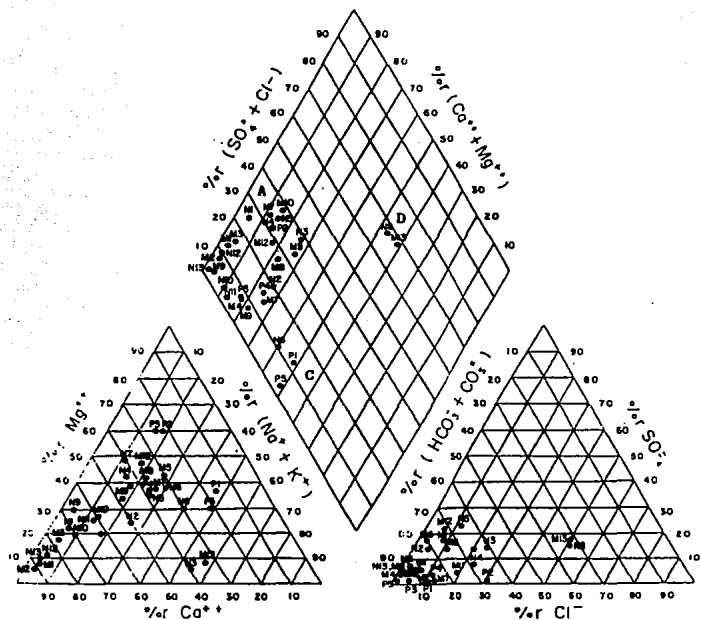
VI.4.1 INTERPRETACION DEL DIAGRAMA DE PIPER

En la figura 6.15 se observa la ubicación de todas las muestras de la región de estudio; en el rombo de la figura se aprecian tres zonas de las cuatro que definen los procesos geoquímicos (dilución salina, disolución salina, mezcla y salinidad alta) del agua subterránea. Estas son las siguientes:

ZONA A

Aquí ocurren la mayoría de las muestras, corresponde a aguas subterráneas de nivel freático somero, cuya salinidad es diluida por el agua de lluvia y tienen una circulación muy local.

DIAGRAMA DE PIPER



%r = PORCENTAJE DE MILIEQUIVALENTES

ZONA A DILUCION (AGUA DE RECIENTE INFILTRACION)

ZONA C DISOLUCION

ZONA D MEZCLA

FIGURA No. 6.15 INTERPRETACION DEL DIAGRAMA DE PIPER

ZONA C

Están involucradas 2 muestras: P-1 y P-5. El proceso geoquímico preponderante que aquí sucede, es la disolución salina de las rocas, provocada por el flujo del agua a través de ellas durante cierta distancia, que varía desde un movimiento local hasta uno regional. Sin embargo, aun cuando en esta zona la disolución sea el proceso principal, las muestras de estos aprovechamientos se ubican en el rombo muy cerca de la zona A y, por tanto, existe cierta dilución por el agua de lluvia. El enriquecimiento químico del agua es principalmente de iones sodio y bicarbonatos.

ZONA D

Las muestras de agua que aquí se sitúan, corresponden a mezclas de agua de diferente composición química y para este caso tienen una salinidad relativamente elevada. Los aprovechamientos involucrados (N-8 y M-13), están asociados a terrenos permeables de travertino y a manantiales termales de posible origen ígneo, es decir, que la mezcla es entre el agua de origen meteórico de salinidad baja y agua salada de origen volcánico; esta suposición está fundamentada en la discusión del origen del termalismo del Manantial de Ixtapan de la Sal en el índice VI.7.

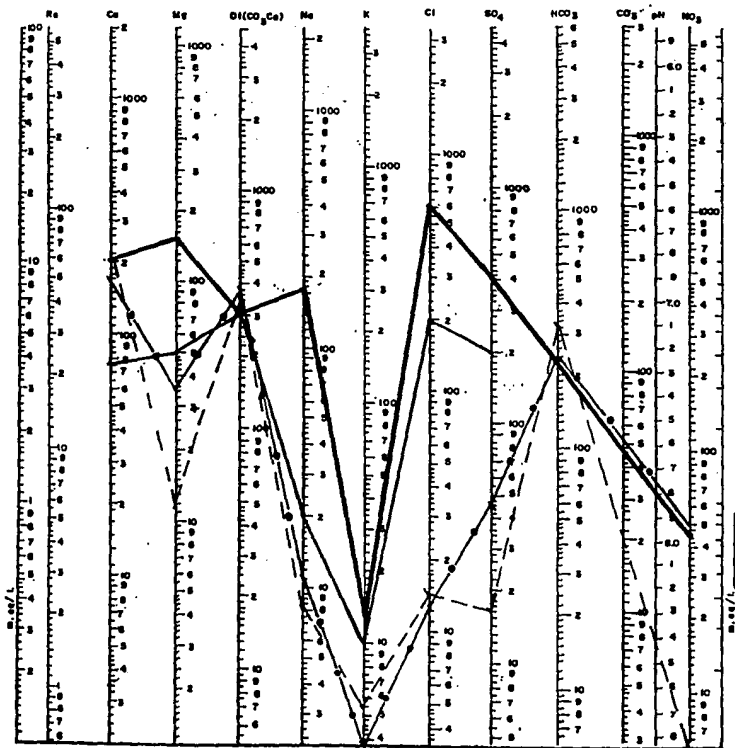
VI.5 CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO

La detección de los elementos químicos contenidos en cantidades que exceden las normas establecidas para el agua potable, así como la dureza total (DT) y el pH analizados en el agua del área de estudio, se realizó con el método de traslape de gráficas dibujadas en el diagrama de Schoeller-Berkaloff (figura 6.16); una de estas gráficas corresponde a la combinación de las legislaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (28) y de la Secretaría de Salud (México), utilizando sus dos parámetros (concentración máxima aceptable y concentración máxima permitida), la otra gráfica pertenece al análisis químico de la muestra de agua estudiada; si algún elemento químico de ésta rebasa el límite de aquella, dicho elemento estará afectando la potabilidad.

En la tabla 6.3 se enlistan los elementos físico-químicos que afectan la potabilidad del agua en la región.

La DT, como ya se indicó, es un producto de la coexistencia del Ca y el Mg en determinadas cantidades y es de mayor importancia para el uso doméstico o industrial (ver sección II.3.2), pero que se establece en la norma de la

**DIAGRAMA SEMI LOGARITMICO
DE SCHOELLER-BERKALOFF**



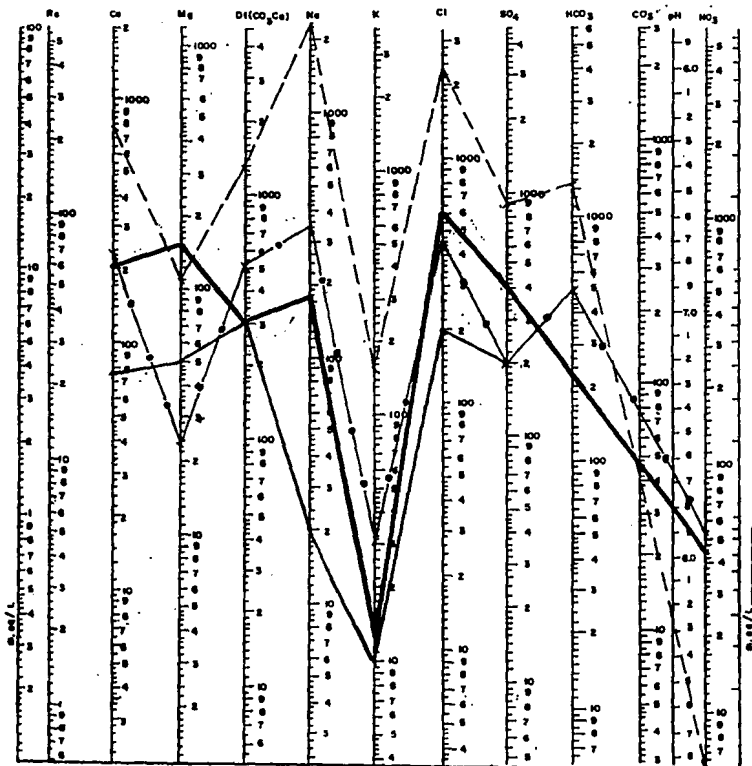
No. DE OBRA	REPRESENTACION
N1	—————
N1	—●—●—
1	—————
2	—————

OBSERVACIONES
N1 excede en dureza total y NO3
N1 excede en dureza total y en NO3

- 1 Concentración máxima permitida
- 2 Concentración máxima aceptable

Fig. 6.16 Elementos químicos que exceden las normas establecidas

**DIAGRAMA SEMI LOGARITMICO
DE SCHOELLER-BERKALOFF**



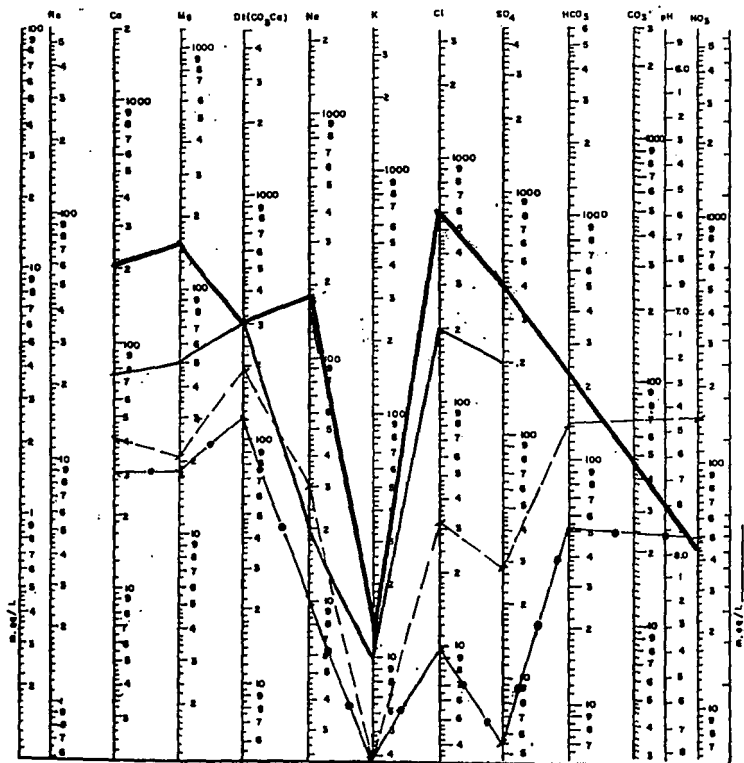
No. DE OBRA	REPRESENTACION
M13	—●—
NB	- - -●- - -
1	—
2	—

OBSERVACIONES
M13 Se excede en todos los iones excepto Mg y NO ₃
NB Se excede en todos los iones excepto en Mg, Cl y SO ₄

1 Concentración máxima permitida
2 Concentración máxima aceptable

Fig. 6.16 Elementos químicos que exceden las normas establecidas

**DIAGRAMA SEMI LOGARITMICO
DE SCHOELLER-BERKALOFF**



No. DE OBRA	REPRESENTACION
N3	—————
N4	—————●—————
1	—————●—————
2	—————

OBSERVACIONES

N2 y N4 exceden en N03

1 Concentración máxima permitida
2 Concentración máxima aceptable

Fig. 6.16 Elementos químicos que exceden las normas establecidas

Secretaría de Salud como un parámetro químico para medir la potabilidad del agua, aunque en opinión del autor, bastaría con determinar los excesos del Ca y el Mg y omitir la DT.

Las muestras de agua M-1 y N-1 de la zona Zumpahuacán, P-1 de la zona Tenancingo, M-13 y N-7 de Ixtapan de la Sal, así como las N-8, N-9 y N-13 de la zona Tonicato, acusan cantidades elevadas en dureza total debido a la relación directa que guardan con terrenos calcáreos, excepto las muestras P-1 y N-7 que tienen como principal elemento inductor de la dureza al Mg.

Las repercusiones en el uso de esta agua son para el uso doméstico e industrial, más que para el consumo humano, ya que causa el consumo excesivo de jabón por la falta de espuma e incrustaciones en calderas y tuberías.

TABLA 6.3 ELEMENTOS FISICO-QUIMICOS QUE AFECTAN LA POTABILIDAD DEL AGUA DE LA REGION DE ESTUDIO

NO. DE MUESTRA	ZONA	ELEMENTOS
M-1	Zumpahuacán	Ca, DT
N-1	Zumpahuacán	DT, NO3
M-5	Tenancingo	pH
N-3	Tenancingo	pH, NO3
N-2	Tenancingo	pH
P-1	Tenancingo	DT, Fe
P-4	Tenancingo	Fe
M-6	Villa Guerrero	pH
M-7	Villa Guerrero	pH
M-8	Villa Guerrero	pH
M-9	Villa Guerrero	pH
M-10	Villa Guerrero	pH
M-11	Villa Guerrero	pH
N-4	Villa Guerrero	pH, NO3
N-5	Villa Guerrero	pH
N-6	Villa Guerrero	pH
M-13	Ixtapan de la Sal	Ca, DT, Na, K, Cl, SO4
M-12	Ixtapan de la Sal	Na
N-7	Ixtapan de la Sal	DT
N-8	Tonicato	Ca, DT, Na, K, NO3
N-9	Tonicato	DT
N-12	Tonicato	NO3
N-13	Tonicato	DT

Las muestras que tienen bajos valores de pH con respecto a los establecidos son la M-5, N-2 y N-3 de la zona Tenancingo y todas las muestras de la zona Villa Guerrero. Estas últimas y la muestra M-5 corresponden a los terrenos de mayor altura topográfica y a aguas de reciente infiltración, por lo que la actividad del CO₂ es grande, principalmente en el área de Porfirio Díaz; de igual manera sucede con las muestras N-2 y N-3, la primera porque es de reciente infiltración y la segunda porque tiene el nivel freático muy somero (1.53 m) y está expuesta a cualquier sustancia contaminante que percole el suelo, además de que existe directamente la influencia del agua meteórica.

El contenido de Ca mayor de 200 ppm sólo se tiene en las muestras M-1 de la zona Zumpahuacán, M-13 de Ixtapan de la Sal y N-8 de Tonalico. El exceso de este elemento no implica repercusiones graves para el organismo, pero si puede influir en el desarrollo de ciertas enfermedades relacionadas con la calcificación de órganos. El agua que presenta mayor cantidad de Ca es la del manantial de Ixtapan de la Sal (762 ppm), por lo tanto, se debe tener cuidado en su uso y utilizarla, si ese fuera el caso, mediante una debida filtración y un constante mantenimiento de los filtros.

El Na y el K están presentes en cantidades mayores que las establecidas en las muestras M-13 del manantial de Ixtapan y la N-8 de Tonalico. El contenido de estos elementos en el agua, como ya se dijo, no son de interés para calificar su potabilidad según diversas legislaciones, incluyendo la de la OMS y la de la Secretaría de Salud, excepto la de la Comunidad Económica Europea (5) que marca la cantidad límite de ocurrencia para el agua de consumo humano. En opinión del autor, el Na principalmente causa problemas en el organismo de algunas personas porque retienen más líquidos que el necesario, ocasionándoles aumento de peso en su físico con las consecuencias que esto implica.

El Fe excede los contenidos establecidos en las normas en el agua de las muestras P-1 (0.4 ppm) y P-4 (2.1 ppm). El agua del acuífero extraída por el aprovechamiento P-1 es actualmente tratada para separar el Fe; aún cuando el contenido en este elemento no es muy elevado, le transmite un sabor astringente. El aprovechamiento P-4, como ya se dijo, está en desuso y su tubería, expuesta a la acción de la atmósfera, se encuentra oxidada y debido al escurrimiento sobre ella del agua de lluvia hacia el acuífero, éste se contamina con Fe.

El Cl se encuentra disuelto en gran cantidad en el manantial de Ixtapan de la Sal (2159 ppm) y le proporciona junto con el Na un sabor salado al agua. Los efectos en la salud humana por las altas concentraciones de Cl son nulos.

El SO₄ está presente en cantidades de casi 900 ppm en el manantial de Ixtapan de la Sal; en esta proporción este ion produce efectos laxantes en el agua de consumo humano, además de producir también efectos perjudiciales en otras áreas de uso, como lo es en las obras públicas porque atacan al cemento cuando el agua lo contiene en más de 300 ppm.

En lo que respecta a los NO₃, se mencionó en el capítulo III que su presencia abundante se debe principalmente a la contaminación orgánica. Las muestras que contienen excesos de este ion son la N-1 de Zumpahuacán, N-3 de la zona Tenancingo, N-4 de Villa Guerrero y las N-8 y N-12 de Tonatico. Las consecuencias de ingerir esta agua se reflejan principalmente en los niños lactantes, ya que esta sustancia al encontrar un ambiente reductor como lo es del aparato digestivo, o en el mismo terreno de infiltración, se reduce a NO₂, sustancia que provoca la cianosis o enfermedad de "sangre azul". Además, una elevada cantidad de NO₃ nos indica la existencia de fenoles, producto de la contaminación orgánica que provocan enfermedades gastrointestinales.

VI.6 CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO

La clasificación del agua para riego se obtiene con el Diagrama de Wilcox, el cual relaciona la salinidad total del agua representada por la conductividad eléctrica, con el índice RAS (Relación de Absorción del Sodio); los valores de estos parámetros están contenidos en la tabla 6.2 y las clasificaciones del agua de la región de estudio se observan en la figura 6.17 y en la tabla 6.4.

Los resultados obtenidos sobre la calidad del agua de las diferentes muestras en base a su clasificación son los que a continuación se describen.

El agua de las muestras M-5, N-2, P-2, P-3 y P-5 de la zona Tenancingo, así como toda el agua de las muestras tomadas en la zona Villa Guerrero, están clasificadas en el campo o celda C1S1; esta agua se caracteriza por los bajos valores de salinidad (menor a 250 mhos/cm), y por lo tanto dicha agua puede usarse para riego en la mayoría de los suelos y para casi todas las plantas, con muy pocas probabilidades de que aumente la salinidad,

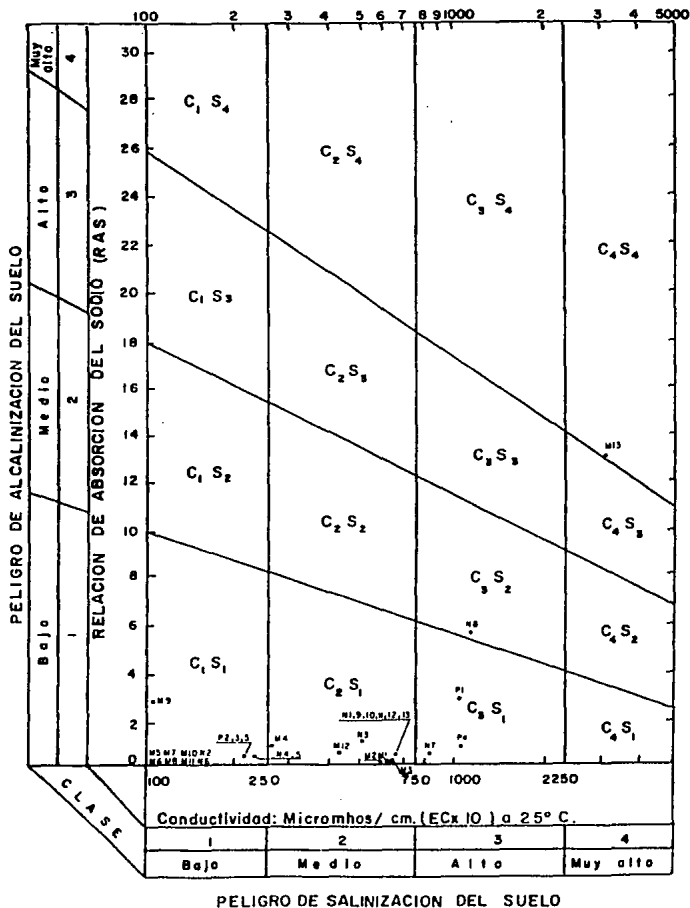


FIG. 6.17 Diagrama para la clasificación de las aguas para riego de la región de estudio

así mismo, en lo que respecta al Na, puede usarse en casi todos los suelos con poco peligro de que el sodio intercambiable llegue a niveles perjudiciales.

Las muestras clasificadas en la celda C2S1 se diferencian de las anteriores por contener mayor cantidad de sales disueltas, es decir, poseen valores más elevados de conductividad eléctrica (entre 250 y 750 mhos/cm), aunque sus cantidades de sodio son similares. De aquí que con esta agua se pueden cultivar plantas moderadamente tolerantes a las sales (tabla 3.5) con lavados moderados del suelo, sin efectuar un excesivo control de la salinidad. El agua que se encuentra en este caso, pertenece a las muestras N-3 de la zona Tenancingo, M-12 de Ixtapan de la Sal, N-9, N-10, N-11, N-12, N-13 y R-1 de Tonicato y a todas las contenidas en la zona Zumpahuacán.

La conductividad eléctrica es aún mayor (750-2250 mhos/cm) en el agua de las muestra P-1 y P-4 de Tenancingo y N-7 de Ixtapan de la Sal, por lo que corresponden a aguas altamente salinas, situadas en la celda C3S1. Según la clasificación, esta agua no puede usarse en suelos de drenaje deficiente y aún con drenaje adecuado se requiere un manejo especial para el control de la salinidad, además de seleccionar plantas muy tolerantes a las sales (tabla 3.6); aunque el terreno que circunda estas obras de captación tiene pendiente suficiente para asegurar un buen drenaje, principalmente localizado en Ixtapan de la Sal. Con respecto al sodio, no existe gran peligro porque sus cantidades disueltas son bajas.

La muestra N-8 del acuífero de Tonicato quedó ubicada en la celda C3S2, es decir, corresponde a un agua altamente salina similar a la anterior clasificación, con contenidos medios de sodio. En este caso, el agua debe usarse en suelos con drenaje adecuado recurriendo a manejos especiales con el fin de controlar la salinidad para irrigar plantas bastante tolerantes a las sales; los terrenos vecinos a este acuífero tienen afortunadamente pendientes que aseguran un drenaje adecuado.

El contenido en sodio del agua anterior representa un peligro en suelos de textura fina y en aquellos que contengan una alta capacidad de intercambio iónico, especialmente bajo condiciones de lavados leves, por lo tanto, este tipo de agua puede usarse en suelos orgánicos o de textura gruesa con buena permeabilidad. Este último factor caracteriza el terreno (travertino) en el cual está asentada la Ciudad de Tonicato.

El agua del manantial termal de Ixtapan de la Sal (M-13), corresponde a la clasificación C4S4 indicativa de un agua muy altamente salina (mayor que 2250 mhos/cm) con elevado contenido de sodio. Generalmente este tipo de agua no es apropiada para riego, debido a la excesiva presencia del sodio.

VI.7 EL MANANTIAL DE IXTAPAN DE LA SAL (M-13)

Este manantial requiere una atención especial debido a las notables diferencias físico-químicas que presenta el agua con respecto al resto de la región de estudio (tabla 6.1).

Sus características generales son: un manantial burbujeante, contenido en travertino y con olor a H₂S; destaca por el alto contenido salino, cuyo valor de la conductividad eléctrica es de 3084 Mmohs/cm, por el tipo de agua caracterizada anteriormente como clorurada-sódica, que difiere de la bicarbonatada cálcica o magnésica que caracteriza al agua subterránea de la región, así como por la concentración anormal del litio de casi 16 ppm y, principalmente, por la alta temperatura que permite clasificar el manantial según Shoeller (35) como hipertermal, tal como se demuestra a continuación:

Fuentes hipertermales = $t > t_m + 4$ grados centígrados

donde: t = temperatura del agua
 t_m = temperatura media anual del lugar

entonces si: $t = 40$ grados centígrados
 $t_m = 22$ grados centígrados

indica que: $40 \text{ C} > 22 \text{ C} + 4 \text{ C}$
 $40 \text{ C} > 26 \text{ C}$

por lo tanto, el agua es hipertermal.

Para establecer el origen del manantial, el cual aun está indefinido, es necesario considerar el marco geológico y geohidrológico de la región, así como la relación entre el contenido iónico y la temperatura que fundamente los procesos geoquímicos actuantes; de tal manera que deben definirse las áreas de recarga y el proceso que ocasiona la elevada temperatura del agua.

TABLA 6.4 CLASIFICACION DE AGUA PARA RIEGO

No. MUESTRA	ZONA	CLASIFICACION
M-5	Tenancingo	C1S1
N-2		
P-2		
P-3		
P-5		
M-6	Villa Guerrero	C1S1
M-7		
M-8		
M-9		
M-10		
M-11		
N-4		
N-5		
N-6		
M-1	Zumpahuacán	C2S1
M-2		
M-3		
M-4		
N-1		
N-3	Tenancingo	C2S1
M-12	Ixtapan de la Sal	C2S1
N-9	Tonatico	C2S1
N-10		
N-11		
N-12		
N-13		
R-1		
P-1	Tenancingo	C3S1
P-4		
N-7	Ixtapan de la Sal	C3S1
N-8	Tonatico	C3S2
M-13	Ixtapan de la sal	C4S4

Uno de los trabajos que incluyen información sobre el manantial es el realizado por A. Issar et. al. (20.a), donde caracterizan isotópicamente el agua de las regiones centrales de México. Los resultados que presentan, están basados principalmente por el análisis de los valores de los isótopos Deuterio y Oxígeno 18 iguales a $D=-69.7 \%$ y $O18 = -9.1 \%$, los cuales en la gráfica de la Curva Meteorica Mundial definen un punto localizado por debajo de ella, es decir, que el agua del manantial muestra un enriquecimiento de dichos isótopos, lo que llevó a los autores a concluir que se trata de una paleoagua.

Los mismos autores toman este resultado con reserva, ya que el exceso de Deuterio y Oxígeno 18 puede deberse a los siguientes procesos:

- a) Intercambio agua-roca a altas temperaturas.
- b) Intercambio de CO_2 (magmático)-agua.

Ahora bien, ellos aclaran que esto no quiere decir que exista un medio subterráneo a altas temperaturas, por lo que para definir con más seguridad si esta agua es antigua, es necesario reunir más información sobre la paleoclimatología de la región. Aún así, si se considera esta agua contenida en un paleoacuífero, estaríamos refiriéndonos a una roca circundada por otras rocas impermeables que evitan que sea recargado por agua reciente y en consecuencia, almacena un gran volumen de agua antigua.

Por otro lado, la interpretación de los análisis físico-químicos y su relación con las estructuras asociadas a la región, dan luz sobre el posible origen del manantial.

La recarga del manantial está controlada por las fallas normales que limitan a Ixtapan de la Sal al oriente y poniente, y que están a su vez asociadas con el sistema de fallas San Miguel de Allende-Taxco; por lo tanto, es posible que el aporte principal de agua al sistema acuoso del manantial proceda de un flujo subterráneo regional profundo desde el norte de la zona de interés. Al respecto, Custodio (7) menciona que si la circulación es profunda, las elevadas temperaturas y presiones y en ocasiones el largo tiempo de contacto, permiten que se concentren oligoelementos y éste puede ser el origen de concentraciones anormales en Li, Sr, As, etc.

El mismo autor dice que las aguas vinculadas con magmas se caracterizan por ser del tipo clorurada-sódicas, lo que indicaría que el cuerpo emisor de la temperatura es un magma de posible tipo ácido debido a la presencia en el agua de elevadas cantidades de elementos alcalinos como el K, Na y Li. Esta suposición es reforzada por la presencia de rocas graníticas a 8 km al SW de Ixtapan de la Sal.

La alta concentración química y la elevada temperatura puede estar relacionada con los dos procesos anteriores, de tal manera que una circulación regional profunda favorece el enriquecimiento iónico del agua y el flujo de vapores calientes ascendentes de origen magmático transmitiendo, además del calor, elementos químicos traza como el Li.

Otra de las cuestiones de interés es la posible relación del manantial y otros manantiales adyacentes, con la formación de travertino que aflora en los alrededores de Ixtapan y Tonatico. Si se considera que la paleogeografía de la región define una cuenca cerrada a principios del Holoceno y la presencia del alto contenido de bicarbonatos (HCO_3) y calcio (Ca) en el agua del manantial, es factible suponer que dicha agua alimentaba a un pequeño lago en donde existían las condiciones propicias para la precipitación de CaCO_3 , siguiendo la siguiente reacción química (21):



Es decir, que al reducirse la presión que sometía al agua en la profundidad a la atmosférica de la superficie, el CO_2 se desprende permitiendo la precipitación del CaCO_3 en un ambiente de aguas muy tranquilas, dando lugar a la formación del travertino.

La temperatura es uno de los factores de gran importancia que caracteriza a una fuente termal, la que registre ésta en la superficie nos puede definir o darnos una idea de la intensidad de calor que recibe su agua en el subsuelo y de la profundidad a la que es calentada. Existen diversos indicadores geoquímicos de la temperatura a profundidad (7), depende si el sistema es con fase de vapor como sucede en los campos geotérmicos o si el sistema es acuoso como lo es en este caso. Entre los principales indicadores geoquímicos para un sistema acuoso destacan el SiO_2 y la relación $r\text{Na}/r\text{K}$ (r en meq/l).

El SiO_2 es el mejor indicador de temperatura para aquellas menores de 200 grados centígrados; para mayores temperaturas da interpretaciones erróneas pues puede precipitarse parcialmente. En el presente trabajo no se realizaron análisis químicos de SiO_2 , pero puede ser una actividad de interés especial ya que según el diagrama mostrado en la figura 6.18, la cantidad de esta sustancia contenida en el agua tiene una relación directa con la temperatura y la profundidad a la que es inducida.

La relación $r_{\text{Na}/r_{\text{K}}}$ es útil si su valor se mantiene entre 8 y 20. El margen de temperaturas que determina está entre 160 y 300 grados centígrados; aunque da mejores resultados por encima de 200 grados centígrados (figura 6.19). Esta relación no debe usarse con aguas ácidas, ni con aguas que originan travertino (White, 1970 en 37). Esta última condición es una limitante para el presente caso porque como ya se explicó, el agua del manantial contiene una gran cantidad de bicarbonatos y calcio. Sin embargo, la presencia del travertino proporciona información al respecto de tipo cualitativo, pues según White (op. cit.), la formación de travertino indica que las temperaturas del subsuelo son bajas y que la zona caliente está a gran profundidad.

En suma, si existe deposición de SiO_2 en superficie o en zonas de poca profundidad es señal de un fuerte gradiente geotérmico, mientras que si se deposita travertino (CaCO_3) como en este caso, indica que en profundidad las temperaturas son poco elevadas y es posible la disolución de caliza por el CO_2 añadido.

Según Custodio (7), el contenido de cloro en una fuente termal puede revelar su temperatura a profundidad, ya que en general los sistemas hidrotermales acuosos de baja temperatura contienen más de 50 ppm de cloro, pero si la temperatura es superior a 150 grados centígrados pueden variar normalmente entre 100 y muchos miles de ppm, aunque pueden existir excepciones.

De lo anterior se deduce que el gradiente geotérmico en la región de Ixtapan de la Sal no es elevado y que la zona en el subsuelo, donde es calentada el agua antes de ascender a la superficie, es muy profunda pero con temperaturas que rebasan los 150 grados centígrados, pues el contenido de cloro en el agua es de 2159 ppm.

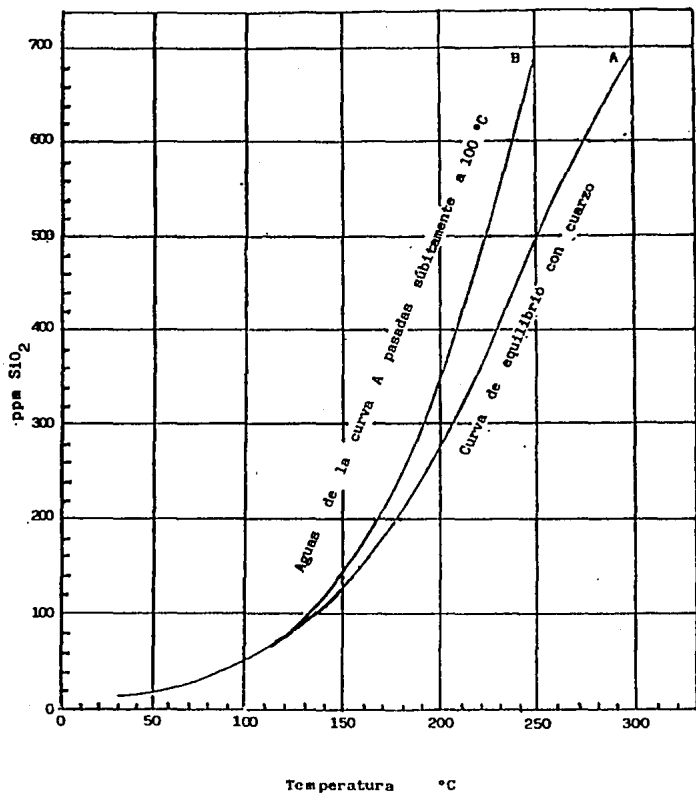


FIGURA 6.18

Relación entre concentración en SiO₂ y la temperatura en aguas termales. (Según Fournier y Truesdell, 1970)

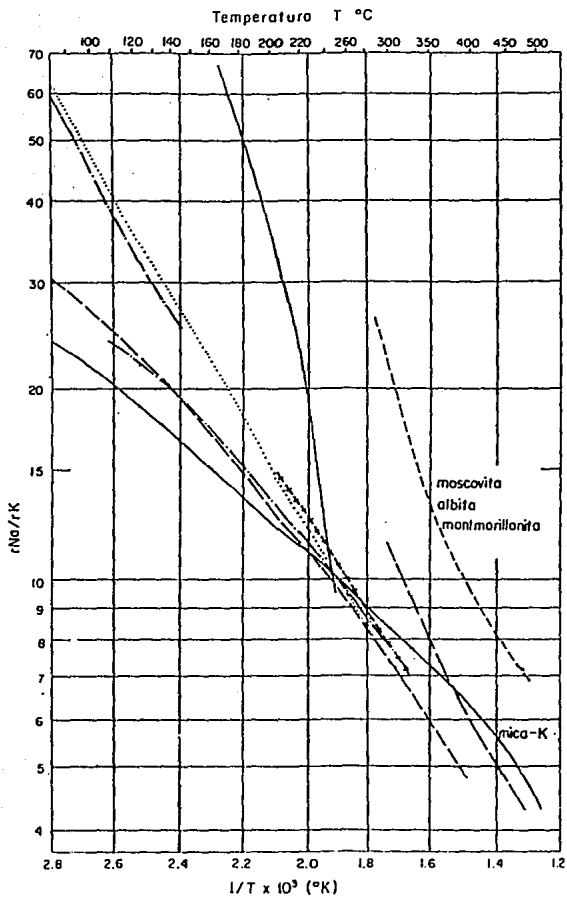


FIGURA No. 619 RELACION r_{Na}/r_K COMO INDICADOR DE TEMPERATURA DEL AGUA A PROFUNDIDAD.

Finalmente, en la figura 6.20 se presenta un esquema de lo que pudiera ser el sistema hidrotermal acuoso de Ixtapan de la Sal. Se observa que el flujo principal subterráneo procede desde el NNW del área de estudio, a través de las grandes fracturas y fallas que constituyen el Sistema San Miguel de Allende-Taxco de orientación NNW-SSE, en donde el agua enriquece su salinidad, hasta llegar a un punto en el subsuelo donde impera una alta temperatura posiblemente mayor de 150 grados centígrados, aportada por el vapor que despiden el cuerpo emisor de origen ígneo que incluye en su composición química elementos como el litio y azufre; de aquí el agua asciende a la superficie apoyada por la disminución de su densidad que experimenta al ser calentada y por los conductos que significa el intenso fracturamiento que debió haber sufrido la roca metamórfica al originarse el graben de Ixtapan. El ascenso del agua a la superficie no debe ser rápido, ya que durante su trayecto el calor se disipa hasta llegar a los 40 grados centígrados, que es la temperatura con la que se manifiesta en la superficie.

Llama la atención el elevado contenido de bicarbonatos y calcio con respecto al de magnesio que tiene el agua; esto nos indicaría que durante su recorrido atraviesa en mayor proporción rocas ricas en bicarbonatos. Es decir, si suponemos que el flujo principal que alimenta al manantial procede del norte del área a través de terrenos volcánicos esencialmente, y que esta fuente junto con otras menos importantes por su caudal que existen en el área, dieron origen al depósito del travertino, entonces ¿de donde adquiere en solución el bicarbonato y el calcio?.

Este cuestionamiento tiene una respuesta si consideramos la teoría de Campa y Ramírez (4), quienes sostienen que el Complejo Metamórfico es un alóctono tectónico que cabalgó a la secuencia sedimentaria marina (subcapítulo de Tectónica y Geología Estructural), por lo tanto, se esperaría que tales rocas carbonatadas se encuentren subyaciendo a las rocas metamórficas; en consecuencia, cabe la posibilidad de que el agua termal adquiera su enriquecimiento en bicarbonatos y calcio de aquellas rocas.

Es importante mencionar que los aspectos anteriores carecen de una base geológica sólida y pueden corresponder a una simple suposición. De ser así, los bicarbonatos y el calcio provienen de algún flujo secundario. Sin embargo, el modelo del sistema termal que se propone se considera como válido para cualesquiera de las dos teorías involucradas.

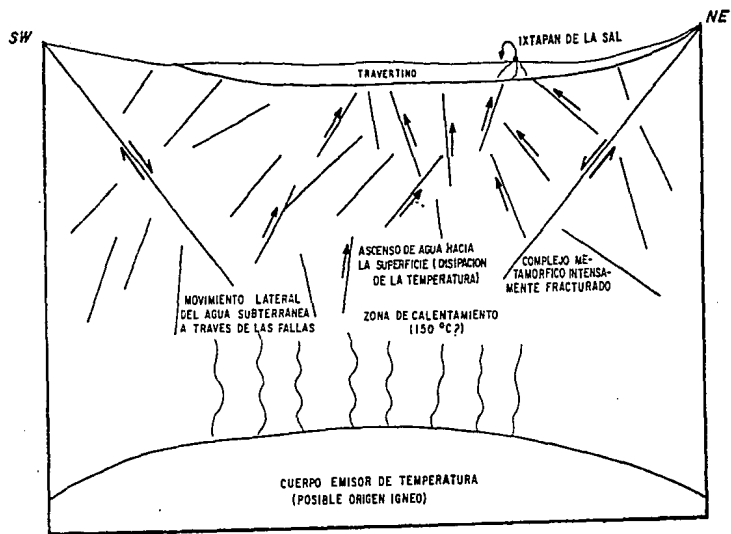


FIG. 20 Modelo Esquemático del Sistema Hidrotermal Acuoso de Ixtapan de la Sal.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1.- La Hidrogeoquímica es una herramienta importante en el desarrollo de estudios hidrogeológicos, ya que con la ayuda de la Geología, permite definir el marco hidrogeológico regional y planear racionalmente la explotación de los acuíferos.

2.- En un análisis hidrogeoquímico de apoyo en estudios hidrogeológicos, es necesario considerar la efectiva aplicación de las siguientes técnicas:

a) El muestreo del agua subterránea y análisis físico-químico de campo.

b) El análisis físico-químico de laboratorio de las muestras de agua.

c) El conocimiento de los fundamentos teóricos de la geoquímica del agua.

d) El conocimiento de la geología del sitio a estudiar.

e) La relación entre la geoquímica del agua local y la geología del sitio para su interpretación adecuada.

3.- La zona de estudio está ubicada dentro de la provincia de la Cuenca Morelos-Guerrero, la cual posee una geología variada y compleja, en donde confluyen tres elementos con características tectónicas y estratigráficas muy particulares:

a) El Complejo Volcánico Teloloapan-Ixtapan desarrollado durante el Jurásico Superior-Cretácico Inferior, es el elemento más antiguo que muestra metamorfismo de bajo grado, en facies de esquistos verdes, representado por las unidades Esquisto Taxco y Roca Verde Taxco Viejo, asignándoles en este estudio el nombre de Complejo Metamórfico.

b) El segundo elemento corresponde a un paquete de rocas carbonatadas y clásticas desarrolladas durante el Cretácico, el cual se inicia con una secuencia de calizas delgadas de aguas profundas que corresponden a la Formación Acuitlapán, posteriormente con un grueso espesor de calizas de facies de plataforma definida por la Formación Morelos y finalmente, por un paquete de rocas clásticas de un ambiente tectónico tipo flysh representado por la Formación Mexcala.

c) El tercer elemento está constituido por un complejo volcánico heterogéneo, definido por la Riolita Tilzapotla, las rocas piroclásticas y lahares de la Formación Tepoztlán, por los derrames lávicos y tobas de la Formación Zempoala y por el gran espesor de rocas clásticas de la Formación Chontalcoatlán.

4.- El área estudiada se encuentra dentro del límite de dos provincias fisiográficas importantes, por un lado la Plataforma Guerrero-Morelos con un basamento paleozoico y por otro, el Eje Neovolcánico Transmexicano con sus depósitos piroclásticos, vulcanoclásticos y derrames.

5.- De acuerdo con Campa y Ramírez, se reconocen cinco fases de deformación que actuaron sobre la región en el Mesozoico y Cenozoico. La primera afectó los depósitos vulcano-sedimentarios a finales del Jurásico, con un metamorfismo regional correspondiente a facies de esquistos verdes. La segunda fase ocurrida en el Cenomaniano, plegó y folió la secuencia vulcano-sedimentaria de nueva cuenta; la tercera fase sucedió en el Paleoceno y da lugar a la deformación de la secuencia mesozoica; la cuarta corresponde a una fase compresional en el Mioceno-Plioceno, que produjeron los combamientos de la región sur de la plataforma y la posición anormalmente elevada de la secuencia metamórfica, así como el intenso fracturamiento de la Formación Tepoztlán; la última fase de edad Pliocuaternaria ocasionó fallamientos normales y un sistema de roturas y diaclasas, a través de las cuales fueron emitidos los materiales volcánicos cuaternarios.

6.- En la zona de estudio sobresalen discontinuidades bien definidas en imágenes de satélite con longitudes considerables y dirección N-NW, posiblemente asociadas a la última fase de deformación, verificadas en el análisis de las rosetas de fracturas de la Formación Chontalcoatlán y Zinacantépetl, las cuales pueden estar relacionadas al sistema de fracturas San Miguel de Allende-Taxco, definido por Demant en 1978. Estas discontinuidades conforman pequeños grabens rellenos por los lahares de la Formación Chontalcoatlán, como el propuesto para el área de Ixtapan de la Sal.

7.- Las unidades geohidrológicas que distinguen a la región son tres, definidas por su permeabilidad y evaluadas en función de sus características litológicas y estructurales. La primera está conformada por formaciones con

buena permeabilidad como la Morelos, Tepoztlán, Andesita Zempoala, Chontalcoatlán, los Basaltos, los Productos Piroclásticos e Intermedios, el Travertino y el Aluvión; la segunda unidad está constituida por los materiales de baja permeabilidad capaces de conformar acuitardos de la Formación Riolita Tilzapotla; la tercera y última unidad la componen materiales que por su baja permeabilidad o abrupta topografía conforman acuífugos o acuícludos, constituida por las formaciones Complejo Metamórfico, Acuitlapán, Mexcala, las Rocas Graníticas y la Formación Zinacantépetl.

8.- De acuerdo a los datos de la conductividad eléctrica analizados, el flujo del agua subterránea del Valle de Tenancingo procede de las partes altas de las porciones Este y Sur y confluyen hacia la parte central del valle, y de aquí hacia el Río Tenancingo el cual drena el agua de la región de Norte a Sur.

Para la zona de El Zapote, el movimiento de flujo del agua subterránea es hacia el SE hasta el Río Tenancingo, que en esta zona se le conoce con el nombre de Río San Jerónimo. En las zonas restantes de la región se infiere el movimiento del agua debido a la limitada información. Así, el agua de la zona Zumpahuacán procede de la serranía de calizas localizada al oriente y se desplaza en una dirección general hacia el poniente. En la zona Villa Guerrero el movimiento del agua es en una dirección general hacia el poniente. En la zona Villa Guerrero el movimiento del agua es en una dirección Oeste-Este, hacia el Río Tenancingo; en esta zona pero en los alrededores de Porfirio Díaz, el agua tiene un flujo muy local que se manifiesta superficialmente a través de manantiales.

9.- Los bajos contenidos de los iones Ca, Mg, Na, K, Cl y HCO₃ revelan que el agua subterránea estudiada en la región es de reciente infiltración procedente del agua de lluvia.

10.- Los altos contenidos de Nitratos en algunos sitios de Tenancingo (151 ppm), Zumpahuacán, Villa Guerrero y Tonatico (entre 25 y 45 ppm), están asociados a contaminación orgánica como el uso de abonos artificiales y naturales en el primer sitio y posiblemente en el último poblado a contaminación de aguas residuales debido a la excesiva permeabilidad del suelo (travertino).

11.- Existen dos familias de agua que caracterizan la región: bicarbonatada y clorurada-sódica.

La bicarbonatada puede ser sódica o magnésica dependiendo de la litología que atraviesa el agua, a ella pertenecen la mayoría de las muestras de agua de la región. La clorurada sódica está relacionada con el agua termal de Ixtapan de la Sal y a las áreas donde el travertino se encuentra distribuido.

12.- Se llevan a cabo tres procesos geoquímicos del agua en la región de estudio: dilución salina, disolución salina y mezcla.

La dilución salina corresponde a las aguas subterráneas de nivel freático somero, cuya salinidad es diluida por el agua de lluvia y tienen una circulación muy local; este proceso está presente en la mayor parte de la región.

La disolución salina se detecta en dos muestras de la zona Tenancingo con enriquecimiento principal de iones sodio y bicarbonato; sin embargo, la ubicación en el diagrama de estas muestras cercana a la anterior, indica que existe también el proceso de dilución por el agua de lluvia.

El proceso de mezcla está relacionado con el manantial termal de Ixtapan de la Sal y con la limitada distribución del travertino; la mezcla es entre el agua de origen meteórico de salinidad baja y agua salada de origen volcánico.

13.- La potabilidad del agua es afectada principalmente en las zonas de Tenancingo, Ixtapan de la Sal y Tonatico. En Tenancingo es la presencia del Fe (0.4 ppm) que causa un sabor astringente al agua, sin embargo, actualmente recibe un tratamiento previo a su distribución; esta agua no pertenece al sistema acuífero estudiado en este trabajo, sino a uno más profundo. En Ixtapan de la Sal el agua contiene abundante cloro (2159 ppm) y Na (1310 ppm) que le ocasionan un sabor salado al agua, además de la presencia excesiva de Ca (762 ppm) y HCO₃ (1359 ppm) que le proporcionan la característica de agua dura. En Tonatico la presencia alta de NO₃ (47 ppm) revelan una contaminación de tipo orgánica que infiere el contenido de fenoles.

14.- El agua de las zonas de Tonatico e Ixtapan de la Sal no es la apropiada para riego, debido a la presencia de una excesiva cantidad de sales; por el contrario, el agua de las zonas de Tenancingo, Villa Guerrero y Zumpahuacán es la adecuada para este uso, por la baja cantidad de sales en su contenido.

15.- En base a la interpretación de los análisis físico-químicos y a la relación con las estructuras asociadas a la región, se considera que el manantial de Ixtapan de la Sal está controlado por las fallas normales que limitan la ciudad de Ixtapan, las cuales están asociadas con el Sistema de Fallas San Miguel de Allende-Taxco. Con este fundamento, es posible considerar que el aporte principal de agua al sistema acuoso del manantial procede de un flujo regional profundo desde el norte de la zona de interés.

16.- El cuerpo emisor de la elevada temperatura al manantial, es un magma de posible tipo ácido debido a la presencia en el agua de elevadas cantidades de iones alcalinos como el K, Na y Li; esta suposición es apoyada por la aseveración de Custodio y Llamas (7), quienes dicen que las aguas vinculadas con magmas se caracterizan por ser del tipo cloruradas-sódicas y por la presencia de rocas graníticas a 8 Km al sur de Ixtapan de la Sal.

17.- La gran cantidad de bicarbonatos y la presencia del travertino indican que la temperatura del subsuelo relacionada con el manantial de Ixtapan es baja y que la zona caliente o cuerpo emisor de altas temperaturas está a gran profundidad (White, 1970 en 37). Además, la presencia de un alto contenido del ion cloro, indica que la temperatura del sistema acuoso a profundidad es superior a 150 grados centígrados.

18.- El esquema del sistema hidrotermal acuoso de Ixtapan de la Sal propuesto, está relacionado con el sistema de fracturas San Miguel de Allende-Taxco que conduce el flujo subterráneo principal procedente del NNW y que enriquece su salinidad en el recorrido, con un cuerpo emisor de temperatura de origen ígneo y con un intenso fracturamiento de las rocas metamórficas que subyacen el área de Ixtapan, funcionando como ducto del agua hacia la superficie apoyada por la disminución de su densidad que experimenta al ser calentada; este último movimiento del agua debe ser lento, ya que durante el trayecto el calor se disipa hasta llegar a la superficie a 40 grados centígrados.

19.- Se apoya la teoría de Campa y Ramírez (4), relacionada con el cabalgamiento del Complejo Metamórfico sobre la secuencia sedimentaria de la Formación Morelos, con fundamento en la abundante presencia de iones calcio y bicarbonato en el agua del manantial de Ixtapan.

RECOMENDACIONES

1.- La Hidrogeoquímica en la actualidad en estudios hidrogeológicos, no es usada como método de exploración, sino como una forma de caracterizar al agua, por lo que es muy recomendable que:

a) Los estudios hidrogeoquímicos formales partan del modelo de funcionamiento hidrogeológico y por tanto del modelo geológico, para que previo a la campaña de muestreo, se pueda definir en que obras se van a tomar muestras de agua y que iones se deben analizar.

b) Adicionalmente se deben tomar en cuenta los diferentes tipos de actividades humanas que se desarrollan en la zona, para determinar su influencia en la calidad del agua y que iones adicionales deben ser analizados; esto permitirá iniciar una caracterización preliminar sobre contaminación inducida.

2.- Para obtener resultados más precisos, que ratifiquen lo que aquí se establece o que proporcionen mayor información, es necesario localizar más aprovechamientos de agua susceptibles de muestrearse, para poder analizarlas.

3.- Es necesario que en los aprovechamientos donde se detectó contaminación orgánica se realicen nuevos muestreos, a manera de analizar el contenido de fenoles u otra presencia orgánica.

4.- Con el fin de verificar la propuesta sobre el origen del Manantial de Ixtapan, es necesario la elaboración de estudios geológicos más profundos, donde se establezca como objetivo principal un análisis estructural que pueda evidenciar la teoría de Campa sobre el cabalgamiento del Complejo Metamórfico con respecto a la Caliza Morelos.

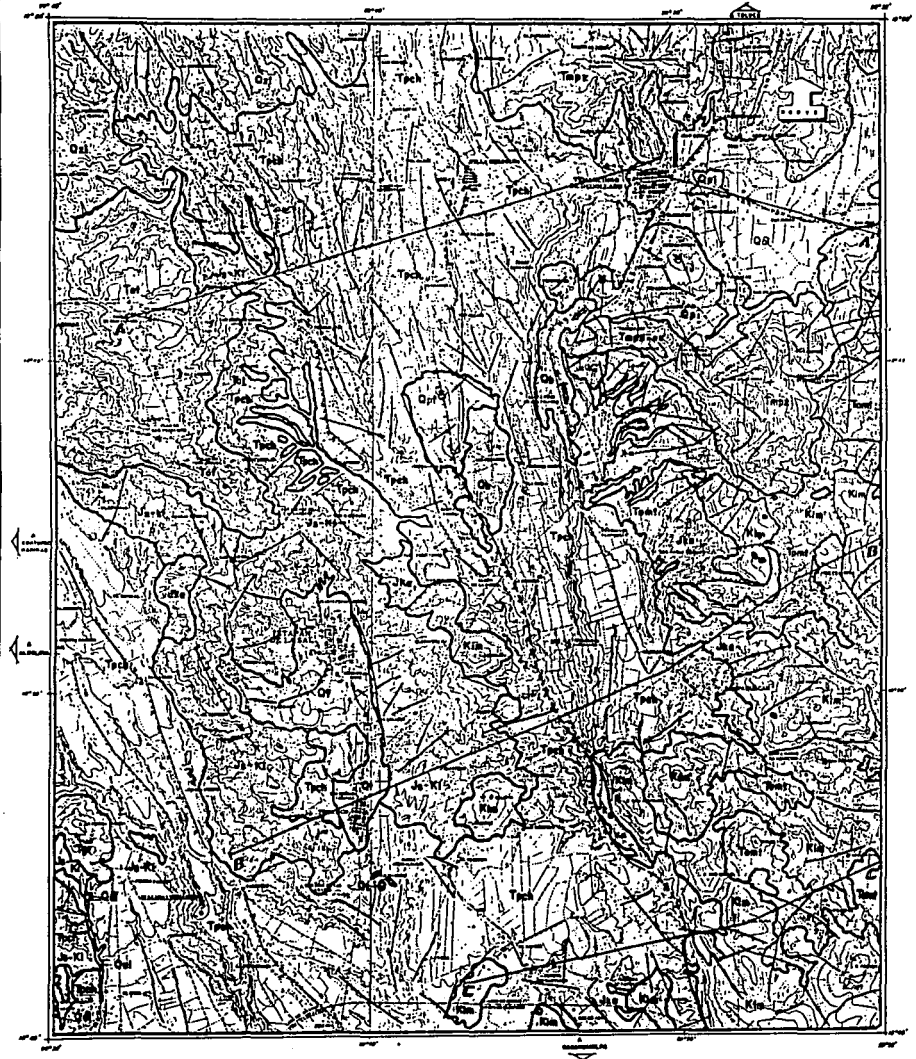
BIBLIOGRAFIA

- (1) Alvarez, C.M., 1984. Calidad del Agua Subterránea. Tesis Profesional, Fac. de Ing. UNAM.
- (2) Bloomfield, K., 1975. A Late Quaternary Monogenetic Volcano Field in Central Mexico. Original no consultado. Contenido en (9).
- (3) Campa, U. M., Campos, M. M., Flores, R. y Oviedo, R., 1974. La Secuencia Mesozoica Volcano-Sedimentaria Metamorfizada de Ixtapan de la Sal, México-Teloloapan, Gro. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo XXXV.
- (4) Campa, U.M., Ramírez, E.J., 1979. La Evolución Geológica y la Metalogénesis del Noroccidente de Guerrero. Original no consultado, contenido en (34).
- (5) Catalán Lafuente, J. G., 1981. Química del Agua. Fuenlabrada, Madrid, España. Segunda Edición, pp. 414.
- (6) Collins, W.D., 1923. Graphic Representation of Water Analysis. U.S. Geological Survey. pp. 1; reeditado en Chemical Hydrogeology. U.S., 1983.
- (7) Custodio E., LLamas, M. R., 1976. Hidrogeología Subterránea. Ed. Omega, Barcelona, España, II tomos.8) Dana, E. S. y Ford, W. E. Tratado de Mineralogía. Ed. CECSA, décima edición.
- (9) Davis, S. N. y De Wiest, R., 1972. Geohidrología. Ed. Ariel.
- (10) De Cserna, Z. y Fries, C. Jr., 1981. Resumen de la Geología de la Hoja Taxco, Edos. de Guerrero, México y Morelos. Original no consultado, contenido en (32).
- (11) Del Arenal, R., 1962. El uso del Diagrama Semilogarítmico para la Representación Gráfica de los Análisis de Agua. Anales del Instituto de Geofísica, Vol. VIII, UNAM, pp. 81-95.
- (12) Del Arenal, R., 1965. Estudio Hidrogeoquímico de la Porción Centro Oriental del Valle del Mezquital, Edo. de Hidalgo. Instituto de Geofísica. Vol. VI, Num. 1, pp, 86-97.
- (13) Demant, A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus Problemas de Interpretación. Revista del Instituto de Geología, UNAM, Vol. 2, No. 2, pp, 172-187.

- (14) Diccionario de Física, 1976. Editorial-Rioduero, España.
- (15) Dibble, W.E. y Dickson, F.W., 1976. The Behavior of Lithium in Experimental Rock-Water Interaction Studies. Geological Survey Professional Paper, num. 1005, pp. 142-147.
- (16) Donald, E.W., Fournier, R.D. y Thompson, J.M., 1976. Lithium contents of thermal and mineral waters. Geological Survey Professional Paper, num. 1005, pp. 58-60.
- (17) Fries, C. Jr., 1966. Resumen de la Geología de la Hoja Cuernavaca, Estado de Morelos. Hoja Cuernavaca. Carta Geológica de México. Instituto de Geología, UNAM.
- (18) Glanzman, R.K. y Meier, A.L., 1976. Lithium brines associated with nonmarine evaporites. Geological Survey Professional Paper, num. 1005, pp. 88-92.
- (19) Gutiérrez Negrín, L.C., 1987. Geotermia: Fuente de Energía al alcance de México. Revista Ciencia y Desarrollo, marzo-abril, num. 73, pp. 35-47.
- (20) Heras, R., 1976. Hidrología y Recursos Hidráulicos. Secretaría General Técnica. Ministerio de Obras Públicas, Madrid, España, pp. 1469-1524.
- (20.a) Issar, A., Quijano, L., Gat, J. y Castro, M., 1983. La Hidrología Isotópica de las Aguas Subterráneas de la porción Central de México. Boletín de Inv. Geohidrológica, V. 3, Fac. de Ing. Universidad Autónoma de Chihuahua.
- (21) Julia, R., 1983. Travertines. American Association of Petroleum Geologists, pp. 64-72.
- (22) Junge, E.C. y Werby, R.T., 1958. The concentration of chloride, sodium, potassium, calcium and sulfate in rain water the United states. American Meteorological Society, pp. 238-246.
- (23) Krauskoff, K. B., 1967. Introduction to geochemistry. Original no consultado, contenido en (14).
- (24) Lesser, I.J.M., 1984. Hidrogeoquímica. Contenido en el Curso de Educación Continua "Cuantificación y Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos Subterráneos", mayo-junio, Fac. de Ing., UNAM.

- (25) Lesser, I.J.M., Sánchez, D.F. y González, P.D., 1987. Hidrogeoquímica del acuífero de la Ciudad de México. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del DDF, inédito (resumen), pp. 1-20.
- (26) López Ramos, E., 1980. Geología de México. Tomo III. Segunda Edición, Ed. Escolar, México.
- (27) McBirney, A. y Williams, H., 1979. Volcanology. Original no consultado, contenido en (19).
- (28) Organización Mundial de la Salud, 1963. International standards for drinking water. Original no consultado, contenido en (1).
- (29) Piper, A.M., 1944. Graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. American geophysical Union. Reeditado en Chemical Hydrogeology, 1983, pp. 50-57.
- (30) Rangel, M.M., 1978. Estudio para la localización de pozos de agua para abastecimiento de la Planta Termoeléctrica de Salamanca, Guanajuato (uso de la conductividad eléctrica). CFE, inédito.
- (31) Rangel, M. M. Hidrogeoquímica. CFE, pp. 67-82.
- (32) Rangel, M.M., 1979. Métodos de análisis químico para agua Subterránea. CFE, inédito, pp. 26.
- (33) Rankama, K. y Sahama, G., 1960. Geochemistry. Universidad de Chicago, pp. 911.
- (34) SARH-FI, 1986-87. Estudio de Prospección Geohidrológica de la zona de Malinalco-Tenancingo, Edo. de México. UNAM.
- (34.a) Secretaría de Salud, 18 de Enero de 1988. Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios. Arts. 209-227. Diario Oficial de la Federación.
- (35) Schoeller, H., 1962. Les eaux souterraines, hidrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et evaluation des ressources. Mason, París, pp. 642.

- (36) Stiff, H. A., 1951. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. Society Petroleum Engineers of AIME. Reeditado en Chemical Hydrogeology, U.S., 1983, pp. 60-62.
- (37) Takamatsu, N., Imahashi, M., Kamimura, K. y Tsutsumi, M., 1986. Geochemical implication of the lithium content of saline spring waters in Japan. Geochemical Journal, vol. 20, num. 3, pp. 143-151.
- (38) Time Life. El Agua. Colección científica, pp. 9-16.
- (39) UNAM-INEGI, Facultad de Ingeniería. 1984. Geología de la República Mexicana. Primera Edición.
- (40) White, D.E., 1957. Thermal Waters of Volcanic Origin. Original no consultado, contenido en (37).



COLUMNA ESTRATIGRAFICA

MESOZOICO	Cretácico	Qp	ALUVIÓ
		Qc	TERRESTRE
		Qd	PARALITISMO INTERMEDIO
		Qe	PARALITISMO BAJALTESO
		Qf	SARALTO
		Qg	PARALITO ZINACATEPEC
		Qh	PARALITO CUMMAGA
		Qi	PARALITO COMTECATLAN
		Qj	PARALITO AJOLTA ESPINAL
		Qk	PARALITO TEPETLAN
CENOZOICO	Cuaternario	Ql	PARALITO AJOLTA TILAPAPILA
		Qm	SARALTO
		Qn	PARALITO SARALTO
		Qo	PARALITO MEZCALA
		Qp	PARALITO SHELBY
		Qq	PARALITO MEZCALCO
		Qr	PARALITO AJOLTLAN
		Qs	COMPLEJO METAMÓRFICO

SIMBOLOGIA GEOLOGICA

