



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Estudio sobre la calidad de agua subterránea del área noreste
del valle de la ciudad capital de Guatemala**

Lilian Leonor Ramírez Mejía
Asesorada por Ing. Julio Rodolfo Escoto Rosales

Guatemala, octubre de 2,003

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Estudio sobre la calidad de agua subterránea del área
noreste del valle de la ciudad capital de Guatemala

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LILIAN LEONOR RAMÍREZ MEJÍA

ASESORADA POR ING. JULIO RODOLFO ESCOTO ROSALES
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE:
INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2,003

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO:	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL PRIMERO:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL SEGUNDO:	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL TERCERO:	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL CUARTO:	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL QUINTO:	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO:	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO:	Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR:	Ing. Pablo Christian De León Rodríguez
EXAMINADOR:	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR:	Ing. Edgar Fernando Aragón Guzmán
SECRETARIO:	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTUDIO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA DEL ÁREA NORESTE DEL VALLE DE LA CIUDAD CAPITAL DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 18 de septiembre de 2,002.

Lilian Leonor Ramírez Mejía

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XIV
INTRODUCCIÓN	XV
1. DESCRIPCIÓN DEL VALLE DE LA CIUDAD GUATEMALA	1
1.1 Descripción del valle de la ciudad de Guatemala	1
1.1.1 Topografía	1
1.1.2 Mapa de fallas	1
1.1.3 Estratigrafía general	2
1.2 Descripción del área de estudio	2
1.3 Estudio geológico	3
1.3.1 Estratigrafía y litología	3
1.3.1.1 Rocas paleozoicas	4
1.3.1.2 Rocas cretácicas	4
1.3.1.3 Rocas terciarias	5
1.3.1.3.1 Riolita	5
1.3.1.3.2 Andesita basalto	6
1.3.1.3.3 Dacita	7
1.3.1.3.4 Sedimentos del terciario	7
1.3.1.3.5 Rocas cuaternarias	8
1.3.2 Geología estructural	9
1.3.2.1 Estructura de la formación	9
1.3.2.1.1 Rocas metamórficas	9

1.3.2.1.2	Rocas cetácicas	10
1.3.2.1.3	Rocas terciarias	10
1.3.2.1.4	Rocas cuaternarias	10
1.3.2.2	Estructura de las fracturas	11
1.3.2.3	Estructura del basamiento	12
2.	MONITOREO Y VULNERABILIDAD	15
2.1	Generalidades	15
2.1.1	Objetivos del monitoreo de calidad	15
2.1.2	Dificultad del muestreo representativo	16
2.1.3	Selección de los parámetros analíticos	18
2.1.4	Precauciones de seguridad para el muestreo	21
2.2	La complejidad hidrogeológica para el muestreo	22
2.2.1	Regímenes de flujo de aguas subterráneas	22
2.2.2	Transporte y atenuación de contaminantes	27
2.2.3	Controles naturales sobre la calidad de aguas subterráneas	32
2.3	Pozos de monitoreo	34
2.3.1	Criterios de diseño	34
2.3.2	Alternativas de diseño	35
2.3.2.1	Piezométricos sencillos	35
2.3.2.2	Piezométricos múltiples	37
2.3.3	Selección de materiales de construcción	39
2.3.4	Métodos de perforación de pozos	41
2.4	Monitoreo de la zona no saturada	44
2.4.1	Fase móvil	44
2.4.1.1	Significado del monitoreo	44
2.4.1.2	Muestreadores a succión	45
2.4.1.3	Otros métodos	48
2.4.2	Fase adsorbida	49

2.5	Programas de monitoreo de aguas subterráneas	50
2.5.1	Objetivos	50
2.5.2	Principios del diseño y desarrollo de sistemas	51
2.5.3	Procedimientos y precauciones operacionales	55
2.5.3.1	Limpieza de pozos	55
2.5.3.2	Recolección de muestras	56
2.5.3.3	Filtración de muestras	58
2.5.3.4	Preservación de muestras	59
2.5.3.5	Control y garantía de calidad	60
2.5.4	Parámetros indicadores de contaminación	60
2.6	Vulnerabilidad natural del acuífero (método DRASTIC)	62
2.6.1	Generalidades	62
2.6.2	Método DRASTIC	63
2.6.2.1	Supuestos	64
2.6.2.2	Variables	64
2.6.2.2.1	Profundidad del agua	65
2.6.2.2.2	Recarga	65
2.6.2.2.3	Medio del acuífero	65
2.6.2.2.4	Suelo	66
2.6.2.2.5	Topografía	66
2.6.2.2.6	Zona vadosa	66
2.6.2.2.7	Conductividad hidráulica	67
2.6.2.3	Sistema numérico	67
2.6.2.3.1	Peso	68
2.6.2.3.2	Escalas	68
2.6.2.3.3	Clasificación	69
2.6.2.3.4	Valor numérico DRASTIC (VND)	71
2.6.2.3.5	Índice DRASTIC (ID)	72
2.6.2.3.6	Rangos de vulnerabilidad	72

3. CARACTERÍSTICAS Y MANEJO ACTUAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	73
3.1 Descripción de la explotación de agua subterránea en el área de estudio	73
3.1.1 Antecedentes	73
3.1.2 Tratamiento del agua potable	74
3.1.2.1 Químicos que se utilizan	74
3.1.3 Sistema de producción y abastecimiento de agua potable	75
3.1.4 Plantas de tratamiento	76
3.1.4.1 El Cambray y planta de bombeo Hincapié	76
3.1.4.2 Sistema La Brigada	77
3.1.4.3 Sistema Las Ilusiones y estación de bombeo El Atlántico	78
3.1.4.4 Estación de bombeo Ojo de Agua	78
3.1.4.5 Sistema Santa Luisa	79
3.1.4.6 Sistema Xayá-Pixcayá y planta Lo de Coy	79
3.1.4.7 Pozos de Empagua	80
3.1.4.8 Pozos proyecto emergencia I	81
3.2 Calidad del agua, parámetros y su interpretación	82
3.2.1 Análisis físico	82
3.2.2.1 Aspecto	82
3.2.2.2 Olor	82
3.2.2.3 Color	83
3.2.2.4 Turbiedad	84
3.2.2.5 Temperatura	85
3.2.2.6 Potencial de hidrogeno (pH)	85
3.2.2.7 Residuos totales	86
3.2.3 Análisis químico	86
3.2.3.1 Fluoruros	87

3.2.3.2	Cloruros	87
3.2.3.3	Nitrógeno	88
3.2.3.4	Hierro total	89
3.2.3.5	Dureza total	90
3.2.3.6	Alcalinidad total	90
3.2.3.7	Manganeso	91
3.2.3.8	Sulfatos	91
3.2.3.9	Cloro residual	92
3.2.4	Examen bacteriológico	93
3.2.4.1	Grupo coliforme	94
3.2.4.1.1	Prueba presuntiva	95
3.2.4.1.2	Prueba confirmativa	95
3.2.4.1.3	Expresión de resultados	95
3.2.4.1.4	Cálculo de número más probable (NMP)	96
3.2.5	Análisis hidrogeoquímico	96
3.2.5.1	Diagramas poligonales y radiantes	96
3.2.5.1.1	Diagrama de Stiff modificado	96
3.2.5.2	Clasificación de las aguas	98
3.2.5.2.1	Clasificaciones simples	98
3.2.5.2.2	Clasificaciones geoquímicas	99
3.2.5.2.3	Clasificación de Chase Palmer	101
3.2.5.2.4	Clasificación de Souliné	103
3.2.5.2.5	Clasificación de Schouller	104
3.3	Marco legal e instituciones relacionadas	105
3.3.1	Marco legal	105
3.3.1.1	Constitución Política de la República	105
3.3.1.2	Código Civil	106
3.3.2	Entidades relacionadas	107

4. MUESTREO	109
4.1 Descripción general de los sectores	110
4.1.1 Sector 1, (Rodeo-Los Ocotes)	110
4.1.2 Sector 2, (Rodeo-Vados)	111
4.1.3 Sector 3 y 4, (Las Vacas)	113
4.2 Análisis de hidrogequímica	114
4.2.1 Gráficas (Piper-Stiff)	114
4.2.2 Análisis e interpretación de resultados	127
4.2.2.1 Gráficas Piper	127
4.2.2.2 Gráficas Stiff	127
4.3 DRASTIC	128
CONCLUSIONES	131
RECOMENDACIONES	133
BIBLIOGRAFÍA	135
ANEXOS	137

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Direcciones de lineamientos	11
2	Circulación del agua subterránea en las fallas	12
3	Secciones hipotéticas para ilustrar típicos regímenes de flujo de agua subterránea, y los tiempos de residencia subterránea bajo condiciones húmedas	25
4	Secciones hipotéticas para ilustrar típicos regímenes de flujo de agua subterránea, y los tiempos de residencia subterránea bajo condiciones semiaridas	25
5	Determinación del gradiente hidráulico del acuífero y la dirección del flujo de aguas subterráneas por medidas piezométricas	26
6	Rango aproximado de permeabilidad y porosidad de acuíferos comunes, con indicación del efecto potencial de fisuras	28
7	Distribución subterránea de hidrocarburos aromáticos de baja densidad	31
8	Distribución subterránea de hidrocarburos halogenados de alta densidad	31
9	Muestreadores a succión para el monitoreo de la zona no saturada	45
10	Dispositivos de vacío de presión modificados para prevenir el flujo de retorno	46
11	Perfiles de la calidad del agua de la zona no saturada, bajo una laguna de aguas residuales, a) NH ₄ y b) COD de muestras centrífugas del núcleo c) parámetros microbiológicos para material del núcleo	49

12	Diagramas de Stiff modificados	97
13	Tipos de aguas deducidas de un diagrama triangular de Piper	101
14	Gráfica de Piper, sector No. 1, datos verano 2002	115
15	Gráfica de Piper, sector No. 2, datos verano 2002	116
16	Gráfica de Piper, sector No. 3, datos verano 2002	117
17	Gráfica de Piper, sector No. 4, datos verano 2002	118
18	Gráfica de Piper, sector No. 1, datos invierno 2002	119
19	Gráfica de Piper, sector No. 2, datos invierno 2002	120
20	Gráfica de Piper, sector No. 3, datos invierno 2002	121
21	Gráfica de Piper, sector No. 4, datos invierno 2002	122
22	Gráficas de Stiff, sector No. 1, datos verano e invierno 2002	123
23	Gráficas de Stiff, sector No. 2, datos verano e invierno 2002	124
24	Gráficas de Stiff, sector No. 3, datos verano e invierno 2002	125
25	Gráficas de Stiff, sector No. 4, datos verano e invierno 2002	126
26	Sectores explotación, proyecto emergencia I	141
27	Ubicación pozos de explotación sistema Norte	143
28	Ubicación pozos de explotación sistema Vista Hermosa	145
29	Ubicación pozos de explotación sistema Canalitos	147
30	Ubicación pozos de explotación sistema Lavarreda y El Rodeo	149
31	Análisis físico químico sanitario	151
32	Balace de aniones y cationes	153
33	Examen bacteriológico	155

TABLAS

I	Resumen de las normas para calidad de agua potable, y el comportamiento subterráneo de importantes contaminantes del agua subterránea	19
II	Resumen de las principales actividades que generan una carga contaminante al subsuelo	20
III	Comparación cualitativa de los materiales de construcción del pozo de monitoreo	39
IV	Resumen de procedimientos y precauciones de muestreo para grupos específicos de parámetros	57
V	Pesos asignados a cada parámetro de acuerdo con su importancia	68
VI	Escala y calificación para la profundidad del agua	69
VII	Escala y calificación para la recarga neta	69
VIII	Tipo de materiales y calificación para el medio del acuífero	70
IX	Tipo de materiales y calificación para medio del suelo	70
X	Escala y calificación para la topografía	70
XI	Tipo de materiales y calificación para el impacto de la zona vadosa	71
XII	Escala y calificación para la conductividad hidráulica	71
XIII	Rangos de vulnerabilidad	72
XIV	Sistemas de producción de agua potable en la ciudad capital	75
XV	Producción mensual en m ³ de agua potable en la ciudad capital	76
XVI	Límites para la concentración de fluoruros en el agua potable	87
XVII	Clasificación del agua, según rango de dureza total	90
XVIII	Clasificación de grupos	100
XIX	Clasificación Chase Palmer	103
XX	Clasificación Souliné I	103

XXI	Clasificación Souliné II	103
XXII	Clasificación de Scholler I	104
XXIII	Clasificación de Scholler II	104
XXIV	Clasificación de Scholler III	104
XXV	Sectorización de los pozos del área de estudio	110
XXVI	Aplicación del método DRASTIC	123
XXVII	Ubicación, profundidad y caudal de los pozos en estudio	139

GLOSARIO

Conductividad hidráulica	Es la propiedad de un medio poroso y/o fracturado en permitir la circulación de agua a través de sí, por unidad de tiempo y bajo un gradiente determinado
Drastic	Es el sistema que evalúa la sensibilidad natural de un acuífero a la contaminación, ante una carga contaminante depositada, con la utilización de escenarios hidrogeológicos con características comunes
Límite máximo aceptable	Es el valor de la concentración de cualquier característica de la calidad del agua, arriba del cual el agua pasa a ser rechazable por sus consumidores
Límite máximo permisible	Es el valor de la concentración de cualquier característica de la calidad del agua, arriba de la cual el agua no es adecuada para consumo humano
Monitoreo	Es la herramienta útil para determinar la calidad de las aguas subterráneas, controlar la extensión del agua contaminada y proporcionar un preaviso del inicio de la contaminación
Recarga	Es la cantidad de agua por unidad de área, que se infiltra a través del suelo y llega hasta el nivel freático

Zona vadosa Es la zona del sistema acuífero que no está saturada o que tiene una saturación discontinua

RESUMEN

El presente trabajo contiene, en su primera parte, una descripción de la geología del valle de la ciudad de Guatemala, la cual ayuda a comprender el comportamiento de los acuíferos del área de estudio.

El capítulo dos describe las generalidades del monitoreo del agua subterránea, características de los pozos de monitoreo, parámetros indicadores de contaminación, y además se describe la metodología DRASTIC.

El manejo de las aguas subterráneas en Guatemala, sus parámetros de calidad y el marco legal dentro del cual se manejan actualmente, se describe en el tercer capítulo.

Por último, la parte práctica cuenta con el análisis e interpretación de resultados obtenidos durante el estudio, así como la aplicación del método DRASTIC al área en estudio.

OBJETIVOS

General

Determinar las condiciones y características, bajo las que se encuentra el agua subterránea del área noroeste de la ciudad de Guatemala, así como proporcionar soluciones prácticas y concisas que ayuden a una mejor conservación del recurso en este sector.

Específicos

1. Determinar la variación espacial de la calidad del agua subterránea.
2. Identificar las posibles fuentes de contaminación del agua subterránea, como consecuencia de actividades dadas en la región.
3. Determinar la vulnerabilidad del área a la contaminación con base en el método DRASTIC.
4. Crear una base de datos para el futuro control de calidad del agua subterránea.

INTRODUCCIÓN

El recurso agua es indispensable para satisfacer las necesidades básicas de la población y para el desarrollo socioeconómico de los pueblos. En Guatemala, es importante su uso en la agricultura, producción de energía eléctrica, en los servicios de agua potable y en la industria.

Al año 2002, según estimaciones del Plan Marco 2003-2020, "Abastecimiento de agua potable de la ciudad de Guatemala", se tiene que para una población de 1.6 millones de habitantes (año 2002), se considera una demanda de 6.091 metros cúbicos por segundo, tomando en cuenta una dotación promedio de 230 lts/hab/día y como promedio un 43% de pérdidas en la red. Tomando en cuenta una oferta de 4.486 metros cúbicos por segundo, establecida en el mismo estudio, por consiguiente existe un déficit de 1.605 metros cúbicos por segundo.

Por esta razón, el fin primordial de este trabajo es analizar las condiciones de calidad del agua subterránea. Para esto, se seleccionó el sector noreste de la ciudad capital como área de estudio.

Se analizaron los parámetros de calidad del agua con base en las pruebas de laboratorio realizadas a muestras recolectadas en los distintos pozos del área, tanto para la época de verano, como invierno.

Por último, se aplicó el método de análisis de vulnerabilidad de los acuíferos DRASTIC. Para esto, el área de estudio se dividió en cuatro sectores con base en escenarios hidrogeológicos de características comunes.

1. DESCRIPCIÓN DEL VALLE DE LA CIUDAD GUATEMALA

1.1 Descripción del valle de la ciudad de Guatemala

1.1.1 Topografía

El valle de la ciudad de Guatemala constituye parte del altiplano de Guatemala, que forman un terreno de relieve moderado, al norte de una cadena de conos volcánicos cuaternarios. Dicha cadena volcánica, cuyos conos ascienden hasta los 4,000 msnm, se extienden en dirección ONO-ESE paralela a la costa pacifica del país. La elevación máxima del terreno al norte de los volcanes y al este del Lago de Amatitlán es de 2,300 msnm, en el valle de Guatemala.

Al norte de este altiplano se ubica un terreno de gran relieve, fuertemente bisectado por los afluentes del río Motagua, cuyo curso está determinado por la presencia de grandes fallas; Motagua y San Agustín. Este sistema de fallas tiene un rumbo O-E desde Chichicastenango (91° al norte del Lago de Atitlán) hasta el Progreso (90° al norte de la ciudad capital), para después continuar con rumbo N-E hacia el Mar del Caribe.

1.1.2 Mapa de fallas

La morfología cuneiforme del terreno entre este sistema de fallas del Motagua y la cadena volcánica, ha sido influenciada por un sistema de fallas de bloque; con rumbo NNE hasta NNO, que forman una serie de bloques levantados y bloques hundidos, de los cuales el valle de Guatemala es un ejemplo.

Esta depresión topográfica forma un valle de fondo plano. La divisoria continental de aguas pasa en dirección NO por la ciudad capital; desde la Florida en el NO (elevación 1,620 msnm) a Vista Hermosa en el SE (elevación mínima 1,510 msnm). Al sur de la divisoria, la planicie desciende gradualmente hasta los 1,280 msnm; al norte del Lago de Amatitlán (pendiente de casi 2%). Hacia el norte la planicie desciende hasta los 1,300 msnm, al norte de Chinautla (pendiente de casi 2.5%).

Ambos lados de la divisoria continental los ríos han cortado cañones profundos en la planicie del valle de la ciudad de Guatemala, que está constituido por cenizas y tobas volcánicas. En estas rocas resistentes a la erosión mecánica fluvial, se han formado cañones con paredes casi verticales de hasta 140 metros de altura, que representan las densas redes dendríticas juveniles de río Las Vacas, que drena en el río Motagua en el norte, y del río Villalobos al sur de la divisoria continental, el cual drena el Lago de Amatitlán. El perfil longitudinal de varios ríos está interrumpido por cataratas con saltos de 1 a unos 15 metros. Estas interrupciones del perfil pueden ser provocadas por la presencia de rocas recientes debajo de la cubierta de tobas y cenizas volcánicas en el cauce del río, o por la presencia de fallas con un desplazamiento vertical.

1.1.3 Estratigrafía general

Las lavas y cenizas volcánicas cuaternarias, con algunas intercalaciones locales relativamente delgadas de sedimentos fluviales, lacustres y paleosuelos, forman una cubierta casi continua sobre las rocas terciarias, cretácicas y paleozoicas en el área.

1.2 Descripción del área de estudio

Los pozos en estudio comprenden parte del Plan de Emergencia I. En dicho estudio, se identificaron cinco zonas, las cuales se seleccionaron en el estudio de factibilidad de aguas subterráneas en el valle de la ciudad de Guatemala en 1986 por JICA, a saber: Norte, Lavarreda, El Rodeo, Canalitos y Vista Hermosa.

La topografía del área es muy variable; en el área Oeste se presenta las mayores planicies, las cuales tienen un alto porcentaje de desarrollo urbanístico. Las áreas norte y este constan de varios cerros, que forman un relieve pronunciado, cuyos drenajes forman barrancas profundas. Debido a esta topografía, no hay un desarrollo urbanístico grande, a excepción de algunas colonias que se han desarrollado en las mesetas existentes en el área. La parte sur está formada por cerros, que constituyen el relieve más abrupto de las zonas.

La elevación más alta del área de estudio es de 2,028 metros sobre el nivel del mar, en el cerro el Pajón, que constituye a su vez el límite sur del área. La elevación más baja es 1,250 metros sobre el nivel del mar, en la orilla del río Ocotes en el límite noreste del área. Los ríos principales son el río Las Vacas, Los Ocotes y Los Vados, para formar, tres subcuencas del mismo nombre.

Casi la totalidad del límite sureste del área está identificado por la carretera Panamericana (CA-1). Aproximadamente, al centro del área pasa la carretera del Atlántico (CA-9) con una dirección este a oeste. Sin embargo, los accesos dentro del área no se han desarrollado suficientemente. La mayoría de las carreteras son de terracería y angostas, especialmente en la zona oeste, de las cuales algunas son intransitables en época de lluvia.

1.3 Estudio geológico

1.3.1 Estratigrafía y litología

Geológicamente el área de estudio está constituida por rocas de edades paleozóicas, cretácicas, terciarias y cuaternarias. De las más antiguas a las más recientes, se encuentran las rocas siguientes:

1.3.1.1 Rocas paleozoicas

Las rocas metamórficas se observan en la zona norte. En los alrededores del cerro El Chile, se encuentran rocas metamórficas que tienen alteración de meteorización muy fuerte, como suelo laterítico de color amarillo rojizo. Se pueden observar cuarcitas, lutitas, meta-volcánicas en los pequeños afloramientos, sin embargo, las relaciones estratigráficas entre ellas no son muy claras.

1.3.1.2 Rocas cretácicas

Calizas gris oscuro a negro y calizas gris claras a blancas, afloran en los bloques levantados de la zona norte del área. Los afloramientos de estas calizas se alinearon en dirección E-W con intervalo de 1-2 Km. Sin embargo, la continuidad subterránea de las calizas está conformada con información obtenida de varios pozos profundos.

Las calizas gris oscuras a negro se encuentran generalmente más al norte de línea UTM 1624 y las calizas blancas están más al sur de la misma línea.

La diferencia esencial de las características de los dos tipos de calizas no es clara, sin embargo, las calizas negras tienen más material orgánico que las calizas blancas y probablemente las calizas blancas fueron afectadas por metamorfismo y alteración hidrotermal.

En el estudio geológico realizado en los pozos San Sebastián y Las Ilusiones, se cortó una capa de caliza negra. Estas calizas negras son generalmente de grano fino, compactas con venillas de calcita blanca, las cuales en algunas partes tienen intercalaciones de lutitas negras bituminosas. El espesor de estas calizas no está claro debido a que en el momento en que se realizó dicho estudio no se contaba con pozos, en los que se haya penetrado completamente en las capas de caliza.

A través del registro geológico del pozo de investigación Las Ilusiones, el espesor de caliza negra podría ser más o menos de 230 metros. Obviamente se determinó que en las calizas blancas se desarrolla más la karstificación y fracturación que en las calizas negras, mediante las observaciones efectuadas en el campo.

Además de las calizas, en el Pozo de la Planta Canalitos se encontró una capa de sedimento silicio (Cuarcita o grauwaca), probablemente de edad cretácica a una profundidad de 390 metros. Los pequeños afloramientos de roca granítica se observan en la parte sur de Canalitos como una intrusión de roca ígnea.

La composición de esta roca es cuarzo, feldespato y poco de biotita, de grano grueso a medio, de color blanco-amarillento. Generalmente se presenta con alteración y meteorizada muy fuertemente.

Su relación con otra formación no está muy clara, sin embargo, estas rocas graníticas se distribuyen extensamente en profundidad, particularmente en la parte sur de la zona. La edad de estas rocas graníticas es de 50 - 80 ma. (Inferior del terciario o cretácico superior), según informe de INSIVUMEH.

1.3.1.3 Rocas terciarias

A través del informe de INSIVUMEH 1978 y del mapa Geológico del Cuadrángulo San José Pinula (1:50,000), las lavas andesíticas-basálticas (formación Sanguayabá) sobreyacen a sedimentos volcánicos, que a su vez sobreyacen a lavas andesíticas-basálticas, que en el estudio se tomaron como rocas de edad terciaria.

1.3.1.3.1 Riolita

Los afloramientos de riolita se distribuyen en la parte S-E de la subcuenca del río Los Ocotes y en la loma de la finca El Durazno al noroeste del área en dirección N-S.

Generalmente, los afloramientos de riolitas ocupan cerros independientes como en los Cerros Monterrey, El Socorro y el de la Finca El Rodeo, al noreste del área. Debido a esta distribución, la mayor parte de afloramientos de riolitas, exceptuando las de la Finca El Durazno, podrían ser en forma de domos.

La riolita presenta un color blanco o blanco-amarillento, generalmente resultado de una alteración hidrotermal muy fuerte. La composición de esta roca no está clara debido a la alteración tan fuerte, y frecuentemente se observan granos finos de pirita diseminados, así como venillas de pirita.

La riolita en la Finca El Durazno presenta un color gris oscuro, grano fino compacto y vídrio. Esta riolita seguramente se formó mediante coladas de lava con espesores de unos 10 metros.

En el fondo del pozo Hacienda Real, se encontró roca riolítica de color gris claro con fenocristales de hornblenda. La edad de estas riolitas no se conocen con certeza, sin embargo, debido a la presencia de venillas de sílice con pirita, en piroclastos de cuaternario en los alrededores de los domos de riolitas, se podría decir que algunas riolitas tienen una edad más reciente que la indicada en otros informes.

1.3.1.3.2 Andesita basalto

Estas rocas afloran topográficamente en el punto más alto, al sur y este de la zona. Sin embargo, a través de la información litológica existente de los pozos perforados en la zona, se puede establecer que éstas subyacen al relleno volcánico del cuaternario.

Como componente en la estructura de estas rocas, son mayormente de color gris oscuro o marrón rojizo.

Generalmente, se presentan en forma de coladas de lava y tienen grietas escamosas parcialmente, y se distribuyen siguiendo la forma de domo, que tienen estructura porfídica con fenocristales de plagioclasa, como la andesita del cerro El Pulte en la zona sur del área.

En todos los pozos de investigación, se encontraron rocas andesitas. El espesor y grado de fracturación es muy variable. En las andesitas, se han desarrollado grietas escamosas, las cuales tienen alta permeabilidad (secundaria) y funciona como un buen acuífero, como la andesita en los pozos El Jagüey y Canalitos JICA.

1.3.1.3.3 Dacita

Esta se puede observar, sólo existe en los pozos de investigación El Jagüey y el Buen Pastor, sin embargo, en lo profundo de los pozos Canalitos-JICA y Canalitos-INSIVUMEH, seguramente se atravesó esa misma formación. La dacita presenta un color gris a marrón-gris, porfídica fracturada, que contiene biotita y hornblenda escoriaza en la parte de contacto con lava andesítica. La extensión de esta roca no está clara, pero se considera, en forma general, que subyace a la lava y funciona como buen acuífero.

1.3.1.3.4 Sedimentos del terciario

Los depósitos de los sedimentos del terciario se observan mayormente en el sur y este del área, en las cercanías de los afloramientos de andesitas y riolitas; estos sedimentos están constituidos por arena, limo tobáceo y arcilla, color gris verdoso.

Según los mapas geológicos anteriores, en la parte en que se distribuyen estos sedimentos, está ocupada mayormente por toba soldada. Sin embargo, no se pudo observar toba soldada típica en los reconocimientos de campo realizados en el estudio.

Por una parte, en los pozos de Hacienda Real y El Jagüey se encontraron sedimentos fluviales constituidos por arcilla, limo, arena y grava subyacente a la lava andesítica. El material de este sedimento parece que es de origen volcánico como ceniza, arena de cuarzo, fragmentos volcánicos y particularmente no tiene pómez. Según los informes anteriores, los sedimentos del terciario están constituidos mayormente de toba soldada y el potencial de agua subterránea es poco, debido a la baja permeabilidad de la toba soldada. Sin embargo, los sedimentos que se encontraron en los pozos mencionados arriba no están consolidados y parece que tienen alta permeabilidad.

De este hecho, los sedimentos de terciario pueden considerarse como acuífero, igualmente que la andesita fracturada.

1.3.1.3.5 Rocas cuaternarias

Se distribuyen en la mayor parte del área y están constituidas por varias capas de sedimentos de ceniza y flujos de pómez y piroclásticos. Según los informes anteriores, estos sedimentos tienen por lo menos seis capas de ceniza caída (tefra) y cuatro capas de flujos piroclásticos (diamicton) en el Valle de Guatemala.

Para confirmar estos sedimentos estratigráficamente, se debe hacer un estudio del área más extenso y detallado, y así dar seguimiento de identificación de las capas de las tefras. En el estudio, se confirmó solo parte de ellas, debido a la falta de tiempo.

Del reconocimiento geológico de campo efectuado en la carretera que conduce a los Ocotes, la secuencia litológica de arriba hacia abajo es la siguiente:

- a) Flujo de pómez, color blanco-amarillento, con fragmentos líticos andesita y basalto de grano fino, los cuales presentan una potencia aproximada de 30 m
- b) Flujo de pómez, esencialmente de color blanco-amarillento, con potencias de 20-30 m

- c) Flujo de pómez color gris, ceniza y arena volcánica con brechas de pómez, poco consolidado, con potencias de 20-30 m
- d) Paleosuelos de color marrón oscuro
- e) Flujo de pómez, color blanco-amarillento con fragmentos líticos de andesita y basalto de grano medio, con potencias mayores de 10 m

En la carretera para Canalitos, se observan flujos de pómez casi igual que la secuencia mencionada anteriormente, sin embargo, en la parte de abajo (cerca del puente) se presenta una toba dacítica con biotita en abundancia.

Generalmente, estos sedimentos tienen alta porosidad, sin embargo, su permeabilidad no es muy alta debido a que contienen arcilla fina, excepto en partes en donde están constituidas con materiales de granos gruesos. Se observan depósitos aluviales, en las orillas de los ríos, sin embargo, estos depósitos no son muy importantes hidrogeológicamente en el área, debido a su poca potencia y cobertura.

1.3.2 Geología estructural

1.3.2.1 Estructura de la formación

1.3.2.1.1 Rocas metamórficas

La estructura de las rocas metamórficas no está clara, debido a los pocos afloramientos y a las altas alteraciones por meteorización.

En el corte de la carretera Atlántico, a inmediaciones del Km 18, el rumbo de una capa de arena cuarcítica es N60°W, y el buzamiento es de 80°- 85° al SW. Sin embargo, éstas, en su mayoría, están cubiertas con las formaciones muy recientes en forma discordante.

1.3.2.1.2 Rocas cetácicas

Las calizas que se observan en los afloramientos son generalmente masivas. Sólo se observó en la caliza blanca, al este del Hospital Psiquiátrico, estratificación con dirección N70°E, y un buzamiento de 40° al NW. Esta dirección representa, en forma general, la dirección correcta de los afloramientos de calizas. Sin embargo, la estructura exacta de esta formación tampoco está clara debido a que se cortan con varias fallas y movimientos complejos.

1.3.2.1.3 Rocas terciarias

Entre las rocas terciarias tenemos dos tipos:

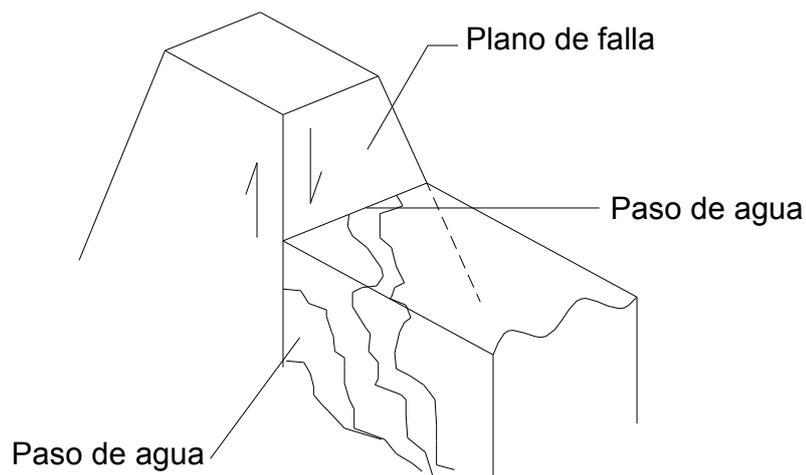
- a) Lavas de andesíticas: las lavas de andesita en el área de estudio, generalmente se fluyeron hacia el noreste con baja inclinación. Sin embargo, en parte de ellas se forman como en el cerro El Pulté
- b) Los sedimentos: el rumbo y buzamiento de los sedimentos del terciario se observaron en dirección NNE-SSW, 15°-25° SE, respectivamente, en la parte sur de Canalitos y en el cerro Quejuta. Sin embargo, en la Finca Llano Largo, se midieron rumbos NNW - SSE, y buzamientos 25° SW. Con estos datos, se puede decir que el rumbo de los sedimentos es casi N-S en general y tienen plegamiento de grado bajo

1.3.2.1.4 Rocas cuaternarias

Los depósitos de caída de ceniza y flujos de piroclásticos del cuaternario tienen una estructura sedimentaria, casi horizontal.

Así, los lineamientos indican fallas, las cuales tienen la característica de fallas abiertas. Con estas condiciones, las fallas que tienen dirección NNE-SSW, se pueden considerar buenas para la circulación del agua subterránea. Sin embargo, hay que considerar que la circulación en las fallas es limitada, debido a que no todo el plano de falla se encuentra abierto, y por ende la circulación del agua subterránea depende de esta condición, tal y como lo muestra la siguiente figura:

Figura 2. Circulación del agua subterránea en las fallas



1.3.2.3 Estructura del basamento

Fisiográficamente, la zona consta de planicies, cerros y/o montañas. Geológicamente los cerros y montañas están constituidas por las rocas del basamento como granito, andesita, riolita, etc., y las planicies están constituidas mayormente por el relleno volcánico del cuaternario.

En virtud de lo anterior, se puede suponer que al centro de las planicies actuales deben existir drenajes antiguos. Algunas lavas andesíticas también se encuentran por debajo de estos rellenos volcánicos (planicies), que indica que éstas fluyeron a lo largo de estos drenajes anteriores.

La recarga natural de agua subterránea se verifica, a través de rellenos volcánicos que tienen alta permeabilidad y percola hacia drenaje antiguo de la cuenca, es decir, que existe una interconexión de los llamados acuíferos e hidrogeológicas, por lo que se pudo concluir que las partes más favorables, para desarrollar agua subterránea en la zona, son las áreas en las cercanías de los drenajes antiguos mencionados arriba.

2. MONITOREO Y VULNERABILIDAD

2.1 Generalidades

2.1.1 Objetivos del monitoreo de calidad

El requisito fundamental en la mayoría de los programas de monitoreo es determinar la variación espacial de la calidad de las aguas subterráneas. Este objetivo es esencialmente el mismo, sin tener en cuenta si el propósito es:

- a) Determinar la distribución subterránea de la contaminación y las tasas de migración de los contaminantes.
- b) Establecer la extensión de intrusión salina costera.
- c) Determinar la distribución de las aguas subterráneas de baja calidad, causada por la interacción natural agua-roca.
- d) Monitorear la efectividad de medidas para controlar o remediar la contaminación.

En todos estos casos, el propósito es obtener resultados que reflejen exactamente la condición de las aguas subterráneas en el acuífero. Esto supone la necesidad de obtener muestras representativas no contaminadas de la condición en un punto específico dentro del sistema de aguas subterráneas en forma periódica.

Otro objetivo del monitoreo es la vigilancia de las aguas subterráneas que se utilizan para el suministro de agua, lo que está relacionado con la aceptabilidad de agua bombeada para un uso determinado y/o con el control de cualquier proceso de tratamiento necesario.

El crecimiento, en la disposición de residuos urbanos e industriales a la tierra y la intensificación del cultivo agrícola, están ocasionando un riesgo de contaminación de aguas subterráneas.

Esto requerirá una mayor ampliación de las actividades de monitoreo de estas aguas, especialmente:

- a) Para identificar el inicio de la contaminación de las aguas subterráneas por una actividad dada, tan pronto como sea posible, de manera que permita la introducción de medidas de control a tiempo.
- b) Para proporcionar aviso anticipado de la llegada de aguas contaminadas a las fuentes importantes de suministro de aguas subterráneas, a fin de conceder tiempo para iniciar acciones correctivas.
- c) Para determinar responsabilidad legal en los incidentes de contaminación.

La exactitud y significación de los resultados del monitoreo necesitan ser evaluados en forma regular. Una acción de seguimiento apropiado, como el control de fuentes de contaminación, descontaminación del suelo y de acuíferos, tratamiento del suministro de agua, modificaciones en la explotación del acuífero, etc., debe tomarse siempre en cuenta.

La carencia de acciones de seguimiento niega la justificación para implementar los programas de monitoreo.

2.1.2 Dificultad del muestreo representativo

En vista de que los sistemas de aguas subterráneas son mucho más complejos y mucho menos accesibles que los cuerpos de agua superficial, como los ríos y lagos, existen grandes obstáculos para lograr los requisitos ideales de muestreo.

Dichos obstáculos son técnicamente difíciles y económicamente costosos de vencer, y a menudo tienen que aceptarse serias limitaciones en la representatividad de las muestras de aguas subterráneas. Es muy importante que tales limitaciones se reconozcan completamente en la interpretación y aplicación de los resultados.

Debería considerarse la introducción de métodos mejorados, cuando la necesidad de un resultado más seguro se justifica económicamente y donde intervengan ciertos grupos de determinantes inestables, pero de importancia para la salud pública.

Las causas que conducen a una interpretación errónea e inadecuada de la condición del agua subterránea en el acuífero se derivan de dos grupos distintos de razones. Las que están relacionadas con:

- a) La modificación fisicoquímica de la muestra
- b) La complejidad hidrogeológica

El acceso normal al subsuelo para el muestreo de aguas subterráneas son los pozos de un tipo u otro. De esta manera, el grupo anterior incluye no sólo la influencia en la integridad de las muestras de aguas subterráneas de factores, como tipo de muestreador, manejo, conservación y transporte de las muestras, sino también problemas claves asociados con la perforación y la presencia de los mismos pozos de monitoreo.

Una fuente aún más grave de error resulta de la frecuente falta al relacionar la escala de las redes de monitoreo con variaciones tridimensionales en el flujo y la calidad de las aguas subterráneas. La complejidad de los regímenes del transporte de contaminantes en los acuíferos a menudo es tal que, para las aplicaciones comunes de muestreo, se requerirá de un hidrogeólogo especializado tanto para diseñar la red, como para interpretar sus resultados.

2.1.3 Selección de los parámetros analíticos

Cuando el objetivo del monitoreo está relacionado con la calidad de las aguas subterráneas y/o los problemas de contaminación, la selección de parámetros analíticos normalmente estará impuesta por la interacción entre:

- a) El uso principal de las aguas subterráneas
- b) La posibilidad que los parámetros así definidos se encuentren presentes en concentraciones problemáticas, como resultado del régimen hidrogeoquímico natural y/o el carácter de cualquier carga contaminante, que está siendo descargada al subsuelo.

En caso de que el interés principal en las aguas subterráneas sea como fuente de suministro de agua potable, entonces las guías de la OMS o de otras agencias (tales como la CCE, la EPA o Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos o las nacionales como la Norma Guatemalteca para agua potable NGO-COGUANOR 29001), serán pertinentes para las concentraciones máximas permisibles en el agua potable, por consideraciones de salud y de estética. Un resumen de las normas de calidad de agua y principales contaminantes se muestra en la tabla I, y en la tabla II se puede observar un resumen de las principales actividades que generan una carga contaminante.

Tabla I. Resumen de las normas para calidad de agua potable, y el comportamiento subterráneo de importantes contaminantes del agua subterránea

Contaminantes	Recomendación de la OMS (CEE)		Transformación bioquímica		Reacción química		Retardo fisicoquímico	
	Guía ug/l	Criterio	Aeróbica	Anaeróbica	Acida	Alcalina	Acida	Alcalina
Elementos metálicos								
aluminio (Al)	200	CE(SS)	+	0	0	++	0	++
cadmio (Cd)	5	SS	0	0	0	++	0	+
chromo (Cr)	50	SS	0	0	+	0	++	0
cobre (Cu)	1000	CE	0	0	+	++	++	+
hierro (Fe)	300	CE	++	0	0	++	+	++
plomo (Pb)	50	SS	0	0	+	++	+	++
manganeso (Mn)	100	CE	+	+	0	++	+	++
mercurio (Hg)	1	SS	+	0	+	++	+	++
plata (Ag)	-	-	0	0	+	++	+	++
zinc (Zn)	5000	CE	0	0	0	++	0	++
Inorgánicos no metálicos								
amonio (NH ₄)	10	CE	++	0	0	0	0	++
nitrito (NO ₂)	45000	SS	0	++	0	0	0	0
sodio (Na)	200000	CE	0	0	0	0	0	+
sulfato (SO ₄)	400000	CE	0	++	0	+	0	0
fluoruro (F)	1500	SS	0	0	+	+	++	0
cloruro (Cl)	250000	CE	0	0	0	0	0	0
arsénico (As)	50	SS	0	0	+	0	+	++
selenio (Se)	10	SS	0	0	++	+	++	0
cianuro (CN)	100	SS	0	0	0	0	++	0
Compuestos orgánicos								
hidrocarburos alifáticos	10	CE	++	0	0	0	++	++
fenoles	0.5	CE	++	+	0	0	+	+
benceno	10	SS	++	0	0	0	++	++
tolueno	-	-	++	0	0	0	++	++
aromáticos polinucleares	0.1	SS	+	0	0	0	+	+
Orgánicos halogenados								
tricloroetileno	30	SS	0	+	0	0	0	0
tetracloroetileno	10	SS	0	+	0	0	+	+
1,1,1. tricloroetano	10	SS	0	+	0	0	+	+
tetracloruro de carbono	3	SS	0	+	0	0	+	+
cloroformo	30	SS	0	+	0	0	0	0
cloruro de metileno	-	-	+	+	0	0	0	0
clorobencenos	0.1	CE(SS)	++	0	0	0	++	++
clorofenoles	0.1	CE(SS)	++	+	0	0	+	+
Organismos fecales								
coliformes fecales	1/100 ml	SS	0	0	0	0	+	+
bacterias patógenas	-	-	0	0	0	0	+	+
virus patógenos	-	-	0	0	++	0	+	++

Significativo para la salud
Consideraciones estéticas

SS
SE

Probablemente no ocurre
puede ocurrir
ocurre

0
+
++

Tabla II. Resumen de las principales actividades que generan una carga contaminante al subsuelo

ACTIVIDAD	Características de la carga contaminante			
	Categoría de distribución	Tipos de contaminante		Indicadores de Contaminación
Urbanización				
Saneamiento sin alcantarillado	u/r	P-D	n f o s	NO3(NH4), CF(SF), COD, Cl
Fugas de alcantarillado (a)	u	P-L	o f n s	CF(SF), NH4(NO3)
Lagunas oxidación de aguas servidas (a)	u/r	P	o f n s	NO3(NH4), COD, Cl, CF(SF)
Descarga de aguas servidas sobre terreno (a)	u/r	P-D	n i o f s	NO3, Cl, COD
Descarga de aguas servidas al río (a)	u/r	P-L	n o f s	NO3, COD
Lixiviación rellenos sanitarios o botaderos de	u/r	P	o l h s	NH4(NO3), COD, Cl, B, COV
Tanques de combustible	u/r	P-D	o	HC, COD
Drenaje de carreteras	u/r	P-D	i o s	Cl, (COV)
Desarrollo industrial				
Fugas de tanques y tuberías (b)	u	P-D	o s h	variable, (HC, COV, COD)
Derrames accidentales	u	P-D	o s h	variable, (HC, COV, COD)
Lagunas de efluentes o procesamiento	u	P	o s h i	variable, (COD, COV, Cl)
Descarga de efluentes o procesamiento	u	P-D	o s h i	variable, (COD, Cl)
Descarga de efluentes a ríos	u	P-L	o s h i	variable, (COD)
Lixiviado de residuos sólidos	u/r	P	o s h i	variable, (COD, COV, Cl)
Drenaje de patios	u/r	P	o s h	variable, (HC, COV)
Deposición aerea	u/r	D	s i o	SO4
Prácticas agrícolas ©				
Cultivo de la tierra con:				
Agroquímicos	r	D	n o s	NO3
Irrigación	r	D	n o i s	NO3
Estiércol / lodo	r	D	n o i s	NO3, Cl
Irrigación de aguas residuales	r	D	n o i f s	NO3, Cl, (CF-SF)
Cría de ganado/procesamiento de cosechas:				
Lagunas de efluentes	r	P	f o n	COD, NO3, Cl
Descarga efluentes al terreno	r	P-D	n i o f	COD, NO3, Cl
Descarga efluentes al río	r	P-L	o n f	COD
Extracción de minerales				
Cambio del régimen hidráulico	r/u	P-D	i h	variable
Descarga de agua de drenaje	r/u	P-D	h i	variable
Lagunas de efluentes o procesamiento	r/u	P	h i	variable
Lixiviado de residuos sólidos	r/u	P	i h	variable
Puede incluir componentes industriales	(a)	n		nutrientes
También puede ocurrir en áreas no industriales	(b)	f		organismos fecales
La intensificación del cultivo presenta mayores riesgos de contaminación	©	o		carga orgánica
urbano/rural	u/r	i		sales inorgánicas
puntual/línea/difusa	P/L/	h		metales pesados

Dichas normas también, en parte, serán apropiadas para ciertos usos industriales y agrícolas. No obstante, para agua de refrigeración o lavado industrial, por ejemplo, el interés puede estar restringido al contenido de dureza total, ph, Fe, Mn y Cl, y para la irrigación agrícola normalmente serán suficientes Na, Ca, B, Cl, SO₄ y sólidos disueltos totales.

Numerosos componentes químicos, que pueden causar daño a la salud o perjuicio estético cuando están presentes en el suministro de agua doméstico, pueden presentarse en las aguas subterráneas en forma natural, como resultado de las interacciones geoquímicas de agua-suelo-roca. Estos incluyen Na, Cl, Mg, SO₄, Fe, Mn, As, Se y B.

Cuando se utilizan técnicas hidroquímicas, como una herramienta en el estudio de los regímenes de flujo de aguas subterráneas y el comportamiento subterráneo, los parámetros de interés incluirán pH y Eh, ciertos cationes (Ca, Na, K, Mg, Sr) y aniones (Cl, Br, SO₄), equilibrio de carbonatos (ocasionando determinaciones de pH, Ca, Mg, HCO₃), y ciertos isótopos.

En vista de la amplia gama de determinantes potencialmente presentes, así como el elevado costo de los análisis de laboratorio, en muchos casos será necesario racionalizar el programa analítico de monitoreo de aguas subterráneas a través de la utilización de parámetros indicadores.

2.1.4 Precauciones de seguridad para el muestreo

La superficie alrededor de los pozos siempre debería ser considerada cuidadosamente, ya que puede existir riesgo de derrumbamiento, en especial alrededor de las fuentes más antiguas y en pozos de grandes diámetros. Los andamios y las escaleras pueden no ser seguros. En caso de que sea necesario entrar en un pozo para hacer un muestreo, debe emplearse un casco y andadores de seguridad apropiados, así como hacerlo con dos personas de apoyo, en caso de un accidente.

Cuando se está haciendo un muestreo en un espacio limitado, tal como dentro del pozo mismo o en un sumidero o galería de un manantial, la atmósfera debería someterse a una prueba, en cada ocasión antes de entrar, para detectar la posible falta de oxígeno y la presencia de gases tóxicos y explosivos. Debido a diversas circunstancias, pueden ocurrir acumulaciones de dióxido de carbono, metano o sulfuro de hidrógeno; estos dos últimos son explosivos. Los gases de diésel y gasolina y el monóxido de carbono, provenientes de los motores de algunas bombas, también pueden acumularse.

El metano, que puede originarse en el subsuelo, es más liviano que el aire y se acumulará cerca de los techos de las cámaras de bombeo. El sulfuro del hidrógeno, con su olor característico a huevos podridos, es muy tóxico, inclusive en pequeñas cantidades.

Las muestras a menudo serán recolectadas durante la perforación del pozo. Por consiguiente, deben tomarse las precauciones normales, a fin de reducir el riesgo de daño del equipo de perforación y bombeo, que incluye la utilización de cascos de seguridad, botas y guantes protectores. Es conveniente el uso de ropa protectora adicional, en caso de que se espere una contaminación sumamente tóxica del suelo y/o de las aguas subterráneas. En caso de que se presenten hidrocarburos sumamente volátiles, las máquinas de perforación deben equiparse con sifones de llama, amortiguadores de chispas, y el equipo eléctrico no deberá permitir formar un arco voltaico a través de la atmósfera. También será necesario llevar equipo contra incendios.

2.2 La complejidad hidrogeológica para el muestreo

2.2.1 Regímenes de flujo de aguas subterráneas

Las características físicas de los regímenes de flujo subterráneo ejercen un importante control sobre la calidad de las aguas subterráneas y una influencia predominante en la distribución del contaminante.

La precisión de cualquier red de muestreo depende esencialmente de si éste representa adecuadamente la distribución espacial de los parámetros de calidad de aguas subterráneas dentro del acuífero. Esto, a su vez, depende de si el diseño del sistema refleja adecuadamente el flujo de agua subterránea y anticipa el transporte del contaminante.

El peligro de falsa interpretación de los resultados depende mucho de la heterogeneidad del acuífero (que controla la complejidad del flujo subterráneo y el transporte del contaminante) en relación con la distribución espacial de las instalaciones de muestreo que componen el sistema de monitoreo.

El régimen de flujo de las aguas subterráneas es controlado por la estratigrafía regional y la estructura geológica, ya que éstos controlan la localización de los afloramientos de formaciones permeables y sus capas confinantes de baja permeabilidad, y asimismo la localización de las áreas de recarga y descarga de aguas subterráneas.

Toda agua dulce encontrada en el subsuelo debe tener, o haber tenido, una fuente de recarga. Normalmente esto se origina como exceso de precipitación sobre la demanda de vegetación que se infiltra a través de suelos permeables. Algunas veces también puede ocurrir como infiltración de ríos, lagos, canales y otras aguas superficiales.

El suelo entre la superficie y el nivel freático es conocido como la zona no saturada, porque sus poros contienen tanto aire como agua. La dirección del flujo en esta zona es verticalmente hacia abajo, aunque el flujo hacia arriba en respuesta a la succión creada por las raíces vegetales ocurre durante períodos de sequía. Este proceso puede extenderse en profundidades de varios metros bajo ciertas circunstancias.

El movimiento natural del agua hacia abajo en la zona no saturada es lento (generalmente menos de 10 m/a y a menudo menos de 1 m/a en promedio), como resultado de la baja conductividad hidráulica de suelos no saturados, debido al hecho de que el agua es retenida en los poros más finos por las succiones que predominan.

Los acuíferos de poca profundidad en áreas de recarga generalmente son freáticos, pero en otros lugares en agua subterránea, a menudo se encuentra confinada por capas menos permeables y bajo una presión considerable. Bajo el nivel freático, predomina el flujo horizontal dirigido hacia áreas de descarga. Sin embargo, es importante comprender qué significativos componentes verticales de flujo pueden desarrollarse localmente, hacia abajo en áreas de recarga y hacia arriba en áreas de descarga.

El espacio intersticial de los acuíferos se une para formar un sistema de tubos o grietas diminutos en los que el agua se almacena y circula muy lentamente. Todos los acuíferos poseen dos características fundamentales: una capacidad para el almacenamiento y otra para el flujo de aguas. En la mayoría de los tipos de acuíferos, el volumen total de agua en almacenamiento es normalmente mucho más grande que el flujo anual a través del sistema.

Los sistemas de aguas subterráneas son dinámicos y el agua está continuamente en lento movimiento entre las áreas de recarga y descarga. Existen diferencias significativas en los regímenes de flujo de aguas subterráneas y el tiempo de residencia subterránea en diferentes condiciones climáticas.

Una indicación de éstos puede encontrarse en la figuras 3 y 4. Por lo general, décadas, siglos o miles de años pueden transcurrir en el pasaje de agua a través del ciclo hidrológico subterráneo, ya que las tasas del flujo normalmente no exceden 10 m/a, y pueden ser tan bajas como 1 m/a.

Figura 3. Secciones hipotéticas para ilustrar típicos regímenes de flujo de agua subterránea y los tiempos de residencia subterránea bajo condiciones húmedas

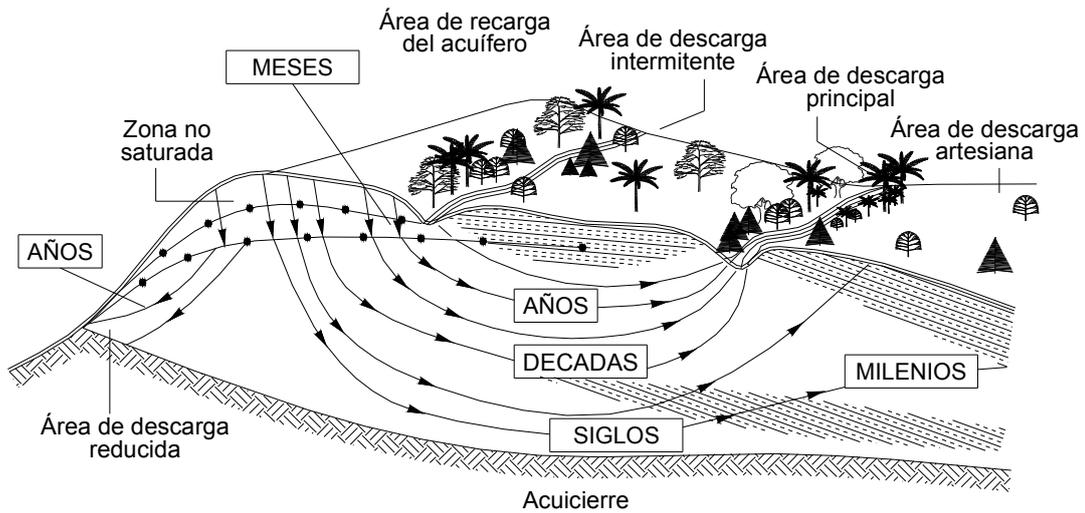
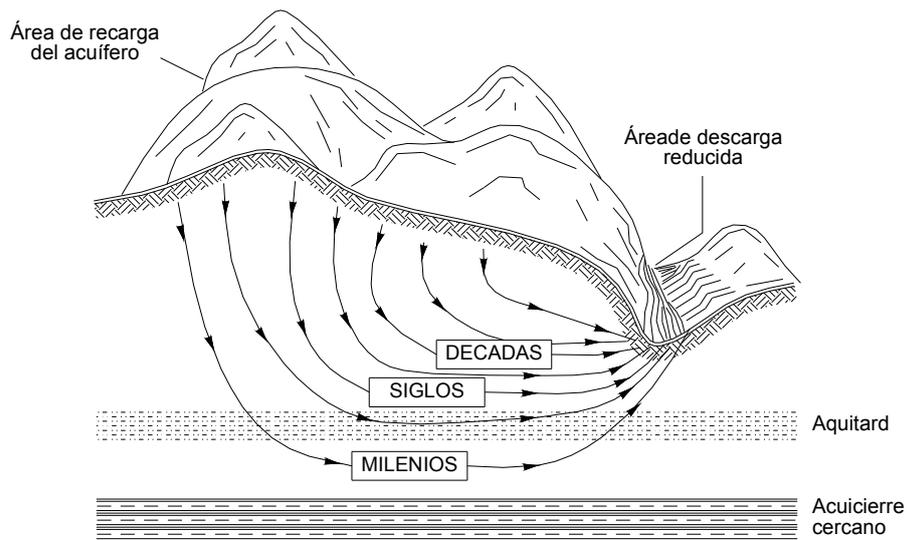


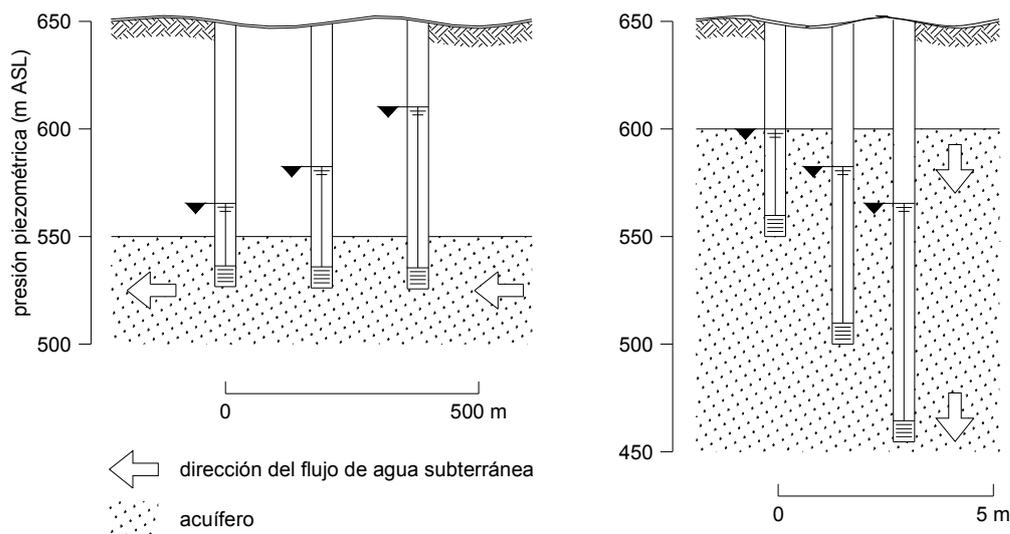
Figura 4. Secciones hipotéticas para ilustrar típicos regímenes de flujo de agua subterránea y los tiempos de residencia subterránea bajo condiciones semiáridas



Es importante realizar mediciones piezométricas en las instalaciones de muestreo de aguas subterráneas, y relacionar dichas mediciones con el conocimiento anterior del régimen de flujo de aguas subterráneas. Ésta es la única forma en que se puede realizar una interpretación satisfactoria de los resultados del monitoreo.

Deberán reconocerse dos situaciones esencialmente diferentes: instalaciones de muestreo muy espaciadas pero con profundidad similar en el mismo acuífero (o sub-acuífero), que pueden ser utilizadas para deducir las direcciones de flujo horizontal de aguas subterráneas, y un grupo de instalaciones de diferentes profundidades en el mismo lugar, que puede ser utilizado para diagnosticar componentes verticales de flujo de aguas subterráneas, como se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura 5. Determinación del gradiente hidráulico del acuífero y la dirección del flujo de aguas subterráneas por medidas piezométricas



Cuando se diseñan los sistemas de monitoreo, es de vital importancia considerar la clase litológica del acuífero bajo investigación, ya que esto determinará sus propiedades y heterogeneidad hidráulica, así como el modo de flujo de aguas subterráneas y el transporte de contaminantes. La probabilidad de una heterogeneidad muy marcada en las propiedades hidráulicas del acuífero es un factor de mucha importancia en el diseño de sistemas de monitoreo y en la interpretación de los resultados. Se reconocen tres clases principales de acuíferos:

- a) Formaciones porosas no consolidadas
- b) Formaciones porosas pero consolidadas
- c) Formaciones esencialmente no porosas y consolidadas.

Ejemplos de cada clase, respectivamente, serían: una grava aluvial, una caliza cretosa y una cuarcita.

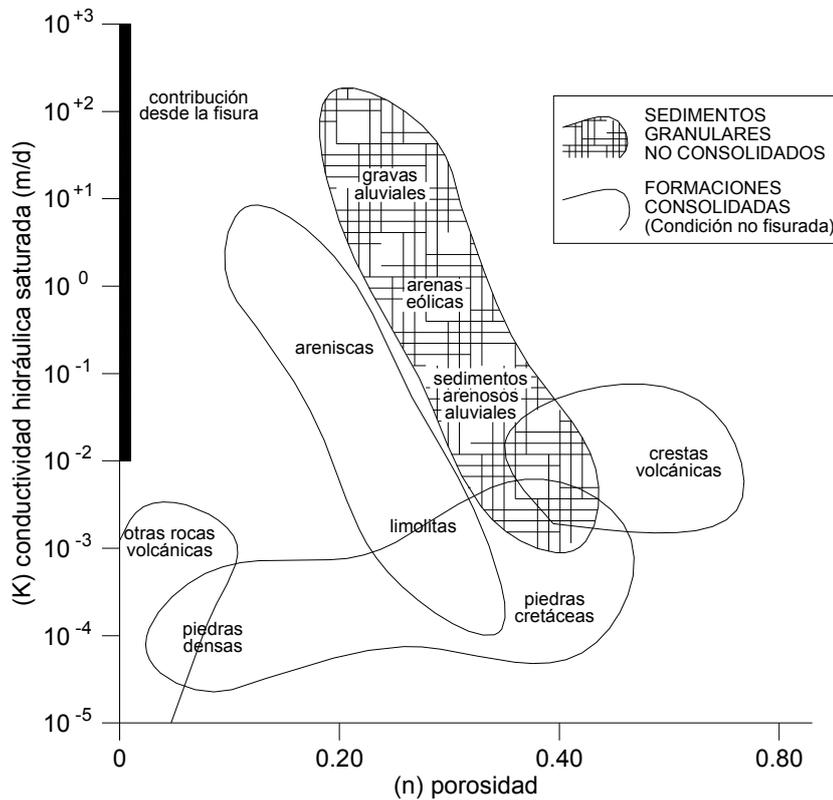
2.2.2 Transporte y atenuación de contaminantes

La variación en las propiedades hidráulicas entre las diferentes clases de acuíferos ejerce una gran influencia sobre el transporte de cualquier contaminante que ingresa al subsuelo. El flujo del agua subterránea es el responsable del transporte de contaminantes dentro de acuíferos. La velocidad actual del flujo de aguas subterráneas en una formación porosa uniforme puede expresarse de manera más simple por:

$$v = Kx / n \times (dh / dx)$$

Donde Kx es la conductividad hidráulica de la formación en la dirección de flujo (x), dh/dx es el gradiente hidráulico, y n es la porosidad efectiva de la formación. El rango potencial de los valores de Kx y n se indica en la figura 6.

Figura 6. Rango aproximado de permeabilidad y porosidad de acuíferos comunes, con indicación del efecto potencial de fisuras



Un contaminante persistente y no reactivo tenderá a migrar con el flujo de aguas subterráneas, por la así llamada convección o advección. La dispersión hidrodinámica (que resulta de la tortuosidad del flujo y la difusión molecular lateral desde áreas de elevada a baja concentración) conducen a reducciones en la concentración del contaminante y a la expansión longitudinal de un frente o pulso de contaminantes.

Donde la permeabilidad es estratificada o se presenta heterogeneidad dentro del acuífero, la dispersión hidrodinámica aumentará marcadamente. Es importante anotar que mientras se pueden medir valores para el coeficiente de dispersión longitudinal en el laboratorio, tales mediciones frecuentemente son órdenes de magnitud menos que aquellas representativas de las condiciones de campo, como resultado de los efectos de heterogeneidad microscópica en el flujo de aguas subterráneas.

En acuíferos consolidados en flujo de aguas subterráneas, será fundamentalmente por fisuras planas o semiplanas. La resistencia por fricción del flujo a través de fisuras es mucho menor que la del flujo intergranular. En consecuencia, las conductividades hidráulicas de las formaciones fisuradas a menudo son más elevadas, con mucha tendencia hacia la heterogeneidad hidráulica.

En una formación de fisuras continuas, bien desarrolladas, de geometría simple y sin porosidad primaria, el transporte de contaminantes será esencialmente advectivo, como consecuencia de la limitada dispersión hidrodinámica que acompaña al flujo en fisuras.

Muchos acuíferos consolidados y fisurados, sin embargo, poseen una matriz que retiene su porosidad primaria. En algunos casos, como en ciertas calizas cretáceas y tobas volcánicas, la porosidad de la matriz puede ser muy alta. En tales formaciones, las tasas de transporte de contaminantes pueden reducirse mucho como resultado de difusión molecular (de acuerdo con los gradientes existentes de concentración entre el agua de la matriz porosa y de las fisuras. Si la densidad de fisuración es alta, la abertura de las fisuras pequeña y el gradiente hidráulico bajo, la mayor parte del agua inmóvil de la matriz porosa llegará a estar involucrada en el proceso de transporte de contaminantes, como resultado de la difusión molecular. Las velocidades resultantes de migración de contaminantes serán reducidas en proporción de la relación entre la porosidad primaria y la de fisuración.

Ciertos contaminantes son absorbidos por las superficies de minerales arcillosos y materiales orgánicos. Donde éstos se encuentran presentes en los acuíferos, la tasa de migración de contaminantes será muy retardada con respecto al flujo de aguas subterráneas, a pesar de que también ocurrirá desabsorción cuando la concentración en fase líquida se reduce y la partición entre la fase sólida y líquida tiende hacia un nuevo equilibrio.

Los perfiles naturales del suelo han sido conocidos hace tiempo como capaces de eliminar muchos tipos de contaminantes de agua. Los procesos involucrados son numerosos, pero no son activos para todos los contaminantes. Los procesos correspondientes operan, pero a un grado progresivamente menor, en profundidades mayores en la zona no saturada y saturada, especialmente en acuíferos no consolidados.

No todas las condiciones hidrogeológicas son igualmente efectivas en la eliminación de contaminantes, y el grado de atenuación; también variará mucho con el tipo de contaminante y el proceso de contaminación en un ambiente dado. En vista de que el movimiento del agua y el transporte de contaminantes desde la superficie del terreno a las aguas subterráneas tiende a ser un proceso lento, en la mayoría de los acuíferos, puede tomar muchos años e incluso décadas antes de que el impacto de un episodio de contaminación por un contaminante persistente llegue a ser completamente aparente en los abastecimientos de aguas subterráneas bombeadas de un acuífero.

Cuando los contaminantes poseen una densidad significativamente diferente de agua y/o una tendencia a ser inmisible con agua, o de solubilidad limitada en agua, tales propiedades ejercen un control dominante sobre su distribución subterránea. Esto necesita cuidadosa consideración en el diseño de sistemas de monitoreo y en la interpretación de los resultados. El caso más común es el de las aguas subterráneas, relacionadas, por ejemplo, con la intrusión costera.

Los hidrocarburos representan un gran grupo de contaminantes potenciales que son relativamente inmiscibles con el agua. Se pueden dividir en dos grandes clases: los tipos aromáticos de baja densidad que tienden a flotar sobre el nivel freático (figura 7), y compuestos halogenados de alta densidad que tienden a sumergirse a la base de los acuíferos (figura 8), después de derrames o grandes descargas en la superficie del terreno.

Figura 7. Distribución subterránea de hidrocarburos aromáticos de baja densidad

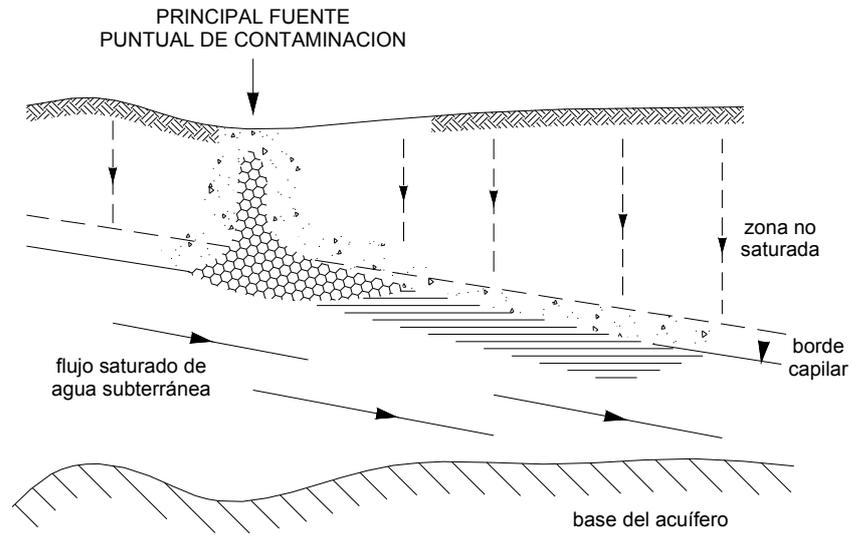
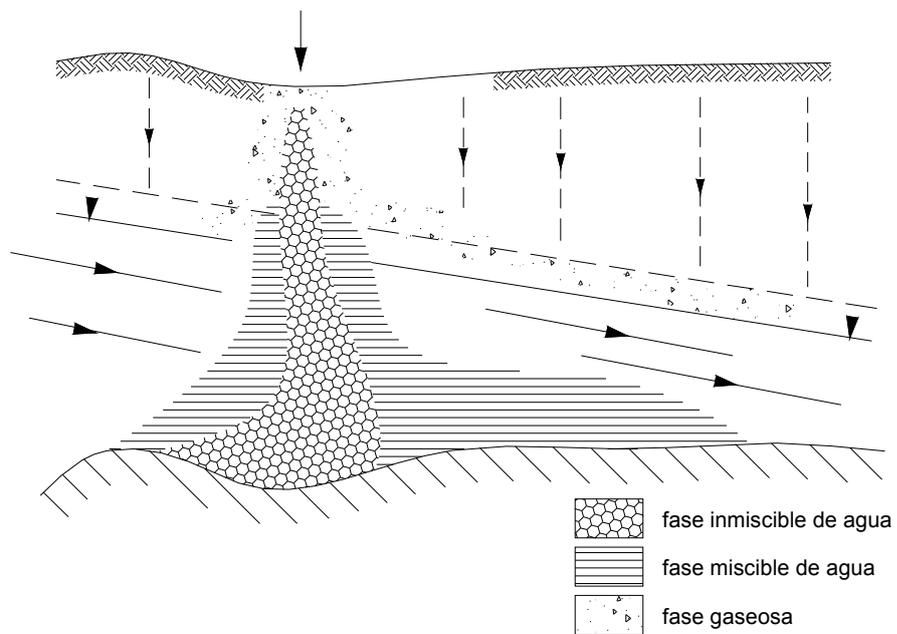


Figura 8. Distribución subterránea de hidrocarburos halogenados de alta densidad



2.2.3 Controles naturales sobre la calidad de aguas subterráneas

Mientras el agua se infiltra y fluye dentro de un acuífero, se desarrolla químicamente por interacción con los estratos subterráneos. Con frecuencia, se observa que los importantes aumentan con el tiempo de flujo y la mayor profundidad o en áreas de descarga natural del acuífero.

La secuencia evolucionaría de la hidroquímica, tanto de elementos mayores como menores, empieza en el suelo, que ejerce una gran influencia sobre el carácter químico de las aguas subterráneas. El suelo tiene la capacidad de generar niveles significativos de acidez, principalmente debido a la generación de dióxido de carbono.

En todos los acuíferos, cuya química se amortigua por la presencia de minerales calcáreos, esta acidez será neutralizada con la disolución de iones de calcio, magnesio y bicarbonato. En los acuíferos no calcáreos, puede existir reacción con minerales de arcilla, que da como resultado la disolución de aluminio y otros metales.

Otros cambios secuenciales en la calidad de las aguas subterráneas ocurren como resultado de las reacciones con ácido-base y la oxidación-reducción de ciertos minerales. Estos procesos muestran amplia variación en los diferentes tipos de formación geológica, que pueden actuar como acuífero. Adicionalmente, la disolución de cloruro de sodio y la oxidación de pirito (sulfuro de hierro) juegan un rol fundamental en el control de las concentraciones de varios cationes, cloruros y sulfatos.

Los procesos de oxidación-reducción son de especial importancia en el control de la solubilidad y estabilidad de muchos elementos, que fácilmente ganan o pierden electrones, tales como hierro, manganeso, nitrógeno, sulfuro, arsénico y muchos otros. Las lluvias que se infiltran normalmente están casi saturadas para la temperatura ambiental con oxígeno disuelto.

Mientras en suelos de grano fino, este oxígeno puede ser consumido por procesos bioquímicos, en muchas situaciones niveles significativos persisten en las aguas subterráneas.

Es bastante común en la zona saturada de los acuíferos no confinados mantener un medio ambiente oxidado. Bajo tales condiciones, el hierro y el manganeso son efectivamente insolubles, y el nitrato y sulfato son las formas estables del nitrógeno y sulfuro, respectivamente.

El oxígeno disuelto es, sin embargo, consumido durante el proceso de flujo de aguas subterráneas, tanto no saturada, como resultado de la oxidación de material orgánico natural de la matriz del acuífero y minerales, que se presentan en forma natural, tal como el pirito. La tasa de consumo del oxígeno es altamente variable con el tipo de suelo, acuífero y clima.

En casos extremos, el oxígeno disuelto puede persistir en las aguas subterráneas por siglos o quizás más tiempo. Sin embargo, donde se consume, el ambiente sería anaeróbico; bajo tales condiciones, los minerales de hierro y manganeso y muchos otros elementos pueden llegar a ser solubles y móviles.

El intercambio de iones y los procesos de absorción y desorción en minerales arcillosos y materiales orgánicos, también juegan un rol importante en la secuencia evolucionaría de la química de los iones principales en el agua subterránea, especialmente en la concentración de cationes (calcio, magnesio y sodio).

Es importante tomar en cuenta los procesos que controlan la hidroquímica natural, porque afectarán la civilidad y el destino de muchos contaminantes que se introducen en las aguas subterráneas.

2.3 Pozos de monitoreo

2.3.1 Criterios de diseño

El método más directo, y generalmente confiable, para mejorar el control de la profundidad del muestreo de aguas subterráneas es la instalación de pozos de monitoreo, perforados a propósito a una profundidad dada con un filtro situado a un intervalo de profundidad conocido.

Una vez que el pozo es instalado correctamente, ofrece la posibilidad de obtener muestras representativas de aguas subterráneas a un costo operacional bajo. Si se emplea materiales de construcciones inertes y se utilizaran métodos de perforación preferidos, la polarización de la muestra sería mínima y una función directa del procedimiento para retirar las muestras de la instalación (normalmente impulsión a succión o de gas o bomba sumergible).

Se pueden realizar pruebas hidráulicas en estas instalaciones para estimar los parámetros hidráulicos del acuífero, que serán requeridos para el análisis de la migración de contaminantes. Aunque tales pruebas serán operacionalmente mucho más simples, que aquellas relacionadas con el uso de sistemas de empaquetadores, los resultados generalmente serán confiables.

En contraste con la mayoría de los pozos de producción de agua, aquellos específicamente diseñados para monitoreo frecuentemente se acaban con materiales inertes (tales como PVC, teflón, acero inoxidable), son de diámetros más pequeños (normalmente menos de 100mm y en algunos casos menos de 50mm), y tienen un área de entrada más limitada (normalmente menos de 5m y en algunos casos solamente 1m).

El procedimiento de construcción de pozos de monitoreo sigue la misma secuencia que los de producción; esto es, perforación, instalación del filtro del pozo junto con el revestimiento sólido y colocación de un sello sanitario. También debería hacerse el desarrollo de los pozos de monitoreo, aunque no es tan importante optimizar su funcionamiento hidráulico, como lo es minimizar las perturbaciones del régimen geohidráulico y hidroquímico del acuífero.

La sección del diseño más apropiado para los pozos de monitoreo debe tomar en consideración los objetivos y los límites financieros del programa de monitoreo, los parámetros de interés y su posible nivel de concentración, el equipo de muestreo disponible, el régimen de flujo de aguas subterráneas, la profundidad requerida de muestreo, las condiciones de campo predominantes, etc.

Una dificultad reconocida en el muestreo de pozos de monitoreo de filtro corto es la presencia de agua estancada en la parte superior, que podría tener una composición diferente, que la del agua subterránea en la profundidad de filtro, como resultado de modificaciones químicas y bacteriológicas y otros procesos. Este problema generalmente se supera limpiando los pozos de monitoreo mediante un vaciador o una bomba.

2.3.2 Alternativas de diseño

2.3.2.1 Piezométricos sencillos

Éstas son las opciones más simples y de uso más frecuente entre pozos de monitoreo. Básicamente consisten en un tubo-forro de plástico o metal, con la parte inferior (0.5-5 m) perforada o con filtro, para permitir la entrada del agua a una profundidad dada. Pueden ser utilizados para el muestreo de aguas subterráneas o igualmente para la medición de la presión hidráulica puntual.

Los materiales más frecuentemente utilizados para el revestimiento son PVC, teflón, o aceros especiales. Los filtros normalmente son plásticos hechos a mano o en fábrica (tales como PVC o teflón) o filtros de alambre enrollado para la medición de la presión hidráulica puntual.

Después de la perforación, se monta la tubería del pozo con su filtro y se baja a la profundidad deseada. Un paquete de arena o grava es colocado hasta 0.2 mts. por encima de la parte superior del filtro y se utilizan bolas de bentonita o relleno de cemento, para sellar arriba e impedir el ingreso de agua de niveles más altos del pozo. El resto del anillo es relleno con cemento o material derivado de la misma perforación. El cemento puede provocar cambios significativos en el pH de los pozos de monitoreo y afectar algunos determinantes. Luego se construye un tapón y área de concreto como protección sanitaria para prevenir el ingreso de agua superficial.

El desarrollo del pozo de monitoreo es muy conveniente para remover sedimentos finos acumulados, provenientes de la arcilla y los fragmentos de perforación. Esto se consigue normalmente utilizando un émbolo de sobretensión, con ciclos cortos repetitivos de bombeo de alta tasa de recuperación, o inyectando aire comprimido o agua, a través de una tubería de inyección o una boquilla. Si se utiliza la tubería de inyección, ésta debería colocarse por lo menos 0.3 mts. sobre el filtro, pero la boquilla de inyección deberá dirigirse directamente al filtro. El desarrollo del pozo se continua hasta que descargue agua limpia y sin sedimento.

Los pozos de monitoreo de nivel simple también pueden instalarse en acuíferos no consolidados, utilizando puntos de acceso al pozo colocados directamente por percusión o ariete hidráulico, lo que evita la necesidad de acabar el pozo.

Es importante que el pozo de monitoreo esté equipado con una tapa de protección, que puede cerrarse con un tubo de ventilación para prevenir la acumulación de gases explosivos.

Sobre todo, este tipo de instalación de muestreo es fácil de diseñar y construir, y puede ser acabado con materiales inertes, si es necesario. Ofrece la posibilidad de obtener un sello hidráulico muy bueno de la zona de investigación y un desarrollo relativamente fácil del pozo, para asegurar su funcionamiento hidráulico adecuado. También permite la realización de mediciones y pruebas hidráulicas del acuífero.

Una extensión lógica de los pozos individuales de monitoreo de nivel simple es el uso de grupos de tales pozos con filtros, que están colocados a diferentes profundidades para permitir el muestreo desde diversas profundidades dentro de un acuífero en el mismo sitio. La desventaja principal es que el costo se incrementa rápidamente con el aumento de la profundidad, y es probable que sea prohibitivo en acuíferos muy profundos.

2.3.2.2 Piezométricos múltiples

Son una opción para realizar la misma función, que los grupos de pozos de monitoreo. El arreglo más común es instalar un grupo de varios piezométricos de pequeño diámetro (con sus áreas de entrada separadas una de otra en forma vertical con relleno de bentonita), dentro de un pozo simple de monitoreo.

La instalación de multipiezométricos no es tan fácil como la de los piezométricos simples, especialmente en acuíferos profundos. Tienen que hacerse en etapas, colocando el piezométrico más profundo con su empaquetador de grava y sello de cemento primero, y luego trabajando sistemáticamente subiendo el pozo, instalando más piezómetros uno por uno. Es necesario tener considerable cuidado para prevenir la migración del cemento, a través del empaquetador de grava y es aconsejable formar una capa de arena escalonada entre el empaquetador y el relleno de cemento; la limpieza y desarrollo de los pozos y el relleno de cemento. La limpieza y desarrollo de los pozos multipiezómetros también es más difícil que las instalaciones sencillas.

Estimar la cantidad de relleno de cemento y/u otros materiales, que van a ser colocados para alcanzar la profundidad deseada del siguiente piezómetro, también puede presentar dificultades, debido al tiempo que toma la solidificación del cemento y la sedimentación del relleno.

Sin embargo, el ahorro financiero del uso de grupos de piezómetros simples es considerable, y dada la razonable posibilidad de su adecuado acabado, al menos a profundidades modestas con 2-4 piezómetros por pozo, esta opción sigue siendo atractiva en algunos casos.

Una variante del pozo de monitoreo multipiezométrico comprende la instalación de muestreadores de impulsión por gas en lugar de filtros piezométricos a las profundidades deseadas de muestreo. El pozo de monitoreo de piezométricos múltiples tiene una cubierta plástica simple (PVC o teflón), que contiene los muestreadores con filtros de tubo encajados a intervalos de profundidad. El muestreo se obtiene para el desplazamiento positivo con gas comprimido, a través de un tubo de descarga de diámetro pequeño conectado a cada muestreador.

La ventaja principal de este diseño es que la limpieza del agua estática de la cámara de muestreo se consigue rápidamente, debido a su pequeño volumen y la muestra es impulsada directamente a la botella de recolección. El control sobre la profundidad del muestreo es excelente y el equipo dedicado evita la contaminación cruzada. La mayor dificultad es el mantenimiento, porque es imposible recuperar los muestreadores para limpiarlos o repararlos una vez instalados. Tampoco son posibles mediciones y pruebas hidráulicas.

Otra variante del pozo de monitoreo multipiezómetro es el uso de un revestimiento especial. En este diseño, se utiliza un pozo de PVC con numerosas aberturas pequeñas (puertos) a varias profundidades, desde las cuales el agua puede ser muestreada, a través de tubos de polietileno de diámetro pequeño (menos de 5 mm.).

El muestreo se consigue mediante impulsión por succión o bombas de pistón del tipo jeringa. La instalación de pozos de monitoreo de puerto múltiple es similar a las instalaciones de nivel simple, pero el desarrollo es más difícil, especialmente en estratos cohesivos. El diseño ha sido utilizado exitosamente a profundidades moderadas en acuíferos de arena y grava con napa freática poco profunda, para obtener perfiles químicos del agua intersticial y con varias modificaciones en formaciones consolidadas fisuradas. La ventaja principal es su bajo costo, pero es muy difícil su instalación adecuada en muchas condiciones del terreno.

2.3.3 Selección de materiales de construcción

Los materiales apropiados para el revestimiento y filtro de pozos de monitoreo (ver tabla III) deben evitar la modificación inaceptable de la química de las muestras de aguas subterráneas, y asegurar una adecuada vida útil de la instalación. Son preferibles uniones atornilladas para la tubería del pozo en vez del uso de pegamentos o cementos, porque de esta manera se evita un origen adicional de modificación de las muestras.

Tabla III. Comparación cualitativa de los materiales de construcción del pozo de monitoreo

Tipo de material	Reactividad química	Fuerza en compresión	Disponibilidad general	Conveniencia operativa	Costo relativo
Polivinilo de cloruro (pvc) b	x(x) a	xx(x)	xxx	xxx	x
Teflón c	x	x(x)	x(x)	xx	xxx
Acero inoxidable (ss)	x(x) a	xxx	xx	x	xx(x)
Acero blando	x(x) a	xxx	xxx	xx	x(x)

- a** puede reaccionar con agua subterránea o natural
- b** las propiedades del polipropileno son similares
- c** marca registrada de Dupont
- xx # de asteriscos significa tendencia creciente de la propiedad indicada

Los plásticos (tales como PVC, polietileno y polipropileno) y los metales (tales como acero galvanizado y de bajo carbón) pueden interactuar con las aguas subterráneas disolviendo o adsorbiendo algunos componentes. Sin embargo, el significado de tales modificaciones, para la mayoría de las aplicaciones prácticas, es cuestionable cuando se compara con los efectos de los procedimientos de muestreo.

El asunto crítico parece ser el período de tiempo, durante el cual la muestra de aguas subterráneas se encuentra en contacto con los materiales de la tubería. Para los períodos de contacto de menos de 1 día, los efectos con termoplásticos tales como PVC, polietileno y polipropileno, no parecen significativos aun cuando el muestreo se realiza para compuestos orgánicos a nivel de ppb. Para períodos mayores, en algunos casos la sorción y lixiviación pueden llegar a ser un problema. Sin embargo, siempre que los pozos de monitoreo sean limpiados y muestreados el mismo día, estos efectos deberán ser mínimos. Cuando el PVC se expone a aguas subterráneas contaminadas por solventes orgánicos sintéticos a 100 ug/l, se comporta en forma comparable al acero inoxidable o teflón.

Las aguas subterráneas altamente contaminadas con solventes orgánicos sintéticos, sin embargo, atacarán y deteriorarán la tubería y el filtro de pozo de PVC. Cuando se sospecha que existen altos niveles de contaminación, es preferible el uso de acero inoxidable o teflón debido a su carácter resistente e inerte. Los costos pueden reducirse sustituyendo la tubería de PVC en la porción del pozo de monitoreo sobre el nivel freático. Las tuberías y los filtros de acero también pueden corroerse rápidamente en aguas subterráneas de bajo pH y Eh, y alta salinidad.

Se concluye que los termoplásticos comunes (especialmente el PVC rígido) son apropiados para la mayoría de las situaciones de campo y los parámetros de interés, siempre que se sigan los procedimientos de muestreo apropiados.

Por consiguiente y en vista de su bajo costo, disponibilidad y fácil manejo son recomendables, excepto en condiciones donde las aguas subterráneas están altamente contaminadas con solventes sintéticos.

2.3.4 Métodos de perforación de pozos

Las mismas técnicas de perforación utilizadas para la construcción de pozos de agua o para la investigación geotécnica pueden emplearse para las instalaciones de monitoreo de aguas subterráneas. Normalmente se utilizan técnicas de percusión con herramientas de cable y perforación por rotación y, en algunos casos, puede ser apropiado el auger mecánico.

Cualquier técnica de perforación que se utilice para construir pozos de monitoreo dará como resultado algún grado de modificación del régimen geohidráulico e hidroquímico, ya sea de:

- a) Contaminación del acuífero con fluidos de perforación
- b) Flujos verticales de aguas subterráneas dentro del pozo antes de su terminación, como resultado de la interconexión de varias profundidades del acuífero a diferente presión hidráulica

Las técnicas llamadas de "perforación seca" (aquellas que requieren del uso de poco o ningún fluido de perforación, como puede ser el caso con algunas máquinas de percusión o rotación) son preferidas para la instalación de pozos de monitoreo. Sin embargo, aun estas técnicas pueden dar como resultado contaminación de las partes más profundas de un acuífero desde napas superficiales contaminadas.

El método más económico para la perforación de pozos de monitoreo es la técnica de auger continuo al vuelo, debido a sus índices de penetración rápida y fácil movilidad.

Los problemas de derrumbamiento del pozo y mezcla vertical pueden reducirse mediante el uso de tubería temporalmente durante la perforación, pero esto reduce grandemente las tasas de penetración. Los augers de tronco ahuecado superan la última dificultad. Un mayor problema con este tipo de equipo es el límite de profundidad máxima a 50 mts. en formaciones no consolidadas y donde las formaciones de grava gruesa y roca dura no pueden ser penetradas.

La perforación de percusión con herramientas de cable, aunque mucho más lenta que con auger, puede realizarse en cualquier tipo de formación geológica y tiene la ventaja de que puede utilizarse con adición limitada de fluidos de perforación y permite la recolección de núcleos. Se requiere tubería temporal en formaciones inestables y para prevenir mezcla vertical.

Las técnicas de perforación por rotación requieren necesariamente un fluido de perforación y, por consiguiente, son menos apropiados para la construcción de pozos de monitoreo. Sin embargo, todavía serán utilizados debido a la falta de disponibilidad de otro equipo o por razones económicas, dado sus altos índices de perforación en acuíferos consolidados.

El fluido de perforación puede ser mezclas de bentonita, polímeros orgánicos biodegradables, agua o aire comprimido. Todos estos afectan en algún grado la calidad de las aguas subterráneas. Los lodos de bentonita entran en intercambio iónico, pueden absorber compuestos orgánicos hidrofóbicos y causan la impermeabilización de las paredes de pozos. Los polímeros orgánicos aumentan las poblaciones microbiológicas y afectan las concentraciones de carbón orgánico total. El agua es mejor, pero puede resultar en la dilución de contaminantes en pozos de monitoreo en acuíferos altamente contaminados.

El uso de aire comprimido es conveniente, en especial se requiere simultáneamente un muestreo de núcleo e involucra formaciones consolidadas. Sin embargo, resulta en la invasión del núcleo y de la formación adyacente con aire que puede modificar el Od Eh de aguas subterráneas y resultar en la precipitación de algunos metales y la pérdida de compuestos orgánicos volátiles. Esto también puede ser dañino si éstas presentan contaminantes muy combustibles.

Otra técnica conveniente para colocar los piezómetros a poca profundidad en acuíferos consolidados es el "jetting hidráulico". Sin embargo, se necesitan extraer grandes cantidades de agua del piezómetro luego de su instalación, antes de utilizarlos con confiabilidad para el muestreo de aguas subterráneas.

En conclusión, todos los métodos de perforación dan como resultado cambios en el régimen de aguas subterráneas. Los métodos "secos" se prefieren a los "húmedos", y el uso de tubería temporal es preferible para reducir la mezcla vertical dentro del pozo de monitoreo durante su construcción. Cuando los métodos de perforación húmedos son inevitables, por razones económicas o logísticas, es preferible el flujo repentino de aire o agua. La decisión de cuál utilizar dependerá de los parámetros bajo investigación.

Si se tiene que utilizar lodo, espuma o agua como fluido de perforación, es posible identificarlos con uso de un trazador de sales de litio o de bromuro, ya que estos elementos son relativamente fáciles de determinar analíticamente y no se presentan normalmente en concentraciones significativas en aguas subterráneas. Su presencia en una muestra de agua del pozo de monitoreo, por lo tanto, implica contaminación por el fluido de perforación.

Para todos los pozos de monitoreo perforados mediante técnicas de rotación, es necesario que la mayor parte, si no todo, el fluido de perforación inyectado, dentro de la formación de la profundidad de interés del muestreo, sea removido.

La mayoría de las técnicas requieren un personal experimentado en equipos de perforación, si se desean conseguir resultados satisfactorios. La excepción son los métodos simples y de bajo costo utilizados a poca profundidad, como la percusión mecánica de piezómetros en acuíferos consolidados.

2.4 Monitoreo de la zona no saturada

2.4.1 Fase móvil

2.4.1.1 Significado del monitoreo

En acuíferos no confinados, la zona no saturada ocupa una posición clave entre la superficie de la tierra, cerca de la que la mayoría de los agentes contaminantes se descargan, y la napa freática, de la que a través de pozos, se extrae el agua potable para abastecimiento.

Por esta razón, monitorear los cambios en la calidad del agua intersticial en esta zona es de gran significado en la detección previa de amenaza de contaminación de aguas subterráneas. Éste es especialmente el caso cuando la zona saturada es relativamente gruesa (más de 10 mts.), ya que en tales situaciones una advertencia del inicio de carga contaminante subterránea permitiría tomar medidas de control, antes de que el deterioro del acuífero sea serio.

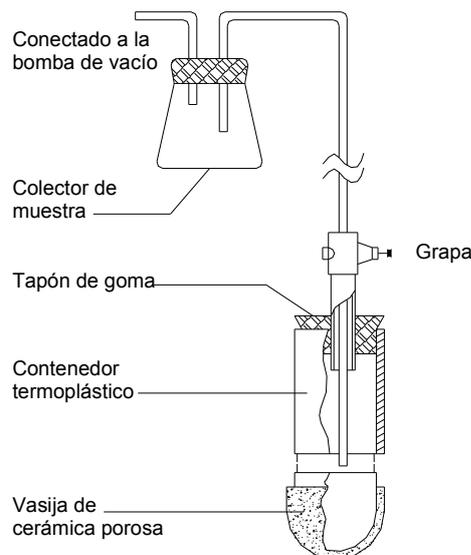
El muestreo y monitoreo de la zona no saturada se esta practicando más frecuentemente, para detectar los posibles problemas de contaminación de aguas subterráneas (a) debajo de las instalaciones de disposición de desechos tóxicos situadas en acuíferos importantes no confinados y (b) de fuentes dispersas, como las prácticas intensivas de cultivo agrícola.

2.4.1.2 Muestreadores a succión

El agua intersticial de la zona no saturada puede muestrearse mediante una variedad de instalaciones no destructivas y permanentes, que se basan en el principio de succión o tensión, en las que el agua es absorbida hacia la cámara de muestra, a través de una jarra porosa aplicando tensión a través de una bomba de vacío. Estas instalaciones son conocidas como lisímetros de succión, vacío o tensión, muestreadores de agua del suelo, etc. Tanto el tiempo de aplicación de vacío como el de muestreo, son variables, lo cual depende de la conductividad hidráulica del suelo. Los procedimientos típicos implican aplicar un vacío de unos 450 mm Hg durante 15 minutos, hay que mantenerlo con una grapa y muestrearlo al día siguiente.

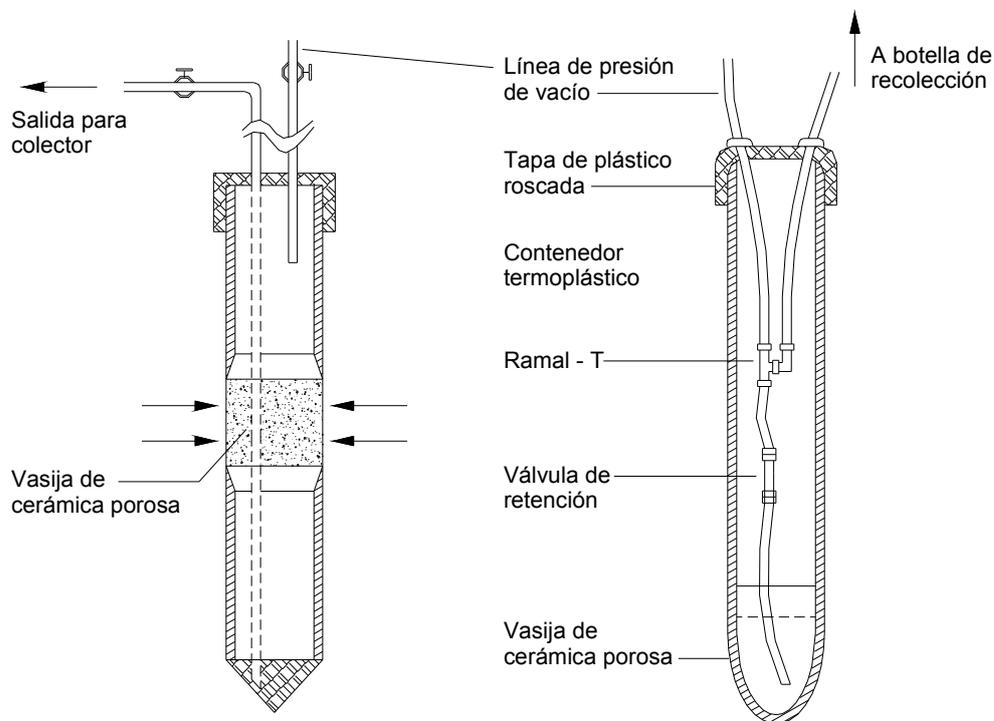
Una vez que el agua ha llenado la cámara de muestra, ésta puede ser recogida utilizando el principio de impulsión por succión o por gas. En el primer caso, que se limita a instalaciones por encima de una profundidad límite de 8 mts., la tubería angosta es introducida en el tubo de acceso por el que se aplico el vacío, para elevar el agua a la botella de recolección en la superficie (ver figura 9).

Figura 9. Muestreadores a succión para el monitoreo de la zona no saturada



En el segundo caso, que no está sujeto a ninguna limitación, dos tubos de acceso están instalados permanentemente. La recolección de la muestra se realiza quitando una grapa de captura del tubo de vacío e inyectando gas comprimido para impulsar la muestra a la botella de recolección, a través de un tubo de descarga (ver figura 10).

Figura 10. Dispositivos de vacío de presión modificados para prevenir el flujo de retorno



Las jarras porosas de los muestreadores a succión se fabrican normalmente de arcilla cerámica (fundida a alta temperatura) o algunas veces de vidrio sinterizado o fragmentado, teflón poroso, etc. Los materiales utilizados, más comúnmente para recubrir las instalaciones de muestreo, son PVC o teflón. Algunas veces se encuentran problemas cuando se inyecta el gas comprimido. A fin de prevenir esto, se introdujeron modificaciones de diseño. Estas modificaciones son necesarias en medios de baja permeabilidad, en los que solamente se obtienen volúmenes pequeños de muestra.

La instalación de los muestreadores a succión es simple y económica. La perforación del acceso normalmente puede llevarse a cabo con un auger manual o mecánico, sin uso de revestimiento temporal. A fin de evitar la obstrucción de la jarra porosa, se utiliza una arenilla de sílice de 200 mm para formar un prefiltro y un relleno de cemento de bentonita para sellar el anillo del pozo.

Se recomienda que las instalaciones se dejen de un año para equilibrarse antes de comenzar el muestreo, debido a que los procesos de perforación modifican grandemente el sistema suelo-aire-agua de la zona no saturada, y movilizan algunas especies químicas adsorbidas, sin embargo raramente se toma tal precaución.

Varias dudas rodean la representatividad de las muestras obtenidas de este tipo de instalación. Se dice que las jarras de cerámica disuelven algunos determinantes (tales como Ca, Mg, Al) y/o adsorben otros (Po_4 , NH_4). El lavado con ácido diluido, seguido de un enjuague meticuloso con agua desionizada, ha sido recomendado para minimizar este problema. Las jarras de vidrio son más inertes, pero cuestan más y son menos disponibles. También están propensos a problemas operacionales, son más frágiles y tienen poros de mayor tamaño, con menor capacidad para soportar tensiones elevadas y mayor tendencia a sufrir invasión de partículas finas del suelo.

Los muestreadores a succión no son apropiados para la investigación de la contaminación microbiológica de la zona no saturada. Las bacterias fecales y algunos virus son filtrados por las jarras porosas de cerámica.

El muestreo en el suelo de baja conductividad hidráulica es especialmente difícil, porque los índices de flujo a través de la jarra porosa son bajos y el vacío en la cámara de muestra tiene que mantenerse por períodos tan prolongados como una semana. Durante este tiempo, pueden ocurrir reacciones fisicoquímicas y bioquímicas, con la modificación de algunos parámetros (tales como los componentes sensitivos pH-Eh, determinantes microbiológicos, etc.).

Por otra parte, la succión desciende drásticamente durante el período de muestreo ocasionado por la desgasificación y volatilización, aunque la pérdida de compuestos volátiles orgánicos puede controlarse utilizando técnicas de succión in situ.

Finalmente, y más importante, en suelos fisurados o estructurados, es probable que el agua que se filtra evada el muestreador a succión durante períodos muy lluviosos o de sobrecarga hidráulica. De esta manera, los análisis de las muestras de agua obtenida de lisímetros a succión no serán representativos del flujo total del contaminante, que migra hacia la napa freática.

En resumen, los muestreadores a succión son económicos, simples de instalar y ofrecen la posibilidad de detectar la contaminación, antes de que llegue al nivel freático. Sin embargo, los problemas operacionales son numerosos, los errores, frecuentes y numerosos agentes contaminantes no se monitorean confiablemente utilizando tales instalaciones.

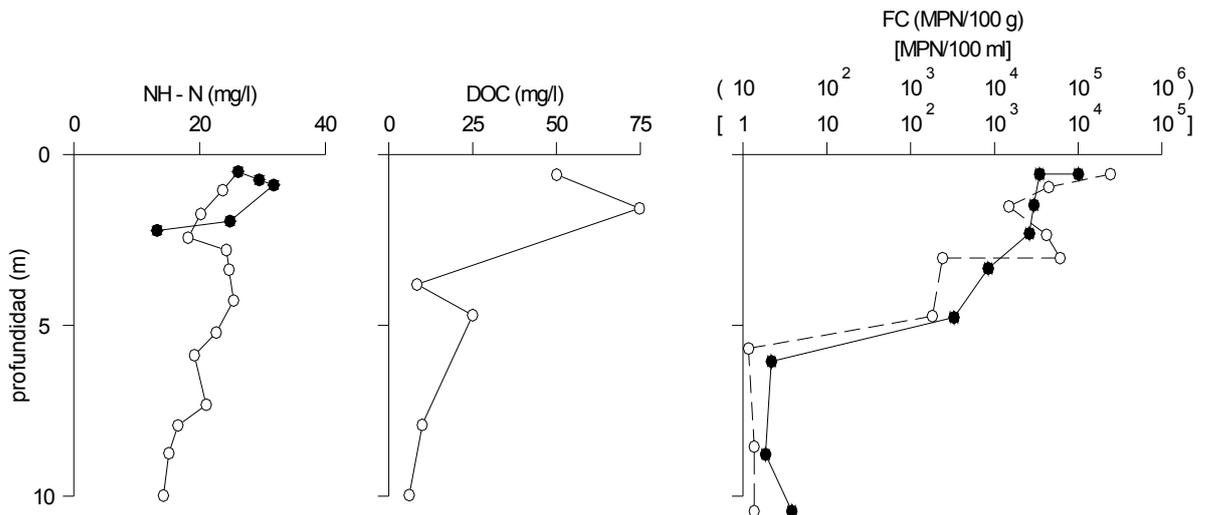
2.4.1.3 Otros métodos

Aunque no son muy utilizados como los muestreadores a succión, las técnicas de drenaje libre constituyen una alternativa para el muestreo de agua gravitacional en suelos con macroporos o fisuras frecuentes. El principio de la técnica es interrumpir el flujo descendente del agua, insertando un canal de drenaje de tubo de arcilla o lámina de metal impermeable con un recipiente de recolección.

La instalación se realiza mediante un canal de acceso y, por consiguiente, se limita a poca profundidad. La ventaja de este método es que se toma la muestra de un área relativamente grande, lo cual permite la recolección del flujo de macroporos, y no es necesario aplicar un vacío para inducir el muestreo. Por tanto, las modificaciones de la muestra se minimizan.

Los métodos de muestreo destructibles, que incluyen la extracción de agua de poro desde muestras geológicas de núcleo, son sumamente convenientes para aplicación en la zona no saturada (ver figura 11). Esta técnica esencialmente es idéntica a aquella descrita para la zona saturada con las numerosas ventajas y las restricciones específicas ya discutidas.

Figura 11. Perfiles de la calidad del agua de la zona no saturada, bajo una laguna municipal de aguas residuales, a) NH₄ y b) COD de muestras centrífugas del núcleo c) parámetros microbiológicos para material del núcleo



2.4.2 Fase adsorbida

Aquellos compuestos que son retenidos en la matriz de la zona no saturada mediante mecanismos de absorción (por ejemplo metales pesados, contaminantes orgánicos con elevados coeficientes de partición, ciertos cationes intercambiables) demuestran un retraso respecto al transporte advectivo. Por consiguiente, puede ser de importancia determinar su distribución en la fase adsorbida en la evaluación de contaminación, porque éstas pueden afectar la calidad de aguas subterráneas y las posibilidades de restaurar el acuífero a largo plazo.

La evaluación de sus índices de comportamiento y transporte requieren análisis químico del suelo mismo, lo cual permite un control seguro sobre el origen de la muestra. El método parece atractivo, ya que es simple y económico, al menos a profundidades superficiales donde el muestreo puede ser efectuado mediante auger manual. Sin embargo, las facilidades de laboratorio adecuadas para el análisis de los contaminantes ambientales en tales muestras son poco desarrolladas. Los laboratorios ya existentes generalmente sólo son capaces de realizar el análisis relacionado con los parámetros agrícolas (tales como NO₃, NH₄, K, PO₄, pH).

Además, el manejo y extracción de la muestra de los componentes de interés son complejos, así como la interpretación de los resultados depende mucho del procedimiento analítico.

2.5 Programas de monitoreo de aguas subterráneas

2.5.1 Objetivos

El objetivo normal del monitoreo de la calidad de aguas subterráneas es detectar y evaluar su distribución espacial y su cambio en el tiempo.

Los datos generados por el monitoreo deben ser suficientes para tomar decisiones correctas, en lo que se refiere al control de migración de aguas subterráneas de calidad no deseable, a las limitaciones del uso de aguas subterráneas contaminadas en forma natural a la especificación del tratamiento de agua necesario.

La clara definición de los objetivos específicos es un primer paso en el desarrollo de programas de monitoreo. Dichos objetivos decidirán el diseño inicial del sistema de muestreo, la selección de los determinantes a ser monitoreados, así como el método de muestreo necesario.

Las tecnologías de limpieza del acuífero continúan siendo muy costosas y en muchos casos problemáticas, por lo que en la mayoría de los casos no son factibles en América Latina y el Caribe.

Es necesario repetir que la vigilancia de la calidad de aguas subterráneas bombeadas es completamente inadecuada para la detección oportuna de la contaminación del acuífero. Donde primero se detecte la contaminación mediante este método, es inevitable que un gran volumen del acuífero estará siempre, o incluso irreversiblemente dañado y que el control de contaminación y la medida de recuperación serán muy costosas.

2.5.2 Principios del diseño y desarrollo de sistemas

El requisito básico del sistema de monitoreo es determinar la distribución de los parámetros de calidad de aguas subterráneas seleccionadas y recolectar datos suplementarios sobre el flujo de las aguas subterráneas, como una ayuda a su interpretación. El diseño del sistema tendrá una función de tres factores:

- a) El objetivo del monitoreo y el nivel de interés son las mayores consideraciones. Los programas de monitoreo locales normalmente se concentran alrededor de conocidas o potenciales fuentes de contaminación o instalaciones de abastecimiento de aguas subterráneas específicas. Los programas de monitoreo regionales necesitan evaluar las fuentes difusas de contaminación, como el uso agrícola de la tierra y la precipitación atmosférica. Dichos factores también determinan la extensión en el cual el sistema de monitoreo hace uso de pozos ya existentes, con todas las limitaciones inherentes que éstos implican
- b) La complejidad del régimen de aguas subterráneas, incluyendo los patrones de flujo regional, el posible grado de heterogeneidad hidráulica y las relaciones de aguas superficiales-subterráneas

- c) Las consideraciones económicas, que inevitablemente restringirán el alcance del sistema propuesto

Cualquiera que sea la situación, es esencial que el diseñador del sistema considere el significado de la heterogeneidad hidráulica vertical y lateral en relación con el nivel de interés en la calidad de aguas subterráneas, en caso de que se generen resultados útiles. Debido a esto, el número necesario de puntos de muestreo por área y profundidad unitaria del acuífero debe considerarse como una función de grado de heterogeneidad hidráulica. El conocimiento hidrogeológico es esencial en el diseño de sistemas, ya que una evaluación realista de posible carácter y complejidad del régimen de flujo de aguas subterráneas es un prerrequisito fundamental.

El tipo de instalación de muestreo seleccionado deberá considerar las peculiaridades de los grupos de determinantes bajo investigación, especialmente su inestabilidad y corrosividad.

La profundidad seleccionada para colocar el filtro en los pozos de monitoreo depende de las propiedades de contaminantes principales bajo investigación (en especial la densidad), y si el régimen de aguas subterráneas posee componentes de flujo verticales importantes. La situación más común es situar los filtros inmediatamente debajo de la zona de la fluctuación del nivel freático natural, pero si se sospecha de contaminantes inmisible (ya sean más livianos o más pesados que el agua), entonces esto tendrá que modificarse. Los hidrocarburos aromáticos livianos tienden a flotar por encima del nivel freático y los hidrocarburos clorinados densos tienden a sumergirse a la base de los acuíferos y acumularse sobre superficies impermeables.

La selección de los lugares más apropiados, para el emplazamiento de instalaciones de muestreo, puede ayudarse considerablemente, bajo algunas circunstancias desde la superficie, por mediciones indirectas, utilizando técnicas geofísicas o detección de gases.

Bajo circunstancias favorables, los resultados de dichos estudios pueden proporcionar información sobre estratificación geológica, grado de fisuración del acuífero, profundidad del nivel freático o lecho del acuífero, variación en la salinidad de aguas subterráneas y el tamaño de plumas de contaminación. Semejante conocimiento ayudaría a la racionalización de los lugares de muestreo, la reducción de la densidad de pozos necesarios y las profundidades preferidas para los filtros de pozos. La presencia de residuos enterrados en cilindros, fosas y otras excavaciones, también pueden detectarse y esto es muy importante para evitar lugares peligrosos para la perforación del pozo de monitoreo.

Mientras los estudios geofísicos han sido utilizados mucho tiempo en la explotación del abastecimiento de aguas subterráneas, su aplicación en los estudios de contaminación de aguas subterráneas es relativamente nueva. La interpretación de los resultados en este contexto necesita un personal especializado y la verificación en relación, tanto con la estructura geológica, como con la calidad de aguas subterráneas, a través de la perforación y muestreo directo.

Un sistema de monitoreo de detección ofensiva normalmente comprime un grupo de pozos gradiente hidráulico debajo de la fuente potencial de contaminación, con la añadidura de por lo menos una en dirección opuesta. Esta última es necesaria para evaluar las variaciones de la calidad del fondo. El número de pozos, para evaluar por fuente de contaminación potencial, es esencialmente función de la dimensión de la fuente involucrada y de la heterogeneidad hidrogeológica; comúnmente cuatro es considerado como mínimo en la literatura. En acuíferos heterogéneos y para fuentes de gran contaminación, será necesario un número mayor.

Un sistema de monitoreo de detección asociada con un abastecimiento de agua subterránea normalmente se encuentra localizado en un arco voltaico defensivo, tomando en cuenta la dirección del flujo de aguas subterráneas locales, la forma del cono de depresión de bombeo y la posible existencia de líneas de flujo preferenciales.

La elección de profundidad de filtro es más difícil en este caso, debido a las grandes fluctuaciones artificiales en el nivel freático consecuente del bombeo, y el posible transporte profundo de contaminantes, como resultado de heterogeneidad hidráulica.

En el monitoreo de evaluación, el número total y la densidad de pozos de monitoreo generalmente es mucho más grande. Esto resulta de los requisitos de establecer la distribución tridimensional de contaminantes en el sistema de aguas subterráneas. El número puede reducirse, en algún grado, si la localización de la fuente de contaminación, las características del acuífero local y las direcciones de flujo de aguas subterráneas son conocidas. Los pozos de monitoreo normalmente serán instalados a lo largo de líneas perpendiculares a la dirección de flujo de aguas subterráneas gradiente hidráulico abajo, desde la supuesta fuente de contaminación.

En los casos de contaminación regional difusa y contaminación de fuentes puntuales supuestas, en lugares con una profunda zona no saturada, debería considerarse el incluir algún muestreo de aquella zona en los programas de monitoreo, en vista de la gran posibilidad de detección oportuna del inicio de cualquier contaminación.

En los estudios regionales de calidad de aguas subterráneas, los pozos ya existentes con frecuencia son incorporados en los sistemas de monitoreo por razones de economía. Los criterios para la selección de los pozos ya existentes deberá seguirse mediante la selección de aquellos con la más corta longitud de filtro sobre el intervalo de profundidad más apropiado, con la adecuada protección sanitaria de la superficie y el registro geológico más seguro, a fin de ayudar a la interpretación que sigue.

La instalación de sistemas grandes de monitoreo de aguas subterráneas, siempre debería llevarse a cabo en fases, de manera que los resultados de la fase inicial puedan proporcionar información para optimizar el diseño posterior.

La frecuencia del muestreo y el número de determinantes analíticos normalmente pueden reducirse sustancialmente, una vez que se haya determinado el grado de variación en la calidad de las aguas subterráneas.

Las variaciones temporales pueden ocurrir como resultado de incidentes de carga aislados o del bombeo del pozo, pero las fluctuaciones cíclicas más comunes son anuales. Así, el muestreo más frecuente para el mayor rango posible de determinantes, generalmente se realiza durante el primer año de monitoreo.

2.5.3 Procedimientos y precauciones operacionales

Cuando se extraen las aguas subterráneas de un acuífero, las mismas están sujetas a modificaciones fisicoquímicas, como resultado de los cambios de presión y temperatura, exposición a la luz solar y contacto con la atmósfera. A continuación, se tratarán las precauciones prácticas necesarias para obtener resultados de monitoreo seguros, cuando el procedimiento de muestreo implica la recuperación de una muestra líquida del pozo para análisis, ya sea en el campo o en un laboratorio base.

Una operación inicial y crítica es la limpieza del pozo, para asegurar que la muestra recogida provenga directamente del acuífero. Además, el método de recolección, filtración, preservación y extracción de las muestras debe tomar en cuenta las propiedades de los tipos de determinantes bajo investigación.

2.5.3.1 Limpieza de pozos

El agua anómala, a menudo estancada (contaminada directamente desde la superficie o la corrosión de las tuberías del pozo), se acumula en los pozos no bombeados. Esta agua debe ser eliminada antes de llevar a cabo el muestreo.

En vista de que los efectos son más serios en la porción de la tubería sólida del pozo, la limpieza se realiza mejor desde el nivel del agua, hasta la base del pozo.

Criterios empíricos, tal como la remoción de 5 o 10 volúmenes del pozo, a menudo se usan con este propósito, pero es preferible verificar la limpieza adecuada mediante el monitoreo en la línea de descarga para conductividad eléctrica, temperatura, pH y Eh u oxígeno disuelto.

El tiempo que toma limpiar un pozo, hasta que bombee una alta proporción de agua del acuífero, está relacionado con su tasa de bombeo y diseño y transmisibilidad y heterogeneidad del acuífero. Tiempos de limpieza más cortos pueden esperarse en pozos de monitoreo de diámetro pequeño en acuíferos de alta transmisibilidad.

Teóricamente se pueden generar curvas de la proporción del agua bombeada con el tiempo de limpieza, con base en análisis de bombeo de pozos con almacenamiento significativo. Grandes aumentos en la tasa de bombeo no producen correspondientes aumentos en la proporción del agua del acuífero, después de un tiempo dado.

Este tipo de estimado, sin embargo, debería tomarse solamente como guía general para los tiempos de limpieza, en vista de la incertidumbre en la estimación del valor apropiado de transmisibilidad que va a ser utilizado, por ejemplo, en un pozo de filtro corto en una formación profunda.

2.5.3.2 Recolección de muestras

El programa de recolección de muestras debería extenderse de acuerdo con los determinantes bajo investigación. Los procedimientos en el sitio de muestreo, los volúmenes de la muestra y los requisitos de preservación también se dictarán mediante el método analítico propuesto. Un resumen de los procedimientos, las técnicas de preservación y los tiempos de almacenamiento permisible se presentan en la Tabla IV.

Tabla IV. Resumen de procedimientos y precauciones de muestreo para grupos específicos de parámetros

Grupo de determinantes	Procedimiento de muestreo	Materiales preferidos	Tiempo máximo almacenaje	Costo relativo	Dificultad operativa
Iones principales: Cl, SO ₄ , F, Na, K	Solo filtro de 45 um Sin acidificación Almacenar a + 4 C	Cualquiera	7 días (*)	0	0
Metales pesados: Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cr, Cd, etc.	Filtro de 45 um sellado en línea Acidificar a menos de pH 2 Evite aeración por derrame/ingreso de aire	Plástico Evite filtros y contenedores de metal	150 días	++	++
Compuestos nitrogenosos: NO ₃ , NH ₄ ; (NO ₂)	Filtro sellado de 0.45 um Almacenar a + 4 C	Cualquiera	1 día (*)	+	++
Microbiológicas: TC, FC, FS	Condiciones estériles Muestra no filtrada Almacenar a + 4 C Preferible análisis en el sitio	Vidrio oscuro, Evitar plásticos y cerámica	6 horas	+	++
Equilibrio carbonatos: pH, HCO ₃ , Ca, Mg	Muestra bien sellada y no filtrada Análisis de pH/HCO ₃ en el sitio Cationes en el laboratorio base en muestra acidificada	Cualquiera	1 hora (150 días)	++	++
Estatus de oxígeno: EI (PE), DO, T	En el sitio en celda medidora Evita aeración Muestra no filtrada	Cualquiera	0.1 horas	++	+++
Orgánicos: TOC, VOC, HC, ClCHC, etc.	Muestra no filtrada Entrega suave al frasco sin ingreso aire y evitando contacto atmosférico absorción directa en cartuchos preferida para orgánicos volátiles	Vidrio oscuro, Teflón o acero inoxidable	1.7 días (indefinido en cartucho de porción)	+++	+++

(0) mínimo
(+) bajo

(++) moderado
(+++) alto

(*) puede aumentarse a 150 días para algunos determinantes, si la muestra está apropiadamente acidificada

Las muestras deberán recogerse tan cerca como sea posible de la descarga de la bomba, interviniendo un mínimo de cañería. Si se recolecta desde una llave de agua ya existente, es importante asegurarse de que esta no contamine la muestra, utilizando una manguera de curva S si es necesario.

El recipiente para la muestra deberá enjuagarse completamente con una porción de muestra. En caso se haya instalado una celda en línea para monitorear los cambios en conductividad eléctrica, temperatura, pH, y oxígeno disuelto, debería instalarse una unión T arriba, para facilitar la recolección de la muestra.

Para la mayoría de los determinantes, los recipientes de polietileno o vidrio con tapa hermética son adecuados, pero para ciertos determinantes deben utilizarse recipientes especiales. Los recipientes de muestra siempre deberán llenarse hasta el borde, evitando la aeración a través de la salpicadura.

2.5.3.3 Filtración de muestras

Las muestras de aguas subterráneas a menudo contienen sólidos suspendidos, que se derivan de los pozos de monitoreo, que si no se eliminan, pueden influir en los resultados analíticos. Las reacciones posibles entre el agua y los sólidos suspendidos incluyen el intercambio de iones y la disolución de material en partículas y coloidal. Adicionalmente, la acidificación de la muestra puede disolver los sólidos suspendidos y producir resultados falsos.

Se recomienda la filtración en la mayoría de los casos aun cuando aparentemente no se presentan sólidos suspendidos. Sin embargo, no es recomendable filtrar las muestras por análisis orgánico o determinaciones microbiológicas, ya que esto puede dar como resultado la pérdida del determinante de interés.

La filtración debería realizarse en la cabecera del pozo, preferiblemente utilizando una unidad de filtración en línea a la presión de la bomba de muestreo. Donde esto no es posible, se acepta para la mayoría de los determinantes una unidad de filtración a presión, utilizando nitrógeno comprimido o inyección de aire. Para volúmenes pequeños, se recomienda una jeringa con filtro. Los equipos de filtración al vacío no son recomendables, porque estimulan la pérdida de gases disueltos y compuestos volátiles.

La selección del filtro depende de los determinantes bajo investigación. En general, se recomienda un filtro de acetatocelulosa de 0.45 μm tamaño de poro. El filtro permitirá el paso de algunas bacterias de material coloidal, pero los tamaños más pequeños de los poros tienden a obstruirse rápidamente. Si la muestra está turbia, será necesario un prefiltro de fibra de vidrio. Si es posible encontrar solventes orgánicos sintéticos, los medios de filtro orgánico (nitrato de celulosa, acetato de celulosa o policarbonato) no deberían utilizarse y se recomienda fibra de vidrio o teflón, donde la filtración sea necesaria

2.5.3.4 Preservación de muestras

La preservación de las muestras se recomienda, ya que los determinantes pueden cambiar la concentración en el tiempo entre la recolección y el análisis. La preservación comúnmente implica añadir ácido a $\text{pH} = 2$ para prevenir la precipitación metálica y/o almacenamiento en 4°C , para retrasar cualquier reacción bioquímica. Los métodos para los determinantes que se presentan en la Tabla 10 poseen técnicas de preservación comunes, de manera que pueden recogerse y almacenarse en el mismo recipiente.

Si es posible, el transporte al laboratorio base y el almacenamiento posterior antes del análisis deberá ser a 4°C . Los tiempos máximos de almacenamiento recomendados para diferentes determinantes varía de 24 horas a 6 meses, y los mismos deben tomarse en cuenta cuando se planifican los programas de monitoreo.

2.5.3.5 Control y garantía de calidad

En el control de calidad de los procedimientos de muestreo y los resultados analíticos, son necesarios para evaluar los errores sistemáticos que se originan del tratamiento de la muestra, transporte y almacenamiento y de los procedimientos del laboratorio. Particularmente esto es importante en los programas de monitoreo a largo plazo. Se recomienda el uso de blancos de campo, muestras artificiales y rangos de concentración para las últimas.

Con tal propósito, es recomendable recolectar y retener las muestras con y sin filtración, acidificación, etc. y analizar algunas de las muestras no escogidas, a fin de identificar cualquier efecto negativo de los procedimientos de preservación de la muestra.

También se desea incorporar prácticas de garantía de calidad en los programas de monitoreo a largo plazo. Tales prácticas requieren que la responsabilidad para cada paso en el muestreo y procedimiento analítico, incluyendo la custodia de la muestra durante el transporte, esté claramente definida, bien documentada y sujeta a inspecciones externas periódicas. En este contexto, es importante la adecuada identificación de las muestras, especialmente cuando se trata de grandes programas de monitoreo.

2.5.4 Parámetros indicadores de contaminación

La selección de los determinantes que van a ser analizados se determinan esencialmente por el uso del agua subterránea en el área monitoreada. Cuando se trata de abastecimiento de agua potable, es preferible que todos los compuestos mencionados en la tabla I sean analizados.

También es posible dar algunas indicaciones generales sobre los tipos de actividad potencialmente contaminante, que es posible que generen un contaminante dado. La identificación de los indicadores de contaminación confiables es un asunto extremadamente importante, en vista de los altos costos de muchos análisis de laboratorio y el potencial ahorro al utilizar indicadores.

El desarrollo de indicadores de contaminación fue iniciado en microbiología, debido a la impracticidad técnica y elevado costo de tratar de monitorear organismos patógenos individuales en suministros de agua. Las características de un indicador de contaminación ideal son:

- a) Su procedimiento analítico debe ser simple, rápido y económico.
- b) No debe presentar problemas serios de muestreo, debido a modificación fisicoquímica.
- c) Debería estar presente en aguas subterráneas en concentraciones más elevadas, que los contaminantes correspondientes.
- d) Su variación debería mostrar correlación positiva con la de los contaminantes correspondientes.
- e) Al menos, debería ser tan persistente y móvil en los sistemas de aguas subterráneas como los contaminantes correspondientes.

En caso de contaminación microbiológica fecal de aguas subterráneas, las características requeridas restringen la selección del organismo indicador a coliformes totales (CT), coliformes fecales (CF) y estreptococos fecales (EF), que son bacterias aeróbicas, y a la bacteria anaeróbica "clostridium perfringens". Generalmente los CF se aceptan como los más útiles. Hay posibilidad que los EF sean más persistentes que los CF en los sistemas de aguas subterráneas, y, por lo tanto, más convenientes como indicadores de la posible presencia de tipos persistentes de virus. También se ha comprobado la relevancia de CT con la presencia relativamente difundida de los organismos coliformes no fecales en las aguas subterráneas poco profundas.

Los indicadores más prometedores de contaminación química de aguas subterráneas incluyen varias combinaciones de los siguientes parámetros: EC, pH, Eh, OD, CL, NO₃, NH₄, y B. La selección dependerá del tipo de actividad contaminante involucrada. El desarrollo de un indicador adecuado de contaminación orgánica de aguas subterráneas es importante. El más prometedor, hasta ahora desarrollado, es el carbono orgánico disuelto (COD o COT), ya que resulta útil como indicador de la posible presencia de hidrocarburos y/o compuestos orgánicos sintéticos, que son agentes serios de contaminación de agua aun en concentraciones muy bajas, siempre que la fuente de contaminación también contenga carga subterránea pesada de carbono orgánico en otras formas.

En la ciudad de Guatemala, se aplica la técnica "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: de la A.P.H.A.-A.W.W.A.-W.E.F. 19th edition 1995, así como la norma COGUANOR NGO4010 (sistema internacional de unidades) y 29001 (agua potable y sus derivadas).. Los análisis son realizados a través del Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria (ERIS) de la Facultad de Ingeniería y la Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA) de la Municipalidad de Guatemala, Ciudad Universitaria zona 12.

2.6 Vulnerabilidad natural del acuífero (método DRASTIC)

2.6.1 Generalidades

La vulnerabilidad hidrogeológica se define como la sensibilidad natural que tiene un acuífero a la contaminación. La vulnerabilidad es una herramienta que constituye parte de la base técnica para la formulación de un plan general de protección para las aguas subterráneas. Es importante considerar que, para determinar el impacto que tiene una fuente contaminante (histórica, actual o futura), es necesario conocer las condiciones geológicas e hidrogeológicas y la sensibilidad que éstas condiciones tienen a la contaminación.

2.6.2 Método DRASTIC

El método DRASTIC fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y ha sido utilizado en diez condados de los Estados Unidos, para elaborar los mapas de vulnerabilidad hidrogeológica.

La metodología DRASTIC es un sistema estandarizado para evaluar la sensibilidad natural de un acuífero a la contaminación, ante la presencia de una carga contaminante depositada, utilizando escenarios hidrogeológicos con características comunes y, por consiguiente, con una vulnerabilidad común a la contaminación.

El DRASTIC es un instrumento que suministra a los planificadores una orientación para dirigir sus esfuerzos y recursos en investigaciones más detalladas de aquellas áreas, que por sus características logran a través de una evaluación comparativa de diferentes ambiente hidrogeológicos, donde se encuentran representados los factores que influyen en la vulnerabilidad que tiene un área ante la presencia de una carga contaminante.

El método conduce al producto de un mapa de vulnerabilidad, que funciona como instrumento de planificación y se caracteriza por ser sencillo, de fácil uso, utiliza la información existente y permite que personas con diferentes formaciones y niveles académicos puedan hacer uso de él.

El DRASTIC no está diseñado para suplantar las investigaciones en el campo ni para ser considerado como una herramienta que puede determinar la ubicación específica de una instalación o una actividad de los usos de la tierra, pero sí permite utilizar los recursos de forma eficiente en las investigaciones detalladas, proporcionándonos elementos necesarios para la formulación de planes de protección de los recursos hídricos subterráneos.

Se debe considerar como un instrumento de inspección preliminar; sin embargo, la vulnerabilidad es uno de los criterios que debe tomarse en cuenta para la toma de decisiones en la ubicación de una instalación, que potencialmente constituye una fuente de contaminación.

2.6.2.1 Supuestos

Según los autores del método DRASTIC se parten de cuatro suposiciones relacionadas con el comportamiento del contaminante en un medio acuífero.

- a) El contaminante se introduce en la superficie de la tierra.
- b) El contaminante es llevado hasta el agua subterránea por la precipitación.
- c) El contaminante tiene la movilidad del agua.
- d) El área mínima para la aplicación del método DRASTIC es de 40 Ha.

2.6.2.2 Variables

El método DRASTIC se apoya en el análisis de siete parámetros, a los cuales les aplica un sistema numérico que permite ponderar la intervención que tiene el parámetro en el proceso de contaminación. Los siete parámetros fueron ordenados para formar el nombre del método con sus siglas en inglés. Estos parámetros son:

D	“Depth to water”	Profundidad del agua
R	“Net recharge”	Recarga neta
A	“Aquifer media”	Medio del acuífero
S	“Soil media”	Medio del suelo
T	“Topography”	Topografía
I	“Impact on the vadose zone”	Impacto de la zona vadosa
C	“Hydraulic conductivity”	Conductividad hidráulica

2.6.2.2.1 Profundidad del agua

La profundidad del agua juega un papel importante, porque determina el espesor del terreno que debe atravesar el contaminante para alcanzar la zona de saturación.

A mayor profundidad del nivel freático, hay mayor oportunidad para la atenuación, dilución, volatización, de los contaminantes, debido a que implica mayor tiempo de desplazamiento de los mismos hacia el espesor saturado.

2.6.2.2.2 Recarga

Se le da el nombre de recarga, a la cantidad de agua por unidad de área que se infiltra a través del suelo y llega hasta el nivel freático. Las principales fuentes de recarga son la percolación directa del agua de lluvia, que cae sobre la superficie del suelo atravesando la zona vadosa para posteriormente alcanzar el manto acuífero y las corrientes superficiales, que contribuyen a la infiltración del escurrimiento superficial en la época lluviosa o de estiaje.

2.6.2.2.3 Medio del acuífero

Se define como la zona saturada de agua que ocupa el espacio de los poros o fracturas. Se encuentra por debajo de la zona vadosa y es capaz de producir agua suficiente para la explotación.

Su importancia radica por el grado de influencia en la atenuación de un contaminante. Dicha influencia se mide por el recorrido del penacho o pluma de contaminación. Éste, a su vez, es determinado por el sistema de flujo o por el nivel de interconexión entre poros o fracturas del medio saturado. Es sumamente importante porque influye en el tiempo requerido, para que ocurran los procesos de atenuación como la absorción, dispersión y dilución.

2.6.2.2.4 Suelo

Se define como el producto de un material rocoso (geológico) que ha sufrido una serie de procesos físicos-mecánicos, químicos y bioquímicos, que alteran el estado original del material parental (meteorización, erosión eólica e hídrica); se encuentra en la superficie terrestre por encima de la zona no saturada (zona vadosa), alberga la acción radicular de la cobertura vegetal, y se caracteriza por tener un considerable potencial biológico y orgánico.

El suelo representa la primera zona donde puede ocurrir la atenuación de la carga contaminante, debido a los procesos de filtración, biodegradación, absorción, volatilización, y otros. La intensidad de los mismos está influida directamente por el tipo de arcilla, características granulométricas del sedimento y contenido de materia orgánica.

2.6.2.2.5 Topografía

Se conoce como topografía a la variación de pendiente, la cual está expresada en porcentaje. Ésta es importante, porque permite que un contaminante depositado sobre la superficie del suelo se escurra o permanezca el tiempo suficiente en la superficie, para lograr infiltrarse a través de la zona no saturada y llegar al manto acuífero. Las pendientes menores están asociadas a un potencial de contaminación mayor, ya que favorecen la infiltración a causa de su bajo escurrimiento superficial.

2.6.2.2.6 Zona vadosa

La zona vadosa se localiza entre la parte inferior y el nivel estático el agua subterránea.

Se define como la zona del sistema acuífero que no está saturada o que tiene una saturación discontinua, donde el papel principal lo juega el material litológico y el espesor, lo cual determina la distancia, la ruta y el tiempo de recorrido de la carga hacia la zona saturada.

La importancia de la zona vadosa, en la estimación de la vulnerabilidad natural del acuífero, depende de las características de espesor, composición litológica, propiedades químicas de las rocas, que determinan las condiciones de atenuación del material que se encuentra por debajo del horizonte del suelo y por encima de la capa freática. La biodegradación, la neutralización, la filtración mecánica, la reacción química, la volatilización y la dispersión, son fenómenos que pueden ocurrir y contribuye al proceso de atenuación de la zona vadosa.

2.6.2.2.7 Conductividad hidráulica

Es la propiedad que tiene un medio poroso y/o fracturado, en permitir la circulación del agua, a través de sí por unidad de tiempo y bajo un gradiente hidráulico determinado. La condición, que controla la conductividad hidráulica, es el grado de interconexiones entre los espacios vacíos en el medio acuífero, ya sea de porosidad primaria o secundaria (conexión intergranular). El papel que juega en la vulnerabilidad hidrogeológica consiste en que altas conductividades hidráulicas están asociadas a un alto grado de potencial de contaminación en dependencia de una mayor o menor velocidad con que el agua puede circular.

2.6.2.3 Sistema numérico

El sistema numérico utilizado, en la aplicación del DRASTIC permite la identificación relativa de la vulnerabilidad del acuífero en el ámbito de un escenario hidrogeológico. Este sistema numérico consta de tres partes principales: pesos, escalas y clasificación.

Haciendo uso de estos tres elementos evaluativos, se puede llegar a obtener el Valor Numérico DRASTIC (VND) y posteriormente el Índice DRASTIC (ID).

2.6.2.3.1 Peso

Es un valor numérico relativo que se le asigna a cada parámetro en relación con otro de acuerdo al nivel de importancia que tiene en el proceso de contaminación del acuífero. Se otorga el máximo peso a los de mayor incidencia y menor peso a los menos significativos. Estos pesos son establecidos por la metodología y no pueden ser modificados (ver tabla V).

Tabla V. Pesos asignados a cada parámetro de acuerdo con su importancia

Parámetro	Peso
Profundidad del agua	5
Recarga neta	4
Medio del acuífero	3
Suelo	2
Topografía	1
Impacto de la zona vadosa	5
Conductividad hidráulica	3

2.6.2.3.2 Escalas

Cada parámetro está dividido en escalas con diferentes rangos que están establecidos de acuerdo con las condiciones físico-naturales, en que se presenta el parámetro en el medio, y al impacto relativo que esta condición juega en la sensibilidad natural del acuífero. Estos rangos se encuentran establecidos por el método y son los que definen las subáreas de los parámetros.

2.6.2.3.3 Clasificación

Para los diferentes rangos que forman una escala, existe una clasificación numérica, que pretende pesar la importancia del parámetro en la condición físico-natural en que se encuentra el medio. El valor de clasificación, para algunos parámetros, es fijo, pero para otros se establecen valores, en donde entra en juego la experiencia y discrecionalidad del técnico analista; sin embargo, el método propone un valor típico. Los valores de calificación oscilan entre 1 y 10 (ver tablas VI, VII, VIII, IX, X, XI Y XII).

Tabla VI. Escala y calificación para la profundidad del agua

Profundidad del agua (mts.)	
Escala (mts.)	Calificación
0 a 1.5	10
1.5 a 9	9
9 a 15	7
15 a 23	5
23 a 30	3
> 30	1
Peso: 5	

Tabla VII. Escala y calificación para la recarga neta

Recarga neta mm/annual	
Escala (mts.)	Calificación
0.0 a 50	1
50 a 100	3
100 a 180	6
180 a 250	8
> 250	9
Peso: 4	

Tabla VIII. Tipo de materiales y calificación para el medio del acuífero

Medio del acuífero			
Tipo de materiales, según Drastic	Materiales, según área de estudio	Rango general de calificación	Calificación
Basalto	Lavas vesiculares	2 a 10	10
Arena y grava	Aluviales y piroclastos sueltos	4 a 9	8
Arenisca masiva	Toba aglomerática	4 a 9	6 (incipientemente fracturada)
			7 (medianamente fracturada)
			9 (intensamente fracturada)
Peso: 3			

Tabla IX. Tipo de materiales y calificación para medio del suelo

Escala medio del suelo		
Tipo materiales, según el área de estudio	Espesor	Calificación
Cobertura ausente y suelos aluviales	< 25 cms.	10
Suelos arcillosos limosos	hasta 50 cms.	7
Suelos arcillosos arenosos	hasta 70 cms.	5
Suelos arcillosos residuales	> 100 cms.	3
Peso: 5		

Tabla X. Escala y calificación para la topografía

Topografía (% de pendiente)	
Escala (mts.)	Calificación
0 a 2	10
2 a 6	9
6 a 12	5
12 a 18	3
> 18	2
Peso: 1	

Tabla XI. Tipo de materiales y calificación para el impacto de la zona vadosa

Impacto de la zona vadosa			
Tipo de materiales, según Drastic	Tipo de materiales según, el área de estudio	Rango general de calificación	Calificación
Arenisca	Las sierras superior, lavas y piroclásticos intercalados del lineamiento Nejapa	4 a 8	7
Arena y grava	Relleno de graben y piroclastos de Apoyo y Apoyeque	6 a 9	8
Basalto fracturado	Colada volcán Masaya, grupo Manangua y parte superior de las sierras	2 a 10	9
Peso: 5			

Tabla XII. Escala y calificación para la conductividad hidráulica

Conductividad hidráulica	
Escala (mts.)	Calificación
0.04 a 4	1
4 a 12	2
12 a 28	4
28 a 40	6
40 a 80	8
> 80	10
Peso: 3	

2.6.2.3.4 Valor numérico DRASTIC (VND)

El valor de clasificación asignado para cada rango de la escala, multiplicado por el peso, permite obtener el valor numérico DRASTIC del parámetro.

3. CARACTERÍSTICAS Y MANEJO ACTUAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Descripción de la explotación de agua subterránea en el área de estudio

3.1.1 Antecedentes

La historia del abastecimiento del agua potable en la ciudad de Guatemala data antes del traslado de la ciudad al valle de la Ermita. En 1774, se realizó un estudio de la introducción de las aguas de Mixco, Pansalique, Pancocha, Belén, Pinula, Acatán y Agua Bonita. El agua se suministraba sin presión y sin un sistema de medida. En 1782 por decreto surgió la Dirección de Aguas como dependencias de la Municipalidad de Guatemala.

En 1918, se inicia la aplicación del cloro a las aguas que surten la capital; en 1950, la Municipalidad de Guatemala dispuso medir el uso del agua por medio de medidores.

Cuando el Gobierno central toma la decisión de realizar por su propia cuenta el acueducto nacional Xayá Pixcayá, obtiene financiamiento del Banco Interamericano de Desarrollo y promueve ante la municipalidad citadina la transformación de la dirección de aguas y drenajes municipales en la empresa especializada en la prestación del servicio de agua potable, creándose para efecto la Empresa Municipal de Agua de la Ciudad de Guatemala EMPAGUA, por acuerdo municipal del 28 de noviembre de 1,972.

3.1.2 Tratamiento del agua potable

El agua cruda contiene diversas sales, así como materiales orgánicos microscópicos, tales como: grava, arena gruesa, arena fina, arcilla, bacterias, partículas coloidales, etc. Por consiguiente, es necesario llevar a cabo algún proceso de tratamiento para purificar el agua y ponerla en óptimas condiciones para el consumo humano.

3.1.2.1 Químicos que se utilizan

En el proceso de tratamiento se utilizan diversos tipos de materiales químicos para la purificación de aguas superficiales, es decir, ríos y presas; a continuación se explica la composición de los mismos, así como su función en el proceso; los materiales químicos son:

- a) Sulfato de aluminio: está destinado para tratar la turbiedad del agua.
- b) Polielectrolito: tiene la misma función que el sulfato de aluminio; es usado para altas turbiedades y su costo es más bajo con relación al sulfato de aluminio; sin embargo no puede usarse como coagulante primario.
- c) Sulfato de cobre: es el material químico que permite eliminar las algas
- d) Cal hidratada: es aplicada para obtener un pH óptimo de coagulación y floculación y corrige la acidez del agua para que pueda utilizarse en el consumo humano.
- e) Cloro gaseoso: es el elemento que elimina la contaminación bacteriológica
- f) Hipoclorito: es el cloro granular, por consiguiente, tiene la misma función del cloro.
- g) Para el caso de las aguas subterráneas del área de estudio, solamente se aplica cloro para desinfección, ya que el agua es de buena calidad.

3.1.3 Sistema de producción y abastecimiento de agua potable

Actualmente, EMPAGUA abastece del vital líquido a los vecinos de la Ciudad de Guatemala, a través de los siguientes sistemas de producción y plantas de tratamiento:

Tabla XIV. Sistemas de producción de agua potable en la ciudad capital

Sistema	Zonas
El Cambray y estación de bombeo Hincapié	9,0,13,14,15
Santa Luisa	5 y 6 en su totalidad 1,4,10 y 17 parcialmente
La Brigada	7,11 y 19
Planta de bombeo Ojo de Agua	1,3,8,9,12,13,14,21 y caserío El Frutal, San Miguel Petapa
Las Ilusiones y planta de bombeo El Atlántico	17 y 18
Xayá Piscayá y planta Lo de Coy	1,2,3,6,7,8,11 y 19 4 y 18 parcialmente
Sistema de pozos	1,2,5,6,7,9,10,12,13,14,15,16,17,18 8,19 y 1 parcialmente

La producción mensual de agua potable de los anteriores sistemas para el año 2,002 y 2,003, se observa en la estadística siguiente:

En 1963, se construye el tanque circular de aguas claras y se completo el sistema con la planta de bombeo Hincapié (1968) y la perforación del pozo del mismo nombre (1970). En 1998, la planta de tratamiento El Cambray fue rehabilitada con el apoyo técnico y financiero de la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA).

Actualmente, el sistema El Cambray consta de:

- a) Presa de captación del río Pinula
- b) Estación de bombeo Hincapié, que incluye una presa de captación, un tanque de alimentación, desarenador y 4 unidades de bombeo, 2 de 200 hp y 2 de 250 hp. Esta últimas, como parte de la rehabilitación del gobierno de Japón

3.1.4.2 Sistema La Brigada

Ubicación: Calzada San Juan y 47 avenida, zona 7
Producción diaria: 40,000 m³

El sistema La Brigada fue puesto en servicio en 1945, en respuesta al crecimiento de la ciudad de Guatemala, que por esos años se expandía predominantemente hacia el sur y el occidente. Actualmente, el sistema consta de:

- a) Presa La Brigada.
- b) Línea de conducción de la presa a la planta La Brigada.
- c) Ocho pozos (6 en el predio de la planta y 2 en la colonia El Rodeo).
- d) Planta de tratamiento, que incluye vertederos de entrada, caseta de dosificación de químicos, canales, mezclas y floculación, sedimentadores, dos unidades de filtración, caseta de cloración, tanques de distribución y bodegas.

3.1.4.3 Sistema Las Ilusiones y estación de bombeo El Atlántico

Ubicación: 4ª Avenida final, Colonia Kennedy, zona 18
Producción diaria: 25,000 m³

Inaugurado en 1972; este sistema fue diseñado para captar por medio de una estación de bombeo las aguas de los ríos Teocinte, Bijagûe y Ocote y posteriormente tratarlas en la planta Las Ilusiones. En 1996 este sistema fue rehabilitado con el apoyo técnico y financiero de la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA). Actualmente, el sistema consta de:

- a) Presa de captación de los ríos Bijagûe y Ocote.
- b) Desarenador.
- c) Casa de mandos.
- d) Cuatro unidades de bombeo de 800 hp.
- e) Bodega y taller.
- f) Planta tipo Degremont, de tecnología francesa, consiste en canal de entrada pulsador, 2 sedimentadores y 4 filtros, 2 tanques de almacenamiento: uno elevado y otro semienterrado.

3.1.4.4 Estación de bombeo Ojo de Agua

Ubicación: final Avenida Petapa, Finca El Frutal zona 12
Producción diaria: 87,000 m³

Construida en 1,958, inicialmente afloraba el agua superficialmente y actualmente la estación de bombeo consta de:

- a) Trece pozos profundos.
- b) Tanque circular usado inicialmente de regulación y actualmente de desinfección

de 8,500 m³.

- c) Unidad de dosificación de cloro y silicofloruro.
- d) Casa de máquinas que incluye 8 unidades de bombeo de 1,000 hp. cada una.

3.1.4.5 Sistema Santa Luisa

<i>Ubicación:</i>	<i>Acatán, Santa Rosita, zona 16</i>
<i>Producción diaria:</i>	<i>10,000 m³</i>

Aunque su construcción data del siglo XIX, no fue sino hasta 1,938 cuando empezó a funcionar propiamente como planta de tratamiento al introducirle las aguas de la presa El Teocinte; en 1954 se le aumento la capacidad para tratar mayores caudales. El terremoto de 1976 obligó a cambiar uno de los sedimentadores de flujo convencional por uno nuevo de flujo laminar. En 1996, el sistema de filtración y aplicación de químicos de la planta Santa Luisa fue rehabilitado con el apoyo técnico y financiero de la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA).

En la actualidad, la planta de tratamiento consta de 4 vertederos de entrada, un punto para la dosificación de químicos, un floculador, dos sedimentadores y 6 filtros, tanque elevado y dos tanques de almacenamiento.

3.1.4.6 Sistema Xayá-Pixcayá y planta Lo de Coy

<i>Ubicación:</i>	<i>Km. 17.5 Carretera Interamericana, Mixco</i>
<i>Producción diaria:</i>	<i>140,000 m³</i>

Terminado en 1978, el acueducto Xayá-Pixcayá es la obra más grande en materia de abastecimiento de agua en Guatemala, el cual abastece a la planta de tratamiento Lo de Coy, que a su vez produce el 30% del agua potable que distribuye EMPAGUA en la ciudad de Guatemala.

En octubre de 1961, el gobierno de Guatemala, con el fin de ayudar a enfrentar la escasez de agua potable, decidió hacer estudios para traer a la ciudad capital el agua de los ríos Xayá-Pixcayá. Para el efecto, se encargó a ingenieros guatemaltecos la preparación de un anteproyecto, que fue terminado a principios de 1962. La Municipalidad capitalina, por otra parte, había preparado otros estudios para traer agua de los mismos ríos a la ciudad capital, pero en diferentes rutas. Después de tres años de deliberaciones para escoger el proyecto más conveniente y de otros cuatro en que estas se prolongaron, se inicio la obra a principios de 1971.

El acueducto Xayá lo constituyen la presa de derivación La Sierra, la presa de derivación El Tesoro y líneas de conducción. La planta de tratamiento Lo de Coy consta de un canal de entrada, 3 floculadores, 4 sedimentadores y 6 filtros.

3.1.4.7 Pozos de Empagua

En Guatemala, Empagua tiene distribuidos 78 pozos, los cuales han sido perforados en distintas fechas. Estos pozos generalmente funcionan contra la demanda y carecen de una sectorización de su zona de servicio, lo que incide en que los mismos no trabajen en una forma continua, ya que únicamente trabajan algunas horas al día.

Conforme a la producción máxima de los pozos de Empagua, la misma es de 781 litros por segundo, es decir que se dispone de una capacidad instalada de este importante caudal, sin embargo, en la práctica muchos de estos pozos salen de servicio por distintas razones, lo cual disminuye la producción en conjunto; adicionalmente es importante resaltar el hecho de que muchos de estos pozos no trabajan las 24 horas del día, ya que trabajan contra la red de distribución, lo que imposibilita que lo hagan continuamente, lo cual disminuye la vida útil de los equipos, ya que hay que programar más paros y arranques, que si trabajaran continuamente.

3.1.4.8 Pozos proyecto emergencia I

Este proyecto se ejecutó dentro del convenio de préstamo GTP2 suscrito entre la Municipalidad de Guatemala, en representación de la Empresa Municipal de Agua de la Ciudad de Guatemala EMPAGUA y el Fondo de Cooperación Económica a Ultramar del Japón OECF, ahora llamado "Japan Bank for International Cooperation JBIC.

Como resultado del proyecto se obtuvo:

Pozos perforados	34 pozos
Caudal obtenido	1,352 litros por segundo
Tubería instalada	24,800 mts. De 8 hasta 24 pulgadas
Líneas eléctricas	10,200 metros
Subestaciones eléctricas	16 unidades
Tanques de distribución	3 mayores de 1,000 metros cúbicos

Todos los pozos poseen equipos de bombeo sumergibles. Se construyeron las casetas de control y equipos de rebombeo con sus respectivos desinfectantes.

De los 34 pozos perforados, actualmente están en operación 28, los cuales originalmente produjeron un caudal de 1,095 lts/seg, sin embargo, la producción actual de los mismos es de 870 lts/seg, producción que ha descendido por diversas razones, principalmente el descenso de los niveles freáticos, lo que ha implicado adecuarlos a una producción más conservadora, para evitar una sobreexplotación y así prolongar la vida útil de los mismos.

3.2 Calidad del agua, parámetros y su interpretación

Los parámetros que miden la calidad del agua son: los análisis físicos, análisis químicos, los exámenes bacteriológicos y los análisis hidroquímicos.

3.2.1 Análisis físico

Este tipo de análisis se relaciona con la medición y registro de aquellas propiedades que pueden ser observadas por los sentidos. Para esto se hace uso de ciertos parámetros, que permiten tener un juicio bastante acertado de la calidad del agua desde este punto de vista. Los análisis físicos efectuados son:

3.2.2.1 Aspecto

Es un análisis cualitativo que se califica de acuerdo a una apreciación general del sentido de la vista como: claro, ligeramente turbio y turbio.

Significado sanitario: dicho aspecto permite una estimación rápida y sencilla de la aceptación del agua por el consumidor. Es deseable que el agua destinada para consumo humano posea un aspecto claro.

3.2.2.2 Olor

Los olores en el agua son debidos a muy pequeñas concentraciones de compuestos volátiles, algunos de los cuales se producen cuando se descompone la materia orgánica. La intensidad y lo ofensivo de los olores varía con el tipo; algunos son a tierra y moho, mientras que otros son putrefactos.

En la mayoría de los casos, los olores indeseables en las aguas superficiales son producidos por el plancton, dado que estos organismos desprenden pequeños vestigios de aceites esenciales volátiles que confieren al agua olores dulzones, aromáticos, a pescado, etc., debido a las muy pequeñas concentraciones de las sustancias que producen olores; los procedimientos analíticos no son satisfactorios para su medición y tiene que confiarse en el sentido del olfato.

Significado sanitario: Tiene importancia determinar este parámetro, ya que las características e intensidad del olor proporcionan una medida de la aceptación del agua por el consumidor.

En Guatemala, se tiene por norma que el agua que se entrega al usuario para consumo humano, por cualquier sistema de abastecimiento, debe estar desprovista de olores rechazables.

3.2.2.3 Color

El color en el agua es generalmente ocasionado por la extracción de materia colorante del humus de los bosques o de la materia vegetal de los pantanos y áreas de poca profundidad.

El color café amarillento como el del té en las aguas superficiales se debe a la materia colorante formada por los compuestos del humus y el ácido tánico, aunque en ciertos casos puede ser impartido por las formas solubles y coloidales del hierro o por las descargas de desechos industriales.

Significado sanitario: la determinación del color en los procesos de tratamiento del agua es importante, ya que la remoción del color es una función del tratamiento del agua, y por lo tanto la disminución del color es una medida de la eficiencia del proceso de la planta.

No hay que pasar por alto que lo atractivo del agua depende notablemente del color que posea. El color se expresa en unidades de color (UC), con base en patrones de comparación de platino-cobalto.

Límite máximo aceptable:	5	UC
Límite máximo permisible:	50	UC

3.2.2.4 Turbiedad

La turbiedad en el agua se debe a la dispersión e interferencia de los rayos luminosos, que pasan a través de la misma como resultado de la presencia de materia orgánica e inorgánica finamente dividida, tal como: arcilla, barro, plancton y otros microorganismos.

Significado sanitario: la medida de la turbiedad permite evaluar la eficiencia de los procesos de coagulación y filtración que realizan las plantas de tratamiento de agua, ya que la presencia de turbiedad en el agua, que ha sido coagulada y filtrada, indica una operación defectuosa. Una turbiedad que sea perceptible en el agua por el consumidor, puede ocasionar su rechazo.

La turbiedad se expresa en Unidades de Turbiedad (UT) y cuando su determinación se realiza por nefelometría, la misma se expresa como Unidades de Turbiedad Nefelométricas (UTN).

Límite máximo aceptable:	5	UTN
Límite máximo permisible:	25	UTN

3.2.2.5 Temperatura

Termodinámicamente se considera como una medida de la energía térmica del movimiento desordenado de las moléculas en una sustancia en equilibrio térmico.

Significado sanitario: los efectos de la temperatura merecen consideración en los procesos de autopurificación natural, relacionada a la rápida estabilización de materia orgánica y al nivel de oxígeno disuelto. Permite ser un parámetro, por medio del cual se normalizan numerosas pruebas físicas, químicas y biológicas.

Límite máximo aceptable: 18-30° C

Límite máximo permisible: No mayor de 34° C

3.2.2.6 Potencial de hidrógeno (pH)

El potencial de hidrogeno se define arbitrariamente y por comodidad como el logaritmo de base 10 del inverso de la concentración del ión hidrógeno, y se emplea para expresar la actividad de este ión.

La escala de pH varía de uno a 14 grados. Un pH de 7° C en el agua indica neutralidad. Un pH comprendido entre el valor neutro y 14° indica alcalinidad. Un pH comprendido entre uno y el valor neutro indica acidez.

Significado sanitario: la importancia de la determinación de este parámetro radica en que la mayoría de las aguas naturales superficiales tienen valores de pH entre 5.5-8.6° C . La alteración excesiva fuera de estos límites puede indicar contaminación del abastecimiento de agua por algún desecho de tipo industrial.

Límite máximo aceptable:	6.5-8.5° de pH
Límite máximo permisible:	6.5-9.2° de pH

3.2.2.7 Residuos totales

La definición usual de residuos o sólidos totales está referida a la cantidad de materia que permanece como residuo después de un proceso de evaporación (103°-105° C) y secado de una determinada muestra de agua. Se divide en:

- a) Residuos filtrables: incluye la porción del residuo total que pasa a través del filtro.
- b) No filtrables: incluye la porción del residuo total que es retenida por el filtro.
- c) Residuos fijos: incluye la porción del residuo total, que no ejerce una presión de vapor significativo a 600° C, durante un período de una hora.

Significado sanitario: es importante la determinación de este parámetro, porque el agua con un alto contenido de residuos, obra como laxante, son inferiores en cuanto a sabor y ocasiona muchos problemas a las personas en cuanto a ingestión se refiere.

Límite máximo aceptable:	500 mg/l residuo total
Límite máximo permisible:	1500 mg/l residuo total

3.2.3 Análisis químico

Estos análisis permiten determinar las cantidades de materia mineral y orgánica presentes en el agua y que pueden afectar su calidad. Proporciona datos acerca de contaminantes y muestra las variaciones, que pueden ocasionarse dentro de un determinado proceso de tratamiento, con lo cual se puede controlar el mismo. Los análisis químicos efectuados son:

3.2.3.1 Fluoruros

Los fluoruros pueden presentarse en forma natural en el agua subterránea o superficial. Regularmente en las aguas destinadas para consumo humano, se mantiene un nivel de 1.0 mg/l de fluoruros, con el objetivo de prevenir la caries dental. Aunque la cantidad que realmente debe dosificarse es una función de la temperatura del aire.

En la tabla XVI, se exponen los límites recomendados para la concentración de fluoruros en el agua potable en varias series de promedios anuales de temperaturas máximas diarias de aire. Para referirse a la tabla, es necesario utilizar temperaturas basadas en datos obtenidos durante un período mínimo de cinco años.

Tabla XVI. Límites para la concentración de fluoruros en el agua potable

Concentraciones de fluoruros recomendadas para el agua potable		
Promedio anual de temperaturas máximas del aire, en °C	Límites recomendados para los fluoruros mg/l	
	Inferior	Superior
10.0 - 12.0	0.9	1.7
12.1 - 14.6	0.8	1.5
14.7 - 17.6	0.8	1.3
17.7 - 21.4	0.7	1.2
21.5 - 26.2	0.7	1.0
26.3 - 32.6	0.6	0.8

3.2.3.2 Cloruros

Estos aniones, que se encuentran presentes en el agua en diversas concentraciones, normalmente se incrementan con el contenido mineral de los suelos.

Los abastecimientos de agua subterránea regularmente presentan mayor concentración de cloruros, debido a que el agua disuelve los cloruros presentes en las montañas y cimas elevadas.

Significado sanitario: la determinación de este parámetro es importante cuando se tiene un conocimiento previo de la cantidad de cloruros que se encuentran normalmente en el agua de un abastecimiento, ya que cuando el agua aparece contaminada, éstos tienden a estar en exceso. Este puede ser un indicio de contaminación por excretas humanas o particularmente por la orina, que contiene cloruros en proporción aproximada a la consumida en la alimentación.

Límite máximo aceptable: 200mg/l Cl

Límite máximo permisible: 400mg/l Cl

3.2.3.3 Nitrógeno

El análisis del nitrógeno en las formas de albuminoideo, amoniacal, nitritos y de nitratos, se ha efectuado en aguas potables y polucionadas desde que se tiene conocimiento que el agua era un vehículo para la transmisión de enfermedades.

Significado sanitario: la determinación del nitrógeno en sus diversas formas sirvió de base para juzgar la calidad del agua durante muchos años. Actualmente se realiza por las siguientes razones:

Se ha demostrado que el nitrógeno en las aguas negras o recién contaminadas, se encuentra originalmente en las formas de alhuminoideo y amoniacal. Con el transcurso del tiempo el nitrógeno albuminoideo es convertido a la forma amoniacal, que posteriormente y en condiciones aeróbicas es oxidado a nitritos y luego a la forma de nitratos. Por lo tanto, el agua que contiene una mayor cantidad de nitrógeno albuminoideo y amoniacal, es considerada como de reciente contaminación y de un peligro potencial mayor para el consumidor.

La determinación del nitrógeno albuminoideo es una medida aproximada de la cantidad de nitrógeno de origen proteico presente en el agua.

La determinación del nitrógeno amoniacal y de nitritos pone en evidencia la presencia de materia orgánica parcialmente descompuesta en el agua. Las normas que actualmente se emplean en Guatemala establecen los siguientes límites:

Límite máximo en forma de nitritos:	0.01 mg/l
Límite máximo en forma amoniacal:	0.50 mg/l

Por otra parte, el empleo de agua con un alto contenido de nitrógeno de nitratos en la alimentación de los niños, puede causar una metahemoglobinemia. Ésta norma establece un límite máximo aceptable de nitrógeno en la forma de nitratos de: 45.0 mg/l.

3.2.3.4 Hierro total

El agua natural contiene una variable cantidad de hierro, que puede presentarse en la forma de ión ferroso (Fe^{++}) soluble o en la forma oxidada menos soluble como la del ión férrico (Fe^{+++}). El hierro puede encontrarse en el agua debido a infiltraciones naturales de depósitos que contiene este material, o bien por afluentes de industrias que procesan hierro.

Significado sanitario: no se conocen efectos perjudiciales a la salud por tomar aguas que contengan hierro, aunque en cantidades excesivas causa manchas en la ropa o utensilios de porcelana, provoca depósitos y proliferación de ferrobacterias, de color y turbiedad al agua, produce sabores metálicos y, en general, le da un aspecto desagradable e inapropiado para ciertos usos.

Límite máximo aceptable:	0.1- 0.5 mg/l Fe
Límite máximo permisible:	1.0 mg/l Fe

3.2.3.5 Dureza total

Es una característica del agua que representa la concentración total de calcio y magnesio, expresada como carbonato de calcio (CaCO₃).

Significado sanitario: la presencia de dureza en el agua no afecta su calidad sanitaria; sin embargo es importante considerarla, ya que en ciertos casos dificulta la cocción de algunos alimentos y provoca la formación de incrustaciones en los utensilios de cocina.

Por otra parte, según el contenido de dureza total en el agua, ésta puede clasificarse de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla XVII. Clasificación del agua, según rango de dureza total

Rango de dureza total (CaCO ₃) mg/l	Clasificación del agua
0.0 a 50	Blanda
50 a 150	Moderadamente dura
150a 300	Dura
> 300	Muy dura

3.2.3.6 Alcalinidad total

La alcalinidad del agua está referida a la capacidad que posee ésta de neutralizar los ácidos, y es una medida de los constituyentes alcalinos del agua expresados como bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos; la alcalinidad total es la suma de estos constituyentes.

La presencia de hidróxidos, bicarbonatos y carbonatos metálicos de calcio, magnesio y sodio, son la causa común de que en el agua se presente una alcalinidad natural.

La determinación de la alcalinidad no tiene importancia directa desde el punto de vista sanitario, pero es importante considerarla cuando se relaciona a los procesos de coagulación y corrección del poder corrosivo del agua.

3.2.3.7 Manganeseo

El manganeseo se encuentra presente en el agua regularmente en la forma del ión (Mn^{++}), aunque se puede presentar en forma de complejos solubles o partículas suspendidas en varios estados de oxidación.

Significado sanitario: la presencia de manganeseo en las aguas de suministro público presenta variados problemas: puede dar sabores desagradables en combinación de bebidas como el café o el té, así como manchas en la ropa, similar a las del hierro, excepto que las manchas son más oscuras y con frecuencia más persistentes.

Límite máximo aceptable:	0.05 mg/l Mn
Límite máximo permisible:	0.50 mg/l Mn

3.2.3.8 Sulfatos

Los sulfatos se pueden encontrar presentes en el agua natural, en un amplio rango de concentraciones. Las aguas provenientes de minas o afluentes industriales frecuentemente contienen altas concentraciones de sulfato, debido a la oxidación de la pirita y el uso del ácido sulfúrico.

Significado sanitario: la presencia en exceso de sulfatos en el agua de suministro público obra como purgante; es decir, tiene efectos laxantes. Por otra parte, tiene efectos corrosivos en los materiales, que regularmente se utilizan en la fabricación de tuberías y piezas de equipo.

Límite máximo aceptable:	400 mg/l SO ₄
Límite máximo permisible:	600 mg/l SO ₄

3.2.3.9 Cloro residual

El cloro residual no es sólo un poderoso desinfectante, sino que también satisface necesidades en las plantas potabilizadoras de agua. Puede reaccionar con amoníaco, hierro, manganeso, sustancias proteicas, sulfuro y algunas sustancias productoras de sabores y olores, mejorando las características del agua potabilizada.

Cuando se realiza el proceso de desinfección por medio de cloro, es posible obtener en el agua dos formas, por medio de las cuales se manifiesta el residual de cloro disponible o activo en el agua. Estas formas son:

- a) Cloro residual libre disponible: este tipo de residual se obtiene cuando el agua se clora íntegramente; es decir, cuando la aplicación del cloro al agua es para producir directamente o mediante la destrucción del amoníaco presente en el agua, un residual de cloro libre.
- b) Cloro residual combinado disponible: este residual se obtiene cuando el cloro se aplica al agua con la finalidad de producir conjuntamente con el amoníaco, ya presente en el agua o agregado, un residual activo combinado.

El cloro residual libre disponible es regularmente más efectivo y más rápido en su acción bactericida que el cloro residual combinado disponible. Esto se debe a que el cloro residual combinado se encuentra presente en las formas monocloramina (NH₂Cl), dicloramina (NHCl₂) y tricloramina (NCl₃), que actúan como agentes oxidantes menos activos y más lentos en su acción.

Significado sanitario: en vista de que el cloro se agrega al agua de los abastecimientos, para asegurar su pureza bacteriológica o para mejorar sus características físicas, químicas y organolépticas (sabor y olor), se hace necesario tener un control adecuado de la cantidad de cloro que se requiere para producir un determinado residual de cloro en fuentes de agua de calidad potable, que comparativamente contienen poca polución. En la mayoría de los casos, se afirma la seguridad bacteriológica de un agua, cuando se tiene un ligero exceso de cloro.

En Guatemala, se ha fijado por norma que las plantas potabilizadoras de agua mantengan un residual de cloro disponible de 1.0 mg/l y de 0.5-0.7 mg/l en cada punto de la red de distribución al usuario.

3.2.4 Examen bacteriológico

Aunque es de suponerse que el objetivo de los exámenes que se practican habitualmente al agua sería el de aislar los organismos patógenos; existen ciertas razones por las cuales esto no es así y se pueden resumir de la siguiente manera:

- a) Lo más probable es que los gérmenes patógenos lleguen al agua esporádicamente y no sobreviven en ella durante largo tiempo; por eso, pueden no encontrarse en la muestra enviada al laboratorio.
- b) Si existen en muy pequeño número es fácil que escapen a las técnicas de investigación.

Además, es sabido que los microorganismos patógenos llegan a los cuerpos de agua, a través de las deyecciones intestinales, por lo que el examen que habitualmente se práctica al agua consiste en la investigación de ciertas especies bacterianas, que se encuentran normalmente en el intestino grueso del hombre y de otros animales de sangre caliente.

Estas especies, que de por sí no son patógenas, se asocian a menudo con los organismos que sí lo son y son un buen índice del grado de seguridad bacteriológica de un cuerpo de agua.

Por otra parte, estas especies bacterianas son más resistentes que las patógenas, por lo que se encuentran ausentes en el agua, entonces hay una indicación de que el agua es bacteriológicamente segura para el consumo humano.

Asimismo, la presencia de estas especies es una indicación de que se pueden encontrar presentes organismos patógenos y que el agua para bebidas es insegura. Estas especies bacterianas tienen por denominación "el grupo coliforme".

3.2.4.1 Grupo coliforme

Básicamente lo forman las bacterias *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes*. El grupo coliforme se divide a su vez en dos; si el grupo está formado por las bacterias anteriormente mencionadas, se denomina grupo coliforme total. Si el grupo está formado únicamente por la bacteria *Escherichia coli*, se denomina grupo coliforme fecal.

Entre las principales características del grupo coliforme tenemos:

- a) Bacilos aerobios a anaerobios facultativos.
- b) No esporulados.
- c) Gram-negativos.
- d) Fermentan la lactosa con producción de ácido y gas de 24 a 48 horas a las temperaturas siguientes:

35 +/- 0.2° C para el grupo coliforme total

45 +/- 0.5° C para el grupo coliforme fecal.

3.2.4.1.1 Prueba presuntiva

Consiste básicamente en sembrar volúmenes apropiados de la muestra de agua en tubos con un medio de cultivo de caldo lactosado, y observar si se produce gas después de un período de incubación de 24-48 horas a 35.0° C. La ausencia de gas después de 48 horas es prueba de que no existen bacterias coliformes en la muestra analizada, y constituye una prueba negativa (-). La presencia de gas en los tubos de caldo lactosado constituye una prueba positiva (+), pero no necesariamente que la formación de gas se deba a otro tipo de microorganismos que no constituyen índices de polución. Por esta razón, es necesario realizar la prueba confirmativa.

3.2.4.1.2 Prueba confirmativa

Consiste en inocular todos los tubos que den un resultado positivo en la prueba presuntiva, en un medio de cultivo adecuado que depende del grupo coliforme a investigar. Para el grupo coliforme total el medio el caldo lactosado con bilis de buey y verde brillante, y para el coliforme fecal se utiliza el medio EC. Las condiciones, a las cuales se llevan a cabo estas determinaciones, se pueden observar en las características del grupo coliforme descritas anteriormente. Al igual que la prueba presuntiva, la ausencia de gas después del período de incubación constituye una prueba negativa y la presencia de gas una prueba positiva, con la diferencia de que al ser positiva la prueba, confirma la presencia del grupo coliforme que se haya investigado (fecal, total o ambos).

3.2.4.1.3 Expresión de resultados

Dado que el método de los tubos de fermentación por diluciones múltiples se basa en leyes probabilísticas, los resultados se expresan por medio de un índice denominado Número Más Probable (NMP). Este NMP es un índice del número más probable de bacterias coliformes (totales), que tienen más probabilidad de ocurrir sobre cualquier otro número en los resultados obtenidos por medio del examen bacteriológico.

3.2.4.1.4 Cálculo de número más probable (NMP)

Se calcula de las diversas combinaciones de resultados positivos y negativos, que se obtienen de la prueba confirmativa del examen bacteriológico realizado por este método. Para esto, se hace necesario utilizar el procedimiento de cálculo y las tablas del NMP de bacterias coliformes en 100 ml de agua de muestra, que presenta el "Estándar Methods for the Examination of Water and Wastewater".

3.2.5 Análisis hidrogeoquímico

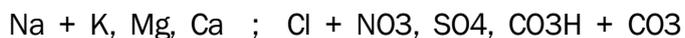
3.2.5.1 Diagramas poligonales y radiantes

3.2.5.1.1 Diagrama de Stiff modificado

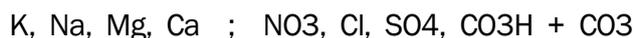
Dichos diagramas consisten en tomar sobre semirrectas convergentes o paralelas, segmentos proporcionales a cada ion y unir los extremos dando así un polígono. Sobre cada semirrecta se toma un solo ion o bien un catión y un anión simultáneamente. La forma de la figura resultante da idea del tipo de agua. Se prestan bien a comparaciones y a ser utilizados en mapas geohidroquímicos. Los tipos de figuras pueden ser:

- a) Radiantes: sobre 4, 6 o 12 semirrectas concurrentes uniformemente espaciadas, se colocan valores proporcionales a los meq/l o a los % de los meq/l de cada ion y se unen los extremos formando un polígono estelar. Son poco usados.
- b) Poligonales paralelos: de los cuales el más conocido es el diagrama de Stiff. En este diagrama, se tienen cuatro rectas paralelas igualmente espaciadas, cortadas por una normal dando así cuatro semirrectas izquierdas (campo de cationes) y cuatro semirrectas derechas (campo de aniones). Sobre cada recta, se toma un segmento proporcional al los meq/l del ion correspondiente y se unen los extremos dando un polígono representativo.

Para aguas subterráneas, se dispone utilizando 3 ó 4 rectas base, de arriba abajo:

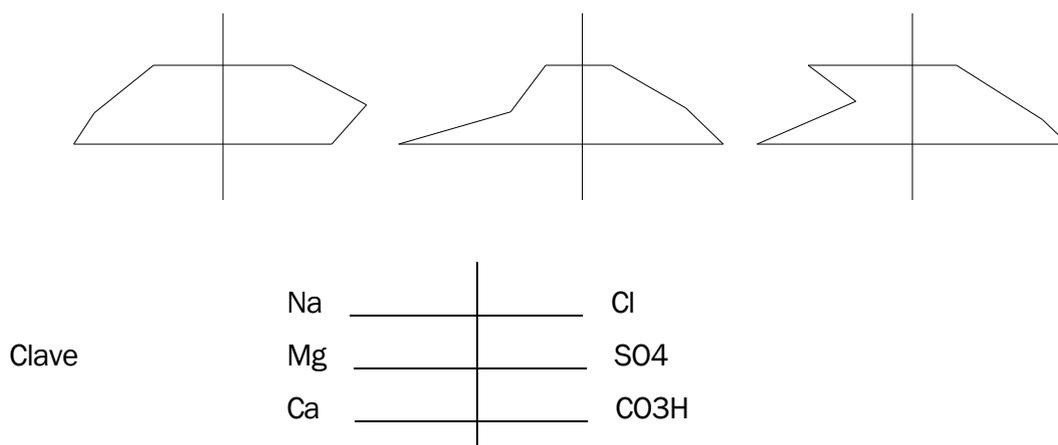


o bien



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

Figura 12. Diagramas de Stiff modificados



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

Para aguas muy concentradas o muy diluidas el diagrama, es muy alargado y entonces es conveniente reducir o ampliar la escala, indicándolo con un rayado especial del diagrama. El empleo de valores en % de meq/l evita diferencias de tamaño entre figuras, pero no permite apreciar concentraciones absolutas.

La adopción de escalas logarítmicas permite representar aguas muy diferentes en contenido salino y mantener tamaños aceptables, pero su uso no es habitual y además se pierde parte de la semejanza.

3.2.5.2 Clasificación de las aguas

Las diferentes clases de aguas subterráneas se clasifican, a fin de informar brevemente su composición química o de algunos aspectos de la misma. Las clasificaciones simples sólo dan una información global, y en general se establecen dando énfasis a las características que más interesa destacar y varían de un lugar a otro, según las necesidades y disponibilidades de agua.

Las clasificaciones geoquímicas contienen más información de carácter geoquímica y, en cierta manera, tienden a expresar de forma concisa lo que se obtiene con los diferentes tipos de diagramas. Las clasificaciones que aportan más información son las más complicadas y por eso, en ocasiones, su utilidad es muy limitada. Las clasificaciones geoquímicas han sido objeto de numerosos trabajos e investigaciones por parte de científicos soviéticos.

3.2.5.2.1 Clasificaciones simples

a) Por el residuo seco:

- Agua dulce de 0 a 2,000 ppm, a veces 3,000
- Agua salobre hasta 5,000 ppm, a veces 10,000
- Agua salada, hasta 40,000 ppm, a veces 100,000
- Salmuera hasta saturación

b) Por la dureza:

- Blanda de 0 a 50 ppm en CO_3Ca , a veces hasta 60
- Algo dura hasta 100 ppm en CO_3Ca , a veces hasta 120
- Dura hasta 200 ppm en CO_3Ca , a veces hasta 250

- Muy dura hasta saturación
- c) Por propiedades destacadas, según los usos:
- Selenitosa se tiene más de 500 o 600 ppm en S04
 - Ferruginosa, si tiene hierro en cantidad tal que produce un precipitado de óxido de hierro, al tomar contacto con el aire
 - Carbónica, si desprende burbujas de CO2 a la temperatura y presión ambiente
 - Lítica, si contiene cantidades medibles de ese elemento
 - Sulfhídrica, si huele a ácido sulfhídrico (a veces llamada impropriamente sulfurosas)
- d) Clasificación SAR
- Esta clasificación tiene en cuenta la conductividad del agua C y el valor SAR

$$SAR = r \times Na / \sqrt{r(Mg + Ca) / 2}$$

3.2.5.2.2 Clasificaciones geoquímicas

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

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

Los grupos que se hacen se muestran en la siguiente tabla:

Tabla XVIII. Clasificación de grupos

	Aniones		Cationes
1	$r\text{Cl} > r\text{SO}_4 > r\text{CO}_3\text{H}$	a	$r\text{Na} > r\text{Mg} > r\text{Ca}$
2	$r\text{Cl} > r\text{CO}_3\text{H} > r\text{SO}_4$	b	$r\text{Na} > r\text{Ca} > r\text{Mg}$
3	$r\text{SO}_4 > r\text{Cl} > r\text{CO}_3\text{H}$	c	$r\text{Mg} > r\text{Na} > r\text{Ca}$
4	$r\text{SO}_4 > r\text{CO}_3\text{H} > r\text{Cl}$	d	$r\text{Mg} > r\text{Ca} > r\text{Na}$
5	$r\text{CO}_3\text{H} > r\text{Cl} > r\text{SO}_4$	e	$r\text{Ca} > r\text{Na} > r\text{Mg}$
6	$r\text{CO}_3\text{H} > r\text{SO}_4 > r\text{Cl}$	f	$r\text{Ca} > r\text{Mg} > r\text{Na}$

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

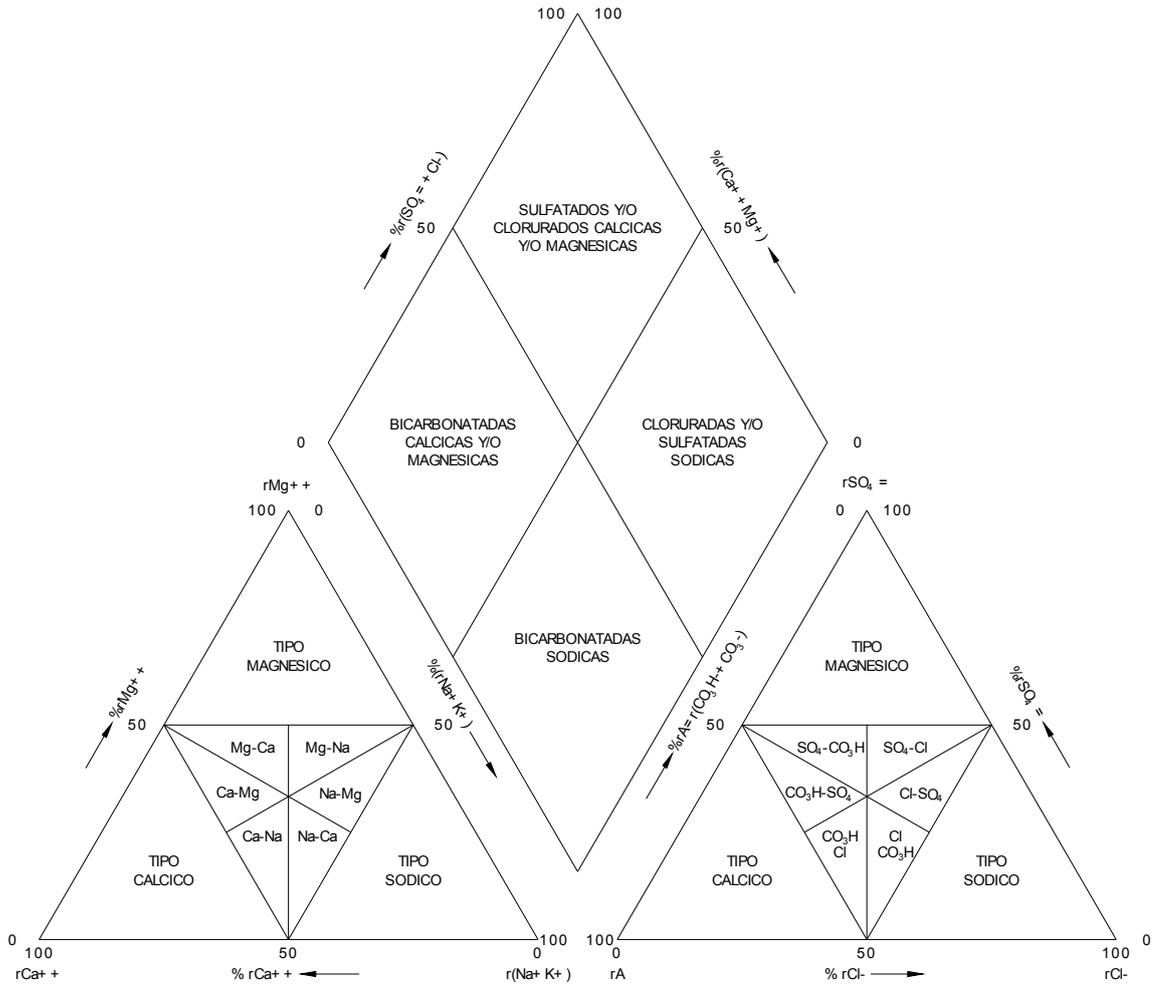
C-2 Conductividad a 25°C entre 250 y 750 u S/cm (entre 215 y 650 a 18°C)

C-3 Conductividad a 25°C entre 750 y 2250 u S/cm (entre 650 y 2000 a 18°C)

C-4 Conductividad a 25°C mayor que 2250 u S/cm (mayor que 2000 a 18°C)

La simplicidad de estas clasificaciones no permite, en general, buenas deducciones en cuanto a relaciones entre aguas, pero se adapta bien a determinar zonas en planos de composición química, por emplear dos signos acompañados o no de la indicación de salinidad. Se adapta bien a su representación en diagramas triangulares, (ver figura 13).

Figura 13. Tipos de aguas deducidas de un diagrama triangular de Piper



3.2.5.2.3 Clasificación de Chase Palmer

Esta clasificación geoquímica es la más antigua y su interés es histórico, aunque sirve como base a otras clasificaciones posteriores. Se basa en la comparación de aniones con cationes en un cierto orden, como si se tratase de formar sales hipotéticas por orden de mayor a menor solubilidad.

Esta clasificación distingue en el agua dos propiedades fundamentales: la salinidad y la alcalinidad; la salinidad corresponde a las sales de aniones no hidrolizables, principalmente los cloruros, sulfatos y nitratos; la alcalinidad es debida a sales hidrolizables, principalmente los bicarbonatos. Los cationes se dividen en tres clases:

- a) Los que comunican propiedades primarias o alcalinos, Na⁺ y K⁺
- b) Los que comunican propiedades secundarias o alcanotérreos Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺
- c) Los que comunican propiedades terciarias o hidrolizables, como H⁺, Al⁺⁺⁺, etc.

En la clasificación de Palmer, se trabaja en % de meq/l de aniones y de cationes.

Sin embargo, a efectos de ordenación, basta trabajar directamente con los contenidos en meq/l, debiendo equilibrar previamente la pequeña diferencia entre la suma de aniones y la de cationes.

Para determinar la clasificación, sea:

A	=	propiedades primarias = 1	=	% (r Na + rK)
B	=	propiedades secundarias = 2	=	% (r Ca + r Mg)
C	=	propiedades terciarias = 3	=	% (r H + r Al)
D	=	salinidad = S	=	% (r Cl + r SO ₄ + rNO ₃)
E	=	alcalinidad = A	=	% (r CO ₃ H + r CO ₃)

Debiéndose cumplir que $a + b + c = d + e$

En las aguas, se encuentra salinidad primaria S1, salinidad secundaria S2, salinidad terciaria S3, alcalinidad primaria A1 y alcalinidad secundaria A2. No es posible la alcalinidad terciaria A3. La agrupación se realiza según la siguiente tabla.

Tabla XIX. Clasificación Chase Palmer

	Clase	S1	S2	S3	A1	A2
I	$d < a$	d	0	0	a - d	b
II	$d = a$	a = d	0	0	0	b
III	$a + b > d > a$	a	d - a	0	0	a + b - d
IV	$d = a + b$	a	b	0	0	0
V	$d > a + b$	a	b	d - a - b	0	0

Un agua no puede tener más de tres de las cinco propiedades. Esta clasificación es muy deficiente, por tener una agrupación un tanto arbitraria y englobar varios iones en una misma propiedad. El manejo de tantos por ciento crea otra diferencia al no poderse apreciar el total de meq/l presentes.

3.2.5.2.4 Clasificación de Souliné

Se trata de una clasificación propuesta en 1948, que pretende evidenciar los fenómenos de cambios de bases. El agua se clasifica de acuerdo con su tipo, grupo y clase, como se presenta en la siguientes tablas.

Tabla XX. Clasificación Souliné I

Tipo	Denominación	r(Na-Cl)/rSO₄	r(Na-Cl)/rMg
1	Sulfatado sódico	> 1	negativo
2	Bicarbonatado sódico	< 1	negativo
3	Clorurado magnésico	negativo	> 1
4	Clorurado cálcico	negativo	< 1

Tabla XXI. Clasificación Souliné II

Grupo	Características	Clase	Características (Palmer)	
A	r CO ₃ H ⁻	dominante	a	A2, dominante
B	r SO ₄ ⁻	dominante	b	S2, dominante
C	r Cl ⁻	dominante	c	S1, dominante
			d	S3, dominante
			e	A1, dominante
		103	f	A3, dominante

3.2.5.2.5 Clasificación de Scholler

Esta clasificación propuesta en 1955 tiene en cuenta los valores absolutos de las concentraciones de cada ion, pero conduce a una denominación complicada. Se distingue: a) tipo en el que participan los aniones fundamentales en el orden Cl⁻, SO₄⁼ CO₃H⁻, aportando cada uno un signo, b) grupo dado por la relación entre iones y formado por tres símbolos, c) clase dada por la clasificación expuesta en el apartado a).

Tabla XXII. Clasificación de Scholler I

Grupo de cloruros	Denominación	Valor r Cl	Observaciones
1	Hiperclorurado	> 700	hasta saturación
2	Clorotalasico	700 a 420	agua del mar 560
3	Clorurado fuerte	420 a 140	
4	Clorurado medio	140 a 40	
5	Oligoclorurado	40 a 15	
6	Clorurado normal	< 10	

Tabla XXIII. Clasificación de Scholler II

Grupo de sulfatos	Denominación	Valor r SO ₄	Observaciones
1	Hipersulfatado	> 58	agua del mar 58
2	Sulfatado	58 a 24	
3	Oligosulfatado	24 a 6	
4	Sulfatado normal	< 6	

Tabla XXIV. Clasificación de Scholler III

Grupo de bicarbonatos	Denominación	Valor r CO ₃ H
1	Hiperbicarbonatado	> 7
2	Bicarbonatado normal	7 a 2
3	Hipobicarbonatado	< 2

3.3 Marco legal e instituciones relacionadas

3.3.1 Marco legal

Entre los aspectos legales establecidos para el régimen y control de aguas subterráneas, se encuentran:

3.3.1.1 Constitución Política de la República

Sobre las aguas subterráneas, se puede citar los siguientes artículos:

Artículo 121. Bienes del Estado. Son bienes del Estado: a) los de dominio público; b) las aguas de la zona marítima que ciñe las costas de su territorio, los lagos, ríos navegables y sus riberas, los ríos, vertientes y arroyos que sirvan de límite internacional de la República, las caídas y nacimientos de agua de aprovechamiento hidroeléctrico, las aguas subterráneas y otras que sean susceptibles de regulación por la ley y las aguas no aprovechadas por particulares en la extensión y término que fije la ley;

Artículo 127. Régimen de aguas. Todas las aguas son de bienes de dominio público, inalienables e imprescriptibles. Su aprovechamiento, uso y goce, se otorgan en la forma establecida por la ley, de acuerdo con el interés social. Una ley específica regulará esta materia.

Artículo 128. Aprovechamiento de aguas, lagos y ríos. El aprovechamiento de las aguas de los lagos y de los ríos, para fines agrícolas, agropecuarios, turísticos o de cualquier otra naturaleza, que contribuya al desarrollo de la economía nacional, está al servicio de la comunidad y no de persona particular alguna, pero los usuarios están obligados a reforestar las riberas y los cauces correspondientes, así como a facilitar las vías de acceso.

3.3.1.2 Código Civil

En su capítulo V, sobre la propiedad de las aguas, comprende entre otros aspectos los siguientes:

Artículo 579. Aguas de dominio privado. Son de dominio privado: a) las aguas pluviales que caigan en predios de propiedad privada, mientras no traspasen sus linderos; b) las aguas continuas y discontinuas que nazcan en dichos predios, mientras discurran por ellos; c) las lagunas y sus álveos formados por la naturaleza, en los expresados terrenos; y d) las aguas subterráneas obtenidas por medios artificiales en propiedades particulares."

Artículo 581. Aguas subterráneas. Todo propietario puede abrir pozos dentro de sus fincas, para obtener y elevar aguas subterráneas, y efectuar cualquier otra obra con el objeto de buscar el alumbramiento de dichas aguas, pero sin que tales trabajos puedan mermar o distraer aguas públicas o privadas de su corriente superficial natural, que se destinan a un servicio público o a un aprovechamiento particular preexistente, con título legítimo, en cuyo caso, la autoridad, a solicitud de los interesados, podrá ordenar la suspensión de la obra.

Artículo 582. Distancias a que pueden abrirse los pozos. Las obras artificiales a que se refiere el artículo anterior no podrán ejecutarse a menor distancia de cuarenta metros de edificios ajenos, de un ferrocarril o carretera, ni a menos de cien metros de otro alumbramiento o fuente, río, canal, acequia o abrevadero público, sin la licencia correspondiente de los dueños o, en su caso, del municipio.

Artículo 583. Los pozos no deberán perforarse a menor distancia de dos metros entre uno y otro dentro de las poblaciones, y de quince metros por lo menos, en el campo.

Artículo 588. Todo lo relativo al uso, aprovechamiento y disfrute de las aguas públicas y particulares, se regirá por las disposiciones de las leyes agrarias o de la ley especial del régimen de aguas y regadíos.

De los artículos anteriormente citados, es importante resaltar que de acuerdo con el artículo 127 de la Constitución Política de la República, el régimen de aguas estará regulado por una ley específica. De dicha ley se cuenta hasta el momento con el proyecto de Ley de Aguas, que actualmente está en proceso de análisis en el Congreso de la República. Sin embargo, y no menos importante es que el manejo de las aguas subterráneas tendría que apegarse a las disposiciones de las leyes agrarias o la ley especial del régimen de aguas y regadíos, según el artículo 588 del Código Civil.

A diferencia de la Constitución Política de la República, el Código Civil trata el tema de la propiedad de las aguas, estableciendo cuáles son las aguas de dominio privado.

3.3.2 Entidades relacionadas

Según la Ley del Organismo Ejecutivo.

Artículo 30. Ministerio de Comunicaciones, Transporte, Obras Públicas y Vivienda. Al Ministerio de Comunicaciones, Transporte, Obras Públicas y Vivienda le corresponde formular las políticas y hacer cumplir el régimen jurídico aplicable al establecimiento, mantenimiento y desarrollo de sistemas de comunicaciones y transporte del país; al uso y aprovechamiento de las frecuencias radioeléctricas y del espacio aéreo; a la obra pública; a los servicios de información de meteorología, vulcanología, sismología e hidrología; y a la política de vivienda y asentamientos humanos;...

Es decir, que entre sus atribuciones, le corresponde formular las políticas y hacer cumplir el régimen jurídico aplicable, entre otras áreas, a los servicios de información de meteorología, vulcanología, sismología e hidrología. Específicamente, el inciso g), indica que tiene a su cargo: "velar por que se presten en forma descentralizada los servicios de información de meteorología, vulcanología, sismología e hidrología".

Esto lo realiza a través del INSIVUMEH, institución creada, a través del acuerdo gubernativo sin número del 26 de marzo de 1976 y publicado el 29 de marzo del mismo año.

A nivel metropolitano, es la Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA) la entidad a cargo del manejo y distribución del agua desde su creación, a través del acuerdo gubernativo de fecha 25 de mayo de 1,971.

Dentro de la estructura orgánica de EMPAGUA, la gerencia decide las acciones y funciones de la empresa, impulsa, dirige y coordina las actividades técnicas y operacionales del suministro de agua potable y alcantarillado. Para el mejor desempeño de sus funciones, cuenta con las siguientes asesorías: asesoría de gerencia, auditoría interna, asesoría legal, la cual es de especial interés para este trabajo de investigación y que tiene a su cargo el dictamen y emisión de opiniones en asuntos de su competencia, que se encuentran enmarcados en derecho y a su vez defiende los intereses de la empresa en materia jurídica.

4. MUESTREO

La toma de muestras se realizó a través de la unidad ejecutora de proyectos. Con base en lo establecido en el estudio hidrogeológico del valle de la ciudad de Guatemala, se efectuó el monitoreo de la calidad del agua subterránea de la siguiente manera:

- a) Una campaña de muestreo de agua de los pozos a mediados del período seco: febrero-abril.
- b) Una campaña de muestreo a mediados del período de lluvia: junio-septiembre.
- c) Una campaña de toma de muestras de los pozos a inicio del período seco: noviembre-diciembre.

Con el objeto de crear una base de datos que contenga todos los pozos que pertenecen a Empagua, se han incluido los datos de los análisis efectuados a todos los pozos y plantas de tratamiento que se encuentran en funcionamiento, aun aquellos que no pertenecen al Proyecto de Emergencia I.

En cada campaña de muestreo, se obtienen los parámetros físicos del agua en el campo, utilizando valijas portátiles para la medición de temperatura del agua, temperatura del ambiente, pH, y conductividad eléctrica. Asimismo, se efectúan mediciones de alcalinidad de campo y si es posible de cloruros in situ.

Para efectos del presente estudio, el muestreo ha sido analizado para la época de verano como para la de invierno. Los pozos monitoreados se han distribuido, como se observa en la tabla XXV.

Tabla XXV. Sectorización de los pozos del área de estudio

Nombre	Área comprendida por
Sector 1	Hacienda Real, zona 16 y Canalitos 2
Sector 2	El Rodeo y Lavarreda zona 18
Sector 3	Vista Hermosa, San Gaspar, zonas 15 y 16
Sector 4	Sector Norte y zona 6

4.1 Descripción general de los sectores

4.1.1 Sector 1, (Rodeo-Los Ocotes)

Comprendido dentro del área que ocupa la cuenca del río Los Ocotes, en el sector 1 el agua subterránea se encuentra en escurrimiento, almacenada en los acuíferos de relleno volcánico y de sedimentos fluviales y lavas, las cuales tienen buena conexión hidráulica entre sí por sus características geológicas.

La profundidad de los niveles freáticos llegan en promedio a los 110 metros al centro de la cuenca y entre 30 y 48 metros al norte de la misma. En general, los niveles de agua subterránea de la cuenca se encuentran arriba del nivel de los ríos que drenan las aguas subterráneas y superficiales de la cuenca, es decir, que los ríos de la cuenca, en casi todo su trayecto son afluentes, es decir reciben aguas subterráneas.

El acuífero de relleno volcánico está constituido principalmente por potentes depósitos de piroclastos pomáceos del cuaternario, los cuales cubren un área aproximada de 50 km², y su espesor varía desde unos pocos metros, hasta potencias de aproximadamente 200 metros.

Los piroclastos del relleno volcánico tienen permeabilidad primaria, lo que se considera bajo; esto es debido a la heterogeneidad y granulometría variada de los materiales que lo constituyen. El acuífero de sedimento fluviales y lavas esta constituido principalmente por lavas adesíticas, riolitas y sedimento fluviales del terciario. Se le encuentra principalmente a este y sur de la cuenca.

La permeabilidad de las lavas es secundaria y alcanza valores altos, ya que la fracturación de las lavas, particularmente en la zona norte de la cuenca, es alta y tienen buena comunicación entre sí.

4.1.2 Sector 2, (Rodeo-Vados)

El agua subterránea del sector 2 que está dentro de la cuenca del río Los Vados se encuentra en escurrimiento y almacenada en los acuíferos que la constituyen, y fluye preferencialmente hacia una garganta ubicada a la altura de la población de El Chato.

Hidrogeológicamente, la cuenca está constituida por tres acuíferos, los cuales por sus características geológicas presentan gran complejidad en cuanto a la conexión hidráulica entre sí.

El acuífero del relleno volcánico está constituido por sedimentos volcánicos de poca potencia, constituidos por piroclastos pomaceos, los cuales cubren un área muy pequeña de la cuenca (aproximadamente 10 km²).

Los espesores del relleno volcánico varían desde unos metros, hasta potencias de aproximadamente 200 metros.

La permeabilidad en los piroclastos del acuífero del relleno volcánico es primaria, bastante baja debido a la heterogeneidad y granulometría variadas que constituyen el acuífero.

El acuífero de sedimentos fluviales y lavas está constituido principalmente por lavas andesíticas y sedimento fluviales de origen volcánico.

La permeabilidad de las lavas es secundaria y alcanza valores bajos; su profundidad varía desde unas decenas de metros, hasta potencias de aproximadamente 300 metros.

Las lavas al norte de la cuenca se encuentran en contacto con las rocas metamórficas del paleozoico y las calizas negras que constituyen los cerros El Chile y de la Mina respectivamente. Las rocas metamórficas del norte constituyen una barrera impermeable para la circulación del agua subterránea; condicionan los flujos hacia el noreste de la cuenca, siguiendo el patrón de escurrimiento superficial de la zona. Los afloramientos de lavas cubren aproximadamente el 25% de la cuenca.

El acuífero de calizas está constituido por calizas del cretáceo, como:

- Calizas gris-oscuro, con abundantes vetas de calcita, con un metamorfismo de bajo grado.
- Calizas de color blanco a gris-claro, fracturadas y/o parcialmente karstificadas.

Las calizas afloran aproximadamente en 3 km² de la cuenca (aproximadamente el 7% de la misma), sin embargo, éstas subyacen a las lavas y relleno volcánico, en consecuencia constituye el acuífero más importante de la cuenca y la que posee mejores características hidrogeológicas para ser explotado. Se estima que las calizas ocupan una franja de 20km de largo y 5km de ancho, queda como resultado un área aproximada de 100 km².

4.1.3 Sectores 3 y 4, (Las Vacas)

El agua subterránea de los sectores 3 y 4 se encuentra en escurrimiento y almacenada en los materiales que constituyen los acuíferos de la cuenca, y fluye preferencialmente hacia una garganta ubicada a la altura de Chinautla (salida de la cuenca hidrográfica).

Hidrogeológicamente la cuenca está constituida por tres acuíferos, los cuales por sus características presentan gran complejidad en lo que respecta a la conexión hidráulica entre sí. Dichos acuíferos se identifican como acuífero de relleno volcánico, de sedimentos fluviales con lavas y calizas.

El acuífero de relleno volcánico está constituido por sedimentos volcánicos de gran potencia, constituidos por piroclastos pomáceos, los cuales cubren un área aproximada de 54 km².

Los espesores del relleno alcanzan potencias de hasta 250 metros.

Los piroclastos del acuífero tienen permeabilidad primaria, la cual es bastante baja debido a la heterogeneidad y granulometría variada de los materiales que constituyen el relleno volcánico.

El acuífero de sedimento fluviales y lavas está constituido, principalmente por sedimento fluviales con intercalaciones de lavas de origen volcánico, las cuales subyacen a los materiales del relleno volcánico.

La permeabilidad de los sedimentos es primaria y alcanza valores altos. La permeabilidad de las lavas es secundaria (por fracturación).

El acuífero de calizas está constituido por calizas del cretácico, y pueden identificarse como:

- Calizas gris-oscuro, con abundantes vetas de calcita, con un metamorfismo de bajo grado.
- Calizas de color blanco a gris - claro, fracturadas y/o parcialmente karstificadas.

Las calizas afloran aproximadamente en 3 km² de la cuenca (aproximadamente el 5% de la misma). A partir de la línea UTN - Y1622, éstas subyacen al relleno volcánico y las pocas lavas que afloran en la cuenca; constituye el acuífero más importante de la cuenca y posee mejores características hidrogeológicas para la explotación.

4.2 Análisis de hidrogeoquímica

4.2.1 Gráficas (Piper-Stiff)

Se realizó el análisis de hidrogeoquímica por medio de las gráficas de Piper y Stiff, para cada uno de los sectores antes mencionados. Los resultados se muestran de la figura 14 a la figura 25.

Figura 14. Gráfica de Piper, sector No. 1; datos verano 2002

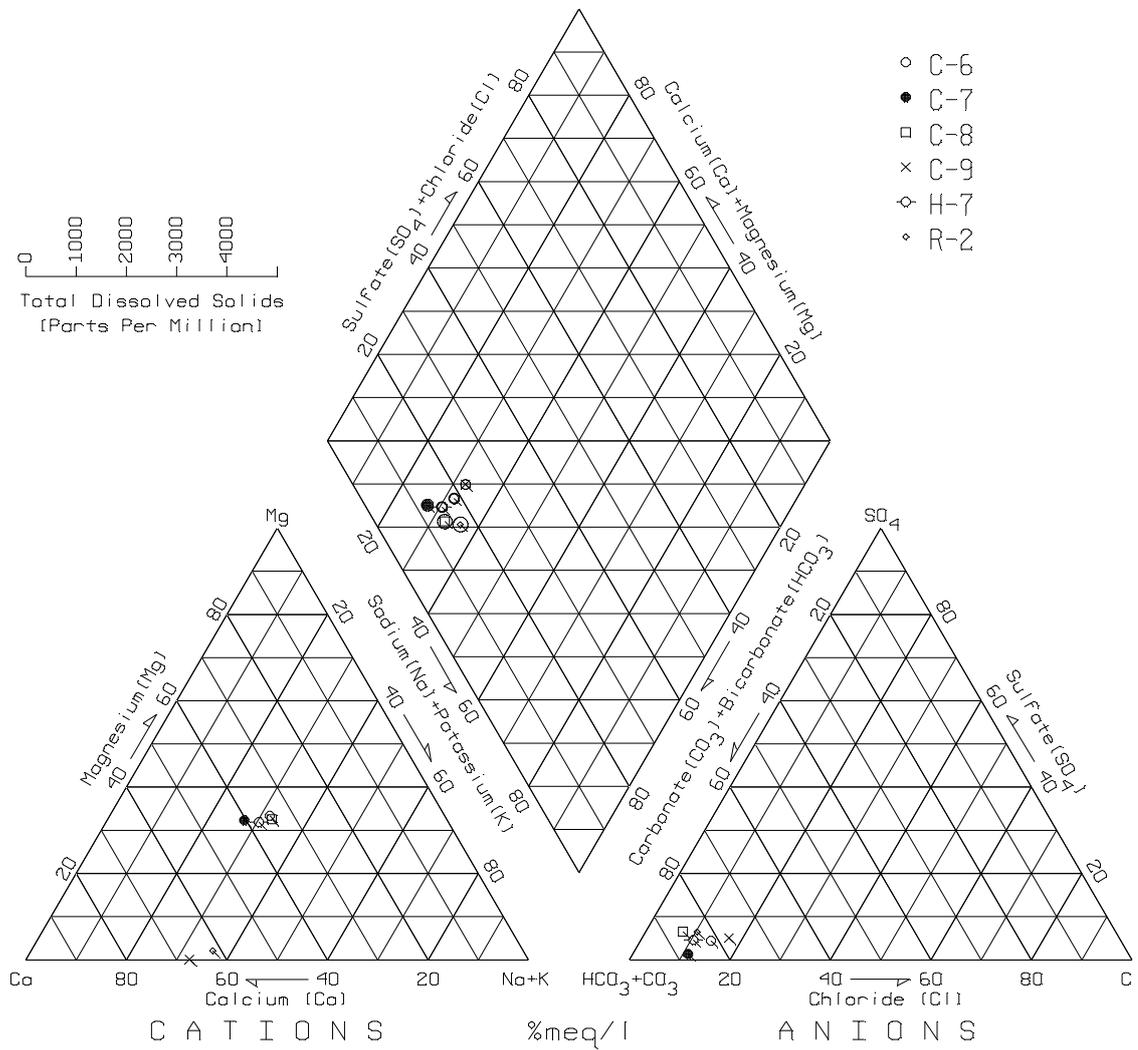


Figura 15. Gráfica de Piper, sector No. 1; datos invierno 2002

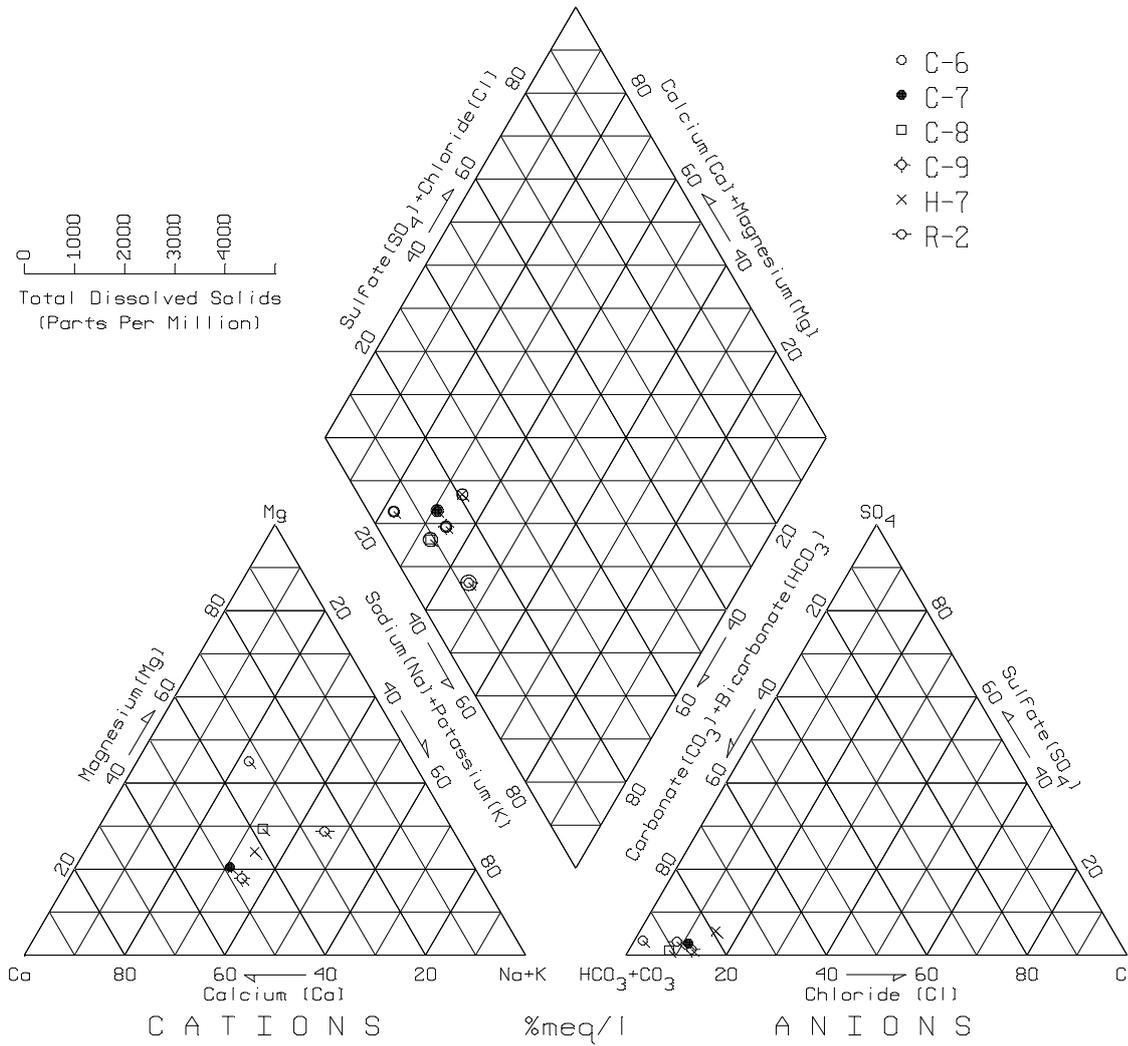


Figura 16. Gráfica de Piper, sector No. 2; datos verano 2002

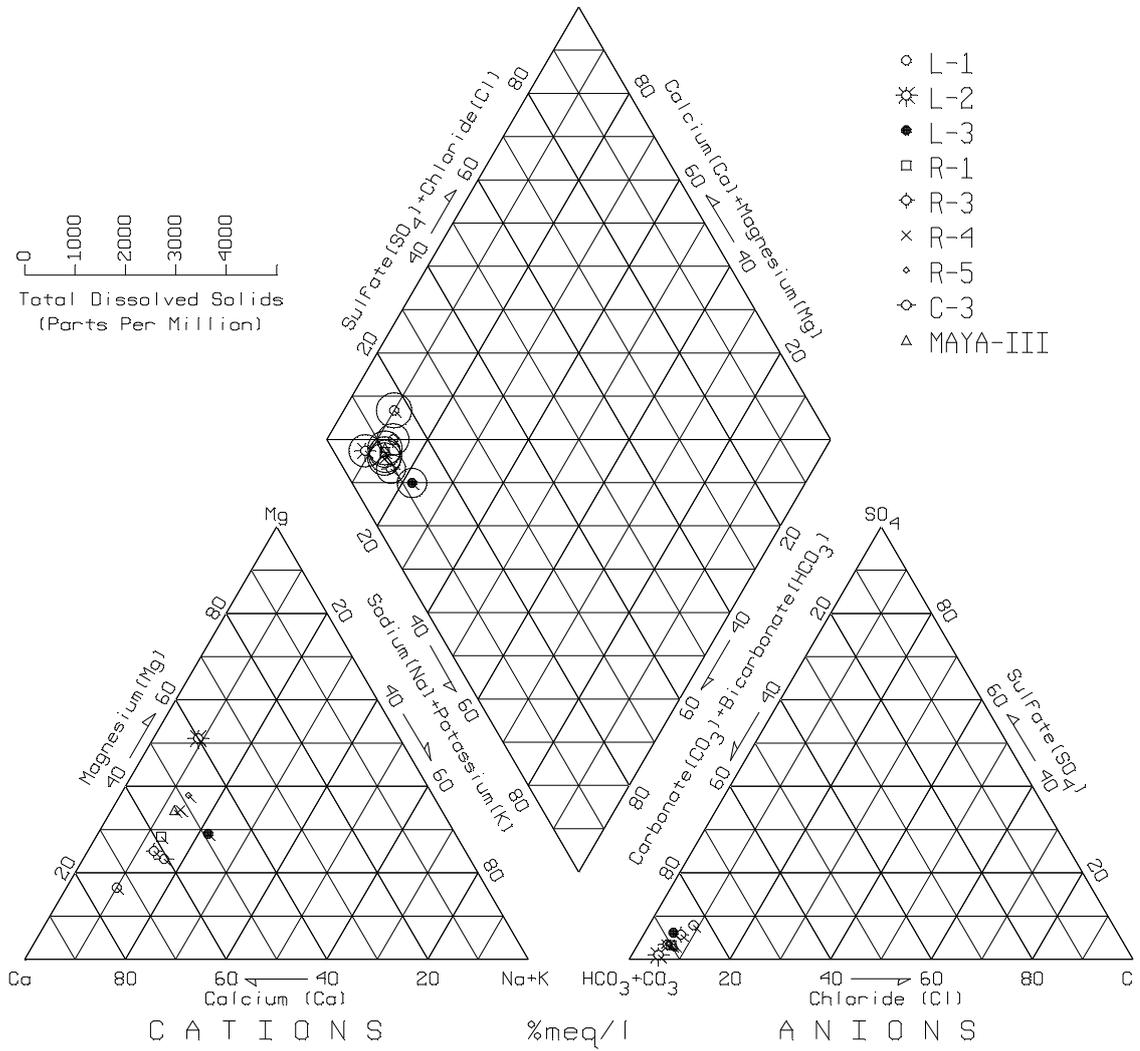


Figura 17. Gráfica de Piper, sector No. 2; datos invierno 2002

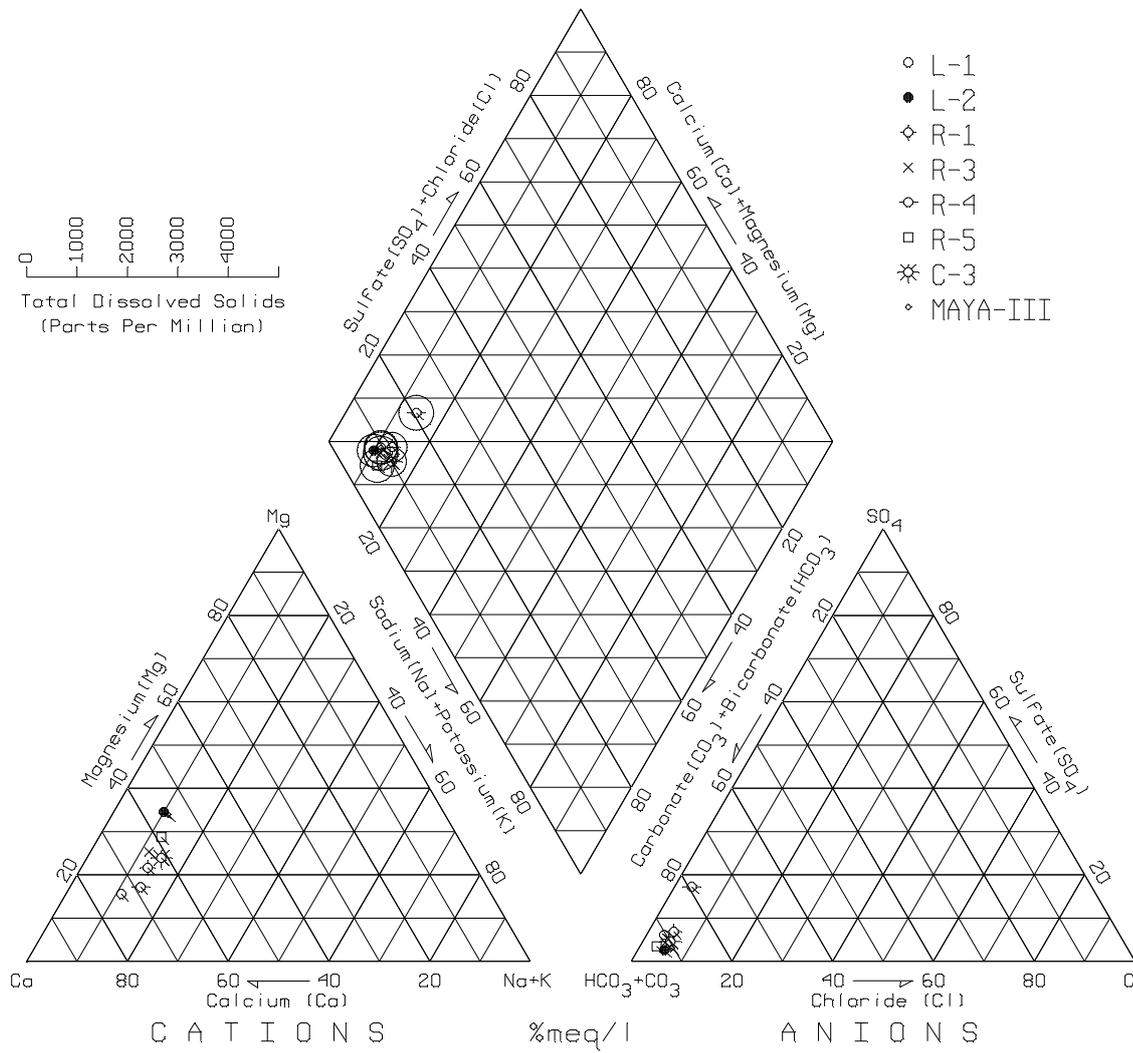


Figura 18. Gráfica de Piper, sector No. 3; datos verano 2002

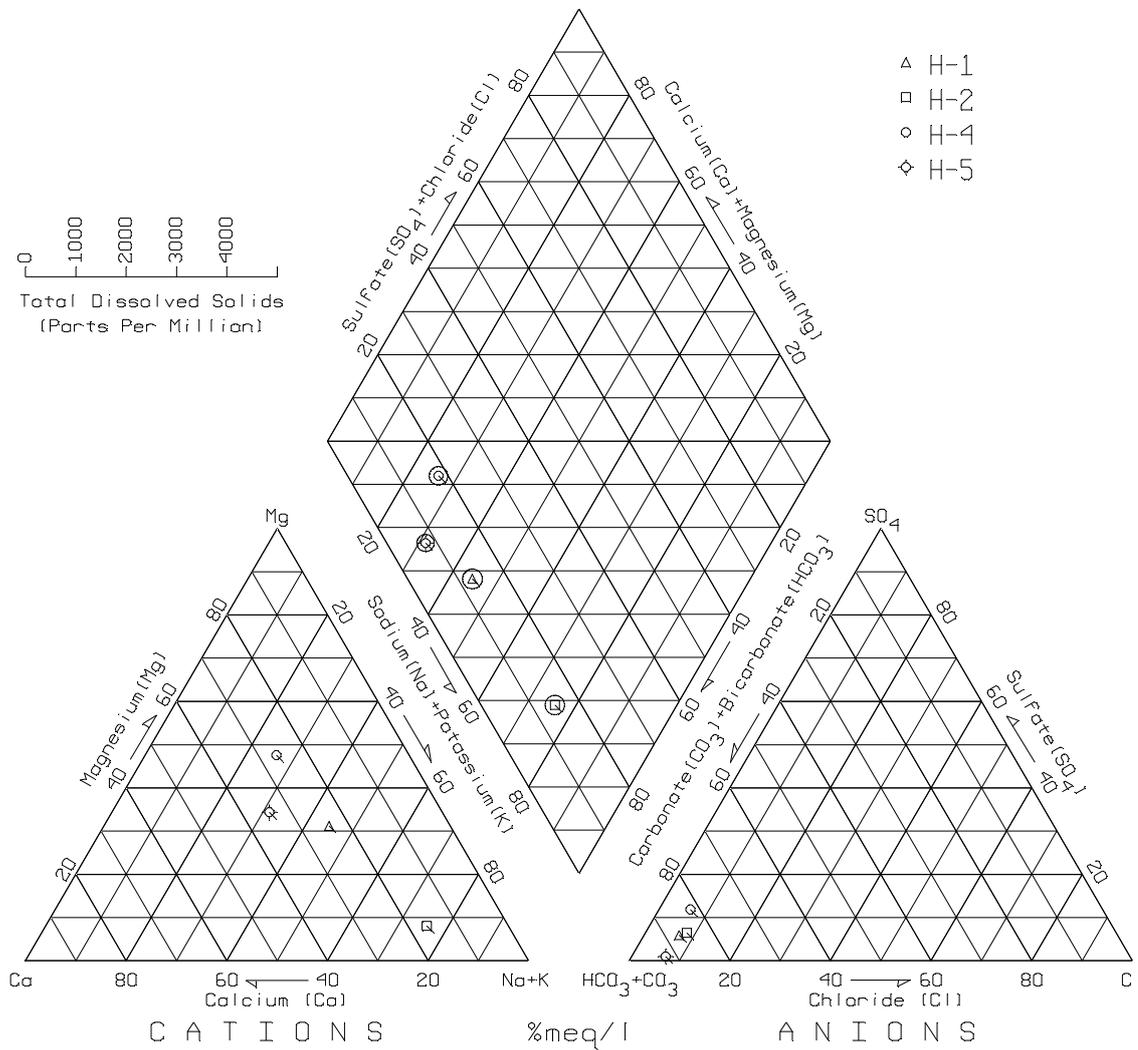


Figura 19. Gráfica de Piper, sector No. 3; datos invierno 2002

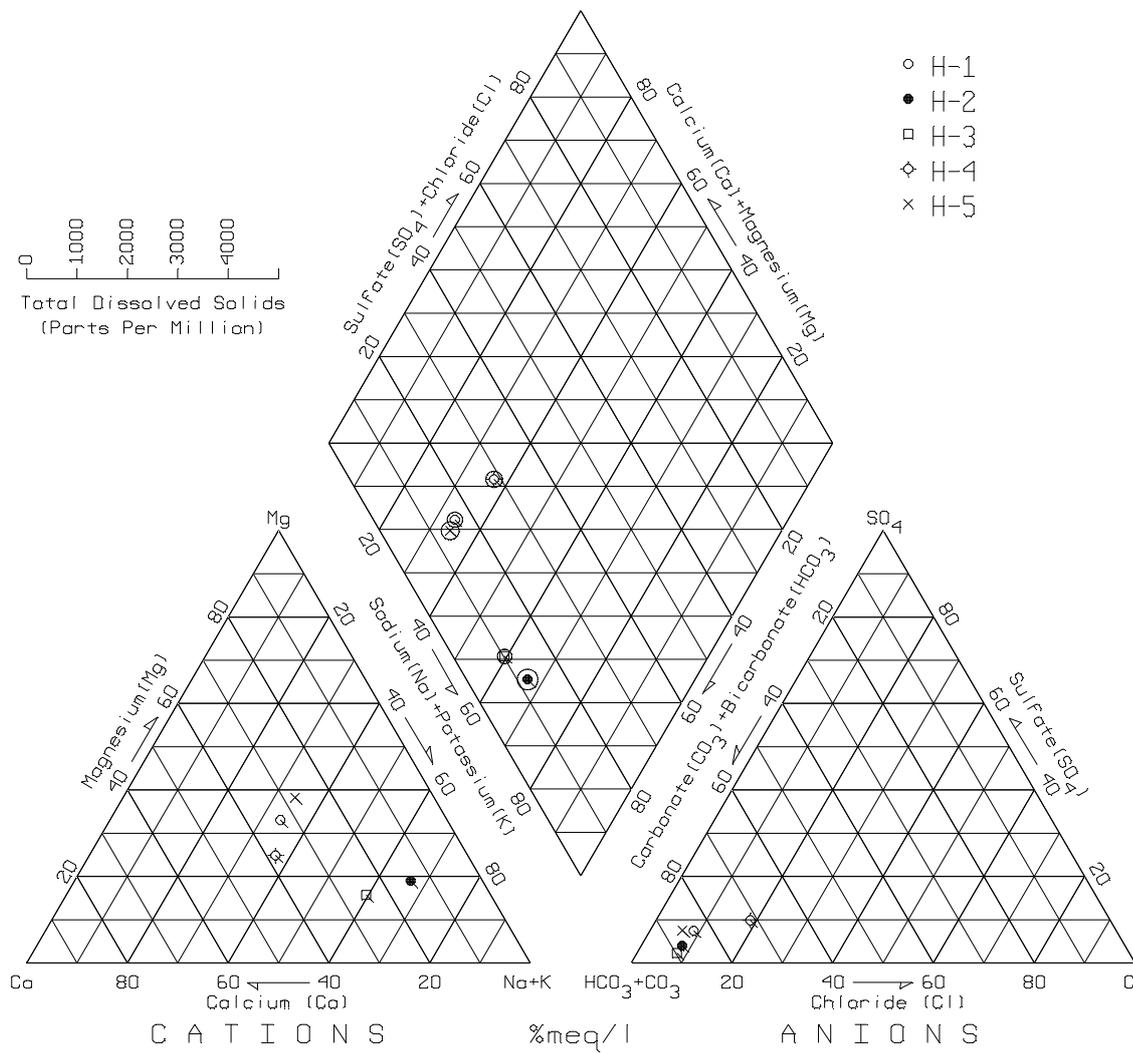


Figura 20. Gráfica de Piper, sector No. 4; datos verano 2002

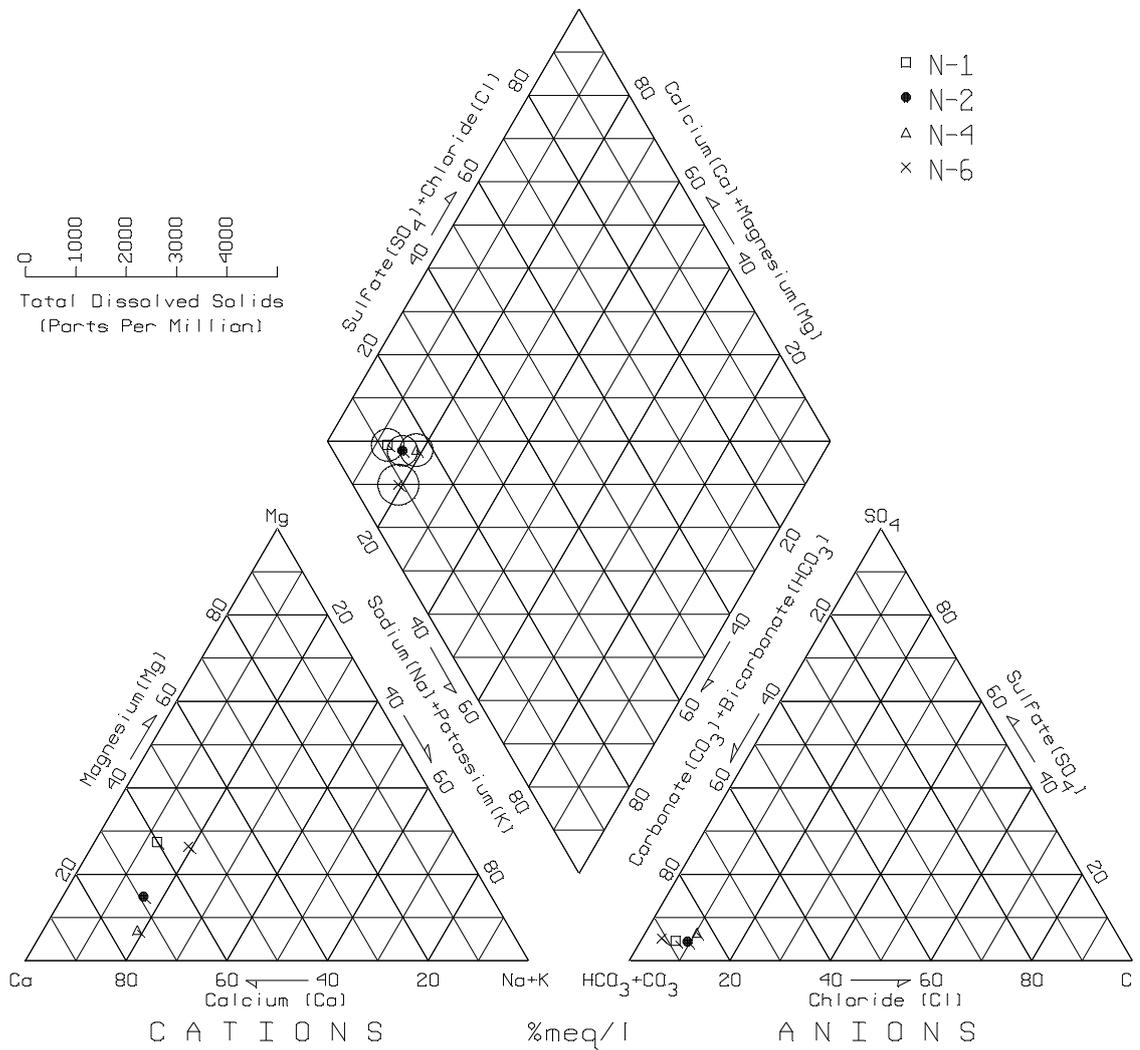


Figura 21. Gráfica de Piper, sector No. 4; datos invierno 2002

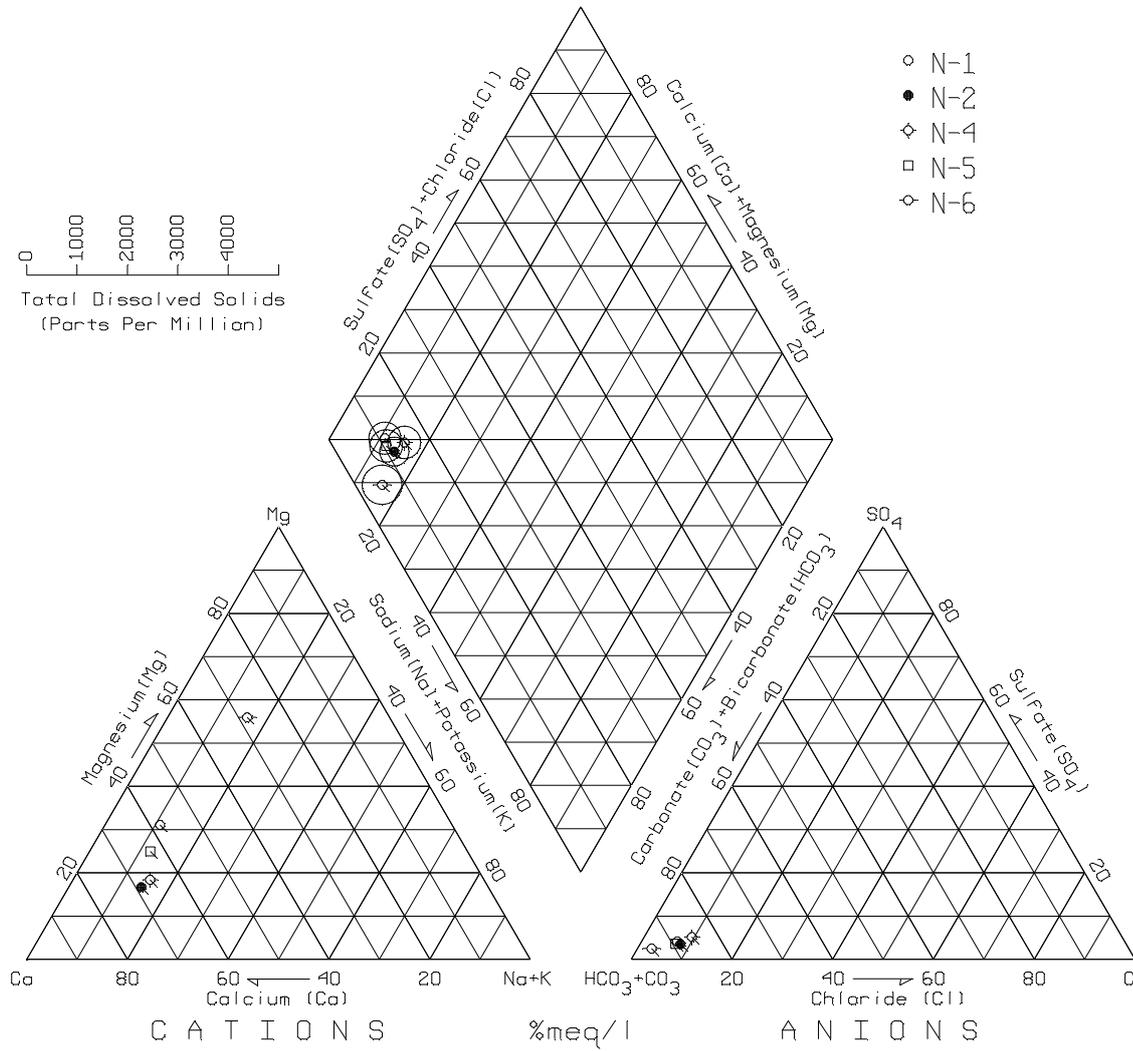


Figura 22. Gráficas de Stiff, sector No. 1; datos verano e invierno 2002

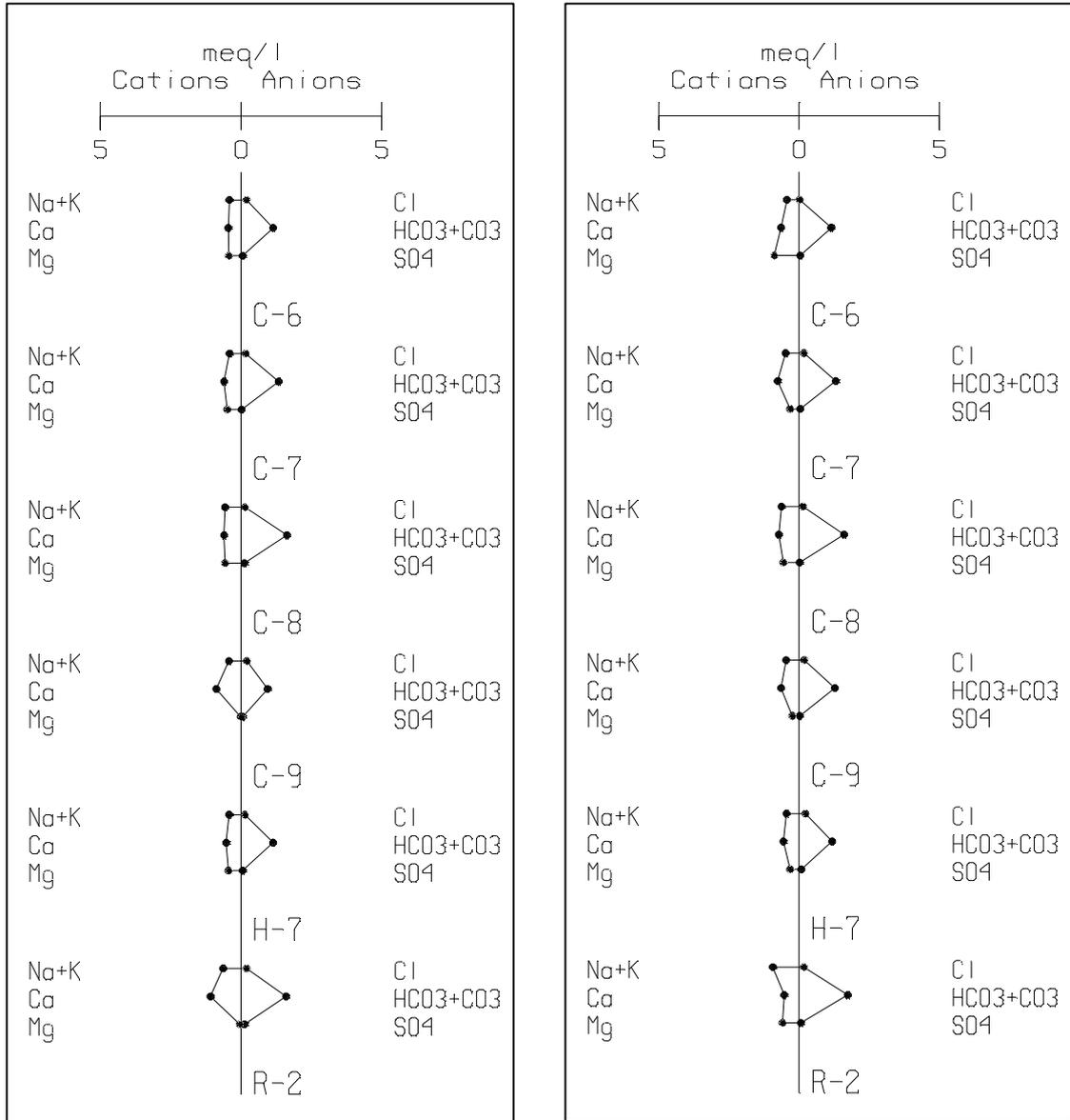


Figura 23. Gráficas de Stiff, sector No. 2; datos verano e invierno 2002

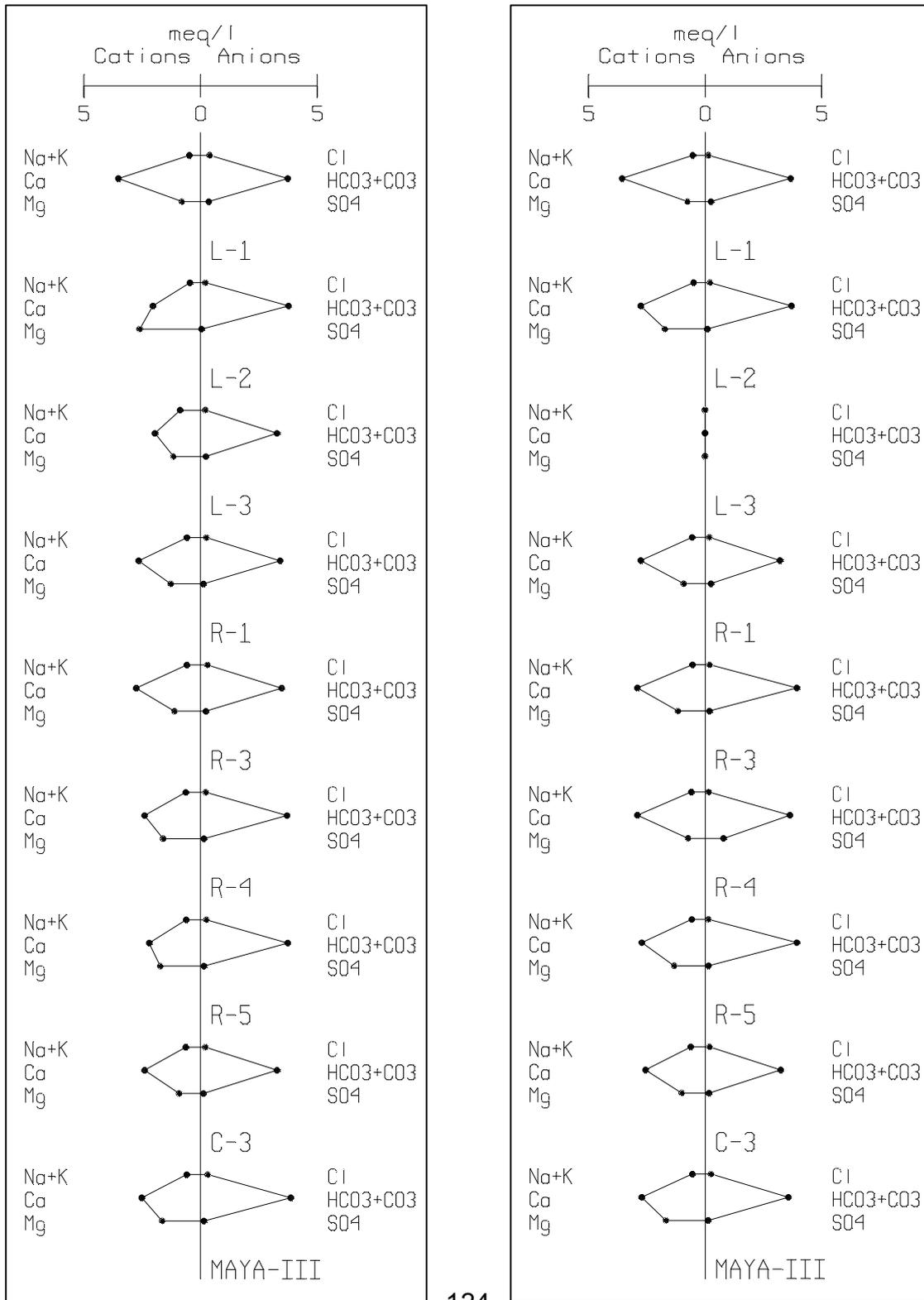


Figura 24. Gráficas de Stiff, sector No. 3; datos verano e invierno 2002

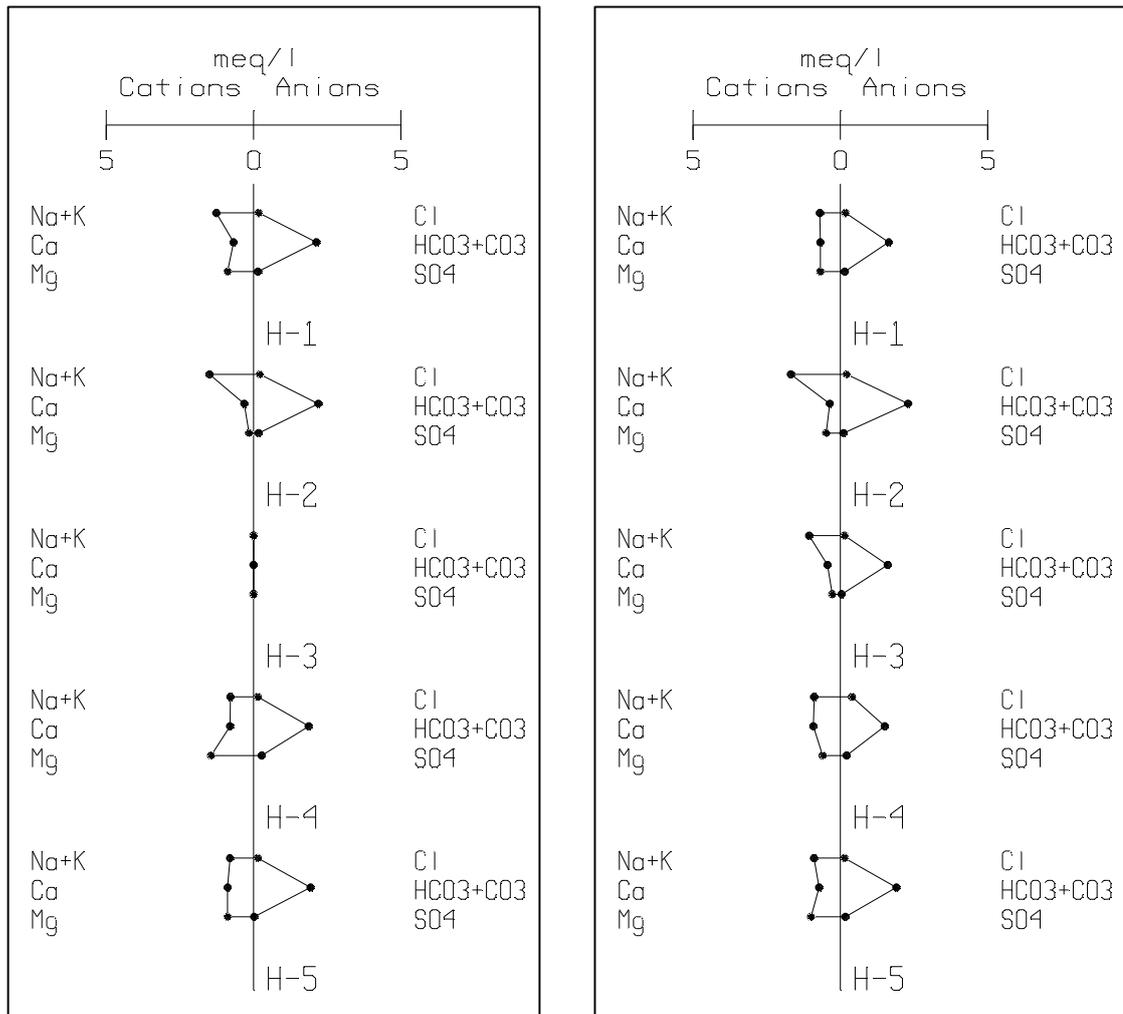
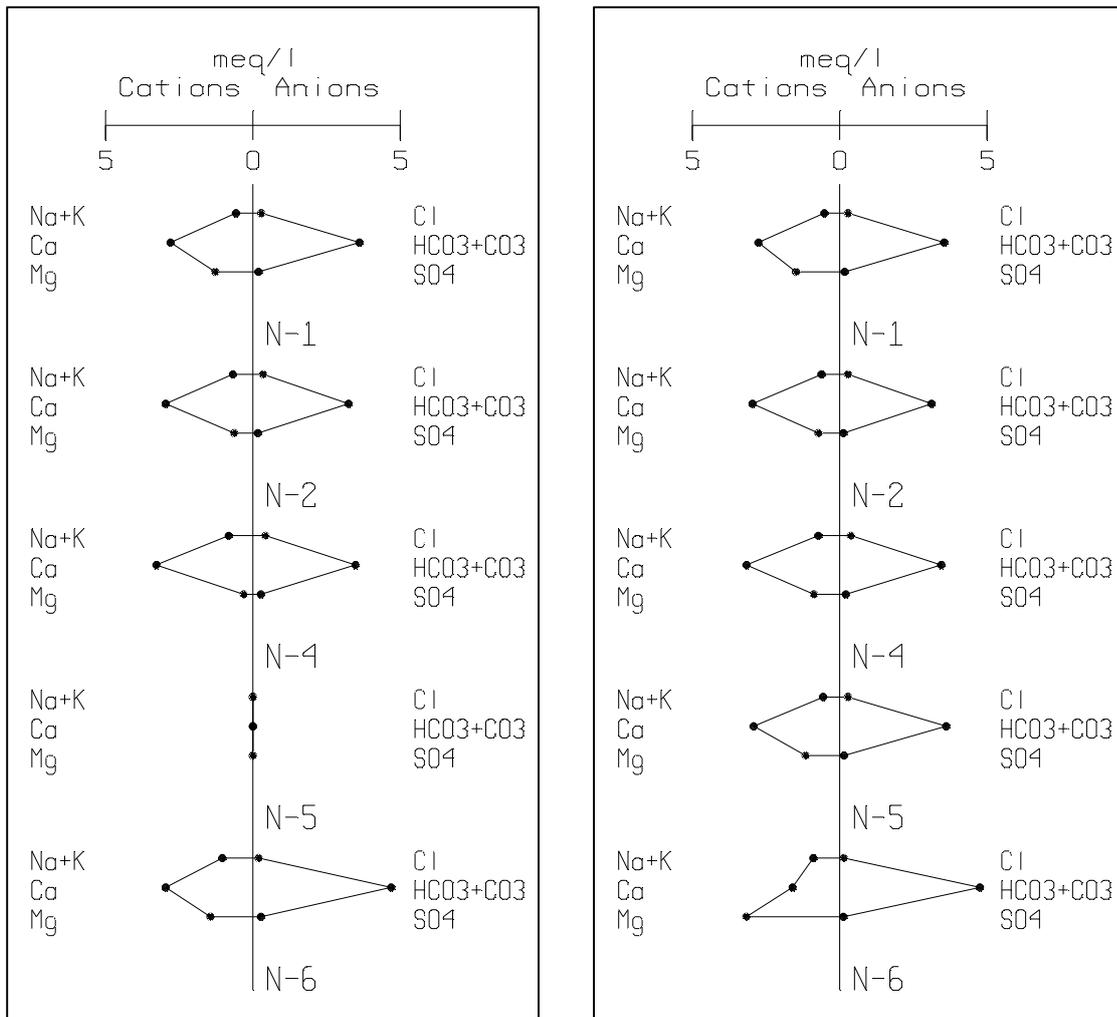


Figura 25. Gráficas de Stiff, sector No. 4; datos verano e invierno 2002



4.2.2 Análisis e interpretación de resultados

4.2.2.1 Gráficas Piper

Comparando el sector 1 respecto del sector 3, en general todas las aguas están agrupadas dentro de las bicarbonatadas cálcicas, tanto para invierno, como para verano. A excepción de la muestra del pozo H-2 que se encuentra dentro del agua bicarbonatada sódica, tanto en invierno como en verano; asimismo, la temperatura del pozo H-2 es bastante elevada, alrededor de 27 grados centígrados, lo que llama la atención por no ser aguas tan profundas.

En general, para el sector 3 las aguas podrían clasificarse como cálcico sódicas y magnésico sódicas. Para el pozo H-2, el agua sería de tipo sódico.

Para el sector Lavarreda-El Rodeo y Norte (sectores 2 y 4 respectivamente), todas las aguas se consideran de tipo cálcico.

El pozo N-6 presenta una variación a aguas tipo magnésico, lo que implica posible error de laboratorio.

4.2.2.2 Gráficas Stiff

1. Puede determinarse que existen dos tipos de aguas en el área de estudio: las que corresponden al área de Canalitos y Vista Hermosa tienen una configuración particular, donde predominan los aniones de carbonatos y bicarbonatos.
2. En Canalitos, el catión dominante es el calcio.

3. En Vista Hermosa, los cationes dominantes son el sodio y el potasio, aunque en el pozo H-2 predomina el catión sodio con condiciones especiales de surgencia y temperatura.
4. Las concentraciones de los cationes y aniones del área de Canalitos no sobrepasan los 2 meq/l. Para Vista Hermosa los aniones y cationes, en su mayoría sobrepasan los 2 meq/l.
5. Para el área del Norte y El Rodeo-Lavarreda, el tipo de agua es similar, predominando en todas el catión Ca^{++} y los aniones carbonatos y bicarbonatos, a excepción del pozo L-2, donde predominan el Mg^{++} , lo cual no se da en los datos de invierno.
6. En el pozo N-6 predomina el catión Mg en la época de invierno, no así en la época de verano. Lo anterior debe tomarse con cierta duda por posibles errores en los resultados de laboratorio.
7. La diferencia de la composición geoquímica del agua de Canalitos y Vista Hermosa, respecto de las aguas del Norte y Lavarreda-El Rodeo, se debe al medio donde circulan y se almacenan las aguas subterráneas. En las primeras dos áreas, predominan las rocas volcánicas y en las otras dos predominan las calizas karstificadas.

4.3 DRASTIC

Con el fin de determinar la vulnerabilidad del acuífero del área de estudio, se aplicó la metodología DRASTIC, la cual puede ser apreciada en la siguiente tabla.

Tabla XXVI. Aplicación del método DRASTIC

		Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	
		Escala	Escala	Escala	Escala	
D	Profundidad del agua Peso = 5 Calificación =	> 30 metros 1	> 30 metros 1	> 30 metros 1	> 30 metros 1	D
R	Recarga neta Peso = 4 Calificación =	Rodeo/Ocotés I = 270mm/año 9	Rodeo/Vados I = 200mm/año 8	Las Vacas I = 80mm/año 3	Las Vacas I = 80mm/año 3	R
A	Medio del acuífero Peso = 3 Calificación =	Andesita basalto 8	Caliza karsificada 10	Sedi. piroclástico pómez y cenizas 6	Caliza karsificada 10	A
S	Medio suelo Peso = 2 Calificación =	Arcilloso limoso 7	Área urbana 1	Arcilloso limoso 7	Área urbana 1	S
T	Topografía Peso = 1 Calificación =	2% < P < 6% 9	6% < P < 12% 5	2% < P < 6% 9	0% < P < 2% 10	T
I	Impacto zona vadosa Peso = 5 Calificación =	Piroclástos potentes 6	Caliza karsificada 10	Piroclástos potentes 6	Caliza karsificada 10	I
C	Conductividad hidráulica Peso = 3 Calificación =	T = 289 / e = 220 Ch = 1.31 1	T = 373 / e = 150 Ch = 2.49 1	T = 372 / e = 200 Ch = 1.86 1	T = 159 / e = 150 Ch = 1.06 1	C
	Índice DRASTIC	121 Sector 1	127 Sector 2	91 Sector 3	112 Sector 4	
	Rangos de vulnerabilidad	Moderada	Moderada	Baja	Moderada	

CONCLUSIONES

1. Se determinó que, dentro de las posibles fuentes de contaminación de los acuíferos, se encuentran la infiltración de las fosas de absorción en lugares donde no existen sistemas de alcantarillado, así como el retorno de las aguas servidas por infiltración en ríos
2. En ausencia de una evaluación de la carga contaminante y del valor relativo del agua, la vulnerabilidad hidrogeológica es un instrumento muy útil para priorizar áreas donde la protección del agua subterránea es de vital importancia, así como identificar áreas donde se justifique una atención especial
3. El parámetro de recarga neta analizado en la aplicación del método DRASTIC, demostró ser sumamente significativo en la determinación del grado de vulnerabilidad de los acuíferos estudiados. Esto se debe a que a mayor infiltración, mayores son las posibilidades de que una carga contaminante llegue hasta el nivel freático
4. Los índices de infiltración de los acuíferos analizados para cada sector son determinantes en una mayor o menor dilución de los aniones y cationes, lo cual puede corroborarse comparando las gráficas de Stiff en verano e invierno
5. Los análisis de laboratorio demostraron que la calidad del agua subterránea, extraída de los pozos en estudio, es de buena calidad, por lo que solamente requieren tratamiento por desinfección

6. La ubicación de los pozos favorece las condiciones de calidad mínimas requeridas, ya que en su mayoría se encuentran localizados en áreas verdes, además de que no se encontró cerca de los mismos focos directos de contaminación, que puedan afectar la calidad del agua
7. La falta de recursos no ha permitido contar con pozos de monitoreo para el control de las aguas subterráneas; es por eso, y sin dejar de ser igual de efectivos, es que utilizan los pozos destinados a la producción para la obtención de las muestras
8. Por medio del método de análisis de gráficas Piper, se comprobó que para los sectores 1 y 3 (Rodeo/Ocotes y Rodeo/Los Vados, respectivamente) las aguas se encuentran dentro del grupo bicarbonatadas cálcicas, asimismo la clasificación para el agua subterránea de los sectores 2 y 4 (Lavarreda/El Rodeo y Norte, respectivamente), es del tipo cálcico.
9. Se determinó con base en el método gráfico de Stiff que existen dos tipos de aguas: uno corresponde al área de Canalitos y Vista Hermosa, en donde los aniones predominantes son de carbonatos y bicarbonatos, y el catión dominante es el calcio; otra en el área Norte y El Rodeo/Lavarreda, en que se puede observar que el catión Ca^{++} es predominante, así como los aniones carbonatos y bicarbonatos. La diferencia de las aguas radica en el medio que circula; el primer sector es de rocas volcánicas, y de caliza karstificada para el segundo.

RECOMENDACIONES

1. Para lograr la conservación del recurso agua, se hace necesario que, tanto las personas como las instituciones encargadas de evaluar la hidrología y el medio ambiente, tomen conciencia respecto al uso y control de los recursos hídricos, para evitar la contaminación de los cuerpos de agua con desechos sólidos y líquidos, los cuales también influyen en la alteración del ciclo hidrológico
2. El agua integra al medio ambiente, por lo tanto, deben tomarse acciones para tratar de reducir o eliminar el volumen de desechos industriales y domésticos. Las aguas servidas tienen que evacuarse con un tratamiento de manera responsable, en plantas centralizadas ambientalmente sanas
3. Hay que prestar particular atención al tratamiento y al reciclaje de aguas residuales, con el fin de maximizar el uso del agua en la industria. Tienen que enfrentarse todos los aspectos de la disminución de desechos y control de la contaminación
4. La integración de agua y cuenca debe tenerse en cuenta. El concepto de cuenca hidrográfica, se establece como marco para el estudio integral de todos sus elementos internos, entre ellos el agua, el suelo, y la vegetación; el hombre mismo y su referencia para la planificación y desarrollo socio-económico denotan la importancia del estudio de cuencas y sus recursos, entre ellos el agua. Puede entonces considerarse "la gestión que el hombre realiza a nivel de cuenca, para aprovechar, proteger y conservar los recursos naturales"

5. Las acciones de manejo y conservación del recurso agua son necesarios; el ordenamiento del uso de la cuenca, la protección y control del recurso, y la recuperación de recursos degradados son tareas, que se deben ejecutar para lograr una buena calidad y cantidad de agua, para los múltiples usos en una sociedad como la de Guatemala
6. Con el propósito de establecer los elementos químicos, orgánicos e inorgánicos, que es necesario analizar para el resguardo de la salud de los consumidores del agua subterránea y superficial, es conveniente un estudio detallado de los vertidos de los procesos de las industrias, con el objeto de identificar cualquier fuente de contaminación y su evolución.
7. Hay que promover la aprobación de la Ley General de Aguas, con el objeto de regular la explotación y gestión de las aguas subterráneas.
8. Se debe continuar el monitoreo físico, químico y bacteriológico de la calidad del agua, así como el control de la evolución en los niveles del agua subterránea.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bravatti Castro, Edgar Aurelio. Evaluación de la calidad del agua para consumo humano en la ciudad de San Pedro Carchá departamento de Alta Verapaz. Trabajo de graduación de Ingeniero Civil. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1,982.
2. CEPIS Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente y la Organización Panamericana de la Salud. **Monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas, una evaluación de métodos y costos.** 2ª ed. Perú, 1,994.
3. CEPIS Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente y la Organización Panamericana de la Salud. **Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas.** 2ª ed. Perú, 1,991.
4. CEPIS Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente y la Organización Panamericana de la Salud. **Estrategias para la protección de aguas subterráneas, una guía para su implementación.** 2ª ed. Perú, 1,992.
5. CKC Chuo Kaihatsu Corporation y EMPAGUA. **Estudio hidrogeológico en el valle de la ciudad de Guatemala; Proyecto Emergencia I.** Guatemala, 1,995.
6. Cuevas Callejas, Carlos Bernardo. Determinación de coeficientes de transmisividad, almacenamiento y el caudal óptimo para la adecuada explotación del agua subterránea. Trabajo de graduación de Ingeniero Civil. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2,001.
7. Custodio, Emilio y Manuel Ramón Llamas. **Hidrología subterránea.** España: Ediciones Omega, 1,976.

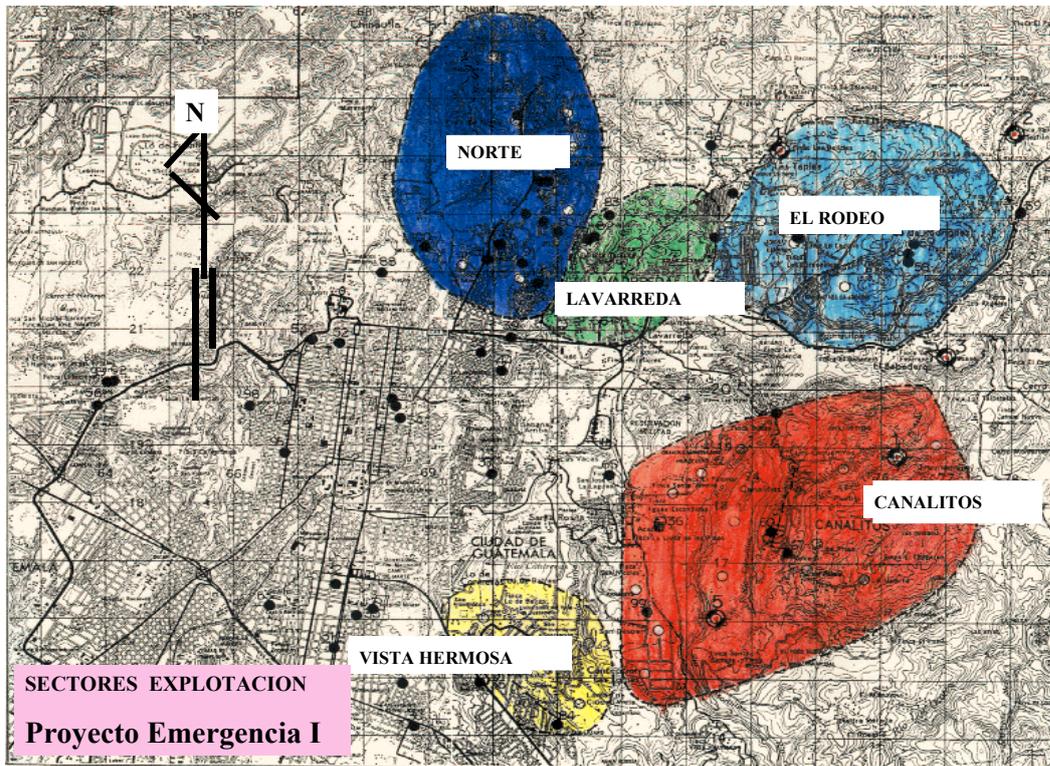
8. INSIVUMEH y otros. **Informe final del estudio de aguas subterráneas en el valle de la ciudad de Guatemala.** Guatemala, 1,978.
9. INSIVUMEH y Pedro A. Tax. **Recursos hídricos superficiales disponibles en la República de Guatemala.** Guatemala, 2,001.
10. INSIVUMEH y PNUD. **Anteproyecto: Ley General de Aguas, República de Guatemala.** Guatemala, 1,988.
11. Lewis, W.J. y B.S. Drasar. **Análisis de contaminación de las aguas subterráneas por sistemas de saneamiento básico.** Gran Bretaña, 1,987.
12. MARENA y otros. **Proyecto uso sostenible de los recursos hídricos, SUWaR-Nicaragua, estrategia de protección para el acuífero de Managua.** Nicaragua, 2,000.
13. Miranda, Félix Rosendo. Estudio de recarga natural y artificial de acuíferos en el municipio de Guatemala con base en datos monitoreados. Trabajo de graduación de Ingeniero Civil. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2,002.

ANEXOS

Tabla XXVII. Ubicación, profundidad y caudal de los pozos en estudio

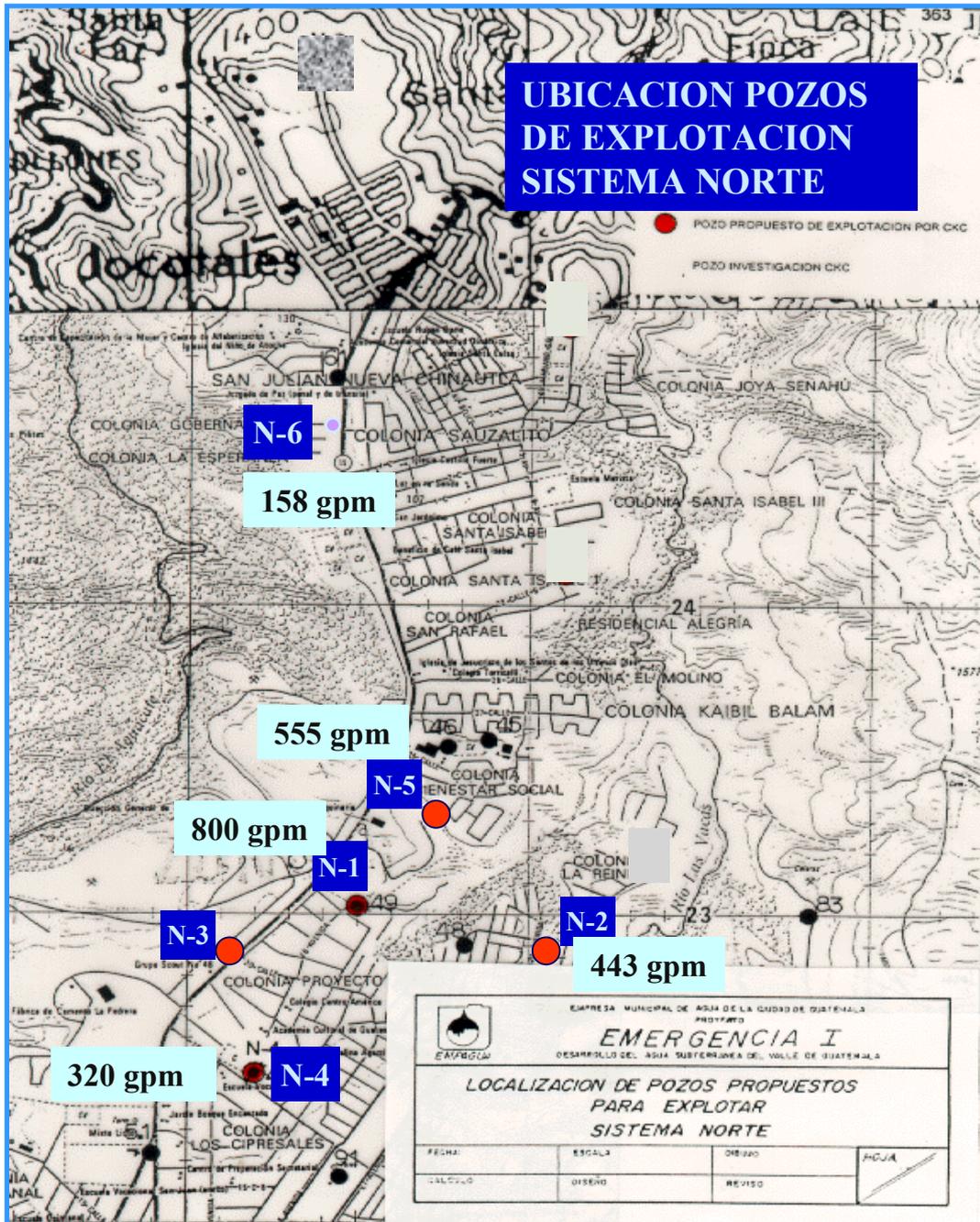
No.	Nombre y ubicacion	Profundidad metros	Producción l/seg
C - 2	Fca La Ventana canalitos z 24.	299.9	20.0
C - 4	Canton Encuentros Canalitos z 24	524.3	41.0
C - 5	Fca La Vega Canalitos z 24	365.8	100.0
C - 6	Boulevard Puerta de Hierro z 17.	350.5	76.0
C - 7	Aereomodelismo H Real z 17.	396.2	76.0
C - 8	Lote 2 mz Q Puerta de Hierro z 17.	365.8	40.0
C - 9	Lote 34 mz Q Puerta de Hierro z 17.	335.3	63.0
C - 10	Rotonda Hacienda Real z 17.	374.9	50.5
H - 7	Lote 40mz 22 Real z 17	396.2	45.0
R - 2	Parqu Universidad R. Landivar	396.2	10.0
L - 1	Preventivo Lavarreda z.18.	426.7	40.0
L - 2	El Limon Lavarreda z 18.	400.2	35.0
L - 3	Colonia Galilea z 18.	399.9	40.0
R - 1	La Milpa El Rodeo z 18.	414.5	40.0
R - 3	El Tanque El Rodeo z 18.	368.8	10.0
R - 4	La Basura El Rodeo z 18.	399.9	38.0
R - 5	La Calera El Rodeo z 18.	353.6	40.0
C - 3	Alameda III zona 18.	563.9	50.0
R-6	Maya II Colonia Maya z 18	457.2	50.0
H - 1	Laguna Kanajuyu z 16.	396.2	25.0
H - 2	Lote 194 Kanajuyu z 16.	373.4	63.1
H - 3	Rotonda Kanajuyu z 16.	360.0	50.0
H - 4	Metro 15 V. H. z 15.	457.2	20.0
H - 5	Confucio V. H. z 15.	396.2	26.0
H - 6	El Cambray zona 14.	388.6	35.0
C - 1	Parque Hasted zona 10.	519.7	50.0
N - 1	Corecha proy 4-4. z 6.	396.2	50.0
N - 2	F/Poligono Cipresales z 6.	365.8	28.0
N - 3	Bodeaga BANVI 4-4 Z. 6.	396.2	60.0
N - 4	Proyecto 4-4 Norte z 6.	379.2	20.0
N - 5	La arenera BANVI, z 6.	396.2	35.0
N - 6	Campos foot Novella z 6.	450.5	10.0
H	Planta Santa Luisa z 16.	457.2	20.0
C	IPM Puerta de Hierro z 16.	411.5	45.0

Figura 26. Sectores explotacion, proyecto emergencia I



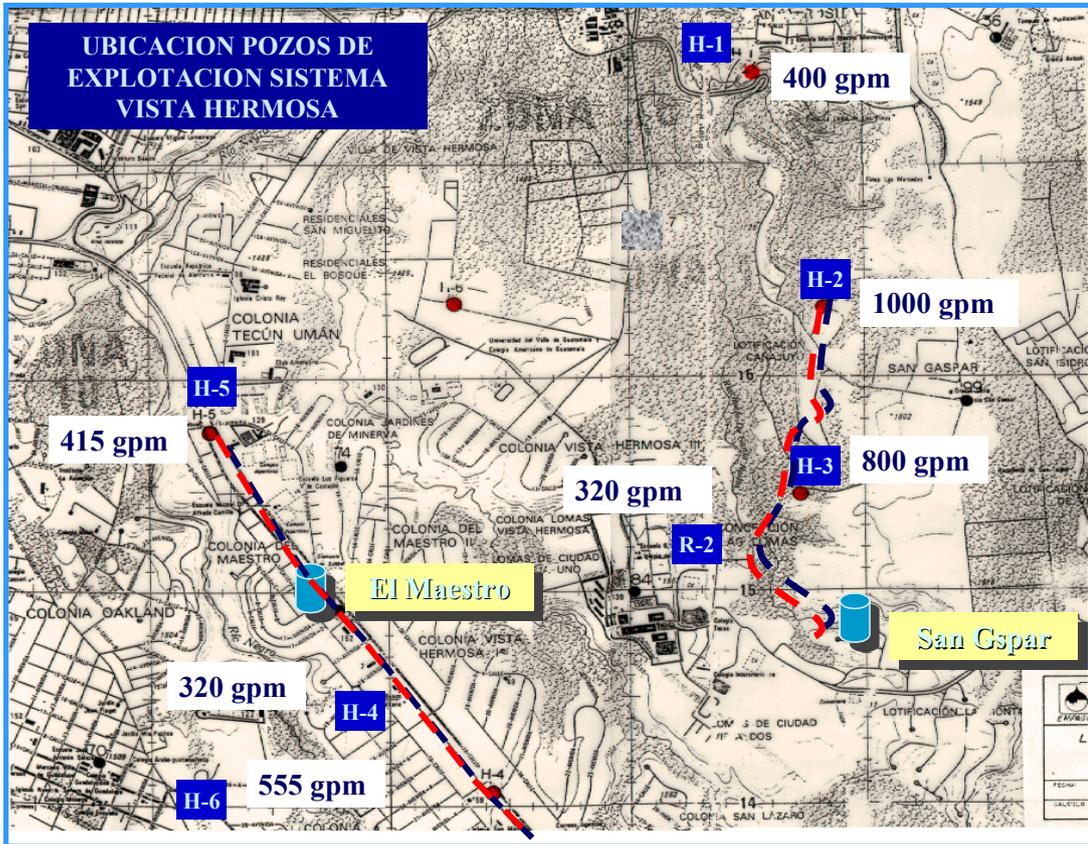
Fuente: EMPAGUA

Figura 27. Ubicación pozos de explotación sistema Norte



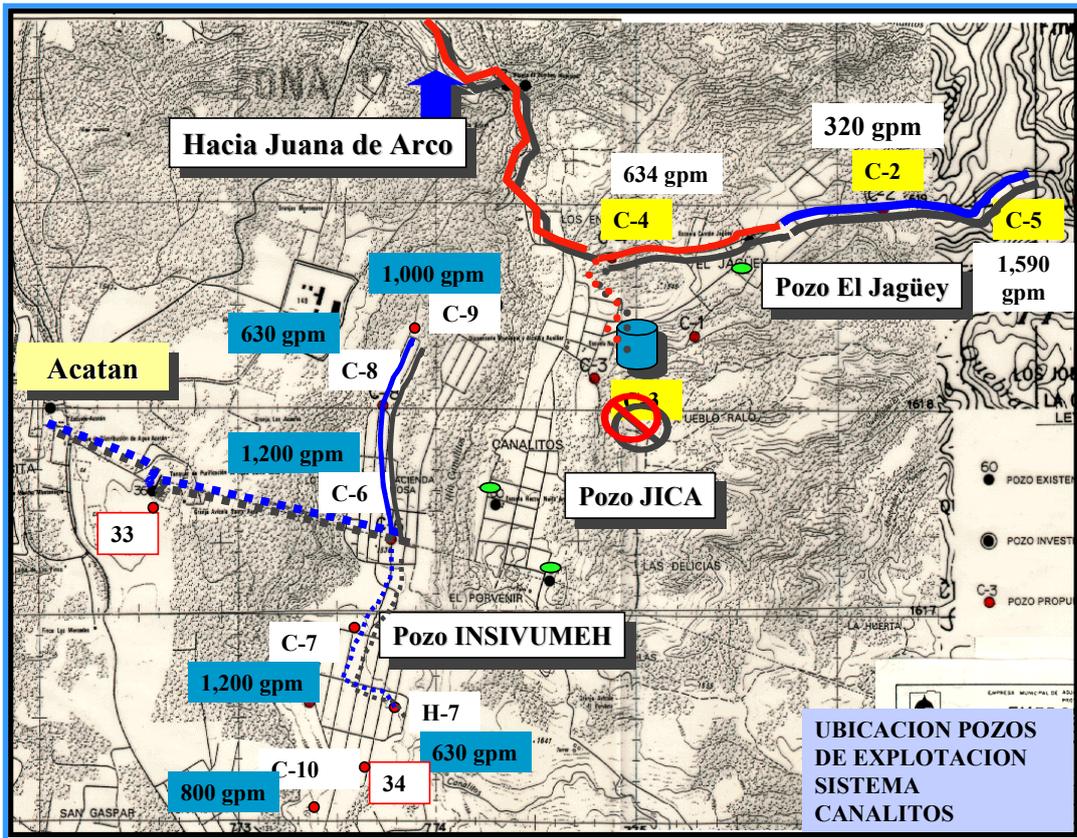
Fuente: EMPAGUA

Figura 28. Ubicación pozos de explotación sistema Vista Hermosa



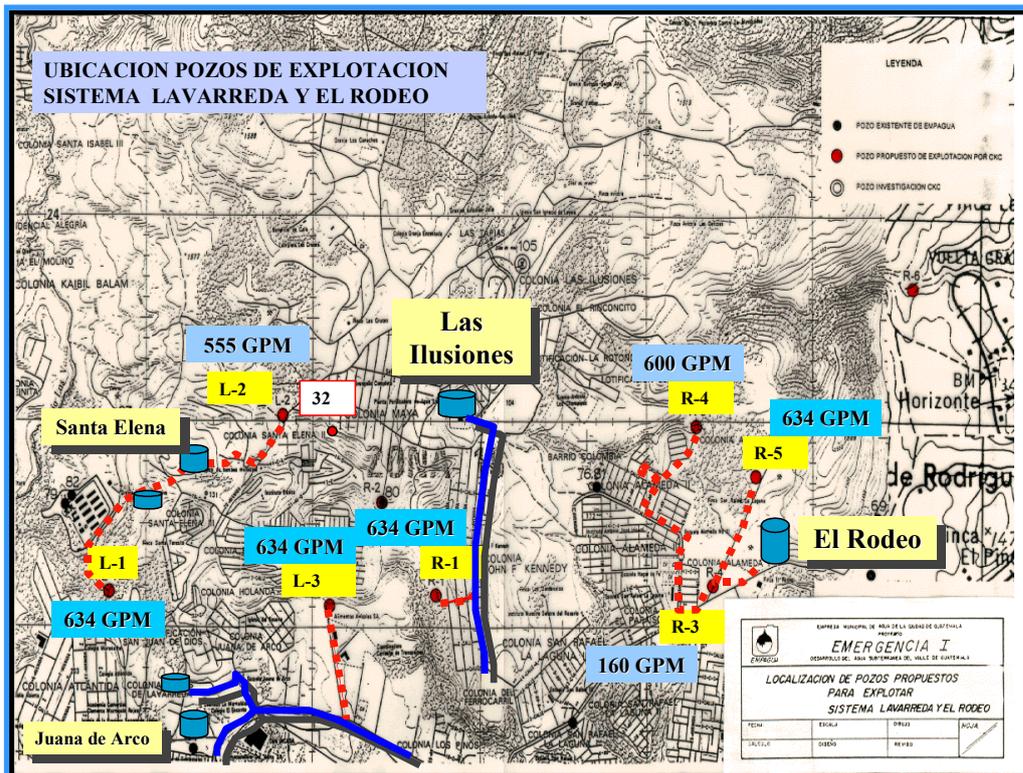
Fuente: EMPAGUA

Figura 29. Ubicación pozos de explotación sistema Canalitos



Fuente: EMPAGUA

Figura 30. Ubicación pozos de explotación sistema Lavarreda y El Rodeo



Fuente: EMPAGUA