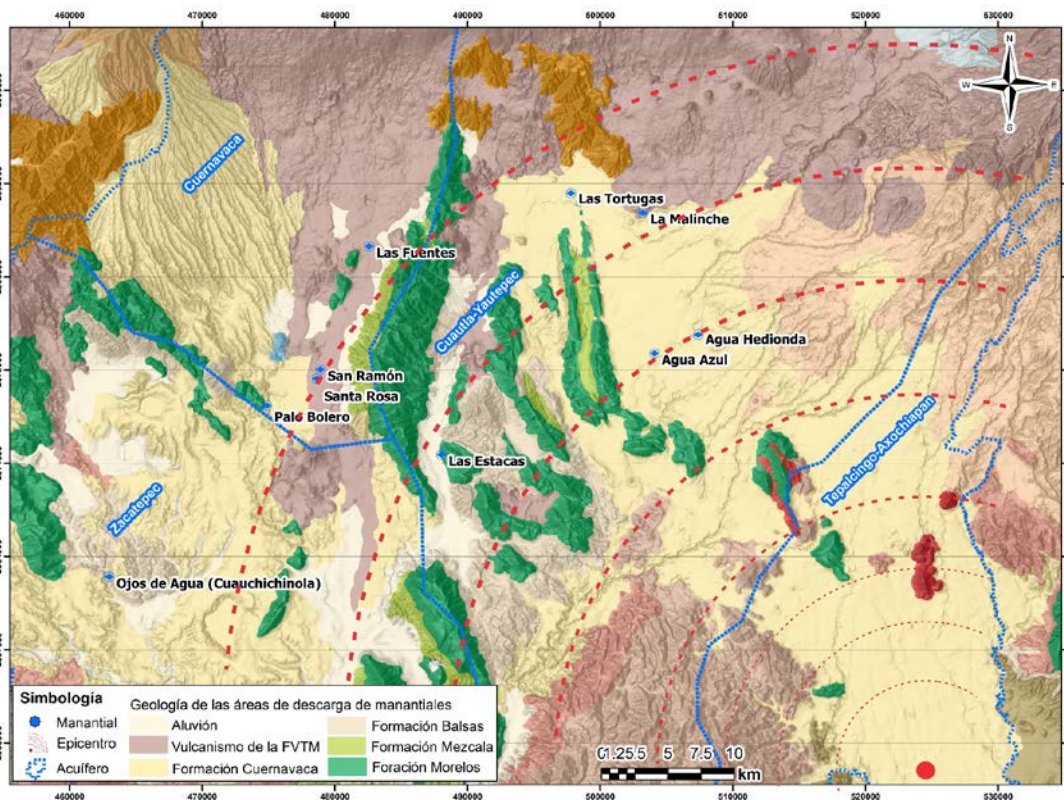


# CARACTERIZACIÓN DE MANANTIALES IMPACTADOS POR EL SISMO EN EL ESTADO DE MORELOS



CONVENIO N° CE.03.01.3.0.2017.- 0158

INFORME FINAL

JULIO 2018

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

## CONTENIDO

	<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>GENERALIDADES .....</b>	<b>18</b>
1.1	Antecedentes.....	18
1.2	Objetivos .....	18
1.3	Área de estudio .....	18
1.4	Compilación, integración, resumen y análisis de estudios previos .....	20
1.5	Metodología.....	76
<b>2</b>	<b>VERIFICACIÓN DE APROCHAMIENTOS EXISTENTES, LEVANTAMIENTO PIEZOMÉTRICO, NIVELACIÓN DE BROCALES Y DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO .....</b>	<b>80</b>
2.1	Verificación de los aprovechamientos existentes.....	80
2.2	Selección de la red de pozos de observación .....	90
2.3	Profundidad al nivel estático .....	95
2.4	Nivelación de brocales.....	104
2.5	Elevación del nivel estático.....	109
2.6	Determinación de la dirección del flujo subterráneo.....	112
<b>3</b>	<b>MUESTREO PUNTUAL CON DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CAMPO.....</b>	<b>121</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS.....</b>	<b>126</b>
4.1	Antecedentes.....	126
4.2	Metodología.....	126
4.2.1	Muestreo.....	126
4.2.2	Procedimiento para la colecta de muestras.....	128
4.2.3	Puntos de muestreo .....	129
4.2.4	Análisis de las muestras.....	130
4.3	Resultados de laboratorio .....	131
4.4	Interpretación de resultados .....	136
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS ISOTÓPICOS .....</b>	<b>144</b>
5.1	Toma de muestras de agua .....	144
5.2	Medición de parámetros de campo.....	147
5.3	Isotopía de manantiales.....	150
5.4	Discusión de resultados.....	156
5.4.1	Isotopía estable y tritio ambiental .....	156
5.4.2	Hidroquímica .....	165
5.4.3	Calidad de los manantiales para riego.....	176
<b>6</b>	<b>AFORO DE LAS DESCARGAS DE MANANTIALES .....</b>	<b>180</b>
6.1	Antecedentes.....	180

6.2	Metodología.....	180
6.3	Resultados .....	180
6.3.1	Manantial “Agua Hedionda” (Alberca principal) .....	180
6.3.2	Manantial “Agua Hedionda” (albercas familiares).....	182
6.3.3	Manantial “La Malinche” .....	184
6.3.4	Manantial “Palo Bolero”.....	186
6.3.5	Manantial “Cuauchichinola” .....	188
6.3.6	Manantial “Las Fuentes” .....	189
6.3.7	Manantial “Santa Rosa” .....	193
6.3.8	Manantial “Las Estacas”.....	195
6.3.9	Manantial “Agua Azul”.....	198
6.3.10	Manantial “Las Tortugas” .....	202
<b>7</b>	<b>INTEGRACIÓN, PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....</b>	<b>209</b>
7.1	Introducción.....	209
7.2	Marco Geológico.....	209
7.3	Estratigrafía .....	209
7.4	Unidades hidroestratigraficas. ....	218
7.5	Condiciones climatológicas e hidrografía en la cuenca de Cuautla-Yautepec.....	221
7.6	Características hidrogeológicas de los manantiales en estudio en el Acuífero Cuautla-Yautepec.....	221
7.6.1	Manantial Las Tortugas.....	223
7.6.2	Manantial La Malinche. ....	225
7.6.3	Manantiales Agua Hedionda y Agua Azul. ....	228
7.6.4	Manantial Las Estacas. ....	234
7.7	Condiciones climatológicas e hidrografía en la cuenca de Cuernavaca.....	238
7.8	Características hidrogeológicas de los manantiales en estudio en el Acuífero Cuernavaca. ....	239
7.8.1	Manantial Las Fuentes.....	239
7.8.2	Manantiales Santa Rosa-San Ramón. ....	242
7.8.3	Manantial Palo Bolero. ....	248
7.9	Condiciones climatológicas e hidrografía en la cuenca de Zacatepec.....	250
7.10	Características hidrogeológicas del manantial en estudio en el Acuífero Zacatepec.....	251
7.10.1	Manantial los Ojos de agua.....	252
7.11	Zonas de protección de los manantiales.....	256
7.11.1	Elaboración de mapas digitales de los perímetros de protección para cada manantial.....	260
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>264</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>280</b>

## **ANEXOS**

- ANEXO 1.    FORMATOS DE REGISTRO Y ÁLBUM FOTOGRÁFICO DE LA VERIFICACIÓN DE APROVECHAMIENTOS
- ANEXO 2.    ÁLBUM FOTOGRÁFICO DE LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CAMPO Y DEL MUESTREO PUNTUAL PARA ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS E ISOTÓPICOS
- ANEXO 3.    RESULTADOS DE CAMPO Y LABORATORIO
- ANEXO 4.    INFORMES DE LABORATORIOS CONTRATADOS
- ANEXO 5.    METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN Y DETERMINACIÓN DE LOS CAUDALES DE DESCARGA



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Localización de la zona de estudio .....	19
Figura 2.1	Aprovechamientos existentes y verificación en el área de influencia del manantial Las Tortugas.....	85
Figura 2.2	Aprovechamientos existentes y verificación en el área de influencia del manantial La Malinche. ....	86
Figura 2.3	Aprovechamientos existentes y verificación en el área de influencia de los manantiales Agua Hedionda y Agua Azul. ....	86
Figura 2.4	Aprovechamientos existentes y verificación en el área de influencia del manantial Las Estacas. ....	87
Figura 2.5	Aprovechamientos existentes y verificación en el área de influencia del manantial Ojos de Agua de Cuauchichcinola. ....	88
Figura 2.6	Aprovechamientos existentes y verificación en el área de influencia del manantial Santa Rosa-San Ramón y Palo Bolero. ....	89
Figura 2.7	Aprovechamientos existentes y verificación en el área de influencia del manantial Las Fuentes.....	89
Figura 2.8	Red de pozos de observación seleccionados y triangulación en la zona del manantial Las Tortugas .....	90
Figura 2.9	Red de pozos de observación seleccionados y triangulación en la zona del manantial La Malinche .....	91
Figura 2.10	Red de pozos de observación seleccionados y triangulación en la zona de los manantiales Agua Hedionda y Agua Azul .....	91
Figura 2.11	Red de pozos de observación seleccionados y triangulación en la zona del manantial Las Estacas.....	92
Figura 2.12	Red de pozos de observación seleccionados y triangulación en la zona del manantial los Ojos de agua en Cuauchichinola.....	93
Figura 2.13	Red de pozos de observación seleccionados y triangulación en la zona de los manantiales Palo Bolero, San Ramón y Santa Rosa. ....	93
Figura 2.14	Red de pozos de observación seleccionados y triangulación en la zona del manantial Las Fuentes.....	94
Figura 2.15	Configuración de la profundidad al nivel estático (Las Tortugas). ....	97
Figura 2.16	Configuración de la profundidad al nivel estático (La Malinche). ....	98
Figura 2.17	Configuración de la profundidad al nivel estático (Agua Hedionda-Agua Azul) .....	98
Figura 2.18	Configuración de la profundidad al nivel estático (Las estacas). ....	99
Figura 2.19	Configuración de la profundidad al nivel estático (manantiales Palo Bolero-San ramón-Santa Rosa).....	102
Figura 2.20	Configuración de la profundidad al nivel estático (los ojos de agua en Cuauchichinola). ....	102
Figura 2.21	Configuración de la profundidad al nivel estático (Las Fuentes).....	103
Figura 2.22	Configuración de le elevación del nivel estático y dirección del flujo del acuífero Cuautla-Yautepec (CONAGUA, 2013) .....	113
Figura 2.23	Configuración de le elevación del nivel estático y dirección del flujo (las Tortugas) ..	114

Figura 2.24	Configuración de la elevación del nivel estático y dirección del flujo (la Malinche)....	114
Figura 2.25	Configuración de la elevación del nivel estático y dirección del flujo (Agua Hedionda-Agua Azul).....	115
Figura 2.26	Configuración de la elevación del nivel estático y dirección del flujo (Las Estacas)...	116
Figura 2.27	Configuración de la elevación del nivel estático y dirección del flujo para el acuífero Cuernavaca (CONAGUA, 2013) .....	117
Figura 2.28	Configuración de la elevación del nivel estático y dirección del flujo (Palo Bolero-San Ramón-Santa Rosa).....	118
Figura 2.29	Configuración de la elevación del nivel estático y dirección del flujo (Las Fuentes) ..	118
Figura 2.30	Configuración de la elevación del nivel estático para el acuífero Zacatepec en msnm (2010).....	119
Figura 2.31	Configuración de la elevación del nivel estático y dirección del flujo (Ojos de agua de Cuauichinola).....	120
Figura 3.1	Localización de manantiales considerados en el estudio, donde se realizaron medición de parámetros de campo (T, CE, pH, Eh, OD, Alcalinidad Total) y toma de muestras para análisis fisicoquímicos e isotópicos, en el estado de Morelos.....	121
Figura 3.2	Medición de parámetros de campo con electrodos multiparamétricos y celda de aislamiento en el manantial Las Fuentes en el Estado de Morelos .....	125
Figura 4.1	Características del equipo multiparamétrico utilizado.....	128
Figura 4.2	Manejo de las muestras para su almacenamiento y transporte.....	129
Figura 4.3	Identificación y control de las muestras.....	129
Figura 4.4	Sitios de muestreo .....	130
Figura 4.5	Temperatura registrada en los manantiales.....	136
Figura 4.6	Relación ion sulfato - dureza de calcio en los manantiales .....	137
Figura 4.7	Sulfuros en manantiales .....	137
Figura 4.8	Fluoruros en manantiales.....	138
Figura 4.9	Coliformes fecales, manantiales que operan como centros recreativos.....	139
Figura 4.10	Gráfico de control de cloruros totales en el manantial Agua Hedionda.....	140
Figura 4.11	Gráfico de control de dureza total en el manantial Agua Hedionda.....	141
Figura 4.12	Gráfico de control de fluoruros en el manantial Agua Hedionda.....	141
Figura 4.13	Gráfico de control para ion sulfato en el manantial Agua Hedionda.....	142
Figura 4.14	Gráfico de control pH en el manantial Agua Hedionda.....	142
Figura 4.15	Gráfico de control de la temperatura en el manantial Agua Hedionda.....	143
Figura 4.16	Graficas de control de los sólidos disueltos totales en el manantial Agua Hedionda.....	143
Figura 5.1	Localización de manantiales considerados en el estudio.....	145
Figura 5.2	Filtrado de muestras de agua con membrana de celulosa de 0.45µ a presión positiva.....	145
Figura 5.3	Toma de muestras para análisis físico-químicos e isotópicos.....	146
Figura 5.4	Medición de parámetros de campo con electrodos y equipos multiparamétricos, celda de aislamiento y bomba subacuática de flujo continuo regulado.....	147
Figura 5.5	Distribución de la composición isotópica estable de las aguas meteóricas a nivel global. Los valores δD y δ18O se ajustan a una recta de pendiente ocho y ordenada al origen 10 denominada Línea Meteórica Global.....	153
Figura 5.6	Evolución isotópica de las aguas superficiales y subterráneas en el ciclo hidrológico.....	154

Figura 5.7	Evolución isotópica del agua subterránea en cuencas sedimentarias: 1. Hidratación de silicatos; 2. Intercambio con H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> e hidrocarburos; 3. Reducción de sulfatos, oxidación de compuestos orgánicos e hidrógeno molecular; 4. Evaporación de agua dulce; 5,6 y7?.....	155
Figura 5.8	Composición isotópica estable de la precipitación pluvial en la zona de estudio.....	156
Figura 5.9	Composición isotópica estable de pozos y manantiales del estado de Morelos. Los manantiales aparecen en color azul y el resto de aprovechamientos considerados en el estudio, corresponden a datos generados en años anteriores al 2018.....	158
Figura 5.10	La recarga efectiva del agua subterránea que alimenta a los manantiales proviene de la lluvia que se precipita en la zona durante los meses de verano.....	159
Figura 5.11	Las aguas más frías corresponden a las δ's de <sup>18</sup> O más negativas es decir composiciones más empobrecidas en isótopos pesados.....	160
Figura 5.12	Interacción del agua con la roca caliza, en donde las mayores concentraciones se presentan en los manantiales las Tortugas, Palo Bolero, Itzamatlán y Agua Hedionda.....	161
Figura 5.13	Interacción del agua con la roca muestra concentraciones elevadas de HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en los manantiales cuyos flujos circulan por rocas carbonatadas.....	162
Figura 5.14	Disolución de roca carbonatada en los flujos que alimentan a los manantiales Agua Hedionda, las Tortugas Itzamatlán, San Ramón, Palo Bolero, Agua Azul, Santa Rosa, y Cuauchichinola.....	163
Figura 5.15	Gradiente de altitud de la composición isotópica de la lluvia utilizado para determinar las zonas de recarga efectiva de los manantiales.....	164
Figura 5.16	Zonas de recarga efectiva de los manantiales de la zona de Morelos determinadas con el gradiente de altitud de la composición isotópica de la lluvia.....	165
Figura 5.17	Diagrama de Piper con la clasificación de las familias o tipos de agua.....	166
Figura 5.18	Clasificación de las aguas de los manantiales. El diagrama de Piper indica la evolución de la calidad de los flujos subterráneos que alimentan a los manantiales, siendo bicarbonatada-cálcica, bicarbonatada-mixta y sulfatada-cálcica.....	167
Figura 5.19	Diagrama de Stiff (que muestra los tipos de mineralización de los flujos que alimentan a los manantiales. Las aguas más mineralizadas corresponden a los manantiales Palo Bolero, Aguas Hedionda y Las Tortugas).....	168
Figura 5.20	Diagramas de Stiff (muestran que las aguas menos mineralizadas corresponden a los manantiales Las Fuentes, La Malinche y Cuauchichinola. En forma contraria los más mineralizadas corresponden a los manantiales Palo Bolero San Ramón y Santa Rosa).....	169
Figura 5.21	Los manantiales Santa Rosa Palo Bolero, San Ramón, Agua hedionda y Cuauchichinola presenta condiciones anaeróbicas. El contenido de oxígeno del manantial Palo Bolero 2018 es erróneo por haber sido medido en agua extraída por bombeo durante el llenado de albercas.....	171
Figura 5.22	Los potenciales redox más bajos corresponden a los manantiales Santa Rosa y Agua Hedionda.....	172
Figura 5.23	Los manantiales Itzamatlán Las Tortugas La Malinche y Agua Hedionda presentan valores de pH ligeramente ácidos por la producción de CO <sub>2</sub> por acción bacteriana de reducción del SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> .....	174

Figura 5.24	Comportamiento de los contenidos de tritio y carbono-14 en las muestras de los manantiales. El límite de medición de tritio ambiental es de 0.6 UT por el método de enriquecimiento electrolítico utilizado.....	176
Figura 5.25	Gráfico de %Na vs. Conductividad eléctrica. Las aguas de los manantiales presentan diferentes calidades aptas para irrigación. Los manantiales Agua Hedionda, Palo Bolero y Las Tortugas califican como mala para la agricultura.....	178
Figura 5.26	Riesgo de alcalinización o sodificación del suelo. El contenido de sodio cuando es elevado genera progresivamente la disminución de la permeabilidad del suelo de cultivo. ....	179
Figura 6.1	Aforo del manantial principal “Agua Hedionda”.....	181
Figura 6.2	Comportamiento de aforo en el manantial principal “Agua Hedionda”.....	181
Figura 6.3	Gráfico de aforos del manantial principal “Agua Hedionda”.....	182
Figura 6.4	Aforo del manantial “Agua Hedionda” en la descarga de una de las albercas familiares .....	183
Figura 6.5	Aforos del manantial “Agua Hedionda” albercas familiares durante la campaña de medición .....	183
Figura 6.6	Aforo del manantial “La Malinche”.....	184
Figura 6.7	Comportamiento del aforo del manantial “La Malinche”. ....	185
Figura 6.8	Aforos del manantial “La Malinche” durante la campaña de medición.....	186
Figura 6.9	Comportamiento del aforo del manantial “Palo Bolero”. ....	187
Figura 6.10	Aforos del manantial “Palo Bolero” durante la campaña de medición. ....	187
Figura 6.11	Aforo del manantial “Cuauchichinola”.....	188
Figura 6.12	Aforos del manantial “Cuauchichinola” durante la campaña de medición.....	189
Figura 6.13	Aforo del manantial “Las Fuentes”. ....	190
Figura 6.14	Aforo del manantial “Las Fuentes”. ....	191
Figura 6.15	Aforos del manantial “Las Fuentes” durante la campaña de medición. ....	192
Figura 6.16	Aforo del manantial “Santa Rosa”. ....	193
Figura 6.17	Resultados del aforo del manantial “Santa Rosa” .....	194
Figura 6.18	Aforos del manantial “Santa Rosa” durante la campaña de medición. ....	195
Figura 6.19	Aforo del manantial “Las Estacas” .....	196
Figura 6.20	Resultados del aforo del manantial “Las Estacas”.....	197
Figura 6.21	Aforos del manantial “Las Estacas” durante la campaña de medición.....	198
Figura 6.22	Aforo del manantial “Agua Azul” utilizando el equipo portátil perfilador Doppler.....	199
Figura 6.23	Aforo del manantial “Agua Azul” utilizando el equipo portátil velocímetro Doppler ...	200
Figura 6.24	Aforo del manantial “Agua Azul” .....	201
Figura 6.25	Aforos del manantial “Agua Azul” durante la campaña de medición.....	202
Figura 6.26	Esquema de la derivación del flujo del manantial “Las Tortugas”.....	203
Figura 6.27	Ubicación de los puntos de medición del manantial “Las Tortugas” .....	204
Figura 6.28	Descarga del manantial “Las Tortugas”. ....	204
Figura 6.29	Aforos del manantial “Agua Azul” durante la campaña de medición.....	205
Figura 6.30	Evolución de caudales en los manantiales en estudio .....	208
Figura 7.1	Mapa Geológico Regional del Estado de Morelos (base cartográfica del SGM).....	211
Figura 7.2	Columna estratigráfica general del área de estudio. ....	213
Figura 7.3	Afloramientos de la Secuencia sedimentaria del Cretácico .....	214

Figura 7.4	Afloramientos de la Formación Balsas.....	215
Figura 7.5	Afloramientos de la Formación Tlayecac. ....	217
Figura 7.6	Afloramientos de los basaltos del CVC .....	218
Figura 7.7	Unidades hidrogeológicas propuestas .....	220
Figura 7.8	Sección hidrogeológica A (Manantial Las Tortugas). ....	225
Figura 7.9	Sección hidrogeológica B (Manantial La Malinche). ....	228
Figura 7.10	Geología superficial (Agua Hedionda-Agua Azul). ....	230
Figura 7.11	Sección hidrogeológica C (Agua Hedionda-Agua Azul). ....	233
Figura 7.12	Sección hidrogeológica D (Las Estacas).....	235
Figura 7.13	Evolución del caudal de septiembre a diciembre de 2017 (CONAGUA, 2018 sismo) 236	
Figura 7.14	Evolución del caudal de septiembre 2017 a mayo 2018 (CONAGUA, 2018).....	237
Figura 7.15	Sección hidrogeológica E (Las Fuentes).....	242
Figura 7.16	Evolución de la descarga de manantiales (m3/s) localizados en el acuífero Cuernavaca, durante el periodo de 1970 a 1980 (Fuente: Servicios Geológicos, 1970 y TACSA, 1981). ....	244
Figura 7.17	Diagrama de Piper para clasificar las familias de agua (CONAGUA, 2002). ....	245
Figura 7.18	Sección hidrogeológica F (San Ramón-Santa Rosa) .....	247
Figura 7.19	Sección hidrogeológica G, Palo Bolero. ....	250
Figura 7.20	Mapa geológico en la zona del manantial los Ojos de agua.....	253
Figura 7.21	Sección hidrogeológica H, los Ojos de agua (Cuauchichinola).....	256
Figura 7.22	Delimitación de cuencas de aportación a manantiales (CONAGUA, 2013).....	258
Figura 7.23	Zonas de protección a manantiales (CONAGUA, 2013).....	261
Figura 7.24	Ejemplo de zonas de protección “A”, “B” y “C” desplegadas en el Google Earth (CONAGUA, 2013). ....	262
Figura 7.25	Áreas de protección contra afectaciones en cantidad (Zona C) .....	263



## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Pozos y norias verificadas (manantial Las Tortugas) .....	81
Tabla 2.2	Pozos y norias verificadas (manantial La Malinche).....	82
Tabla 2.3	Pozos y norias verificadas (manantiales Agua hedionda y Agua Azul).....	82
Tabla 2.4	Pozos y norias verificadas (manantial Las Estacas).....	83
Tabla 2.5	Pozos y norias verificadas (Palo Bolero-San Ramón-Santa Rosa) .....	83
Tabla 2.16	Elevación del nivel estático (Acuífero Cuautla-Yautepec) .....	110
Tabla 2.17	Elevación del nivel estático en las zonas de influencia de los manantiales del acuífero Cuernavaca .....	111
Tabla 3.1	Resultados de los parámetros de campo y bacteriológicos.....	123
Tabla 3.2	Resultados de los parámetros de campo (primer trimestre de 2018) .....	124
Tabla 4.1	Tipo de envase, preservación y tiempo máximo para análisis por parámetro.....	127
Tabla 4.2	Pruebas y métodos de referencia .....	130
Tabla 4.3	Resultados de los parámetros de campo y microbiológicos .....	132
Tabla 4.4	Resultados de parámetros fisicoquímicos .....	133
Tabla 4.5	Resultados de los parámetros de calidad del agua, metales.....	135
Tabla 4.6	Valores analizados en diferentes fechas en el manantial principal Agua Hedionda. ....	140
Tabla 6.1	Aforo de los diferentes manantiales visitados. ....	206
Tabla 6.2	Caudales en los manantiales estudiados. ....	207
Tabla 7.1	Clasificación de los manantiales en estudio. ....	222
Tabla 7.2	Cuencas de aportación a los manantiales.....	259

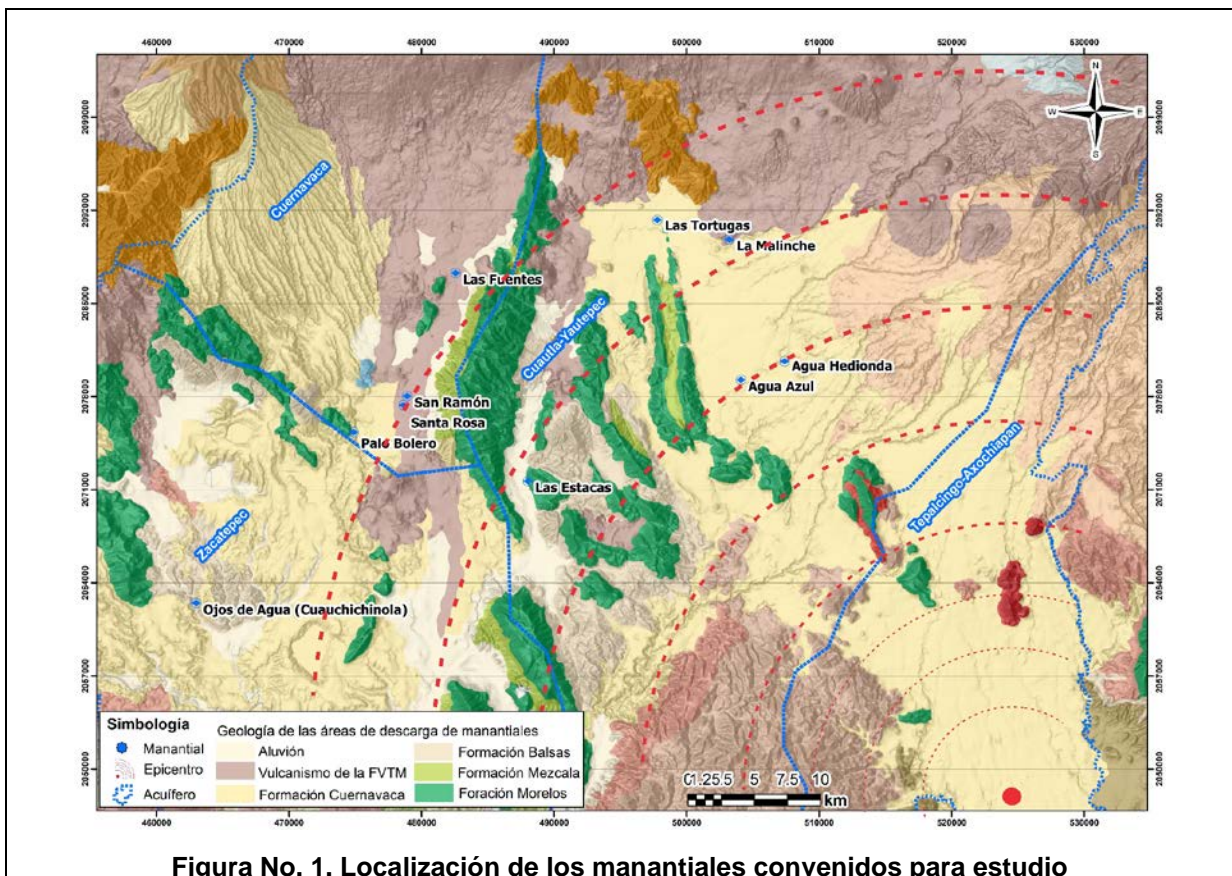
## CARACTERIZACIÓN DE MANANTIALES IMPACTADOS POR EL SISMO EN EL ESTADO DE MORELOS

### ANTECEDENTES

El sismo del 19 de septiembre de 2017, impacto a manantiales en el Estado de Morelos, ya que algunos desaparecieron, presentaron una disminución/aumento en sus descargas y cambio en la coloración de sus aguas. Los manantiales a estudiar en Convenio (sitios de muestreo): Agua Hedionda (3), San Ramón (1), Palo Bolero (1), Las Fuentes (1), Itzamatitlán (1), Las Tortugas (1), Las Estacas (1) y Agua Azul (1). La CEAGUA cambió San Ramón por Sta. Rosa, descarga arrollo en Agua Hedionda por Cuauchichinola e Itzamatitlán por La Malinche (Figura No. 1).

### OBJETIVO

Caracterizar los sitios aledaños a los manantiales, determinar sus condiciones actuales y evaluar su posible afectación en cantidad y calidad, con el fin de recomendar acciones tendientes a su posible recuperación.

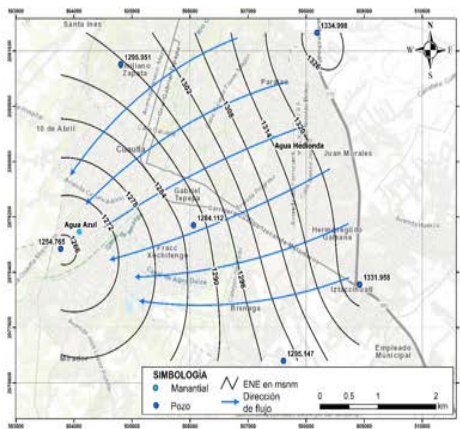
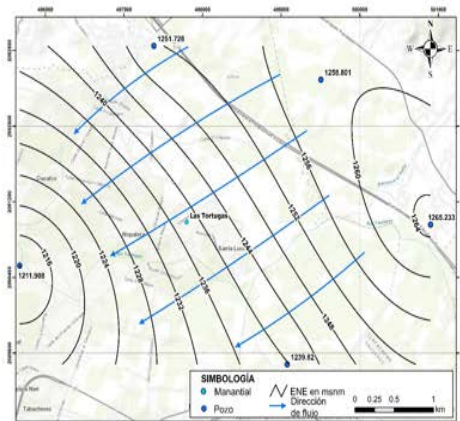


## METODOLOGÍA

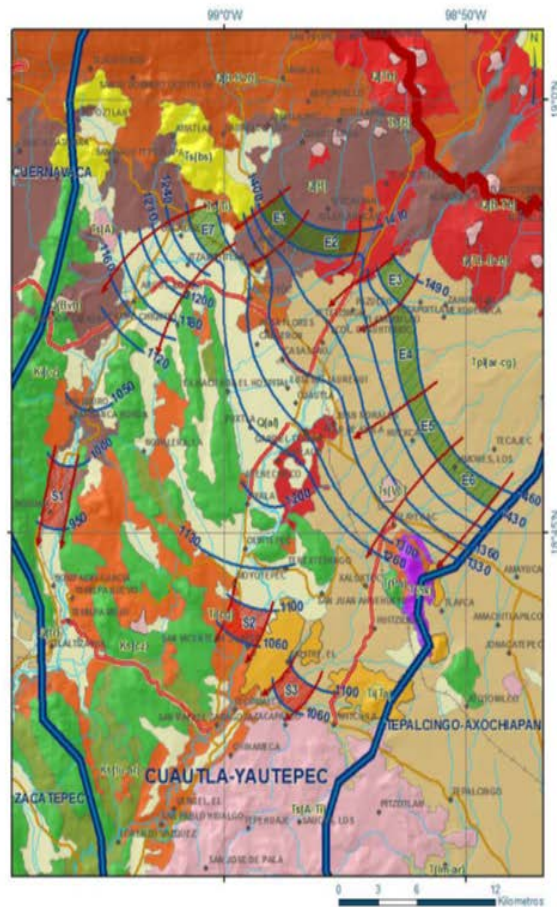
La metodología aplicada para la consecución del objetivo del estudio consistió en: 1) La recopilación y análisis de información; 2) La verificación de aprovechamientos existentes, levantamiento piezométrico, nivelación de brocales y determinación de la dirección del flujo subterráneo; 3) El muestreo puntual con determinación de parámetros de campo; 4) Los análisis físico-químicos; 5) Los análisis Isotópicos (Deuterio, Oxígeno-18, Tritio, Carbono-14); 6) El aforo de las descargas de manantiales; 7) La integración, procesamiento y análisis de la información y 8) La edición e impresión de informe final y presentación de resultados.

## RESULTADOS

### Dirección del flujo subterráneo Acuífero Cuautla-Yautepec (Condiciones hidrodinámicas sin cambios)



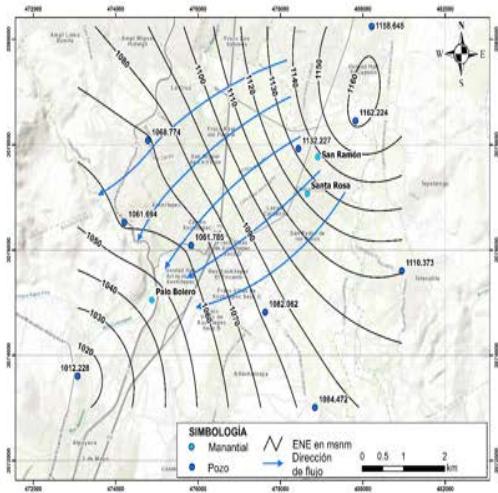
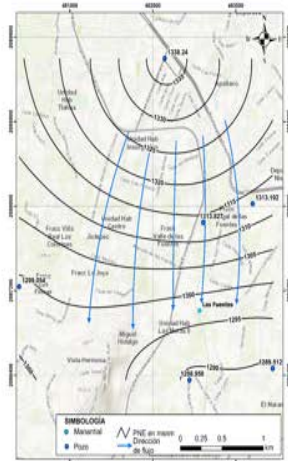
CEAGUA, 2018



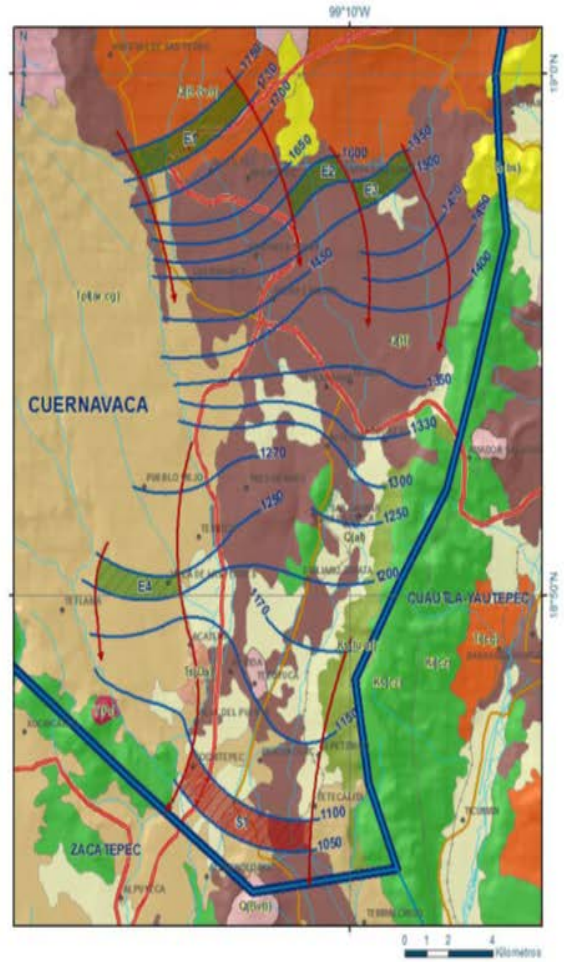
CONAGUA, 2013



**Dirección del flujo subterráneo Acuífero Cuernavaca  
(Condiciones hidrodinámicas sin cambios)**



CEAGUA, 2018



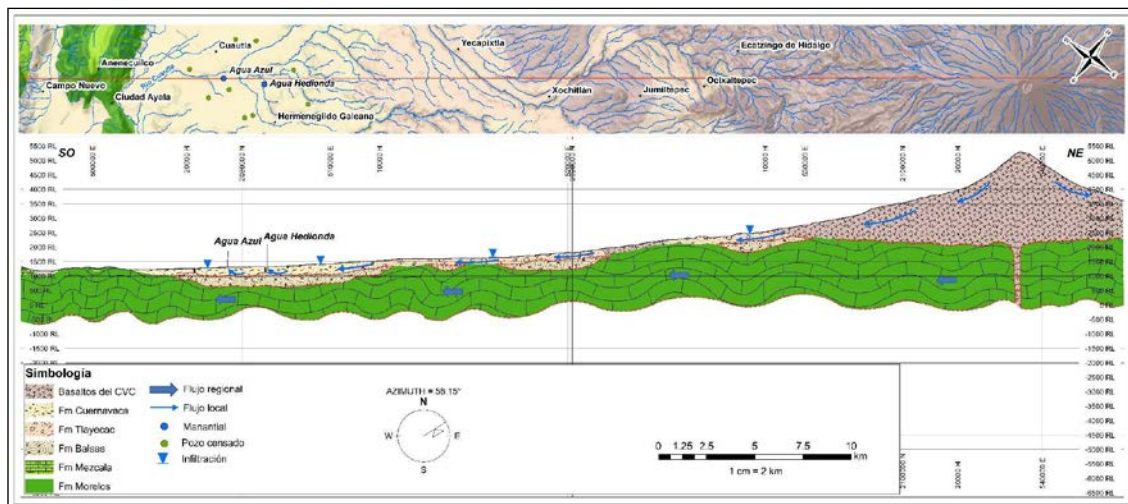
CONAGUA, 2013

## MODELO CONCEPTUAL. ACUÍFERO CUAUTLA-YAUTEPEC

En este acuífero ocurren los manantiales: Las Tortugas, La Malinche, Agua Hedionda, Agua Azul y Las Estacas.

Se tiene la hipótesis sobre la existencia de tres unidades hidroestratigráficas: i) La primera del tipo libre y superior, constituida por las formaciones volcánicas (Formaciones Cuernavaca y Tlayecac) y por basaltos del Campo Volcánico Chichinautzin (CVC); ii) La segunda, un acuífero que se constituye por las formaciones Mexcala y Balsas y iii) la tercera, un confinado inferior, constituido por rocas calizas.

El agua subterránea infiltrada en las partes altas de la cuenca circula por los materiales volcánicos formando sistemas de flujo local e intermedio en el acuífero libre superior y/o sistemas de flujo regional en el acuífero confinado inferior. La Formación Balsas actúa como barrera confinante (Figura No. 2).



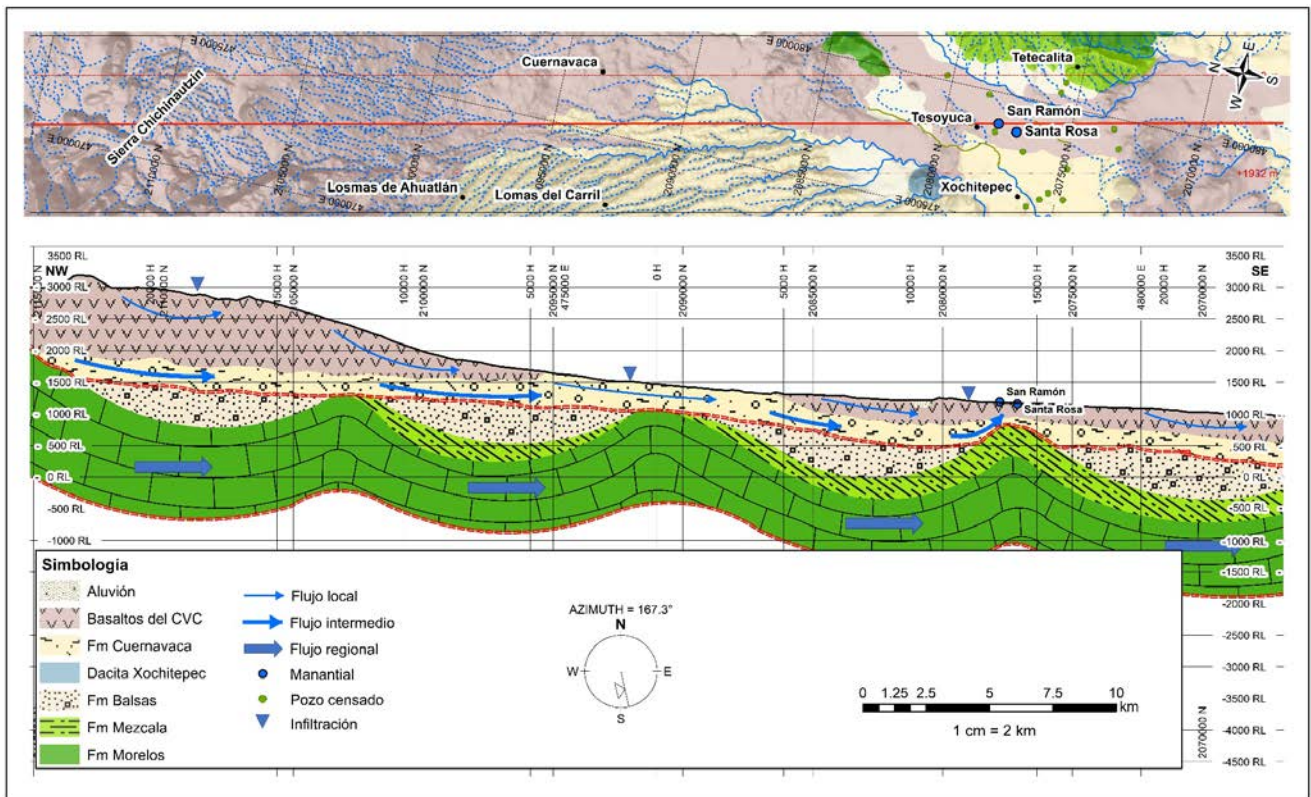
**Figura No. 2. Sección hidrogeológica Volcán-Agua Hedionda-Agua Azul.**



### MODELO CONCEPTUAL. ACUÍFERO CUERNAVACA

En el acuífero Cuernavaca se tiene la hipótesis sobre la existencia de tres unidades hidroestratigráficas: i) La primera del tipo libre y superior, constituida por rocas volcánicas del Oligoceno (Riolita Tilzapotla), Mioceno (andesitas, Dacitas, Tobas y lahares), del Plioceno (Basaltos, piroclastos, tobas y brechas de la Formación Zempoala, las Cruces y depósitos clásticos de la Formación Cuernavaca; ii) El acuífardo, constituido por lutitas y depósitos areno-arcillosos; y iii) la tercera del tipo confinado e inferior, constituido por rocas calizas.

En este sistema acuífero, se tienen sistemas de flujo del tipo local, intermedio y regional que dan origen a las descargas de agua subterránea en los sitios como los manantiales Las Fuentes, Palo Bolero, Santa Rosa y San Ramón (Figura No. 3). A continuación se presentan las principales características del régimen de los manantiales que se encuentran en este acuífero (caudal, propiedades físicas del agua, química del agua e isotopía):

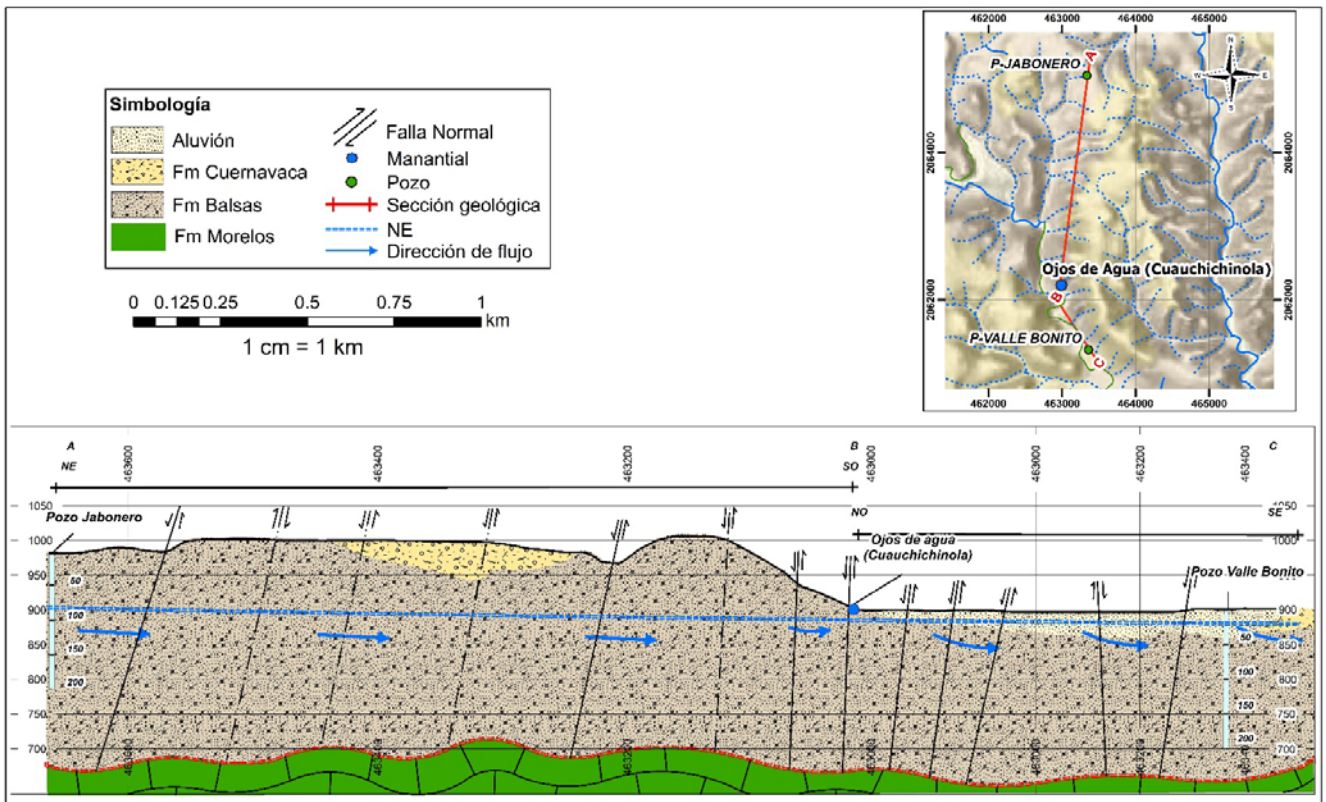


**Figura No. 3. Sección hidrogeológica Sierra Chichinautzin-San Ramón-Santa Rosa**

### MODELO CONCEPTUAL. ACUÍFERO ZACATEPEC

En la zona de los ojos de agua de Cuauchichinola se tiene la hipótesis sobre la existencia de dos unidades acuíferas; la primera representada por la Formación Balsas, la Formación Cuernavaca y los depósitos aluviales, que constituyen un acuífero superior del tipo libre, considerado de gran espesor (no se cuenta con información); la segunda a mayor profundidad está constituido por la secuencia de calizas de la Formación Morelos que es el principal constituyente del acuífero semiconfinado profundo (Figura No. 4).

En la sección, superficialmente corta a tres unidades litológicas consideradas constituyentes del acuífero libre, representadas por un depósito aluvial que cubre indistintamente a las demás unidades, también corta pequeños horizontes correspondientes a la Formación Cuernavaca. Subyaciendo a ambas unidades mencionadas se encuentran discordantemente rocas de la Formación Balsas, en esta zona esta unidad presenta características peculiarmente diferentes. A continuación se presentan las características resultantes del manantial en Cuauchichinola:



**Figura No. 4. Sección hidrogeológica en el acuífero Zacatepec.**

A continuación se presentan las principales características del régimen de los manantiales (caudal, propiedades físicas del agua, química del agua e isotopía):

## RESULTADOS

Tabla No. 1. Caudal, magnitud, parámetros de campo y uso.

Manantial	Caudal (l/s)		Magnitud	Parámetros físicos de campo			Uso
	Antes del sismo	después		Temp.(°C)	pH	C.E. (µs/cm)	
Las Tortugas	?	22.60	4a	24.7	6.3	2,518	Agric-recreativo
La Malinche	18?	3.50	5a	21.6	6.2	371	Domestico
Agua Hedionda	350?	76.25	3a	26.4	6.26	2,310	Agric-recreativo
Agua Hedionda (albercas)	?	20.80	4a	21.1	6.24	2,590	Recreativo
Agua Azul	?	317.00	2a	21.1	6.77	1,019	Agric-recreativo
Las Estacas	6,912.00 (19Sep17)	6,757.60 7,369.00 (12Oct17)	1a	22.6	6.91	1,250	Agric-recreativo
Las Fuentes		590.00	2a	15.6	7.38	135	Domestico-recreativo
Santa Rosa	845-600 Sep 2017	285.00	3a	20	7.0	1,160	Agricultura
Palo Bolero	?	5.40	4a	22.1	6.57	2,160	Recreativo
Ojos de agua	300	111.00	3a	26.2	7.08	811	Agricultura

## RESULTADOS

Tabla No. 2. Aniones y cationes mayoritarios.

### Régimen de los manantiales (Química del agua en mg/L y meq/L)

	STD	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Tipo de familia
Las Tortugas	1,935	694 34.63	162 13.33	72.9 3.17	9.2 0.23	1,870 38.94	673 11.03	53.9 1.56	Sulfatada cálcica
La Malinche	278	23.8 1.19	20.7 1.70	19.7 0.86	4 0.10	34.2 0.71	115 1.88	12.8 0.37	Bicarbonatada cálcica
Agua Hedionda	1,733	369 18.41	108 8.89	93.6 4.07	10.3 0.26	840 17.49	703 11.52	64.7 1.88	Sulfatada cálcica
Agua Hedionda (albercas)	1,943	436 21.76	126 10.37	107 4.65	11.4 0.29	1,010 21.03	781 12.80	75.8 2.2	Sulfatada cálcica
Agua Azul	764	124 6.19	43.7 1.80	32.4 1.41	4.1 0.105	199 4.14	429 7.03	21.9 0.63	Bicarbonatada cálcica
Las Estacas	937	150 7.48	47.7 1.96	33 1.43	5.2 0.13	442 9.20	322 5.27	18.3 0.53	Sulfatada cálcica
Las Fuentes	101	6.1 0.304	5.96 0.24	9.7 0.42	1.7 0.04	11.6 0.24	56.1 0.92	1.8 0.05	Bicarbonatada sódica
Santa Rosa	870	197 9.83	47.8 1.97	17.1 0.74	3 0.08	330 6.87	381 6.24	13.2 0.38	Sulfatada cálcica
Palo Bolero	1,620	461 23.00	91.8 3.78	22.6 0.98	4.3 0.11	1,150 23.95	442 7.24	19.4 0.56	Sulfatada cálcica
Ojos de agua	608	118 5.89	32.1 1.32	9.7 0.42	2.3 0.06	196 4.08	289 4.74	4.2 0.12	Bicarbonatada cálcica



## RESULTADOS

En la tabla anterior se muestran los cationes y aniones mayoritarios (en mg/L y meq/L., con lo cual se define el tipo de familia de agua para cada manantial.

Desde que el agua alcanza la superficie freática más próxima hasta que sale al exterior en un río, manantial o pozo, pueden transcurrir días, decenas o miles de años y el recorrido puede ser muy corto o de varios kilómetros.

Por lo tanto, la evolución química del agua dependerá de los minerales con los que interactúe y el tiempo de residencia. Si atraviesa yesos se tendrá  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Ca}^{++}$ , si encuentra niveles salinos con sales cloruradas adquirirá  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , si pasa por rocas calizas adquiere  $\text{CO}_3\text{H}^-$ .

Aunque las reacciones y procesos químicos que se desarrollan son muy variados, **como norma general**, se observa que las aguas subterráneas con **menor tiempo de permanencia en el subsuelo son generalmente bicarbonatadas**. Después predomina el **sulfato** y las aguas más salinas son cloruradas. Esta evolución se denomina secuencia de Chevotareb:

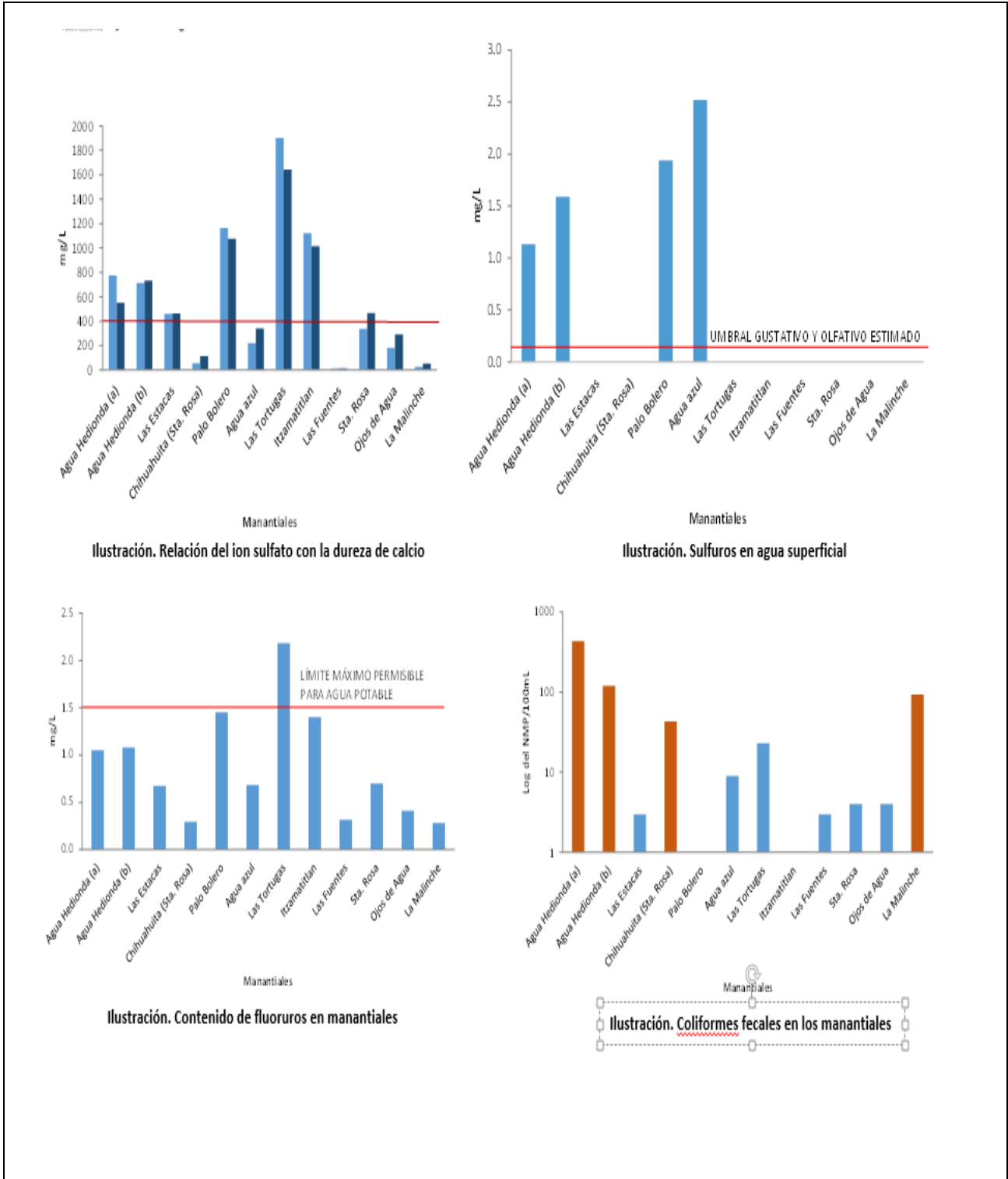
	→ Sentido del recorrido y tiempo de permanencia en el acuífero →								
Anión predominante	$\text{HCO}_3^-$	→	$\text{HCO}_3^-$	→	$\text{SO}_4^-$	→	$\text{SO}_4^-$	→	$\text{Cl}^-$
Catión predominante	$\text{Ca}^{++}$		→		$\text{Mg}^{++}$		→		$\text{Na}^+$
	→ aumento de la cantidad de sales disueltas →								

Con respecto a los aniones, cabe señalar los valores altos de **sulfatos** para el agua de los manantiales Las Tortugas, Agua Hedionda (principal y albercas), Las Estacas, Santa Rosa y Palo Bolero, los cuales son atribuidos a los yesos.

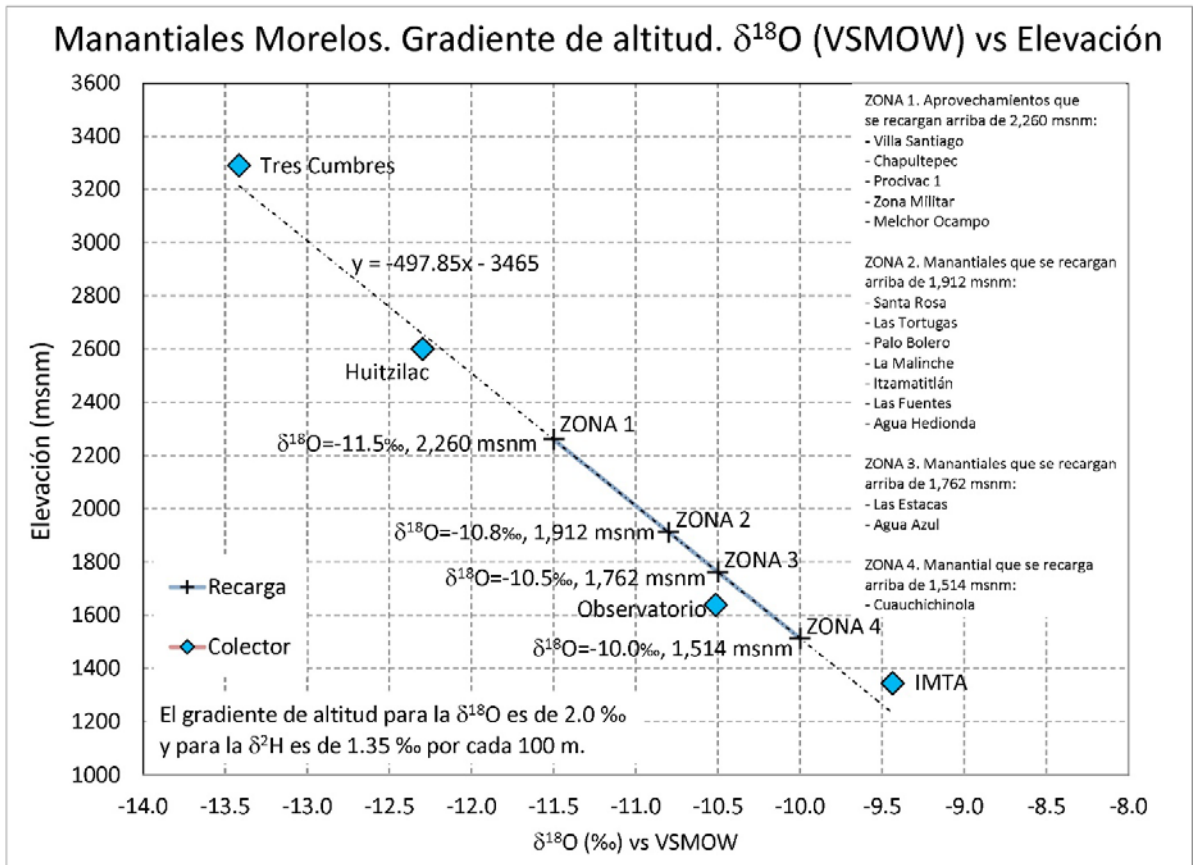
Valores altos de **cloruros** para las descargas en Agua hedionda principal y albercas. Los valores no son característicos de aguas subterráneas en la zona (probablemente se trata de aguas contaminadas con sales presentes en el suelo o de desechos urbanos e industriales y/o mezclas).



**RESULTADOS**



**RESULTADOS**



**Gradiente de altitud de la composición isotópica de la lluvia utilizado para determinar las zonas de recarga efectiva de los manantiales.**

## RESULTADOS

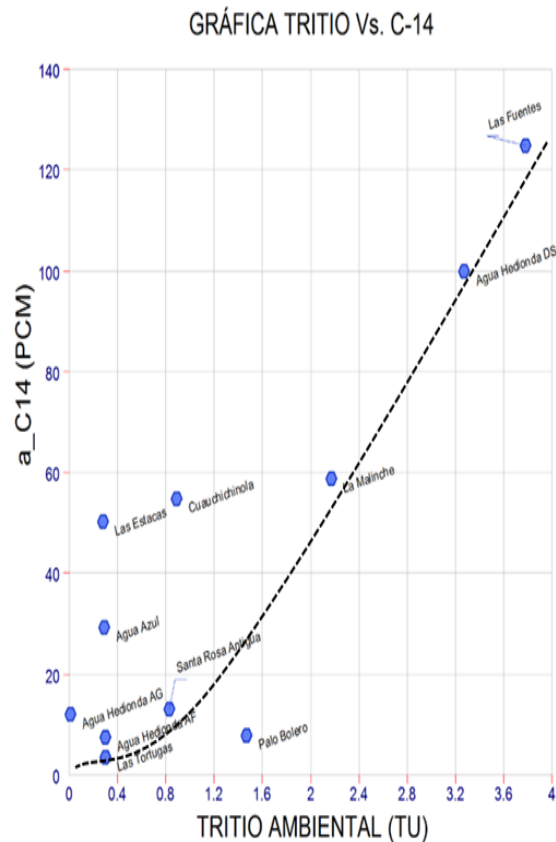
Los contenidos de tritio ( $^3\text{H}$ ) ambiental medidos en unidades de tritio (UT) y de radiocarbono, medido en porcentaje de carbono moderno (PCM) de los manantiales, están comprendidos en el rango de 0.8 UT (Cuauchichinola, 2.17 (La Malinche), hasta valores de 3.78 UT (manantial Las Fuentes), indicando que su recarga es de precipitación reciente.

Mediciones de tritio ambiental en lluvia, muestran que los contenidos de tritio son de 3.8 UT.

Ello implica que el tiempo que tarda el agua desde el momento que se infiltra en la zona de recarga hasta que fluye en el manantial Las Fuentes, es de uno o dos años.

En el caso de los manantiales Cuauchichinola (0.89 UT) y La Malinche (2.17 UT), los tiempos de residencia son mayores, comprendidos en el rango de una a dos décadas.

Los manantiales donde hay ausencia total de tritio ambiental, los flujos que los recargan tienen tiempos de residencia de más de cuarenta años (Figura 5.24). Estos manantiales presentan contenidos de radiocarbono de 50.3 a 3.50 PCM. Las edades aparentes de radio carbono estimadas para estos manantiales van de 5,520 hasta 26,910 años. Estas edades aparentes están influenciadas por el ciclo del carbono que se verifica en el ambiente subterráneo, el cual tiene una naturaleza muy compleja en la química de las especies carbonatadas presentes en el ambiente subterráneo, especialmente en las rocas calizas.



**Comportamiento de los contenidos de tritio y carbono-14 en las muestras de los manantiales. El límite de medición de tritio ambiental es de 0.6 UT por el método de enriquecimiento electrolytico utilizado.**

## RESULTADOS

Tabla. Tiempo de residencia y sistemas de flujo

	Tritio (años)	Carbono 14 (años)	Sistema de flujo
Las Tortugas		5,520-26,910	Intermedio/regional/Acuífero Confinado
La Malinche	3-30		Local/acuífero libre
Agua Hedionda		5,520-26,910	Intermedio/regional/Acuífero Confinado
Agua Hedionda (albercas)		5,520-26,910	Intermedio/regional/Acuífero Confinado
Agua Azul		5,520-26,910	Intermedio/regional/Acuífero Confinado
Las Estacas		5,520-26,910	Intermedio/regional/Acuífero Confinado
Las Fuentes	3-30		Local/acuífero libre
Santa Rosa		5,520-26,910	Intermedio/regional/Acuífero Confinado
Palo Bolero		5,520-26,910	Intermedio/regional/Acuífero Confinado
Ojos de agua	3-30		Local/acuífero libre

## CONCLUSIONES

### Las Tortugas

- Caudal de 22.60 lps (no antecedentes)
- Uso agrícola y recreativo

### La Malinche

- Disminución de 18 a 3.5 lps.
- Se han detectado descargas aguas abajo (0.5 lps; marzo 2018).
- Uso domestico.
- Usuarios afectados.

### Agua Hedionda

- Disminución del caudal de 350 a 80 lps
- Se mantiene la calidad del agua
- Usuarios agrícolas severamente afectados

### Agua Azul

- Caudal de 317 lps (no existen antecedentes)
- Uso agrícola y recreativo.

### Las Estacas

- Aumento en sus descargas de 6.912 a 7.369 m<sup>3</sup>/s.

### Las Fuentes

- Caudal de 590 lps.
- Uso domestico y recreativo

### Palo Bolero

- el manantial principal desapareció
- se explota un manantial alterno con un caudal 5.4 lps, ubicado a unos metros.
- agua emerge a 100 m en la margen izquierda del rio.

### Santa Rosa

- registra un caudal de 285 lps.
- Uso agrícola y servicios

### San Ramón

- desapareció totalmente
- actualmente se suministra agua para las albercas por medio de pipas.

### Cuauchichinola

- desaparición de los 3 manantiales
- el tercero disminuyó de 400 lps a 200 (feb-mar), 100 lps (abril) y desapareció en mayo, respectivamente.
- Se considera que los pozos emplazados gradiente arriba interceptan el agua de estos manantiales.



## CONCLUSIONES GENERALES

La determinación del régimen de los manantiales, nos ha permitido evaluar los cambios en el volumen de descarga y calidad del agua de algunos manantiales en el estado, por el sismo M7.1 del 19 de septiembre de 2017.

Estas características no proporcionan elementos para realizar un diagnóstico preciso sobre si la afectación a los manantiales Agua hedionda, La Malinche, San Ramón, Palo Bolero y los Ojos de agua en Cuauchichinola es temporal o permanente, ya que el movimiento telúrico pudo originar cambios en la estructura del subsuelo, creando nuevas fracturas y patrones de flujo, obstruyendo los existentes.

Por lo anterior, los resultados del presente estudio no muestran evidencias de afectaciones a la geología local en la zona de descarga de los manantiales, por lo que se considera que los efectos principales de los sismos fueron de carácter profundo y a largo plazo.

## RECOMENDACIONES

### Las Tortugas

- Realizar limpieza periódica, desazolve del sitio y del canal de conducción.
- Zonas de protección (Colocar cerca perimetral)

### La Malinche

- Construir tanque e incorporar las nuevas descargas identificadas gradiente abajo (considerar la contaminación por asentamientos).
- Zonas de protección (Colocar cerca perimetral)
- Realizar un estudio de prospección en la colonia Alejandra, con el objeto de perforar un pozo.

### Agua Hedionda

- Seguir utilizando el agua del manantial principal
- bombear el agua del manantial de las albercas particulares a la alberca principal (una vez llenas se vierten a la barranca).
- Realizar un estudio de prospección geofísica para la perforación de pozos profundos para fines agrícolas.

### Agua Azul

- Zonas de protección (Colocar cerca perimetral)

## RECOMENDACIONES

### Palo Bolero

- Construir un tanque de almacenamiento y bombear hacia las albercas.

### Cuauchichinola

- Perforar un pozo cercano al río para suministrar agua al balneario Paraíso Escondido,
- Realizar un estudio de prospección con el objeto de perforar un pozo para fines agrícolas

### Manantiales en el estado de Morelos

- Implementar un programa de saneamiento de cauces/cuencas
- Se propone instrumentar todos los sitios de los manantiales.
- Medir caudales con una frecuencia mensual.
- Muestrear y determinar parámetros de campo cada 6 meses.

## 1 GENERALIDADES

### 1.1 Antecedentes

Derivado del sismo del 19 de septiembre de 2017, varios manantiales del estado de Morelos sufrieron diversas afectaciones principalmente en sus volúmenes de descarga.

Los manantiales sujetos a estudio y definidos por la Comisión Estatal del Agua (CEAGUA) en Morelos son: Agua Hedionda, San Ramón, Palo Bolero, Las Fuentes, Itzamatitlán, Las Tortugas, Las Estacas, Agua Azul. Cabe señalar que la CEAGUA propuso incluir en el estudio a los manantiales Ojos de agua en Cuauchichinola, Santa Rosa en Xochitepec y La Malinche en Oaxtepec sustituyendo a la descarga de agua del lecho del arroyo en Agua Hedionda, el ex manantial de San ramón y el manantial Itzamatitlán.

Los manantiales Agua Hedionda, Palo Bolero, San Ramón, los Ojos de agua en Cuauchichinola fueron los más afectados, ya que se presenta una disminución en su caudal y/o prácticamente desaparecieron. En contraste, se reportó un aumento en el caudal descargado de los manantiales Itzamatitlán y las Estacas, mientras en las Tortugas se reporta un cambio en su coloración.

Existe la necesidad de realizar un diagnóstico de todos los manantiales ubicados en el estado y revisar la información histórica con el fin de atender la emergencia.

### 1.2 Objetivos

Caracterizar los sitios aledaños a los manantiales, determinar sus condiciones actuales y evaluar su posible afectación en cantidad y calidad, con el fin de recomendar acciones tendientes a su posible recuperación.

### 1.3 Área de estudio

Las zonas de estudio se localizan: **i)** en el acuífero Cuernavaca, hacia el sur, en el municipio de Xochitepec (**los manantiales Santa Rosa y San Ramón**), al suroeste, en el municipio de Alpuyecad (**el manantial Palo Bolero**) y hacia el oriente, en el municipio de Jiutepec (**manantial Las Fuentes**); **ii)** en el acuífero Cuautla-Yautepec, hacia el poniente, en el municipio de Yautepec (**manantiales Las Tortugas y La Malinche**), hacia el oriente, en el municipio de Cuautla (**manantiales Agua Hedionda y Agua Azul**) y hacia el sur del acuífero, en el municipio de Tlaltizapan el manantial **las Estacas** y **iii)** en el acuífero Zacatepec, **los Ojos de Agua de Cuauchichinola** (Figura 1.1).

El acuífero Cuernavaca (1701), se localiza en la porción noroccidental del Estado de Morelos, entre los paralelos 18° 40' y 19° 0' de latitud norte y entre los meridianos 99° 20' y 99° 10' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 820 km<sup>2</sup>.

El acuífero Cuautla-Yautepec (1702), se localiza en la porción central del Estado de Morelos, geográficamente se localiza entre los paralelos 18°30' y 19°00' de latitud norte y los meridianos 99°10' y 98°45' de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 2,558 km<sup>2</sup>, incluyendo los municipios del Estado de México.

El acuífero Zacatepec (1703), se localiza en la porción suroeste del Estado de Morelos, entre los paralelos 18° 20' y 18° 45' de latitud Norte y los meridianos 99° 30' y 99° 9' de longitud Oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,279 km<sup>2</sup>.

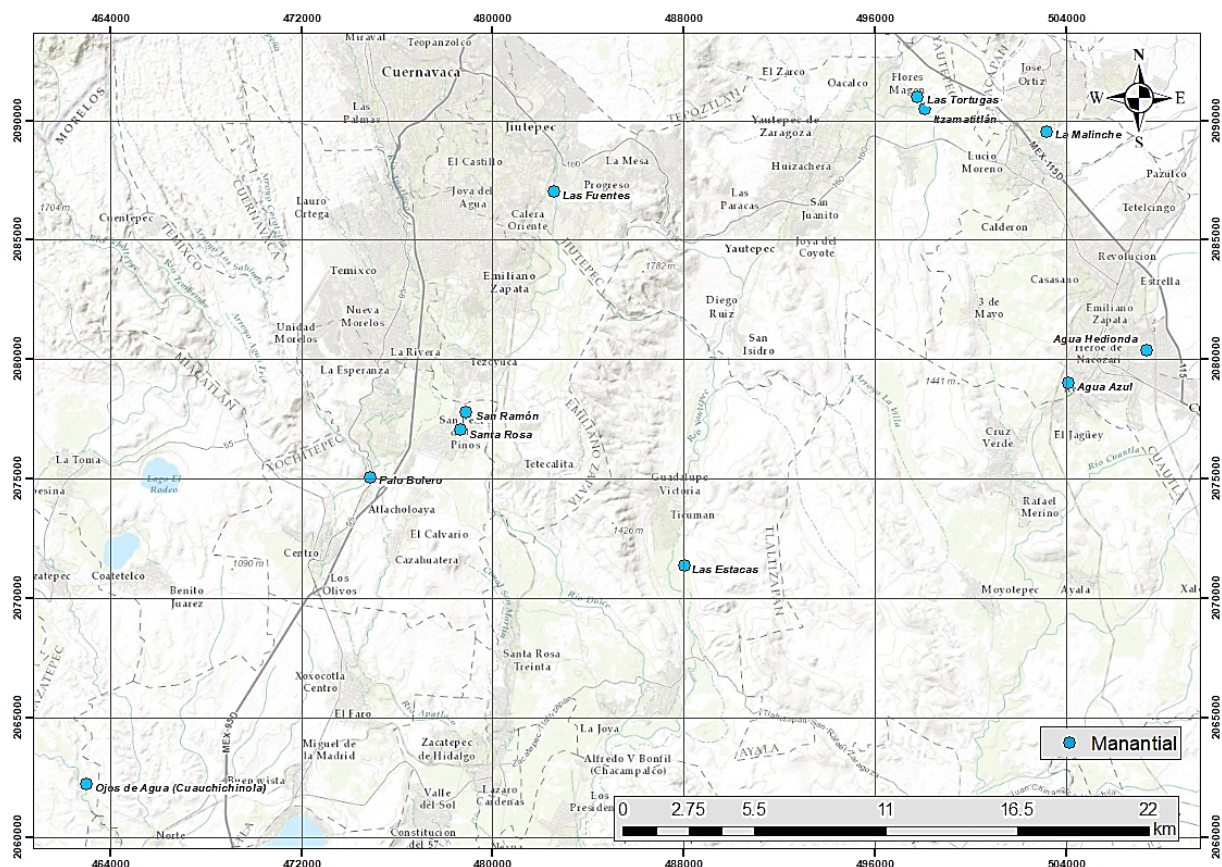


Figura 1.1 Localización de la zona de estudio



#### 1.4 Compilación, integración, resumen y análisis de estudios previos

Se recopiló toda la información disponible que permitió definir la situación actual de conocimiento hidrogeológico del área de estudio.

A continuación en cada una de las tablas se hace una descripción del nombre del estudio recopilado, fecha de realización, compañía consultora, el tipo de estudio, objetivos y resultados alcanzados:

<b>ARTICULO</b>	<b>Regional groundwater flow and geochemical evolution in the Amacuzac river basin, México. Hidrogeological Journal</b>
<b>FECHA</b>	2016
<b>AUTORES</b>	Eric Morales Cacique, Jacobo Guinzberg Belmont y Adrián Ortega Guerrero
<b>TIPO</b>	Investigación
<b>OBJETIVOS</b>	Investigar la evolución regional del agua subterránea en la cuenca del río Amacuzac.
<b>RESULTADOS</b>	<p>El enfoque se basa en la modelación del flujo de agua subterránea a través de secciones transversales en combinación con la química de los iones mayores y la modelación geoquímica, complementado con los componentes principales y el análisis.</p> <p><b>En cuarenta y cinco aprovechamientos hidráulicos (manantiales, pozos y ríos) se tomaron muestras de agua para el análisis químico de los principales iones.</b> En la Tabla 2, se reportan datos de los manantiales <b>Agua Hedionda, Las Estacas, Las Fuentes, Palo Bolero y San Ramón.</b></p> <p>El sistema de flujo de agua subterránea modelado por gravedad reprodujo satisfactoriamente las observaciones de campo, mientras que los principales procesos geoquímicos de agua subterránea en la cuenca están asociados al orden y las reacciones en las rocas ígneas y sedimentarias que se encuentran a lo largo del flujo de agua subterránea.</p>

Caracterización de manantiales impactados por el sismo en el Estado de Morelos

**Table 2** Results of the chemical analyses in groundwater samples

Site No.	Name	Type	UTM-E-W	UTM-N-S	Elevation (masl)	Temp (°C)	pH	TDS (mg/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	Na (meq/L)	K (meq/L)	HCO <sub>3</sub> (meq/L)	Cl (meq/L)	SO <sub>4</sub> (meq/L)	Charge balance error %
2	Ispuatlan	S	489,700	1,109,000	2,361	18	6.93	126.09	0.82	0.41	0.113	0.097	1.3679	0.219	0.01	-0.38
3	Tlacuahuac	W	501,000	1,097,000	1,877	16.4	7.49	79.66	0.84	0.14	0.206	0.041	0.6017	0.403	0.01	1.60
5	Ematucap	S	438,797	1,095,197	2,034	18.4	7	238.79	1.08	1.47	0.259	0.118	2.5577	0.415	0.031	3.19
6	San Andrés	W	473,829	1,092,896	1,986	19.8	6.94	197.33	0.96	1.11	0.259	0.033	2.6813	0.403	0.042	-0.36
7	San Mateo	S	479,798	1,097,833	1,860	14.9	6.4	153.87	0.86	0.85	0.113	0.056	1.2308	0.15	0.25	-0.19
8	Agua Nueva	S	484,239	1,089,092	1,391	14.7	7.33	111.94	0.36	0.72	0.4	0.033	1.094	0.276	0.052	3.10
9	Villa Guaymas	W	482,300	1,089,200	1,394	17.9	6.63	287.39	1.18	2.11	0.487	0.097	2.3248	0.49	1	0.61
10	Chalco	S	454,000	1,092,800	1,394	14.9	6.8	120.41	0.82	0.31	0.113	0.056	1.0328	0.138	0.82	-0.12
11	San José	W	501,687	1,086,590	1,331	23.3	6.79	523.63	2.13	4.1	1.64	0.097	5.7453	0.419	0.791	2.84
12	San José	S	502,700	1,089,900	1,314	26.1	6.09	2,950.46	24.93	12.44	4	0.251	18.2467	2.75	22.903	-2.63
13	San José	S	504,600	1,089,800	1,374	18.1	6.62	211.73	1.07	1.14	0.231	0.071	2.3248	0.403	0.004	4.31
14	San José	S	482,564	1,087,012	1,347	18.1	7.1	138.14	0.87	0.76	0.183	0.041	1.2308	0.279	0.073	4.69
15	San José	S	477,990	1,091,235	1,450	16.1	6.42	94.19	0.74	0.16	0.248	0.041	1.2308	0.157	0.051	-0.25
16	San José	W	428,576	1,084,376	1,818	40.1	6.31	7,020.03	71.2	3.2	87.13	3.1	16.6867	68.31	17.334	-0.08
18	San José	S	506,560	1,082,350	1,340	18.7	6.21	285.18	1.23	1.26	0.496	0.056	3.444	0.276	0.073	-0.42
19	San José	S	504,940	1,082,520	1,344	18.1	5.98	33.06	0.98	2.38	0.577	0.082	3.4	0.352	0.098	-0.60
21	Agua Nueva	S	507,648	1,086,360	1,331	26.1	6.03	2,422.45	24.83	10.98	4.2	0.235	16.6833	2.198	20.821	0.90
22	San José	S	505,811	1,080,284	1,312	18.1	5.89	332.98	1.44	1.96	0.774	0.082	4.1023	0.414	0.087	-0.46
23	San José	W	505,444	1,081,843	1,338	18.7	6.07	333.89	0.92	2.34	0.774	0.082	4.1023	0.276	0.087	-0.83
24	San José	S	440,112	1,073,958	986	26.1	6.96	392.36	2.56	1.24	1.06	0.082	4.6409	0.276	0.147	-1.20
25	San José	W	484,817	1,079,217	974	23.6	7.08	335.43	7.13	4.5	1.4	0.124	7.618	0.4	1.465	2.55
26	San José	S	480,230	1,079,872	1,131	20.1	6.89	397.84	2.3	1.23	0.222	0.071	3.1808	0.276	0.479	4.86
29	San José	W	474,303	1,087,597	1,011	24.2	6.74	1,877.98	29.6	6.96	1.63	0.105	7.035	0.888	19.163	1.08
31	San José	S	474,811	1,079,817	1,070	21	6.49	2,080.90	22.88	7.2	0.774	0.087	7.0313	0.828	19.28	4.98
32	San José	S	487,902	1,071,348	965	22.3	6.96	1,077.69	9.27	3.81	1.4	0.105	61.993	1.14	7.115	0.71
33	San José	W	505,001	1,071,362	1,146	23.7	7.12	838.97	4.21	3.77	2.64	0.328	8.211	0.996	1.823	-1.64
34	San José	W	441,310	1,070,921	1,018	26.9	6.22	649.47	4.2	2.90	1.14	0.159	6.017	1.134	1.9	-0.43
36	San José	W	481,927	1,062,944	943	23.7	7.02	1,081.23	7.99	3.17	1.11	0.169	6.3903	0.352	6.942	2.52
37	San José	W	463,131	1,061,844	942	23.3	6.97	699.18	4.11	2.7	0.4	0.056	5.8612	0.352	3.6	-0.09
38	San José	W	500,750	1,060,542	1,096	26.5	7.08	84.71	2.97	4.34	4	0.082	8.211	1.31	2.08	-1.00
39	San José	W	440,007	1,057,851	922	23.9	7.03	899.48	6.44	4.14	0.26	0.041	6.1982	0.414	4.9	-0.23
41	San José	S	471,519	1,050,499	866	26.2	6.79	1,924.43	18.12	10.3	0.71	0.082	5.47	0.49	2.5	2.17
42	San José	S	471,219	1,050,499	866	26.1	7.05	486.41	3.61	2.01	1.86	0.128	3.7378	0.828	2.3	-0.13
43	San José	S	479,854	1,047,589	789	26.7	7.85	947.23	6.61	3.44	1.117	0.159	4.8818	1.134	7.5	-0.41
46	San José	S	440,730	1,049,990	886	28	8	1,077.30	8.31	3.49	1.4	0.102	7.111	0.996	1.83	3.43
47	San José	S	448,870	1,041,145	779	29.4	7.28	2,154.17	20.17	10.31	1.31	0.118	4.5407	0.276	37	-0.56
48	San José	S	438,870	1,034,680	2,343	18	6.83	2,491	0.82	0.88	0.694	0.082	2.2792	0.414	0.031	1.12
49	San José	S	471,129	1,034,217	2,407	13.8	6.55	4.28	0.63	0.09	0.102	0.020	0.2755	0.276	0.4	3.43
51	San José	S	478,198	1,036,351	1,426	19.6	6.55	1,104	0.82	0.4	0.31	0.056	1.2308	0.414	0.083	-0.34
52	San José	S	517,790	1,042,167	1,252	22.8	6.78	1,213.2	11.2	3.21	0.17	0.105	49.266	0.966	13.013	-0.03
53	San José	S	501,700	1,073,200	1,184	22.8	6.84	1,203.64	7.23	6.97	1.77	0.128	9.3038	0.828	7	-0.77
54	San José	S	477,119	1,036,603	950	25.9	6.72	825.10	8.04	1.81	1.21	0.159	7.0198	0.352	3.175	3.77
55	San José	S	479,102	1,077,614	1,119	19.7	6.87	1,716.60	10.99	4.1	0.713	0.071	7.3843	0.198	9	-0.00
56	San José	S	429,717	1,080,327	1,736	26.5	6.13	7,124.26	71.16	6.34	6.4	2.32	11.9083	67.896	15.841	-0.54
57	San José	S	447,686	1,039,321	1,061	17.1	6.78	197.30	0.9	0.9	0.4	0.087	2.188	0.414	0.082	-0.44

Notes: W well, S spring, R river, G gallery. HCO<sub>3</sub> measured as total alkalinity in the field. TDS computed from chemical analysis

<b>ARTICULO</b>	<b>Fluoruro en el agua subterránea: niveles, origen y control natural en la región de Tenextepango, Morelos, México. Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 90, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 40-58, dx.doi.org/10.14350/rig.47374.</b>
<b>FECHA</b>	2016
<b>AUTORES</b>	Huízar Á., R., J. J. Carrillo R. y F. Juárez.
<b>TIPO</b>	Investigación
<b>OBJETIVOS</b>	El objetivo de este trabajo es conocer los niveles de fluoruro en el agua subterránea, su distribución y su procedencia en la región de Tenextepango, Morelos, México.
<b>METODOLOGÍA</b>	Con base en la consulta de literatura existente y el reconocimiento geológico de campo, se definió el contexto geológico que fue la base del modelo hidrogeológico conceptual. De esta manera, se documentan las rocas que forman la columna lito estratigráfica de la región, estableciéndose su distribución horizontal y vertical, las propiedades petrofísicas e hidráulicas de las rocas, así como las Características físico-químicas del flujo de agua subterránea. En dos ocasiones se registró la elevación del nivel estático del agua subterránea; se colectaron 17 muestras de agua en pozos y cinco en manantiales para determinar el contenido de aniones, cationes y elementos traza (Tabla 1). Las muestras fueron filtradas con celulosa de 0.45 µm, las muestras para cationes (y elementos traza) fueron aciduladas con HNO <sub>3</sub> (de alta pureza); durante la obtención de cada muestra de agua, usando una celda de aislamiento, se registró en campo el valor de la temperatura, pH y conductividad eléctrica (CE). El contenido de CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> y HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> se analizó <i>in situ</i> por el método de titulación de acuerdo al <i>Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water</i> , APHA (1989). Los cationes, elementos traza, y aniones se determinaron mediante ICP-MS. El error analítico es aceptable para el 95% de las muestras (con <5%) encontrándose un error de 8 a 9% para tres de las muestras analizadas. A partir de la interpretación de la información aquí generada se establecieron los territorios de procedencia del F <sup>-</sup> y la variación espacial del contenido en el agua subterránea. Es de destacar la importancia de registrar la temperatura, pH y CE <i>in situ</i> , ya que son parámetros cuyo valor permiten deducir procesos por el contenido mineral del agua, y la posible estratificación química de ésta y comparativamente derivar la profundidad de trayectoria recorrida por el agua, dentro del ambiente hidrogeológico de referencia.
<b>RESULTADOS</b>	<b>Química del agua subterránea en la planicie de Tenextepango.-</b> La Tabla 1 muestra el contenido de los diferentes iones en el agua subterránea captada en la planicie y aunque la diferencia relativa entre las concentraciones es pequeña, es decisiva para poder clasificar dos facies hidroquímicas; una cálcica y otra sódica. La primera es cálcica-sódica-magnésica-bicarbonatada (Ca-Na-Mg-HCO <sub>3</sub> ) que comprende el 25% de las

muestras, excepto una muestra que es cálcica -sódica-magnésica-sulfatada ( $\text{Ca-Na-Mg-SO}_4$ ). La segunda es una facies sódica-cálcica-magnésica-bicarbonatada ( $\text{Na-Ca-Mg-HCO}_3$ ) que agrupa el 75% de las muestras. En el diagrama de Piper (1944), el diamante de cationes marca claramente la diferencia relativa de su contenido en las aguas sugiriendo que han viajado por rocas con diferente contenido mineral; mientras que los aniones sugieren que las aguas han viajado distancias comparativamente similares. Las muestras 1, 7, 9, 13, 18 y 22, que corresponden a la facies cálcica quedan situadas en la parte del diamante en la que Appelo y Postma (1993) sugieren intercambio iónico. Asimismo, los diagramas de Stiff (1951), también son muy similares, evidenciando la relativa homogeneidad de la litología por donde el agua subterránea circula y su consecuencia en la composición química del agua que se extrae en los pozos. En efecto, esta mineralización del agua captada por los pozos es producida por reacciones entre ésta y materiales volcánicos de composición química intermedia-ácida y en parte por las rocas carbonatadas descritas. Los triángulos sugieren que el agua de estas muestras fluye por material sedimentario resultado de la denudación de rocas presentes en partes altas; similarmente, el agua representada por rombos fluye por rocas volcánicas. El diagrama de aniones sugiere que las muestras provienen de flujos que han tenido recorridos identificables como de tipo intermedio y regional, mientras que el flujo local resulta menos evidente. Desde el punto de vista de los sistemas de flujo la concentración relativa de aniones en las muestras indica que todos los flujos han tenido una trayectoria relativamente larga, **donde el contenido de  $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3^-$  en el manantial Agua Hedionda sugiere poseer el agua de mayor recorrido y haber circulado por caliza y dolomía de la Formación Morelos.**

#### **Fluoruro en el agua subterránea**

Los análisis realizados para este estudio confirman los resultados obtenidos por Huizar *et al.* (2014), el contenido de  $\text{F}^-$  decrece de NE a SW, en la dirección del flujo subterráneo en el plano horizontal y, que en general en los sectores S y SW de la planicie, con excepción del pozo El Salitre y el manantial Atotonilco, el contenido de  $\text{F}^-$  es inferior a 0.80 mg/L. Cabe resaltar, que al comparar las líneas marcando el movimiento del agua en el plano horizontal con las isolíneas de concentración de  $\text{F}^-$  se interpreta que los valores altos están controlados por flujo vertical, ya que en caso contrario, se podría postular que el contenido de  $\text{F}^-$  en agua tendría que ir aumentando en el sentido del flujo. Así, en contra a lo sugerido por la dirección de flujo, un mayor contenido de  $\text{F}^-$  se presenta en el N y NE de la región en estudio, en los pozos Paseos de Ayala 1 y 2, Tenextepango, Leopoldo Heredia, La Joya y el agua que descarga en el manantial Agua Hedionda, con 1.5, 1.9, 1.05, 1.09 y 1.30 mg/L de  $\text{F}^-$  respectivamente; su temperatura  $>25^\circ \text{C}$ . El agua obtenida de los manantiales y pozos restantes tiene de 0.2 a 0.8 mg/L de  $\text{F}^-$  y en general su temperatura es  $<25^\circ \text{C}$  (Tabla 1). Es importante notar que los pozos Paseos de Ayala 1, 2, Tenextepango,

Leopoldo Heredia y La Joya, operan de forma ininterrumpida, mientras que los demás pozos operan nueve hr/día. La relativa alta temperatura de estos pozos se considera evidencia de que un régimen de operación con un abatimiento continuo puede estar resultando en la inducción de agua de un flujo que tiene un recorrido más profundo reflejado también por una mayor salinidad. En efecto, la temperatura del agua subterránea registrada en campo permite establecer dos intervalos: el primero de 20 a 25° C y el segundo de 25 a 30° C. Con base en esos intervalos de temperatura, y considerando criterios de Van-Lanen y Carrillo (1998); Carrillo *et al.*, (2002); Varela (2011); Tóth (2000), quienes sugieren la existencia de dos sistemas de flujo subterráneo; el primero de tipo local-intermedio, captado por flujo horizontal en los pozos que extraen agua solo algunas horas al día, y el segundo de tipo intermedio y regional, resultado de la inducción de flujos más profundos hacia la zona de producción de los pozos que extraen agua sin interrupción. Al analizar conjuntamente la variación en la temperatura en el agua extraída, con el tiempo de bombeo en los pozos y la distribución espacial del contenido de F<sup>-</sup> resultante, sugiere que los pozos Paseos de Ayala 1 y 2, Tenextepango, L. Heredia y La Joya, extraen agua de un flujo subterráneo más profundo con respecto al agua extraída por los pozos restantes. Situación similar se presenta en el agua que se descarga en los manantiales aquí analizados (Tabla 1), esto sugiere que el agua de descarga en dichos manantiales también se asocia a los sistemas de flujo antes mencionados. Esta hidrodinámica subterránea es resultado del tiempo de bombeo de los pozos ya que esto origina una disminución continua de la presión en la superficie piezométrica que induce el ascenso de flujos de agua profunda, en el cual su contenido de F<sup>-</sup> es mayor que en los sistemas de flujo más fríos y someros (Carrillo *et al.*, 2002). Condiciones similares de flujo vertical ascendente como respuesta de inducción a la extracción han sido documentadas en otras regiones Volcánicas de México por Carrillo *et al.* (1996, 2002), Ortega (2009); Huízar *et al.* (2004). Este comportamiento hidrodinámico e hidrogeoquímico en la región estudiada es contrario a lo que usualmente se espera si se considera que el flujo de agua a un pozo solo ocurre en el plano horizontal, lo cual no explica la evolución geoquímica (*ie*, aumento de F<sup>-</sup> en el agua extraída). Esto corrobora, por un lado, la presencia de componentes verticales de flujo ascendente inducidos por nuevas condiciones Hidrodinámicas de flujo radial al pozo en 3-D. Respuesta que se hace más evidente por efectos de diferencia de densidad del agua involucrada (el agua caliente subyacente tiende a ascender). Por el otro, ratifica que hacia los pozos se produce una mezcla de al menos dos sistemas de flujo de calidad contrastante, resultado de, entre otras, el tiempo de extracción. En la Tabla 1 se observa que el contenido de F<sup>-</sup> en el agua subterránea es mayor cuando en ésta la cantidad de Ca<sup>2+</sup> es menor, y viceversa; también que a mayor concentración de F<sup>-</sup> corresponde un alto contenido de Na<sup>+</sup>. Esto evidencia una estrecha relación entre las concentraciones de Ca<sup>2+</sup> y F<sup>-</sup> en el agua, que es de esperarse debido a la afinidad del F<sup>-</sup> por el Ca<sup>2+</sup>, ya que de acuerdo con Whittemore *et al.* (1993), Bardsen *et al.* (1996), Gupta *et al.* (1999), Earle y Krogh (2004); Kim (2005)



y Chae *et al.* (2006a) estos iones se unen para formar  $\text{CaF}_2$ , lo cual precipita; así, la tendencia es que el contenido de  $\text{F}^-$  en agua subterránea se incremente cuando decrece el contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  en solución. En experimentos sobre la solubilidad de fluorita y de calcita, Shen *et al.* (1989) demostraron que el contenido de  $\text{F}^-$  en el agua subterránea es bajo en un ambiente ácido, cambia en situación neutral y es mayor en un ambiente alcalino. Lo anterior explica por qué al correlacionar el contenido de  $\text{F}^-$  con aquél de los aniones y cationes del agua aquí analizada, resulta que el coeficiente de correlación entre  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{F}^-$ , es pequeño, en cambio ese coeficiente es grande en relación con  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , y temperatura, que son parámetros que influyen en la disolución del  $\text{F}^-$ . Asimismo, a mayor contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  habrá una cantidad de  $\text{F}^-$  acomplejándose, la cual al precipitar como  $\text{CaF}_2$  disminuirá el  $\text{F}^-$  disuelto en el agua, ya que de acuerdo con Hem (1985), Saxena y Amed (2001), y Rafique *et al.* (2009) el  $\text{Ca}^{2+}$  limita la concentración presente de  $\text{F}^-$ .

Tabla 1. Componentes químicos del agua subterránea en Agua Hedionda (2014).

Tabla 1. Composición química del agua subterránea en la región de Tenextepango, Morelos

Muestra No.	Nombre sitio	°C	pH	$\text{Ca}^{2+}$ mg/L	$\text{Mg}^{2+}$ mg/L	$\text{Na}^+$ mg/L	$\text{K}^+$ mg/L	$\text{Cl}^-$ mg/L	$\text{HCO}_3^-$ mg/L	$\text{SO}_4^{2-}$ mg/L	$\text{NO}_3^-$ mg/L	$\text{F}^-$ mg/L
T-1	A. Hedionda M	25.80	6.50	421.241	127.923	296.792	16.148	74.466	890.075	948.790	77.513	1.30
T-2	Aneneuilco P	22.30	6.90	44.600	23.108	94.452	15.104	94.547	217.168	80.117	20.000	0.30
T-3	Atotonilco M	33.31	7.10	70.100	24.332	114.724	15.327	70.069	278.450	153.055	20.029	1.20
T-4	Axocoche M	22.43	7.80	78.980	12.461	77.094	32.158	54.625	238.353	138.589	6.542	0.63
T-5	Buenavista M	24.00	7.22	62.244	24.535	114.586	15.564	78.202	354.210	82.823	41.733	0.84
T-6	Chinameca 5 P	25.90	7.40	74.126	20.200	93.580	28.383	54.580	398.160	85.234	15.875	0.45
T-7	Chinameca 4 P	25.10	7.42	83.196	22.107	78.034	21.966	49.174	406.163	84.218	6.000	0.40
T-8	El Salitre P	26.10	7.30	76.500	35.100	126.793	14.557	71.599	405.000	135.721	35.036	0.98
T-9	E.Zapata P	23.10	7.13	101.019	23.732	69.034	19.480	60.290	364.381	110.760	28.277	0.20
T-10	Jalostoc P	25.30	7.01	75.140	27.402	107.520	32.244	53.945	430.487	91.304	52.212	0.75
T-11	La Joya P	25.13	7.02	69.212	22.989	130.961	26.889	71.199	487.880	73.178	9.984	1.09
T-12	La Longaniza P	23.63	7.28	74.148	25.200	125.040	35.812	91.991	401.250	51.550	5.023	0.71
T-13	Lauro Ortega P	25.60	7.26	65.560	20.217	47.506	10.503	41.787	280.264	19.532	35.278	0.50
T-14	Leopoldo Heredia P	24.80	7.35	66.491	26.982	133.976	30.779	83.854	460.000	80.588	48.802	1.05
T-15	Palo Blanco P	25.10	7.32	27.795	16.800	73.832	10.026	70.100	200.500	18.000	9.239	0.28
T-16	P. Ayala 2 P	26.18	7.43	68.857	18.240	128.018	24.789	56.027	298.888	63.461	93.015	1.50
T-17	P. Ayala 1 P	26.14	7.42	65.791	25.402	125.396	23.577	56.027	329.393	85.175	93.015	1.50
T-18	Sn. J. Ahuchucyo P	24.90	7.71	85.690	32.120	77.430	22.066	80.473	328.010	100.310	68.769	0.60
T-19	San Vicente P	24.40	7.10	34.400	16.505	93.741	15.904	70.100	232.141	56.982	7.000	0.30
T-20	Tecomalco M	24.50	6.99	75.201	26.710	99.520	34.219	74.676	363.580	107.671	42.125	0.40
T-21	Tenextepango P	26.40	7.24	69.048	21.512	134.140	23.761	72.395	429.240	57.864	22.882	1.90
T-22	Tlaycac P	30.60	8.10	60.880	19.284	58.943	2.601	49.070	225.705	76.896	15.000	0.46

M = Manantial, P = Pozo.



<b>ARTICULO</b>	<b>Uso de isótopos ambientales y herramientas hidrogeoquímicas para evaluar la contaminación por fuentes naturales, agrícolas y domésticas en el acuífero Cuernavaca.</b>
<b>FECHA</b>	2015
<b>AUTORES</b>	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Hidrología. Subcoordinación de Hidrología Subterránea.
<b>TIPO</b>	Investigación
<b>OBJETIVOS</b>	La realización de un diagnóstico de las condiciones hidrogeológicas e hidrogeoquímicas del acuífero de Cuernavaca
<b>RESULTADOS</b>	<p>El presente estudio define la evolución de las condiciones geohidrológicas y hidrogeoquímicas en el acuífero Cuernavaca para el periodo 1995 a 2015. Las condiciones hidrogeológicas en el acuífero Cuernavaca no han cambiado significativamente en los últimos 20 años a pesar de la explotación intensiva que se presenta en este acuífero, donde se extraen a través de pozos profundos un volumen anual aproximado de 120 millones de metros cúbicos en beneficio de una población urbana de un millón de habitantes.</p> <p>Las condiciones hidrogeológicas no han variado significativamente en los últimos 20 años, se conservan los niveles piezométricos en todo el acuífero, con la única diferencia que ha disminuido la descarga natural de los manantiales que se tienen en este.</p> <p>Las condiciones hidrogeoquímicas son buenas en general para el acuífero Cuernavaca, sin embargo progresivamente se ven zonas donde están evolucionando hacia un agua más antigua, esto es, una agua que progresivamente se está enriqueciendo de sales principalmente hacia las zonas media y bajas del acuífero de Cuernavaca, se tiene evidencia de este enriquecimiento para algunas zonas y para algunos parámetros hidrogeoquímicos.</p> <p><b>Conclusiones</b></p> <p>En general los niveles piezométricos en el acuífero Cuernavaca entre los años 2011 a 2014 observan las mayores profundidades en la zona norte del acuífero y menores en la zona sur. En la región norponiente del acuífero se presentan profundidades del agua subterránea de 80 metros mientras que en la zona entre Ahuatepec a Santa Catarina se presentan profundidades cercanas a los 200 metros. En la zona de central del acuífero entre Temixco y Emiliano Zapata se presentan profundidades entre 50 a 30 metros de profundidad, mientras que en el flanco sur entre Xochitepec a Tetecalita se presentan las profundidades más someras entre 30 a 20 metros de profundidad. La elevación del agua subterránea registrada en el mes de mayo del año 2011 en el</p>

acuífero Cuernavaca presenta elevaciones de 1,710 metros sobre el nivel medio del mar en el flanco norponiente de Cuernavaca, en la zona media del acuífero presenta elevaciones en la zona centro de Temixco de 1,200 msnm elevación que se extiende hacia la cabecera municipal de Emiliano Zapata, el cual desciende progresivamente en dirección sur hacia la zona de Xochitepec a elevaciones de 1,110 metros sobre nivel medio en la cabecera municipal de este municipio y a 1140 metros sobre el nivel medio del mar en el flanco oriental en la zona de Tetecalita del municipio de Emiliano Zapata, en condición análoga al registrado para el año 2001.

Cambios en el almacenamiento (variación del nivel estático) se encuentran descritos por González Rojas et al (2012), a través del estudio de PIEZOMETRÍA EN LOS ACUÍFEROS CUERNAVACA Y TEPALCINGO AXOCHIAPAN EN EL ESTADO DE MORELOS, publicado en el XXII CONGRESO NACIONAL DE HIDRÁULICA, realizado en ACAPULCO, GUERRERO, MÉXICO, NOVIEMBRE 2012, donde para el acuífero de Cuernavaca reportan que la evolución de niveles piezométricos de los periodos con el mayor número de pozos en común, siendo éstos el de lluvia 2002 a lluvia 2011 y de estiaje 2003 a estiaje 2012, observan que no existen variaciones significativas en estos niveles por lo que lo catalogan como un acuífero en EQUILIBRIO. La evaluación piezométrica para el periodo del año 2001 a 2014, define que existen variaciones en los niveles piezométricos  $\pm 30$  en el acuífero Cuernavaca para este periodo de tiempo, pero que en la zona de abatimiento se debe a registro permanente del bombeo intensivo en las zonas urbanas por que los pozos en esas zonas operan 24 horas al día y generan un cono de abatimiento permanente de estas magnitudes.

La evolución hidrogeoquímica en el acuífero Cuernavaca durante los años 1995 al 2015 en general muestra que la calidad hidrogeoquímica en todo el acuífero la definen como un agua de excelente calidad para consumo humano. El agua subterránea presente en el acuífero evoluciona de un agua bicarbonatada cálcica a bicarbonatada mixta y finalmente a sulfatada cálcica.

El incremento progresivo en las concentraciones de iones a partir de las zonas de recarga, ubicadas en la porción Norte del acuífero, hacia las zonas de tránsito y descarga en la porción media y de transferencia en la porción Sur del acuífero es genérico para los iones mayores en general y para los parámetros medidos *in situ*. Dicha evolución hidrogeoquímica genera un enriquecimiento de iones al circular el agua a través del subsuelo, que en términos generales puede definirse por ejemplo con contenidos de sólidos totales disueltos de 50 a 100 mg/l al Norte del valle, en la porción intermedia con contenidos entre 200 a 400 mg/l y al final del acuífero de 400 a 600 mg/l.

Existen diferencias locales en la distribución de estos iones mayores y

parámetros *in situ*, que hacen suponer que la intensidad del bombeo local promueve la movilidad hacia estas zonas, de aguas enriquecidas de sales en solución de estratos más profundos del acuífero libre.

Para los iones menores se establecen niveles de referencia en el acuífero de Cuernavaca para los elementos de: Ag, Al, As, Au, Br, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf, Hg, Ho, I, In, K, La, Lu, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Nd, Ni, Os, P, Pb, Pd, Pr, Pt, Re, Ru, S, Sb, Se, Si, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr, los cuales se presentan en la sección de anexos del presente documentos.

Como ejemplos de la movilidad de los iones menores en el acuífero de Cuernavaca 2015 se utilizan a los iones Flúor, Arsénico, Manganeseo y Fierro en diferentes secciones del presente estudio. La movilidad de estos en el acuífero definen que se encuentran en concentraciones que no ponen en riesgo la salud humana, excepto para el Arsénico en la porción sur del acuífero en la zona del crucero de Tezoyuca. La distribución de arsénico ( año 2015 (julio – agosto), presentó concentraciones menores de 25 □g/l en la mayor parte del acuífero, que representan a concentraciones muy bajas y que se encuentran muy por debajo del límite máximo permisible de este elemento de 25 mexicana 127 en materia de agua potable, en los pozos y manantiales siguientes: Acatlipa 3 (El Rayo), DIF Temixco, Los Compadres, Pueblo Viejo, Alta Palmira, Manantial Palo Escrito, Texcal, Procivac, Manantial Chapultepec, Lomas de Cuernavaca, Villas del descanso, ETA, Atlacomulco, Manantial las Fuentes, Chipitlán 3, Melchor Ocampo, Zona Militar, Villa Santiago, San Andrés de la Cal, Granjas Mérida, Los Sabinos, Manantial Palo Bolero, Las Flores, Tetecalita, Alcanfores, Planchuelas, Xochitepec 1, Electricistas y Paseos del Río.

Concentraciones superiores a 25 □g/l de arsénico para los meses de julio agosto del 2015 se presentaron en fueron los siguientes: Manantial San Ramón, Sámano, Lázaro Cárdenas y Unidad Habitacional Tezoyuca, al sur de la cabecera municipal de Emiliano Zapata y al oriente de la cabecera municipal de Xochitepec, en la zona aledaña entre los cruceros de las localidades de Chiconcuac y Tezoyuca.

Se observa tres patrones de enriquecimiento estacional de arsénico para los años 2013 a 2015; el primero con enriquecimiento de arsénico en la temporada de lluvias (pozo Sámano), el segundo patrón con enriquecimiento de arsénico en la temporada de estiajes (UH Tezoyuca) y el tercer patrón con enriquecimiento creciente de arsénico (manantial San Ramón). Ente enriquecimiento se asocia principalmente para los pozos de agua potable siguientes: Unidad Habitacional Tezoyuca, Sámano, Lázaro Cárdenas, El Sauce y Real Tezoyuca.

Las mediciones de los isotopos estables de Deuterio ( Oxígeno 18 (( de Cuernavaca en julio agosto del 2015, se asocian en correspondencia con la Línea Meteórica Global. Los resultados de muestras de pozos y manantiales del acuífero de Cuernavaca 2015 se calibraron con estándares certificados e internos versus laboratorios externos de la Universidad de Arizona (USA) y de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA).

Las mediciones de los isotopos estables de Deuterio ( Oxígeno 18 (( julio agosto del 2015, en 36 muestras de pozos y manantiales, definen una alta correlación entre estos ( $R^2 = 0.9014$ ), en correspondencia con la Línea Meteórica Global se comparan estos resultados con mediciones previas realizadas en este acuífero por TACSA 1981.

En la distribución de deuterio ( Cuernavaca para el año 2015, muestra un gradiente de mayores concentraciones de deuterio hacia las zonas de recarga y menores concentraciones de deuterio hacia las zonas centro y sur del acuífero. Mientras que en la distribución de Oxígeno 18 (O18, ‰) presenta una distribución análoga a la distribución de deuterio ( acuífero del valle de Cuernavaca para el año 2015, muestra un gradiente de mayores concentraciones de oxígeno 18 hacia las zonas de recarga y menores concentraciones de oxígeno 18 hacia las zonas centro y sur del acuífero.

En el presente estudio se utiliza la concentración de nitratos como un criterio relevante para definir la calidad del agua y su evolución hidrogeoquímica para el acuífero Cuernavaca.

En general se observa que la concentración de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ , mg/l) para el año 1995, presentó concentraciones menores de 5 mg/l hacia la porción oriente del acuífero, donde predominan rocas de la Formación Chichinautzin, compuestas principalmente por basaltos fracturados. Mientras que la porción poniente mostró los niveles más altos de nitratos dependiendo del área de la zona urbana con concentraciones mayores de 10 a 20 mg/l, predominando las mayores concentraciones de 20 a 30 mg/l en la zona urbana de Temixco Acatlipa, observándose la mayor concentración de nitratos en el pozo profundo Los Sabinos entre el municipio de Cuernavaca con Temixco.

Para el año 2015, la concentración de nitratos conserva las concentraciones menores en el flanco norte y sur del acuífero, hacia las zonas con menor grado de urbanización. La mayor parte dela zona urbana de Cuernavaca, Jiutepec, Temixco, Emiliano Zapata y norte de

Xochitepec muestra un incremento en la concentración de nitratos a valores entre 10 a 20 mg/l. La zona de Temixco Acatlipa que presentó concentraciones de 20 a 30 mg/l en el año 1995, se extiende al oriente al año 2015 hacia la cabecera municipal de Emiliano Zapata y hacia la zona sur hasta el fraccionamiento Granjas Mérida y la zona de los desarrollo habitacionales Geo No. 4 y 5 al nororiente del cruce de Tezoyuca. Las mayores concentraciones de nitratos para el año 2015 se presentaron en el pozo profundo del nuevo desarrollo habitacional ubicado al poniente de la cabecera municipal de Emiliano Zapata en el pozo Fraccionamiento del río.

Finalmente se presenta el comparativo entre variables químicas que permitan identificar reacciones oxidación-reducción que pudieran estarse presentando en el acuífero Cuernavaca y que pueden influir principalmente en la movilidad – enriquecimiento de iones menores, tales como es el caso del Arsénico y Nitratos, principalmente.



<b>ESTUDIO</b>	<b>Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuernavaca (1701), estado de Morelos.</b>
<b>FECHA</b>	Diciembre de 2013
<b>AUTORES</b>	CONAGUA
<b>TIPO</b>	Estudio
<b>OBJETIVOS</b>	Mediante estudios técnicos se especifique el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar para que se publique la disponibilidad que servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.
<b>RESULTADOS</b>	<p>Se reporta una Disponibilidad de 7, 656,070 m<sup>3</sup>/año.</p> <p>Con respecto a los manantiales, reportan un descenso paulatino en sus descargas, debido probablemente a la interferencia de nuevas perforaciones.</p> <p>Entre los años 1970 a 1981 se observó una reducción en la descarga de los manantiales del 32.5% mientras que para el periodo de 1970 a 1980 representan una reducción del 40.2%.</p> <p>En la evolución de las descargas de los manantiales localizados en el Acuífero Cuernavaca de 1970 a 1980, el Manantial San Ramón ya mostraba una evolución negativa desde 1998.</p>

<b>ESTUDIO</b>	<b>Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuautla-Yautepec (1702), estado de Morelos.</b>
<b>FECHA</b>	Diciembre de 2013
<b>AUTORES</b>	CONAGUA
<b>TIPO</b>	Estudio
<b>OBJETIVOS</b>	Mediante estudios técnicos se especifique el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar para que se publique la disponibilidad que servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.
<b>RESULTADOS</b>	Se reporta una Disponibilidad de 8, 844,375 m <sup>3</sup> /año.  Con respecto a los manantiales, reportan 40 aprovechamientos y un caudal en sus descargas de 103 Mm <sup>3</sup> /año.

<b>ESTUDIO</b>	<b>Estudio geohidrológico de la zona de manantiales en los municipios de Cuautla, Ayala y Yauatepec, en el estado de Morelos</b>
<b>FECHA</b>	2013
<b>EMPRESA</b>	Comisión Nacional del Agua. Organismo de Cuenca Balsas. Dirección Técnica. Subdirección de Aguas Subterráneas
<b>TIPO</b>	Estudio
<b>OBJETIVO</b>	<p>Definir y delimitar en planos las zonas de protección de calidad y cantidad del agua de los manantiales ubicados en los municipios de Cuautla, Ayala y Yauatepec, en el estado de Morelos.</p> <p>Objetivos Específicos</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Delimitar las áreas de protección de cada manantial para evitar la contaminación y la reducción de sus caudales.</li> <li>2. Definir dentro de cada zona de protección, los aprovechamientos existentes que interfieren con el gasto de los manantiales y su situación jurídico-administrativa.</li> <li>3. Proponer acciones para solucionar la interferencia que los aprovechamientos subterráneos causan a los manantiales.</li> <li>4. Definir indicadores de seguimiento y evaluación para el monitoreo de los manantiales, tanto en su cantidad como en su calidad.</li> <li>5. Proponer acciones complementarias de sistemas de instrumentación, medición y monitoreo, relacionados con el manejo sustentable de los manantiales.</li> </ol>
<b>RESULTADOS</b>	<p>En el estudio se definen las zonas de protección de manantiales tanto de calidad como de cantidad, utilizando la metodología de radio fijo calculado en función del tiempo de tránsito, éste método básicamente divide la zona de protección en tres áreas:</p> <p>La “Zona A” que es la zona inmediata de restricciones absolutas, se delimita con un tiempo de tránsito de 1 a 25 días, para efectos prácticos es una zona que hay que resguardar mediante una cerca perimetral y puede tener entre 5 y 20 m de diámetro aunque puede ser mayor dependiendo del tamaño del manantial.</p> <p>La “Zona B” o Zona Intermedia de restricciones máximas, la cual viene hacer una superficie en donde se requiere restringir actividades peligrosas para la protección de las aguas frente a una contaminación antropogénica de cualquier tipo. Se delimita para prevenir la contaminación bacteriológica, imponiendo que el tiempo de tránsito hasta el punto de captación sea mayor de 50 días, la distancia se calcula teniendo en cuenta los parámetros hidrogeológicos y el régimen de flujo del manantial. Estas dos primeras zonas tienen como objetivo proteger a los manantiales en cuanto a su calidad.</p> <p>La “Zona C” o zona de protección de la cantidad del agua, tiene como objetivo proteger a los manantiales para que no se vean afectados en sus caudales, restringiendo el aprovechamiento de aguas subterráneas</p>

mediante pozos o norias aguas arriba del manantial. Se define con un tiempo de tránsito de varios años, su geometría se determina mediante la zona de aportación subterránea; su límite puede coincidir con la cuenca vertiente si coinciden los límites de las cuencas de las aguas superficiales y de las subterráneas. Las restricciones en esta zona no son tan severas como en la zona intermedia, en cuanto a la preservación de la calidad del agua.

La definición de las zonas de protección para cada manantial requiere de varios parámetros para su cálculo, entre los que destacan: conductividad hidráulica, gradiente hidráulico, gradiente topográfico (pendiente del terreno) y porosidad cinemática, entre los más importantes.

Utilizando la metodología de radio fijo calculado en función del tiempo de tránsito se determinaron las zonas de protección A, B y C para 55 manantiales de los municipios morelenses de Cuautla, Ayala y Yauatepec.

Para este estudio se censaron 55 manantiales, se realizaron 85 mediciones piezométricas en pozos aledaños a los manantiales, localizados a una distancia no mayor a 2.5 km; se tomaron muestras de agua en 14 manantiales, en 9 pozos y en una noria, y en laboratorio se realizaron los análisis de aniones y cationes principales, además de dureza total, sólidos disueltos totales, boro y arsénico. Se reinterpretaron 20 pruebas de bombeo. En gabinete se determinó la geología por donde fluye el agua subterránea de los manantiales, se delimitaron las cuencas potenciales de aportación de agua a los manantiales y la infiltración potencial en las mismas. Con las pruebas de bombeo, la hidrogeoquímica, los mapas geológicos, perfiles geofísicos y cortes litológicos se determinó la conductividad hidráulica promedio para cada manantial y la porosidad **cinemática**. Con la configuración de isopiezas se determinó la dirección del flujo subterráneo y el gradiente hidráulico, en los manantiales donde no existe información piezométrica el gradiente hidráulico se obtuvo por medio de la pendiente del terreno.

La metodología para definir el radio de protección de las Zonas A, B y C, es similar lo único que cambia es el tiempo de tránsito a emplear. Por ejemplo, para definir la "zona de protección B" del manantial Michate, el primer paso es calcular la velocidad de Darcy (q), mediante la siguiente expresión matemática:  $q=Ki$ , donde q= Velocidad de Darcy (m/día), K = Conductividad hidráulica (m/día), i= Gradiente Hidráulico.

El siguiente paso es calcular la velocidad real, considerando velocidad de Darcy y porosidad eficaz.

Finalmente el radio (R) de la "zona de protección B" se calcula mediante la siguiente expresión:  $R= v \times t$  donde: R = radio (metros), v= Velocidad real (m/día) y t = tiempo de tránsito (días)



Para el ejemplo del manantial El Michate se utilizó una conductividad hidráulica de 8.8 m/día, el agua circula a través de basaltos fracturados sobre arcillas y conglomerados del grupo Balsas, la porosidad eficaz es de 10%, el gradiente hidráulico es de 0.01559 y el tiempo de tránsito aplicado es de 50 días. Haciendo los cálculos descritos párrafos arriba se obtiene un radio de protección para la Zona B de 69 m. Para la Zona C el cálculo indica un tiempo de tránsito de 3500 días que al aplicarlo da un radio mayor a la cuenca potencial de aportación, por lo que en estos casos se opta por seleccionar toda la cuenca de aportación donde el límite de la “zona de protección C” coincide con la cuenca vertiente.

**Las principales conclusiones de este estudio fueron las siguientes:**

1. El área total de estudio para el análisis del balance hidroclimatológico es de 1416.8 km<sup>2</sup>
2. En campo se visitaron y geoposicionaron 65 manantiales. 24 del Municipio de Ayala, 24 de Cuautla, 13 de Yautepec, 1 de Tepalcingo y 3 de Tlayacapan.
3. Se visitaron 114 pozos, los cuales se localizan a menos de 2.5 km de distancia de los manantiales estudiados, con el fin de medir la profundidad al nivel estático. Solo en 85 de ellos se puso medir el nivel estático.
4. Durante la visita a los manantiales se midió la temperatura, el pH, la conductividad hidráulica y los sólidos disueltos totales. Lo cual fue de utilidad para definir de una manera subjetiva, si el agua subterránea que aflora en los manantiales es de reciente infiltración o no. Se encontró que los manantiales que se ubican en los Municipios de Yautepec, con excepción de los manantiales Cúpula de Oaxtepec y Poza de las Tortugas, presentan un pH ligeramente ácido (menor a 7) y concentraciones de sólidos disueltos totales menor a 300 mg/l, todo esto es indicativo de agua de muy reciente infiltración. Por los que respecta a los manantiales ubicados en el municipio de Cuautla y Yautepec, la mayor parte de ellos presentan pH mayor a 7 y concentraciones de sólidos disueltos totales mayor a 500 mg/l, esto nos sugiere que el agua ha circulado durante un mayor tiempo a través de las formaciones acuíferas.
5. La campaña piezométrica realizada en los pozos de la red piezométrica y en los pozos aledaños a los manantiales, se utilizó para generar la configuración de la elevación del nivel estático, la cual a su vez sirvió para definir la dirección del flujo subterráneo, encontrándose que la dirección preferencial es de noreste a suroeste. Por otro lado, la configuración de isopiezas también se empleó para determinar el gradiente hidráulico que se presenta en las inmediaciones de los manantiales, dato que es requerido para la determinación de los radios de las zonas de protección.
6. A partir del modelo digital del terreno y de la red hidrográfica, se delimitaron las cuencas vertientes o cuencas potenciales de aportación

	<p>de agua, de los 65 manantiales. En total se delimitaron 36 cuencas, aunque básicamente 4 de ellas no aportan agua de manera evidente a los manantiales, por lo tanto solo 32 cuencas alimentan de manera directa a los 65 manantiales censados.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>7. Los cauces principales perennes dentro de la zona de estudio son el Río Yautepec y el Río Cuautla. Diez de las subcuencas delimitadas vierten sus escurrimientos al Río Yautepec y las restantes 26 subcuencas lo hacen al Río Cuautla.</li> <li>8. La precipitación calculada del análisis de isoyetas, con datos del periodo de 1986 al 2008 indica que la precipitación es mayor en las cuencas vertientes de la porción norte, donde se manifiestan precipitaciones anuales de 950 a 1368 mm. Mientras que en las cuencas de la porción central y sur, la precipitación anual es de 740 a 950 mm.</li> <li>9. Por lo que respecta a la temperatura media anual, está es más fría en las cuencas de la porción norte de la zona de estudio donde el rango es de 12.6 hasta 20°C; mientras que en las cuencas de la porción central es de 20 a 22.5°C y en las cuencas de la porción sur es de 22.5 a 23.8°C.</li> <li>10. De la superficie total del área de estudio (1417 km<sup>2</sup>), el 72% es superficie agrícola, el 13% bosque, el 7% selva, el 4% pastizal, el 2% Área urbana y el 1% área sin vegetación.</li> <li>11. El análisis del balance hidroclimatológico por subcuenca, indica láminas de infiltración de entre 35.3 mm a 262.2 mm. Siendo las subcuencas con mayor lámina de infiltración las siguientes: Subcuenca 2 con 262 mm, que alimenta a los manantiales Balneario Itzamatitlán, El Recreo, Ejido Itzamatitlán, Poza Las Tortugas y manantial M24007; Subcuenca número 9 con una infiltración de 178.7 mm, que alimenta a los manantiales El Almeal, Santa Rosa, Los Sabinos, Los Amates, San Cristóbal, Agua Dulce y La Mora; Subcuenca 5 con una lámina de infiltración de 156.8 mm, que aporta agua a los manantiales del Balneario El Bosque. La subcuenca 1 con una lámina de 136 mm que aporta agua al manantial El Michate.</li> <li>12. Por su parte, los volúmenes infiltrados en las subcuencas de análisis van de 0.023 hm<sup>3</sup> (subcuenca No. 31, manantial Huichila 1) hasta 51.955 hm<sup>3</sup> (Subcuenca No. 9, Manantiales El Almeal, Santa Rosa, Los Sabinos, Los Amates, San Cristóbal, Agua Dulce y La Mora). Queda claro que entre mayor es el volumen infiltrado en la subcuenca vertiente, los manantiales asociados a esa subcuenca se encontrarán menos vulnerables a la interferencia causada por la extracción de agua subterránea a través de pozos y norias; mientras que las subcuencas con una reducida infiltración serán más vulnerables si pozos y norias comienzan a extraer agua del subsuelo en la misma subcuenca.</li> <li>13. En cuanto a la geología que aflora en la zona de análisis, se tienen: rocas vulcano-sedimentarias en la porción centro norte del acuífero, principalmente coladas basálticas, escoria, tefra, tobas y cenizas de la Formación Chichinautzin. Lahares y abanicos aluviales de la Fm.</li> </ol>
--	---

	<p>Cuernavaca en la porción centro-oeste, Lahares de la Fm Tepoztlán en la porción centro-norte. Lutitas, yesos y conglomerados del Grupo Balsas en la porción centro poniente y por debajo de los materiales basálticos y de los lahares. Afloran areniscas con intercalaciones de lutitas de la Formación Mexcala, en la porción centro-poniente de la zona de estudio y Rocas carbonatadas de la Fm. Morelos en la porción centro – poniente. Afloran andesitas y tobas andesíticas en la porción sur y riolitas y tobas riolíticas (Riolita Tilzapotla) en la porción suroeste de la zona de estudio.</p> <ol style="list-style-type: none"><li>14. Se determinó la litología por donde circula el agua subterránea de cada uno de los 65 manantiales, utilizando el plano geológico del Servicio Geológico Mexicano, de perfiles geofísicos y de cortes litológicos de pozos.</li><li>15. Se reinterpretaron 20 pruebas de bombeo y de acuerdo a la ubicación de cada pozo, se le asignó la posible litología de donde se está extrayendo el agua subterránea.</li><li>16. Se hicieron extensivas las conductividades hidráulicas obtenidas de las pruebas de bombeo, hacia las zonas donde afloran los manantiales en base a la similitud de litologías.</li><li>17. A cada manantial se le asignó la probable litología por donde circula el agua subterránea, y con base en esa litología se le asignó una conductividad hidráulica y una porosidad eficaz.</li><li>18. Para cada manantial se determinó el gradiente hidráulico, con base a la configuración de isopiezas. En aquellos manantiales donde no existe información piezométrica, el gradiente hidráulico se obtuvo de la pendiente del terreno.</li><li>19. Se analizaron fisicoquímicamente 24 aprovechamientos de agua subterránea (14 manantiales, 9 pozos y una noria).</li><li>20. En cuanto a su fase aniónica, 8 manantiales manifestaron un tipo de agua bicarbonatada, 3 manantiales tienen un tipo de agua sulfata (Itzamatitlán 1, Agua Hedionda 1 y Poza de las Tortugas) y 4 manantiales presenta una mezcla de agua en diferente proporción de bicarbonato y sulfato (Agua Limpia, Axocoche, Cúpula de Oaxtepec y Michate).</li><li>21. En cuanto a su fase catiónica, 4 manantiales tienen un tipo de agua cálcica, 3 magnésica y 7 mixta (calcio, magnesio y sodio en diferente proporción)</li><li>22. Por lo que respecta a los pozos, en 9 de ellos su fase aniónica es bicarbonatada y solo en el pozo Estadio Oaxtepec su fase es mixta (bicarbonatada-sulfatada). La fase catiónica predominate es mixta (mezcla de calcio, sodio y magnesio en diferente proporción), El agua del pozo los amates es cálcica y las de los pozos 5 de Diciembre y Yautepec 2 es magnésica.</li><li>23. Existen 3 principales unidades hidrogeológicas en el sistema hidrogeológico Cuautla-Yautepec. La primera lo constituye una serie de acuíferos intermontanos y/o colgados que se pueden presentar en basaltos, materiales vulcano-sedimentarios, sedimentos aluviales y</li></ol>
--	--

	<p>lahares. Cuando afloran estos materiales funcionan como zonas de recarga. En esta unidad es donde se localizan la mayor parte de los manantiales. La segunda es un acuitardo y se presenta en materiales de las formaciones Balsas (conglomerado, yesos y lutitas) y Mexcala (areniscas y lutitas). Cuando están fracturados pueden transmitir agua. La tercera unidad es un acuífero regional profundo en calizas de las formaciones Morelos y Cuautla.</p> <p>24. El funcionamiento hidrogeológico de los 65 manantiales estudiados, es muy similar. Parte del agua que llueve se infiltra en la superficie del terreno; dentro del subsuelo puede tomar tres caminos el agua infiltrada, el primero de ellos es que durante su infiltración el agua se tope con una unidad hidrogeológica impermeable y por lo tanto el flujo subterráneo seguirá en una dirección casi paralela a la unidad hidrogeológica impermeable, aflorando en forma de manantial cuando esa unidad impermeable aflore en la superficie del terreno. Este funcionamiento es el que se presenta en la mayor parte de los manantiales que se ubican en la porción norte de la zona de estudio, donde el agua se infiltra a través de los basaltos y lahares fracturados y llega hasta donde se presenta una unidad de lutitas, cuando estas lutitas (que se encuentran por debajo de los basaltos y lahares), aflora en la superficie el agua subterránea también lo hace formando manantiales.</p> <p>25. El siguiente camino que puede tomar el agua infiltrada es que a través de grietas y fallas se infiltre hasta zonas más profundas, justo donde se localizan los materiales del grupo balsas (yesos, lutitas y conglomerados) y al igual que en el caso anterior, cuando en su descenso el agua subterránea encuentra una unidad litológica impermeable, el flujo seguirá de manera paralela a esa unidad impermeable (dirección noreste-suroeste), hasta aflorar en la superficie del terreno (caso de manantiales Poza de las Tortugas, Cúpula de Oaxtepec, Agua Hedionda). O puede ser que antes de aflorar el agua a la superficie, ésta se mezcle con agua que ha circulado por unidades litológicas más someras como las del primer caso, de ahí que se tenga mezcla de familias de agua, como sucede con los manantiales El Michate e Itzamatlán 1 y la mayor parte de los manantiales de Cuautla y Yautepec.</p> <p>26. El tercer caso es cuando el agua que se infiltra a través de profundas grietas y fallas, llega hasta las calizas de las formaciones Morelos y Cuautla, disolviendo éstas rocas y asimilando el carbonato y magnesio de las mismas y aflorando en forma de manantiales en las partes más bajas, como en el caso del manantial Las Estacas (localizado fuera del área del estudio).</p> <p>27. El método empleado para delimitar las 3 zonas de protección para cada manantial fue el de radio fijo con diferentes tiempos de tránsito, según la zona a delimitar.</p> <p>28. La primera zona de protección es la "A" o zona de protección inmediata. El objetivo principal de esta zona es impedir el acceso de</p>
--	--

animales y personas no autorizadas que pudieran contaminar directamente las captaciones. se ha definido en base a un criterio de tiempo de tránsito de 1 a 25 días. Los radios obtenidos para los manantiales van de 10 a 25 m, dependiendo de la extensión del manantial

29. La segunda zona de protección es la “B” o zona intermedia de restricciones máximas. Su objetivo es proteger frente a la contaminación bacteriológica. Comprende el área en la cual una eventual contaminación en la misma alcanzaría la captación de abastecimiento en un tiempo de tránsito inferior a 50 días. Los radios obtenidos para esta zona en los manantiales analizados van de 20 a 748 m.
30. La tercera zona de protección es la “C” o zona de protección contra afectaciones en cantidad. La zona C, en la que están englobadas las dos anteriores, tiene por objetivo garantizar que no disminuyan los caudales de agua de los manantiales frente a todo riesgo de afectación cuantitativa. Por lo general se emplea un tiempo de tránsito de 3500 días, pero pudiera ser mayor o incluso menor si la cuenca vertiente es muy reducida. Los radios obtenidos para esta zona en los manantiales analizados van de 974 m hasta incluso proteger toda la cuenca vertiente.
31. Al unir las zonas de protección “C” de cada uno de los manantiales se obtuvieron 11 áreas, donde no se podrán dar concesiones de agua subterránea, cuando el diseño de los pozos indiquen que se extraerá la misma agua que está alimentando a los manantiales.
32. Al realizar un balance infiltración - volumen concesionado en cada una de las 36 subcuencas de análisis, se obtuvo que en 12 de ellas el volumen concesionado de agua subterránea es mayor a la infiltración y por lo tanto no deben darse concesiones. En 14 subcuencas el balance da entre 0 y 5 hm<sup>3</sup>, por lo tanto tampoco es factible en estas cuencas dar nuevas concesiones de agua subterránea. Solo en 10 subcuencas se tiene que el volumen anual infiltrado es mayor que el volumen concesionado.
33. Solo la tercera parte del volumen obtenido del balance infiltración – vol. Concesionado es factible de otorgarlo para nuevas concesiones.

A continuación se presentan las recomendaciones principales a seguir:

1. La recomendación principal en cuanto al aspecto jurídico, es que se cree la figura de zona de protección o perímetro de protección de aprovechamientos de agua subterránea y de manantiales dentro de la Ley de Aguas Nacionales. Para que exista seguridad jurídica de los usuarios o asignatarios de aguas subterráneas ante una posible merma en la cantidad o calidad de sus aprovechamientos, como consecuencia de la interferencia que otros aprovechamientos ocasionen al explotar aguas subterráneas dentro del límite de protección del aprovechamiento asignado.



2. La delimitación de las zonas de protección de cada aprovechamiento de agua subterránea y de manantiales la deberá establecer mediante la metodología apropiada, ya sea el área técnica del organismo de cuenca o de las direcciones locales, pero en cualquier caso deberá ser aprobada por la Dirección del Organismo de Cuenca.
3. Las zonas de protección “A”, “B” y “C”, deberán incluirse en el reglamento del acuífero.
4. Para los indicadores de seguimiento de la cantidad del agua de los manantiales que se ubican en los municipios de Ayala, Cuautla y Yautepec, en el Estado de Morelos, se recomienda llevar a cabo dos campañas de aforo en los 65 manantiales por año. La primera, justo cuando éste por terminar la época de lluvia (mediados de septiembre) y la segunda cuando esté por terminar la época de estiaje (finales de mayo)

Para los indicadores de seguimiento de la calidad del agua de los manantiales que se ubican en los municipios de Ayala, Cuautla y Yautepec, en el Estado de Morelos, se recomienda llevar a cabo primeramente una campaña de muestreo del agua en los 65 manantiales, analizando todos los parámetros que sanciona la NOM127SSA1 y posteriormente, de manera anual se deberán analizar solo los parámetros que hayan rebasado los límites máximos permisibles que señala la norma, en la primer campaña.

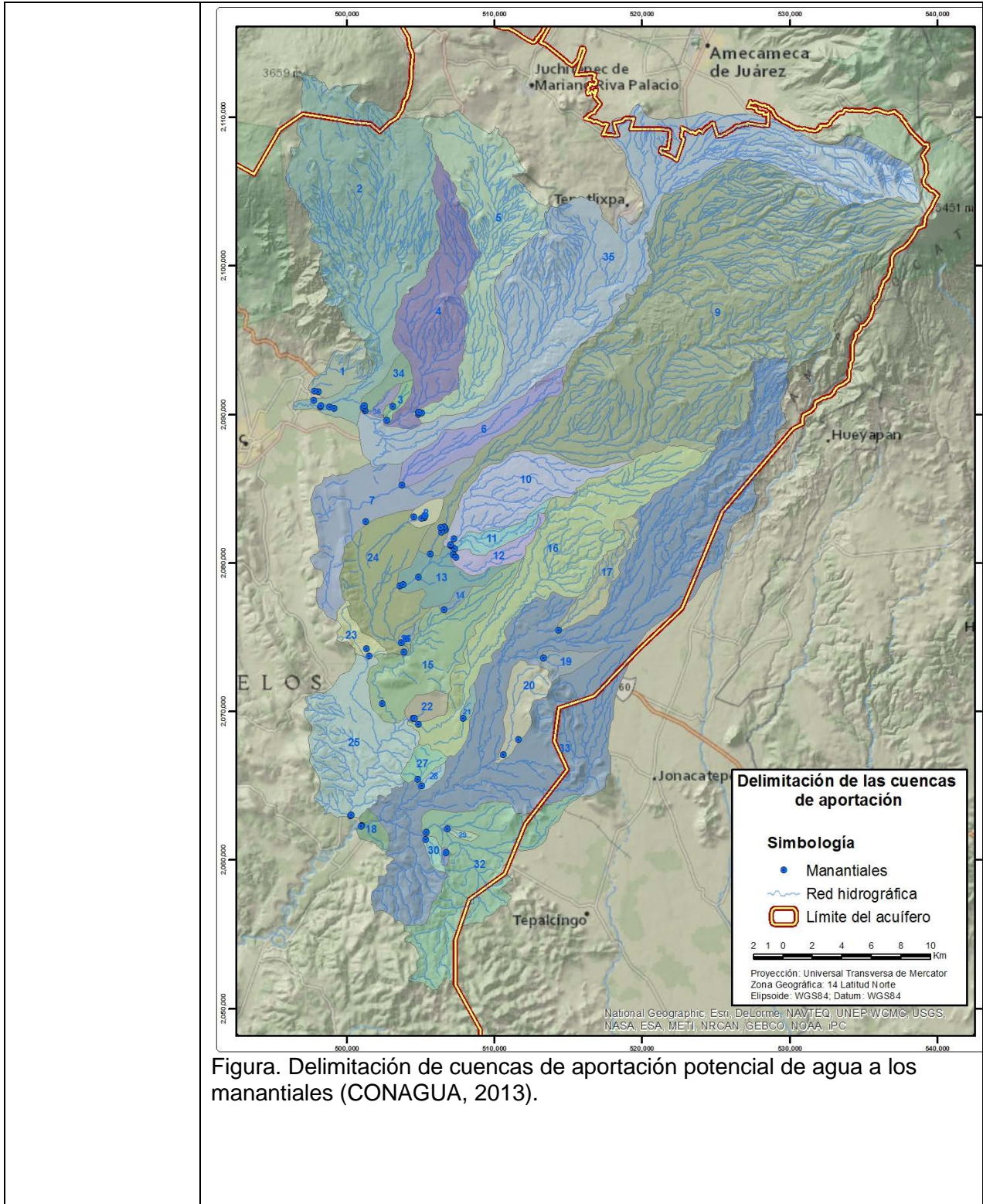


Figura. Delimitación de cuencas de aportación potencial de agua a los manantiales (CONAGUA, 2013).

Tabla. Datos generales de las cuencas de portación de agua a los manantiales (CONAGUA, 2013).

Cuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km <sup>2</sup> )	Manantiales
Cuenca 1	8.93	13.08	Manantial Michate
Cuenca 2	136.18	72.80	Balneario Itzamatlán 1 y 2, Ejido Itzamatlán, Poza Las Tortugas y s/nombre M24007
Cuenca 2bis	4.69	11.42	Balneario El Edén, Manantial Ahuilican, El Paraíso (Fraccionamiento), Los Manguitos
Cuenca 3	2.19	7.64	La Cúpula Oaxtepec, Sistema Operador Oaxtepec
Cuenca 5	71.58	60.85	Manantiales: El Bosque 1, 2, 3 y La Poza Azul
Cuenca 6	20.51	30.14	El Ojito del Polvorín
Cuenca 7	39.14	41.91	Manantial Santa Cruz (Hacienda del Hospital)
Cuenca 8	3.09	7.02	Manantial La Huancha, Taza Grande, Taza Chica y La Caja
Cuenca 9	290.88	106.22	Manantial El Almeal, Los Sabinos, Santa Rosa, Los Amates, San Cristóbal, Agua Dulce y La Mora
Cuenca 10	33.08	32.23	Manantial Tierra y Libertad, Manantial Paraíso II, Campo San Pablo I y Campo San Pablo 2
Cuenca 11	7.12	17.52	Manantial Paraíso I
Cuenca 12	7.62	17.73	Manantiales Agua Hedionda 1 y 2
Cuenca 13	13.65	23.27	Manantial Agua Azul, Manantial M24078 y M24078b
Cuenca 14	1.63	6.29	Manantial Las Arboledas
Cuenca 15	36.65	37.15	Manantial Tenextepango
Cuenca 16	77.96	72.56	Manantial Col. Loma Bonita 1
Cuenca 17	11.15	22.79	Manantial Tlayecac
Cuenca 18	234.31	157.43	Manantial Tecomalco 1 y Manantial Palo Blanco

<b>Cuenca 19</b>	<b>4.70</b>	<b>11.79</b>	Manantial Colorines
<b>Cuenca 20</b>	<b>12.15</b>	<b>18.03</b>	Manantial Huitzililla y Manantial M24169
<b>Cuenca 21</b>	<b>1.32</b>	<b>5.87</b>	Manantial San Juan
<b>Cuenca 22</b>	<b>4.60</b>	<b>8.44</b>	Manantiales Loma Bonita 2 y 3
<b>Cuenca 23</b>	<b>5.30</b>	<b>12.38</b>	Manantial Axocoche y Manantial El Colibrí
<b>Cuenca 24</b>	<b>37.36</b>	<b>33.78</b>	Manantial Balneario Agua Limpia
<b>Cuenca 25</b>	<b>50.44</b>	<b>35.64</b>	Manantiales Tecomalco 2 y 3
<b>Cuenca 26</b>	<b>1.30</b>	<b>5.52</b>	Manantiales Col. Niños Héroes y Villa de Ayala
<b>Cuenca 27</b>	<b>4.65</b>	<b>9.34</b>	Manantial El Salitre 1
<b>Cuenca 28</b>	<b>1.52</b>	<b>5.68</b>	Manantial El Salitre 2
<b>Cuenca 29</b>	<b>1.00</b>	<b>5.36</b>	Manantial Huichila 2
<b>Cuenca 30</b>	<b>2.10</b>	<b>6.85</b>	Manantial Palo Blanco 1
<b>Cuenca 31</b>	<b>0.59</b>	<b>3.32</b>	Manantial Huichila 1
<b>Cuenca 32</b>	<b>54.75</b>	<b>57.16</b>	Manantial Palo Blanco Chinameca

<b>ESTUDIO</b>	<b>Actualización geohidrológica del acuífero Cuautla-Yautepec en el estado de Morelos.</b>
<b>FECHA</b>	2010
<b>EMPRESA</b>	Universidad Autónoma de Chapingo
<b>TIPO</b>	Estudio
<b>METODOLOGIA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>i) Recopilación de la información disponible</li> <li>ii) Censo de aprovechamiento de agua subterránea</li> <li>iii) Medición piezométrica en pozos piloto</li> <li>iv) Muestreo y análisis de agua subterránea</li> <li>v) Ejecución de pruebas de bombeo</li> <li>vi) Nivelación de brocales de pozos piloto</li> <li>vii) Ejecución de sondeos electromagnéticos (TEM)</li> <li>viii) Determinación de los parámetros físicos e hidráulicos del acuífero</li> <li>ix) Formulación del Modelo Conceptual hidrogeológico</li> <li>x) Realización de balances hidrometeorológicos y de agua subterránea</li> <li>xi) Cálculo de la disponibilidad de agua subterránea</li> <li>xii) Elaboración del Sistema de Información Geográfica</li> <li>xiii) Integración del informe final</li> </ul>
<b>RESULTADOS</b>	<p>Se identificaron tres unidades hidrogeológicas: la primera con porosidad intergranular de permeabilidad primaria que es captada por los pozos y norias existentes; está formada por depósitos clásticos continentales de origen volcánico del tipo conglomerático y depósitos aluviales que rellenan los valles de Cuautla y Yautepec con espesores que varían entre 60 y 150 metros. En esta primera unidad, se pueden considerar hidrogeológicamente las rocas volcánicas consolidadas principalmente basálticas y de permeabilidad secundaria sobreyaciendo o intercalada en los materiales de porosidad intergranular, por donde circula y se almacena el agua que da origen a los manantiales que afloran en el contacto geológico de estas rocas basálticas con los depósitos clásticos continentales.</p> <p>Los balances de aguas subterráneas efectuados en el intervalo 2002-2010</p>



permiten afirmar que las descargas naturales de los manantiales no interfieren en el funcionamiento y/o comportamiento del acuífero de porosidad intergranular.

La segunda unidad hidrogeológica, definida como un “acuitardo” se asocia con los materiales del Grupo Balsas y la Formación Mexcala que se encuentran a profundidades del orden de 150 metros, formando un estrato semiconfinante que separa a la primera unidad acuífera de la tercera unidad hidrogeológica.

La tercera unidad hidrogeológica, corresponde a un acuífero regional y profundo del tipo “semiconfinado” constituido por materiales calizos de las Formaciones Morelos y Cuautla, siendo esta unidad el basamento de la secuencia hidroestratigráfica. El agua subterránea en este acuífero circula a través de fallas geológicas fracturas o conductos de disolución que se manifiesta en la descarga natural de algunos manantiales; el importante manantial “Las Estacas” en el valle de Ticumán, que descarga un volumen de 179 hm<sup>3</sup>/año es el mejor ejemplo de estas descargas naturales de agua subterránea en el área de estudio.

La recarga total media anual del acuífero Cuautla-Yautepec en el periodo octubre 2007- mayo 2010 fue de 230.2 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales 80.5 hm<sup>3</sup>/año corresponden a las entradas por flujo subterráneo y 149.7 hm<sup>3</sup>/año a la recarga vertical. La recarga vertical tiene lugar principalmente por la infiltración de la lluvia, la infiltración de los escurrimientos superficiales, la infiltración del agua utilizada en el riego de los terrenos agrícolas y por fugas en la distribución de agua de uso público urbano.

La descarga total media anual del acuífero Cuautla-Yautepec es de 248.5 hm<sup>3</sup>/año; de los cuales 87.6 hm<sup>3</sup>/año corresponden a las extracciones por bombeo de pozos y norias; 21.8 hm<sup>3</sup>/año corresponden a la descarga natural del acuífero por flujo base durante la época de estiaje en los ríos Cuautla, Yautepec y la Cuera, 20.5 hm<sup>3</sup>/año corresponden a la salida por flujo subterráneo horizontal y 118.6 hm<sup>3</sup>/año por descarga de manantiales.

La descarga total del acuífero Cuautla-Yautepec de 248.5 hm<sup>3</sup>/año es mayor que su recarga total de 230.2 hm<sup>3</sup>/año, hecho que ha provocado que durante el periodo de análisis 2007 – 2010, los niveles estáticos descieran con una velocidad media de 1.1 m/año.

Con base en las conclusiones anteriores y de acuerdo con lo que se establece en la Norma Oficial Mexicana NOM – 011 – CNA – 2000, la **DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DEL ACUIFERO “CUAUTLA-YAUTEPEC” RESULTO SER NEGATIVA E IGUAL A - 8.058683 hm<sup>3</sup>/año.**

La calidad del agua subterránea desde el punto de vista físico – químico, es apta para el consumo humano, pues los sólidos totales disueltos (STD)

varían entre 80 y 690 ppm, encontrándose las concentraciones más altas al suroeste de Yautepec.

De acuerdo con la clasificación de Wilcox, el agua subterránea del valle Cuautla – Yautepec se encuentran los tipos C2-S1 y C3-S1, el primer tipo puede utilizarse en el riego de los terrenos agrícolas con un grado moderado de lavado y puede emplearse en la mayoría de los suelos escasas posibilidades de alcanzar elevadas concentraciones de sodio intercambiables. El segundo tipo no puede usarse en suelos de drenaje deficiente; los cultivos sensibles, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

Tomando en cuenta el DEFICIT ANUAL de  $-8.058683 \text{ hm}^3/\text{año}$  en la disponibilidad de agua subterránea, se recomienda en primer lugar NO autorizar ningún volumen de extracción adicional al Volumen Concesionado de Agua Subterránea de  $77.35 \text{ hm}^3/\text{año}$ , registrado en el Registro Público de Derechos de Agua.

Se recomienda realizar un manejo sustentable del acuífero; para esto, será necesario publicar oficialmente los resultados del presente estudio, fomentar acciones orientadas a reducir las demandas de agua y reglamentar el uso de agua subterránea.

Se recomienda continuar con la medición sistemática de los niveles estáticos en los pozos piloto de la red piezométrica y continuar con el monitoreo de la calidad del agua que se obtiene de esos pozos piloto.

<b>ESTUDIO</b>	<b>El recurso agua en el Alto Balsas.</b>
<b>FECHA</b>	2003
<b>EMPRESA</b>	Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM.
<b>TIPO</b>	Libro
<b>OBJETIVOS</b>	<p>Analizar los indicadores de disponibilidad, uso y contaminación del agua en el Alto Balsas, en particular en los estados de Morelos, Tlaxcala y Puebla.</p> <p>Proponer escenarios factibles de desarrollo sustentable en ámbitos semiáridos, altamente contaminadas, densamente pobladas y expuestas a procesos de conurbación e industrialización.</p> <p>Elaborar balances hídricos y evaluar cargas ambientales, capaces de absorber naturalmente los contaminantes y evaluar la repercusión en salud pública por su toxicidad.</p> <p>Desarrollar políticas socio-ambientales que superen la escasez y contaminación del agua tomando en cuenta la evolución demográfica, la equidad, el mejoramiento de la nutrición, de la salud y de la calidad de vida.</p>
<b>ACTIVIDADES</b>	Se tomaron muestras de 70 aprovechamientos en el valle de Cuernavaca, donde manantiales, pozos y norias son las fuentes de abastecimiento y sus aguas fueron analizadas en técnicas basadas en la medición de isotopos ambientales del agua: tritio, oxígeno 18 y deuterio. Asimismo, se seleccionaron 16 aprovechamientos en cuyas muestras se efectuaron análisis fisicoquímicos.
<b>RESULTADOS</b>	<p>Los resultados del análisis geológico definen que las Cuencas de México y del río Amacuzac entre ambas comparten zonas de recarga, sin embargo, cada una presenta características geohidrológicas diferentes. Para la cuenca del río Amacuzac se distinguieron dos zonas acuíferas principales; una corresponde al valle de Cuernavaca y la otra al valle de Cuautla-Yautepec. Estas últimas son separadas por el Cañón de Lobos, la cual funge como una barrera hidrológica paralela al flujo. Esto ocasionado por las complejas estructuras y además porque al oriente y occidente las facies hidrogeoquímicas son diferentes. En general constituidas de un acuífero de tipo libre (rocas volcánicas del Oligoceno al Cuaternario) y un acuífero confinado (secuencia marina Cretácica), donde la Formación Mezcala (acuitardo) funge como la base del acuífero libre y así mismo, representa la capa confinante del acuífero calcáreo.</p> <p>Los resultados hidrogeoquímicos identifican seis facies principales de AS en las dos cuencas. Donde la zona de recarga correspondiente a la Sierra de Chichinautzin y Las Cruces muestran los valores más bajos y</p>

son de tipo  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  y  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$  con valores menores a 200 mg/l en STD, menores a 10 mg/l de sulfatos, los valores de Ca y K son menores a 5 mg/l y el Na no alcanza los 20 mg/l y las temperaturas radican entre 10 a 16°C. Por otra parte, el valle de Cuernavaca aparentemente capta flujos locales provenientes de la zona de recarga ya que presentan valores similares a esta zona (Ca 5-25 mg/l, Mg 5-20 mg/l, Na 20 mg/l,  $\text{HCO}_3$  menores a 200 mg/l,  $\text{SO}_4$  10 mg/l,  $\text{Cl}^-$  menores a 10 mg/l, STD de 200 mg/l y temperaturas de 16 a 20°C). En esta área el agua más evolucionada corresponde al lago de Tequesquitengo, representando un flujo de carácter regional (Ca 250 mg/l, Mg 200 mg/l, K 35 mg/l, Na 240 mg/l,  $\text{HCO}_3$  300 mg/l,  $\text{SO}_4$  1600 mg/l,  $\text{Cl}^-$  30 mg/l, STD de 2800 mg/l y temperaturas de 16 a 20°C).

Lo que respecta al valle Cuautla-Yautepec, esta una mayor abundancia de estructuras geológicas (pliegues, fallas y fracturas) que propician anomalías en los componentes hidrogeoquímicos y estas se relacionan al origen de los manantiales en esta región. El comportamiento heterogéneo de las facies hidrogeoquímicas de esta zona, son el resultado de la mezcla los diferentes tipos de flujo existente. El agua procedente de la Zona de recarga de la Sierra Nevada es de tipo  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$  con 6.5 de pH, esta ligera acidez se puede explicar a la presencia del  $\text{CO}_2$  volcánico, corroborando que los flujos locales provienen del Volcán Popocatepetl. Dentro del acuífero regional, confinado y carbonatado se distinguieron tres facies hidrogeoquímicas. El primer grupo representado por los manantiales **Agua Hedionda**, Oaxtepec, Oacalco e Iztamatitlán (65) presentan facies sulfatadas cálcicas con un pH cercano a los 7.4, sobresaturadas en  $\text{CaCO}_3$  y temperaturas de 26°C. El geotermómetro de sílice indica profundidades con 125°C, en conjunto indican etapas de flujos más evolucionados de tipo regional. El otro grupo representado por los manantiales **Palo Bolero**, **Las Estacas**, Alpuyeca y Atlacholoaya son de tipo  $\text{SO}_4\text{-Ca}$  y  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ , con un pH de 6.2, sub saturadas en  $\text{CaCO}_3$  y una temperatura media de 22°C, posiblemente correspondientes a flujos intermedios. El tercer grupo es representado por los manantiales Iztamatitlán (67) ¿Las Tortugas? y Ticuman son de tipo  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ , con un pH de 6.2, sub saturados en  $\text{CaCO}_3$  y temperaturas de 21°C, las cuales se interpretan como flujos locales.

En las subcuencas de los ríos Yautepec y Cuautla, en los albores de Agua Hedionda, Oaxtepec, Yautepec y Oacalco presentan anomalías en los componentes hidrogeoquímicos (Ca 400 mg/l, Mg 120 mg/l, K 20 mg/l, Na 80 mg/l,  $\text{HCO}_3$  de 700 mg/l,  $\text{SO}_4$  700 mg/l,  $\text{Cl}^-$  80 mg/l, STD de 2200 mg/l y temperaturas máximas de 24°C las más frías siendo provenientes de la Sierra Nevada).

Los resultados de los análisis isotópicos sugieren que la mayoría de los acuíferos superiores tienden a manifestar una conducta muy similar a la meteórica, reflejando el efecto de altitud en la composición isotópica de

la precipitación. En el valle de Morelos se observa isotópicamente empobrecido. Esto relacionado a las elevadas altitudes de las zonas de descarga. Sin embargo, en la zona oriental indica menores altitudes en la zona de recarga para la parte oriental de la Sierra Chichinautzin con valores altos de D y O-18. El valle de Cuernavaca es el único que manifiesta de recarga local a menores altitudes en la parte este de Progreso debido a un incremento isotópico. La recarga en la Sierra Nevada ocurre a una altitud de 3950 msnm, y la parte oriental de la cuenca de México y Cuautla son isotópicamente similares a esta.

Por otra parte, los valores de tritio en el valle de Cuernavaca varían entre 0.8 a 20 UT indicando tiempos de residencia menores a los 40 años y valores menores a 0.8 representan aguas más antiguas de edad indeterminada. Para las descargas en el acuífero calcáreo regional se observan tres grupos de valores; el primero menor a 0.8 UT indica flujos regionales con una circulación profunda y lenta; la segunda 3.9 a 7.4 UT estos valores indican flujos intermedios pero con presencia de mezcla con flujos locales; el tercer grupo 25 a 39 UT, en conjunto con las características hidrogeoquímicas indican flujos netamente locales.



<b>ARTICULO</b>	<b>Características del manantial las Estacas en Morelos, México. Geofísica Internacional (1994), Vol. 33, Núm. 2, pp.283-294</b>
<b>FECHA</b>	1994
<b>AUTORES</b>	Henry Niedzielski
<b>TIPO</b>	Investigación
<b>OBJETIVOS</b>	Dar a conocer el régimen del manantial con el propósito de aclarar las condiciones hidrogeológicas regionales
<b>RESULTADOS</b>	<p>El manantial las estacas, de primer orden, se manifiestan con un caudal constante. El manantial brota en el valle del río Yautepec, a lo largo de 600 m de calizas cretácicas de forma descendente, sin embargo, el principal surgimiento es ascendente de una gruta kárstica. Basándose en las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona y en algunas propiedades físico-químicas del agua, se supone que el manantial constituye un desagüe de los acuíferos de la subcuenca del río Cuautla a través de un conducto kárstico subterráneo, o un sistema de conductos, de longitud de 13 km aproximadamente, que aprovecha el flujo subterráneo cruzando las dos cuencas hidrográficas.</p> <p>En conclusión, los resultados generados sugieren que el manantial de Las estacas, en la cuenca del río Yautepec, constituye una descarga de flujo subterráneo y quizá parcialmente superficial, de la subcuenca del río Cuautla a través del sistema kárstico que cruza ambas cuencas hidrográficas. Se descarta la influencia de flujos profundos regionales en el caudal de Las Estacas.</p>

<b>ESTUDIO</b>	<b>Modelo matemático del acuífero de Yautepec, Morelos.</b>
<b>FECHA</b>	1992.
<b>EMPRESA</b>	CONAGUA
<b>TIPO</b>	Estudio.
<b>OBJETIVOS</b>	Realizar un estudio geohidrológico integral, para conocer el funcionamiento hidráulico del acuífero, analizar las condiciones climatológicas de la cuenca, así como la disponibilidad de las aguas subterráneas.
<b>ACTIVIDADES</b>	<p>Se utilizó un modelo de flujo bidimensional denominado "PLASM_CT", utilizando información recabada en estudios previos para completar los parámetros que requiere el software. Inicialmente se calibra el modelo con cargas hidráulicas, recargas y bombeos conocidos.</p> <p>Un censo de 43 pozos (23 operando y 20 inactivos), 4 norias y 6 manantiales. Pruebas de bombeo</p>
<b>RESULTADOS</b>	<p>La simulación en condiciones iniciales se hace con condiciones de recarga y coeficiente de almacenamiento pequeños de 0.1 a simular 10,000 y 20,000 días.</p> <p>El análisis climatológico se elaboró con en base a la estación climatológica Yautepec, con un periodo de observación de 39 años (1952-1991). Clasificándose como un clima ligeramente húmedo, con deficiencia de agua invernal a semicálido con baja concentración de calor en verano. La lámina de precipitación media anual es de 1,010.38 mm, la temperatura media anual resultante es de 21.14°C, la evaporación potencial media anual es de 1,607.98 mm, por último, la lámina de evapotranspiración real es de 1,043 mm.</p> <p>La hidrometría de aprovechamientos indica un volumen de 1.831 mm<sup>3</sup>/año para la extracción artificial y 23.021 mm<sup>3</sup>/año para extracción natural.</p> <p>La profundidad de los niveles estáticos es muy variable, en la porción norte son poco profundos manifestados en norias, mientras que al sur varían entre 20 y 40 m.</p> <p>Las condiciones geológicas de límite para este modelo matemático son: al norte una zona impermeable constituida de lahares de la sierra de Tepoztlán, al oriente, poniente y sur del valle es limitado por las elevaciones de las calizas de la Formación Morelos. El acuífero de Yautepec es de tipo libre y es constituido de material granular y clastos no consolidados, con espesores de hasta 200 m. Sus recargas principales provienen de la Sierra Chichinautzin y del Río Yautepec.</p>

	<p>Los resultados de las pruebas de bombeo arrojan un coeficiente de almacenamiento calculado de 0.17 tomando un valor 0.1 de constante.</p> <p>Las extracciones en 1930-1981 eran de 33,284 mm<sup>3</sup>/año y en 1982-1991 los valores son de 45.802 mm<sup>3</sup>/año. Sin embargo, por la inactividad de algunos aprovechamientos se propone un volumen real de 37,303 mm<sup>3</sup>/año para este último período.</p> <p>El modelo después de la calibración refleja variaciones en los espesores y en la permeabilidad del acuífero, con coeficientes de transmisividad que varían de 1.91 a 5.82 10<sup>-3</sup>m<sup>2</sup>/seg.</p> <p>Para la zona del Valle de Yautepec y para la zona del Valle de Cuautla se tiene valores de 1.27 a 64.16 10<sup>-3</sup>m<sup>2</sup>/seg. Esta variación es el resultado de la heterogeneidad en la granulometría del subsuelo presente.</p>
--	---

<b>ESTUDIO</b>	<b>Characteristic manner of groundwater discharge in the Cuautla river sub-basin (Mexico).</b> Memories of the 22nd Congress of IAH, Vol. XXII, Lausanne.
<b>FECHA</b>	1990.
<b>TIPO</b>	Artículo.
<b>OBJETIVOS</b>	Examinar las características de las descargas del agua subterránea en el río Cuautla, mediante el mapeo hidrogeológico, registros anuales de descargas de ciertos manantiales (Agua Hedionda), y el análisis de datos existentes de estudios geológicos.
<b>ACTIVIDADES</b>	Se realizó un análisis hidrogeológico del área de estudio, examinando los registros de descarga para ciertos manantiales (Agua Hedionda incluido). Con esta información y con el análisis de estudios previos de la geología superficial, se realizó un mapa hidrogeológico de escala 1: 50,000.
<b>RESULTADOS</b>	<p>Los datos de precipitación para el análisis fueron con valores entre 900 a 1400 mm, siendo 1205 mm el valor medio total de la subcuenca. La temperatura media anual fue de 23.3 °C en las partes más bajas.</p> <p>Se determinaron que los acuíferos presentes son constituidos por dos unidades cuaternarias (fig. 1); Un acuífero intergranular de material piroclástico y un acuífero constituido por basaltos fracturados. Las recargas son directamente de la infiltración de las precipitaciones y de acuerdo a mediciones se calculó un flujo subterráneo de <math>1.2 \text{ lps}^{-1} \text{ km}^{-2}</math>. Las profundidades del nivel estático variaban en un rango de 0 (en manantiales) a 100 m. Los manantiales son de baja descarga (2 a 10 lps), originados posiblemente por el contacto de los basaltos fracturados con capas impermeables locales. Por otro lado, el acuífero que es cubierto por la Formación Tlayecac (fig. 3), es confinado con un coeficiente de permeabilidad de <math>6.4 \times 10^{-5} \text{ m/seg}</math>.</p> <p>La zona de recarga del acuífero fracturado es directamente reabastecida por precipitación infiltrada que fluye en un acuífero granular desde el volcán Popocatépetl (fig. 1). La dirección del agua subterránea se describe en tres direcciones: a lo largo del río Cuautla, otro es un flujo perpendicular a la barranca Santa María y el tercero es el la barranca Agua Salada, en conjunto tienen un módulo mínimo de escorrentía de aguas subterráneas de 17.66 lps.</p>

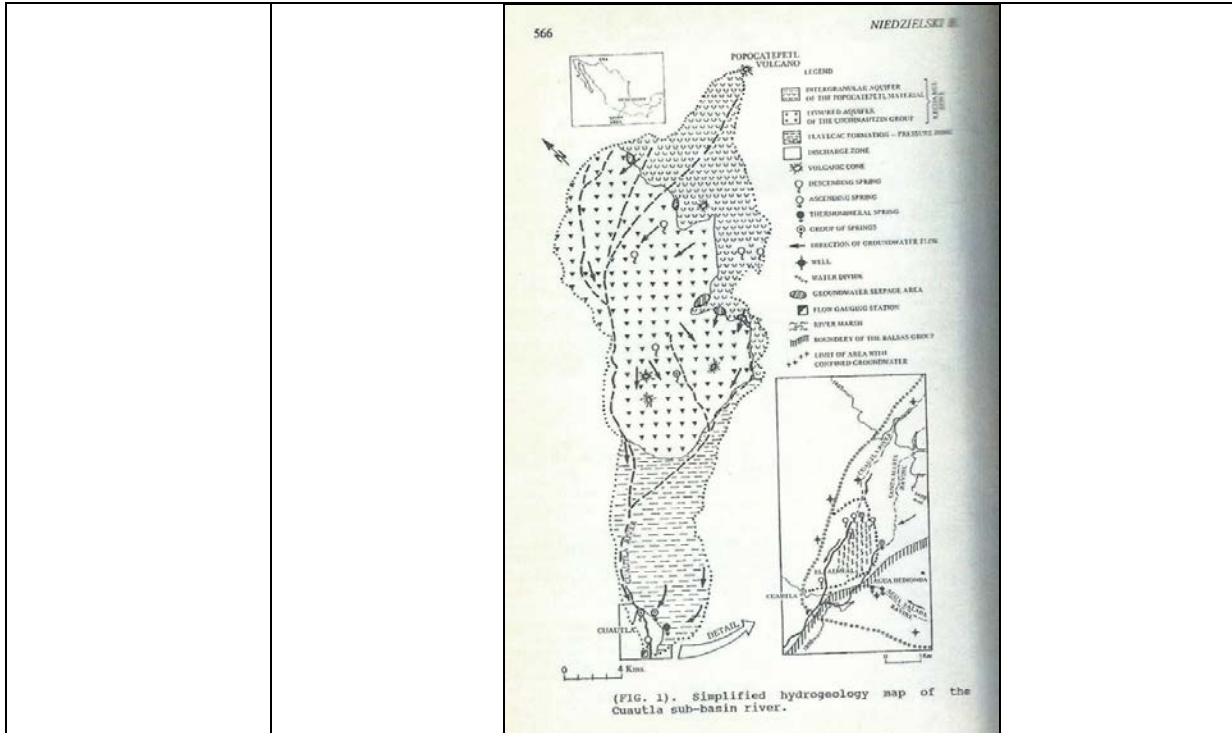


Fig. 1.

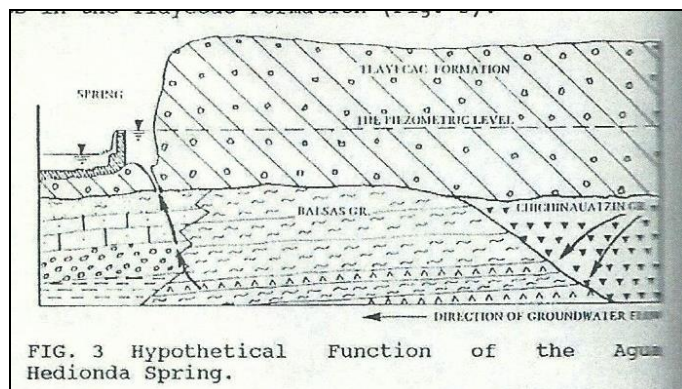


Fig. 3.

La zona de descarga se encuentra en la porción suroeste del acuífero fisurado (fig. 1), donde mantiene contacto con un acuífero de material clástico (Formación Cuernavaca y Grupo Balsas). En esta zona se observan grandes manantiales con un flujo mínimo total de 5 m<sup>3</sup>/seg. Y son divididos en dos grupos; de agua fresca, los cuales emergen al largo del río Cuautla y son de tipo descendente, este grupo de manantiales es llamado El Almeal, muestran temperaturas en un rango de 18.2 y 19.8 °C, con una mineralización de 238 mg/l, pH de 6.4 y una conductividad eléctrica de 270-320 µS/cm.



Mientras que los 2 manantiales termales únicamente se observan en el área de Agua Hedionda (ver fig. 1), ambos son de tipo ascendente y suceden en grietas de lahares. La relación entre la descarga máxima (354.2 lps) y mínima (233.2 lps) es de 1.52 y evidencia estabilidad del manantial. Tienen temperaturas de 26 y 27 °C, valores elevados a la temperatura media anual reportada para temperatura atmosférica. Su composición química indica que son sulfato-calcio-bicarbonatadas, con gas hidrosulfúrico, STD de 2530 ppm, Ph de 6 y una conductividad eléctrica de 2580 mS/cm.

Estos autores concluyen que el origen de los manantiales es meteórico y ocurre en la superficie de las fracturas de la Formación Tlayecac y fluye en las direcciones de flujo antes mencionadas. El agua infiltrada es calentada por el gradiente geotérmico y mineralizada por el yeso contenido en el Grupo Balsas, para finalmente descargar como manantial en la zona de Agua Hedionda.

<b>ESTUDIO</b>	<b>Geoquímica isotópica del sistema hidrogeológico del valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México.</b>
<b>FECHA</b>	1989.
<b>EMPRESA</b>	Instituto de Geofísica, UNAM.
<b>TIPO</b>	Artículo.
<b>OBJETIVOS</b>	Conocer la posible comunicación entre los acuíferos del sur de la cuenca de México y los del estado de Morelos, entender los mecanismos de recarga y conocer el origen del agua en el acuífero calcáreo.
<b>ACTIVIDADES</b>	Se recolectaron 70 muestras en aprovechamientos del valle de Cuernavaca, donde manantiales, pozos y norias son las fuentes de abastecimiento y sus aguas fueron analizadas en técnicas basadas en la medición de isotopos ambientales del agua: tritio, oxígeno 18 y deuterio. Asimismo, se efectuaron análisis fisicoquímicos en muestras de 16 aprovechamientos previamente seleccionados.
<b>RESULTADOS</b>	<p>Los resultados fisicoquímicos se presentan en la tabla 1 (aprovechamientos identificados con un número no muestran su equivalencia). La evolución química general para la región tiende a seguir la misma dirección que el patrón de flujo de agua subterránea propuesto. Un incremento en la salinidad se observa en la dirección de flujo y únicamente se presentan facies con <math>\text{HCO}_3</math> y <math>\text{SO}_4</math> como aniones dominantes.</p> <p>Los resultados hidrogeoquímicos sugieren que el agua podría circular desde las zonas de recarga (Sierras de Zempoala y Chichinautzin), infiltrarse y viajar por estratos que contengan yeso o anhidrita, hasta fluir a través de un acuífero granular. Las facies químicas en la zona de recarga, propuesta para el acuífero granular son <math>\text{HCO}_3</math>-Mg, mientras al sur de la ciudad de Cuernavaca las facies son <math>\text{HCO}_3</math>-Mg-Na, este enriquecimiento en Na es posible que sea originado por el tiempo de residencia de un flujo profundo o es agua influenciada por los minerales de los basaltos presentes en la zona de recarga. Por otra parte, las facies presentes en la zona meridional son <math>\text{HCO}_3</math>-<math>\text{SO}_4</math>-Ca-Mg, la adición de <math>\text{SO}_4</math> posiblemente proviene de los basaltos de la Sierra de Chichinautzin. Nótese que el incremento del <math>\text{HCO}_3</math>-Mg es mayor, con respecto al Na en la parte occidental y además coincide con el patrón de flujo, fenómeno que es de esperarse, el Mg proviene de los minerales ferromagnesianos de los basaltos. Sin embargo, en la parte central hay un incremento de Na y Mg, esta diferencia radica en que la Sierra Zempoala litológicamente es compuesta por andesitas y brechas, mientras que la Sierra Chichinautzin es compuesta por escorias y coladas de lava basálticas.</p> <p>En cambio, las facies observadas en el acuífero calcáreo son <math>\text{SO}_4</math>-</p>

HCO<sub>3</sub>- Ca-Mg, algunas sobresalen por alto contenido de HCO<sub>3</sub>, otras por tener valores altos de SO<sub>4</sub>- en relaciones SO<sub>4</sub>/Ca, SO<sub>4</sub>/Cl y Na/Cl (ver tabla 1). Los valores de SO<sub>4</sub>/Ca saturan al acuífero calizo provenientes de la disolución del yeso y anhidrita. Los elevados valores del Mg sugieren incongruentemente la disolución de la dolomita, por lo tanto, es evidente que otro proceso y origen aporta estos valores, en una mezcla podría pensarse.

Los análisis de O-18 y Deuterio en 48 muestras de AS se graficaron en una correlación δD vs δ<sup>18</sup>O evidenciando moderadas variaciones en la composición isotópica de las precipitaciones. Los valores de contenido isotópico para el área occidental dentro del acuífero granular correspondiente al abanico volcánico-aluvial es de δD = -76‰ y de δ<sup>18</sup>O = -11.1‰, estos valores son ligeramente más negativos con respecto a la zona central del área, con valores δD = -75‰ y de δ<sup>18</sup>O = -10.8‰, donde el acuífero granular es constituido de un depósito aluvial cubierto por coladas de lava basálticas muy fracturadas. Esta diferencia en contenido isotópico es posible atribuirle a una diferencia en los procesos o ambientes de recarga (altitud, clima, etc.) que se encuentran en las Sierras de Zempoala y Chichinautzin. En cambio, los valores medios reportados en el valle de Tepoztlán son de δD = -73‰ y de δ<sup>18</sup>O = -10.3‰, ligeramente más enriquecidos que el valle de Cuernavaca, confirmando que la zona de recarga del área centro-oriental corresponde a la Sierra Chichinautzin. Existen valores de pozos más enriquecidas en isótopos δD = -66‰ y de δ<sup>18</sup>O = -9.3‰, indica posiblemente el valor de la recarga local provenientes de la Sierra Barriga de Plata, esto apoyado por sus facies químicas (HCO<sub>3</sub>- Ca-Mg-K) que se salen del contexto evolutivo.

Las zonas de recarga principales se encuentran en el reciente y activo Cinturón Volcánico Mexicano y en el subsuelo existen espesores de anhidrita, por lo tanto, el contenido de S en los acuíferos puede tener procedencia volcánica o evaporítica. Para determinar el origen de los altos contenidos de los compuestos de azufre en forma de SO<sub>4</sub> encontrados en el acuífero calcáreo se analizaron cuatro muestras de agua de manantiales, que sugieren que el δ<sup>34</sup>S proviene de las anhidritas que subyacen a este acuífero debido a que se trata de un sistema kárstico. Y una de yeso recristalizado proveniente de las calizas y dolomías Cretácicas encontrado dentro del conglomerado calcáreo del Terciario temprano, con valores típicos de aguas que fluyen a través de evaporitas de origen marino (Fig. 8). Los valores más empobrecidos de δ<sup>34</sup>S son para el acuífero en lahares y tobas andesíticas, este empobrecimiento en sulfatos sugiere otra fuente. Esta fuente es ocasionada por la oxidación de los sulfuros y/o azufre de origen volcánico.

En un intento de determinar la edad relativa del AS se analizaron ocho

muestras para determinar los contenidos de Tritio, cuatro muestras para C-14 y tres para C-13. Los valores obtenidos de C-14 en los acuíferos granulares y basálticos indican que toda el agua es de reciente infiltración. Por otra parte, para los acuíferos calcáreos los valores encontrados indican una componente de aguas jóvenes de más de 40 años de haberse infiltrado. Estos valores relativamente elevados de C-14 y <sup>3</sup>H en comparación con los otros acuíferos (Tabla 2), manifiestan una mezcla que se puede explicar proveniente de una zona semihúmeda del karst con una recarga moderna y cercana. El manantial Las Estacas es esta zona semihúmeda que constituye la transición entre la zona seca de los karts y la zona húmeda con agua de origen más regional. De este modo, es común encontrar esta mezcla en las surgencias o la que es extraída en los pozos someros. La existencia de esta mezcla también se manifiesta en la surgencia de aguas de distinta temperatura, la más fría posiblemente proviene de la recarga que ocurre en la Sierra Chichinautzin y la más caliente, proviene de un flujo profundo o regional.

No.	C.E. mhos/cm	Ph	T°C	STD	Ca++ meq/L	Mg+ meq/L	Na+ meq/L	K+ meq/L	Cl- meq/L	HCO3- meq/L	SO4= meq/L	Na -- Cl	Na -- Ca	SO4 -- Ca	SO4 -- Cl
14	160	7	20	181	0.6	2.14	0	0	0.39	2.09	0.02	0.001	0		
16	176	6.5	19	207	0.6	2.79	0	0	0.33	2.39	0.06	0.001	0		
17	200	6.04	19	223	0.6	1.97	0.74	0	0.59	2.39	0.06	1.25	1.23		
c23	*243	6.5	16.5	*170	0.339	0.399	0.33	4.88	6.46	1.35	8.27	5.11	0.974		
24	190	6.6	19.5	*133	0.8	2.14	0	0	0.451	2.09	0.083	0	0		
32	80	6.5	17.5	204	0.157	0.32	0.421	0.01	0.025	1.472	0.119	16.59	2.68		
677	2000		24.1	*1400	19.42	7.64	0.997	0.27	0.536	6.71	19.85	1.86	0.05	1.02	37.04
c78	1300		23.1	*910	10.1	4.48	0.983	0.113	0.457	2.64	10.52	2.15	0.09	1.04	23.03
679	1250	7.2	23.1	955	8	4.84	1.27	0.33	0.556	5.39	7.85	2.28	0.15	0.982	14.14
c81	1400		24.7	*980	6.45	6.56	1.31	0.16	0.542	7.74	7.94	2.43	0.2	1.02	
90	500	6	23.8	397	2	1.56	1.96	0	1.24	3.74	0.25	1.57	0.979		
ñ91	**410	6.4	20.6	287	1.65	2.09	0.18	0.11	0.46	2.13	1.09	0.39	0.11		
6108	2100	7	22.5	2033	19.2	6.71	0.866	0.258	0.55	7.72	21	1.57	0.05	1.09	38.18
6109	320	6.5		391	1.41	1.19	0.783	0.171	0.493	2.13	0.479	1.58	0.55		
6110	504	6.5		236	58	18	11.6	2.5	3.16	210	681				
ñ144	290	6.6	19.9	101	1.3	1.42	1.23	0.05	0.66	1.96	0.37	0.35	0.18		
*C.E. y STD calculados.															
**Dato de la SARH 1980 y 1981.															
ñ Dato de C.A.V.M. 1986.															
6 Dato Instituto de Geofísica, UNAM 1986/87.															

Tabla 1. Resultados fisicoquímicos.

<b>ESTUDIO</b>	<b>Hidrogeología isotópica de los valles de Cuautla y Yautepec, México.</b>
<b>FECHA</b>	1989.
<b>EMPRESA</b>	Instituto de Geofísica, UNAM.
<b>TIPO</b>	Artículo.
<b>OBJETIVOS</b>	Entender el comportamiento hidrogeológico de la zona para determinar la naturaleza, distribución e interconexiones de acuíferos, así mismo, establecer las zonas de recarga y descarga, tiempos de residencia, medios de circulación existentes en los sistemas de flujo de agua subterránea y obtener antecedentes sobre origen del agua subterránea.
<b>ACTIVIDADES</b>	Se analizaron muestras de aprovechamientos (manantiales, pozos y norias) en las cuencas nororientales del Estado de Morelos, las fuentes de abastecimiento y sus aguas fueron analizadas en técnicas basadas en la medición de isotopos ambientales del agua: tritio, oxígeno 18 y deuterio. Se seleccionaron 23 aprovechamientos de los distintos acuíferos para caracterizarlos mediante análisis fisicoquímicos.
<b>RESULTADOS</b>	<p>Con la interpretación geológica y el análisis de estudios previos, se determinaron los acuíferos y acuitardos presentes; Un acuífero volcánico superior de tipo libre constituido principalmente por lahares, tobas, gravas, arenas, limos y arcillas. Un acuífero calcáreo regional y semiconfinado, constituido de calizas y dolomías Cretácicas y con presencia de manantiales kársticos. Un acuitardo representado por una estratificación de anhidritas no aflorantes con las unidades calcáreas. Otro acuitardo constituido por un conglomerado oligmítico compacto, cementado por calcita y óxidos de Fe, subyacido por una secuencia de arenas, limos y arcillas. Y en la parte superior pocas intercalaciones de lavas, brechas y tobas volcánicas. Y otras unidades litológicas como ignimbritas, las lavas riolíticas y los troncos dioríticos y granodioríticos fungen también como acuitardos.</p> <p>El análisis hidrogeoquímico sugiere que en el acuífero volcánico predominan las facies predominantes son HCO<sub>3</sub>-Mg con bajas salinidades y temperaturas, bajas concentraciones en STD. Los resultados isotópicos, indican que la mayor parte de las aguas se ubican en la línea meteórica. Este acuífero volcánico muestra variaciones en <sup>2</sup>H y O-18, atribuido al efecto de altitud. Los valores más empobrecidos isotópicamente se encuentran en el valle de Yautepec sobre rocas volcánicas permeables, por el contrario, las aguas de mayores valores isotópicos se encuentran al noreste de Cuautla, ligadas a menor altitud, estos son datos congruentes con la dirección del flujo del AS.</p>



Los datos de lluvia para caracterizar isotópicamente el agua de recarga en las altitudes del volcán Popocatépetl fueron de  $-11.4\text{‰}$ ,  $-12.1\text{‰}$  y  $-72\text{‰}$ ,  $-86\text{‰}$  para O-18 y  $^2\text{H}$ . Por otro lado, el manantial 146 en depósitos piroclásticos Cuaternarios, exhibe una composición de O-18 =  $-10.6\text{‰}$ ,  $^2\text{H} = -71\text{‰}$ , sugiriendo una recarga local. Los valores del acuífero volcánico y en el escurrimiento superficial muestra una concentración menor en sulfatos y con valores isotópicos más empobrecidos de  $+6$  y  $+10\text{‰}$  en S-34 y de  $+2.4\text{‰}$  en O-18. Los valores empobrecidos de S-34 y O-18 en el acuífero volcánico y en los manantiales de la Sierra Nevada están dentro del rango isotópico del azufre volcánico. Las posibles fuentes son sulfuros y sulfatos que se encuentran en la zona de recarga. Los valores resultantes para el  $^3\text{H}$  en este acuífero volcánico varían de 2.9 y 0.8 UT, mientras que los valores de C-13 y C-14 son de  $-10.3\text{‰}$ , 89 pmc y  $-7.4\text{‰}$  y 18 pmc respectivamente.

En las descargas del acuífero calizo están presentes facies de  $\text{SO}_4\text{-Ca}$  con altas salinidades y temperaturas sobresaturadas de  $\text{CaCO}_3$ ; otras facies de  $\text{SO}_4\text{-Ca}$  presentan menores salinidades y temperaturas, manifestando un patrón de mezcla. Con esto se propone la presencia de un flujo regional termal que circula en las calizas y anhidritas que se mezcla en las zonas de descarga con aguas someras. Por otro lado, la química de los manantiales kársticos con flujo horizontal presenta facies de  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ , bajas temperaturas y salinidades, además de no mostrar saturación de  $\text{CaCO}_3$ , sugiriendo ser parte de un flujo local influenciado por el acuífero volcánico.

El alto contenido de sulfatos en el acuífero calizo presenta valores isotópicos de valores  $+16\text{‰}$  para  $\delta^{34}\text{SO}_4$  y de  $+14.2\text{‰}$  a  $+16.8\text{‰}$  para  $\delta^{18}\text{O SO}_4$ , estos son valores típicos de evaporitas marinas de Cretácico. También muestra valores elevados de  $^3\text{H}$  que varían de 0.8 y 25 UT. Y los valores de C-13 y C-14 son de  $-5.6\text{‰}$  y 5 pmc. Por consiguiente, la variación de valores de sulfatos e isotópicos afirman la existencia de una mezcla del acuífero volcánico con un flujo regional.

<b>ESTUDIO</b>	<b>Características de los manantiales de Agua hedionda y el Almeal en Cuautla, Morelos.</b> Memorias del X Congreso nacional de Hidráulica.
<b>FECHA</b>	1988
<b>TIPO</b>	Artículo
<b>OBJETIVOS</b>	Determinar las características de los manantiales El Almeal y Agua Hedionda, mediante las mediciones anuales de sus caudales y temperatura.
<b>METODOLOGÍA</b>	El trabajo se basa en las mediciones de los caudales y la temperatura del agua en los manantiales, efectuadas mensualmente durante un año. En el <b>Balneario Agua Hedionda</b> las mediciones se han efectuado durante el periodo de junio de 1986 a julio de 1987. Se han aforado las descargas del manantial aprovechando las instalaciones existentes, mediante el vertedor rectangular construido para descargar las aguas a la alberca y las pérdidas que salen por la compuerta, mediante el tubo que desemboca en un tanque. El gasto que sale por el vertedor se estima aplicando la fórmula de Bazin para vertedores rectangulares con pared gruesa. Para medir la temperatura se utilizó un termómetro con divisiones de 1°C.
<b>RESULTADOS</b>	<p>Descripción del manantial. El manantial de Agua hedionda se encuentra enclavado a los pies de la pared sureste de la barranca. El agua surge de una caverna que tiene la forma triangular aumentándose hacia abajo a 1 m aproximadamente de ancho. Esta es una grieta con la dirección E-W, inclinada al SE formada en lahares con grandes fragmentos rocosos. Se puede observar la estratificación horizontal de los sedimentos, encima de la caverna. El origen de la grieta no es tectónico sino erosional. Se supone que principalmente existía una fractura producida debido al secado de los sedimentos y posteriormente se aumentó por acción de la erosión. Encima de la caverna no se observan fracturas, lo que sirve como evidencia de que su origen no es tectónico. En el fondo de la caverna se encuentra arena de grano grueso y grava de las rocas volcánicas.</p> <p>Resultados de la investigación. Se consideran tres factores que caracterizan el régimen del manantial: El gasto y su variación, la temperatura y la composición química del agua.</p> <p><b>Caudal.</b> Las mediciones del gasto se han efectuado una vez al mes de junio de 1986 a julio de 1987, en total durante 14 meses. Ver tabla siguiente:</p>

Tabla. Gasto del manantial Agua hedionda (lps; 1986)

Mes	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Día	27	12	15	5	29	21	10
Gasto	233.2	234.0	262.4	279.5	297.2	310.0	325.1

Tabla. Gasto del manantial Agua hedionda (lps; 1987)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Día	16	6	2	3	11	16	21
Gasto	327.2	344.7	354.2	313.6	269.2	281.7	284.8

Según la clasificación de Meinzer, el manantial se clasifica en el segundo y tercer grupo. Su índice de variación ( $R=Q_{max}/Q_{min}$ ), para los 14 meses es de 1.52 (manantial como **estable**).

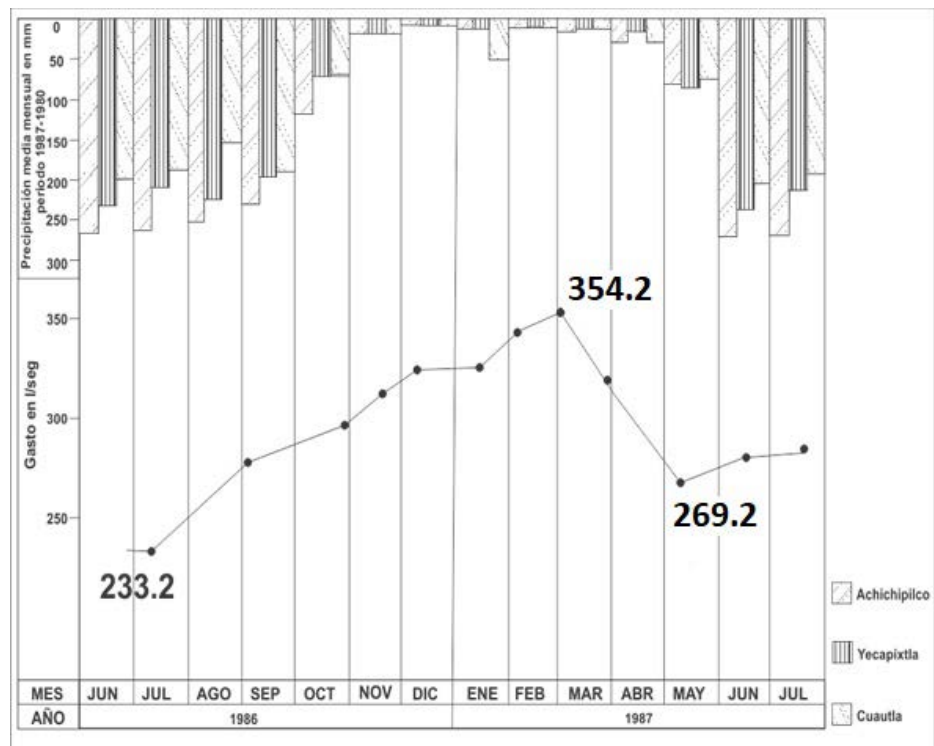


Figura. Hidrograma del manantial Agua hedionda

En el **hidrograma del manantial** (Figura), se puede ver que el crecimiento del gasto presenta un retraso de dos meses y medio después del inicio de la época de lluvias o aproximadamente un mes y medio después de las intensas lluvias de junio y sigue creciendo

durante el estiaje hasta principios de marzo, cuando llega a su máximo. Después el gasto baja en la manera clásica para el régimen del periodo no influenciado por la precipitación. **Este comportamiento indica claramente que el acuífero desaguado por el manantial se encuentra en cierta profundidad y su zona de recarga está alejada.**

En la representación semilogaritmica (Figura) se puede ver que durante el periodo no influenciado los gastos siguen una recta de agotamiento apropiada a la fórmula de Maillet (1905):

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t}$$

Dónde:

Q es el caudal del manantial;  $\alpha$  es el coeficiente que depende de las características geométricas e hidrológicas del embalse subterráneo; t tiempo desde el momento en que el caudal vale Q0.

#### **Temperatura.**

La temperatura del agua del manantial Agua hedionda de 27°C durante todo el año, es 7.8°C más alta que la temperatura media anual en el aire (la temperatura media anual de la cuenca de Cuautla es 19.2°C). Esto indica que el agua proviene de cierta profundidad y se calienta debido al grado geotérmico.

Calcula la profundidad del origen del agua, aplicando la formula (Pazdro, 1983):  $H = g (T - (tm+A)) + h$ ; donde: **H es la profundidad del agua; g es el grado geotérmico; T es la temperatura del agua; tm es la temperatura media anual del aire; A es la corrección de Bendel (1948) que depende de la altura sobre el nivel del mar y h es la profundidad de la zona con la temperatura estable. La profundidad reportada es de H = 212.8 m**

Sánchez San Roman (2018), menciona que en las aguas subterráneas es aproximadamente la temperatura media anual más el gradiente geotérmico regional (normalmente la temperatura del subsuelo aumenta 3°C cada 100 m de profundidad). Por lo cual, H = **260 m**.

#### **Hidroquímica**

La composición química del agua en el manantial Agua Hedionda analizada en la facultad de Química de la UNAM se presenta como sigue: El agua es incolora, transparente y ligeramente acida, pH=6.4. Su composición se muestra en la siguiente tabla:

**Composición química del agua (Manantial Agua Hedionda)**

<b>Componentes</b>	<b>Ppm</b>	<b>epm</b>
Solidos volátiles	51.30	
Solidos fijos	2017.60	
Solidos totales	2530.00	
Calcio	521.00	26.00
Magnesio	26.10	2.14
Sodio	72.20	3.14
Fierro	0.00	
Magnesio	0.00	
		Suma 31.28
Bicarbonatos	676.90	11.03
Cloruros	98.60	2.78
Sulfatos	1059.60	22.03
Ácido sulfhídrico	Huellas	
		Suma 35.84
radiactividad	783 mmc	Error 13%

El agua es Triónica: Sulfatada-bicarbonatada-cálcica y contiene ácido sulfhídrico.

Su composición química es muy característica para aguas asociadas con los yacimientos de yeso.



<b>ESTUDIO</b>	<b>Estudio geohidrológico integral de la porción occidental del estado de Morelos.</b>
<b>FECHA</b>	1982.
<b>EMPRESA</b>	S.A.R.H.
<b>TIPO</b>	Estudio.
<b>OBJETIVOS</b>	Conocer la posible comunicación entre los acuíferos del sur de la cuenca de México y los del estado de Morelos
<b>ACTIVIDADES</b>	Se realizó un censo de aprovechamientos (4 manantiales, 18 pozos y 6 norias). Continuamente se elaboró un programa de nivelación de brocales de pozos de agua, como apoyo para las configuraciones de profundidades y elevaciones del nivel estático. Posteriormente se elaboró una toma de 59 muestras de agua (34 de aguas superficiales y 25 agua subterránea) para un análisis fisicoquímico. También se aforaron 20 manantiales con el método sección y velocidad, utilizando un molinete "tipo London". Como complemento se efectuó un análisis geológico para interpretar los medios por donde se mueve el agua.
<b>RESULTADOS</b>	<p>De acuerdo al análisis geológico, se lograron reconocer tres unidades hidrogeológicas; la primera unidad impermeable, es constituida por las rocas de la Formación Xochicalco, Formación Mezcala, grupo Balsas y la Formación Tilzapotla; La unidad hidrogeológica semipermeable es representada por la Formación Tepoztlán; Y finalmente la unidad permeable las constituyen rocas de las formaciones Morelos, Cuautla, Cuernavaca y los basaltos fracturados pertenecientes al campo volcánico Chichinautzin.</p> <p>Los niveles estáticos del agua en el área de Cuernavaca son aproximadamente de 50 m, hacia el sur son más someros 10 m en Tejalpa, 5 m en Temixco, Tezoyuca y Chiconcuac. En las inmediaciones de Tequesquitengo los niveles son entre 5 y 10 m. Mientras que en el Valle de Zacatepec muestra niveles de 5 m y en las inmediaciones de las lagunas El Rodeo y Coatetelco los niveles van de 10 m aproximadamente.</p> <p>Las curvas equipotenciales de la elevación de los niveles de agua que la dirección de flujo es hacia el sur, bifurcándose en el área de Atlacholoaya, dirigiéndose hacia la zona del lago de Tequesquitengo y otra hacia el Valle de Zacatepec, terminando como flujo tributario al Río Amacuzac.</p> <p>El análisis de la evolución entre diciembre 1980 y abril-mayo de 1982, los niveles del agua en general indican que son favorables con valores de hasta 2.0. La evolución de abril-mayo a septiembre-octubre de 1982, durante este periodo se logra apreciar una ligera variación</p>

negativa atribuida al final del estiaje con valores entre -0.5 y -1.0 m.

Para el análisis de los escurrimientos y conocer el volumen que aporta el río Apatlaco al río Yautepec se utilizaron las estaciones climatológicas del Temixco, Alpuyecá, Zacatepec, los volúmenes medios mensuales mínimos obtenidos para el mes de abril son de 2.5 m<sup>3</sup> millones de los máximos para el mes de septiembre son de 12.4 millones de m<sup>3</sup>.

De acuerdo con el aforo de manantiales se calculó un gasto de descarga por manantiales (ver tabla siguiente) de 5.951 m<sup>3</sup>/s para el Valle de Cuernavaca y de 2.648 m<sup>3</sup>/s para el Valle de Zacatepec.

No. de Manantial	Localidad	Gasto (L.P.S)
1804	Santa María	140
1808	Las Fuentes	1142
1811	San Ramón	220
1736	Ojos de agua de Cuauchichinola	1098

<b>ESTUDIO</b>	<b>Estudio geohidrológico preliminar del valle de Zacatepec, Morelos.</b>
<b>FECHA</b>	1981.
<b>EMPRESA</b>	TACSA.
<b>TIPO</b>	Estudio.
<b>OBJETIVOS</b>	<p>xiv) Definir las condiciones de explotación en que se encuentra el acuífero.</p> <p>xv) Determinar la magnitud y distribución de la extracción de agua subterránea en la zona.</p> <p>xvi) Conocer la calidad y distribución del agua subterránea.</p> <p>xvii) Delimitar de forma preliminar la disponibilidad de los recursos hidráulico subterráneos.</p> <p>xviii) Recomendar las áreas más favorables para la perforación de pozos de exploración de agua subterránea.</p>
<b>ACTIVIDADES</b>	<p>Realizar un reconocimiento geohidrológico de la región en base a:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>I. Recopilación de los antecedentes.</li> <li>II. Durante mayo-junio se elaboró un censo de 72 aprovechamientos (69 pozos, 1 noria y 2 manantiales).</li> <li>III. Recolección de 50 muestras para análisis fisicoquímicos para determinar Ca, Mg, Na, CaCO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, STD, SO<sub>4</sub>, Cl<sup>-</sup>, dureza total, alcalinidad total, dureza del Ca y Mg.</li> <li>IV. Nivelación de brocales de 23 aprovechamientos, 1 pozo brotante, el manantial Cuauchichinola y dos puntos de la laguna de Tequesquitengo.</li> <li>V. Medición de la profundidad de niveles estáticos (PNE) de 23 aprovechamientos.</li> <li>VI. 8 pruebas de bombeo de 4 a 5 horas de duración.</li> </ol>
<b>RESULTADOS</b>	<p>El volumen de extracción calculado en la zona de Zacatepec es de 8.2x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> en 7 meses, y se estimó una extracción anual de 14x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Por otro lado, la hidrometría de los manantiales manifiesta un gasto de 3 m<sup>3</sup>/seg y para el pozo brotante San Gabriel de las Palmas 122x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año.</p> <p>Los resultados del análisis fisicoquímico, en donde se observa las concentraciones de los parámetros medidos:</p> <p>-STD varían entre 523-1384 ppm, las concentraciones mayores se muestran al norte del lago de Tequesquitengo (1000 ppm), al sur de Huixtla (1300 ppm). Los valores con menores concentraciones se</p>

observan en la porción nororiental en las proximidades de Tlatenchi (500-900 ppm) y en Puente de Ixtla (600-750 ppm) (Datos de los manantiales Cuauchichinola y La Fundición en la tabla sig.).

Aprovechamiento	T°C	Ph	C.E.	Alcalinidad total (ppm)	Dureza Ca (ppm)	Dureza Mg (ppm)	Dureza total (ppm)	STD (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Na (ppm)	HCO <sub>3</sub> (ppm)	CO <sub>3</sub> (ppm)	CL (ppm)	SO <sub>4</sub> (ppm)
Man. Cuauchichinola	27	7	700	360	480	280	200	696	112	48	10	384	27	53	62

-Ca, en la zona existe en general en concentraciones entre 56-260 ppm. Mg (plano 5.3.3.1) varía de 9-85 ppm. No exhibe bajas concentraciones 1.45 ppm. HCO<sub>3</sub> (plano 5.3.5.1) sus concentraciones varían 292-597 ppm. SO<sub>4</sub>, se presentan de 3-525 ppm. Cl también se muestra en bajas concentraciones de 26-80 ppm. CaCO<sub>3</sub>, concentraciones menores que varían de 9-31 ppm.

De acuerdo con los diagramas triangulares, se graficaron 47 muestras las cuales resultan ser pertenecientes a la familia cálcica-bicarbonatada, 1 cálcica sulfatada y 1 magnesiana-bicarbonatada.

La medición de los parámetros de calidad del agua arroja un contenido de STD de 1,000 ppm, con una alcalinidad menor a 400 ppm, sugiriendo ser potable a excepción de algunos aprovechamientos (60, 74, 314 y 1761)

La PNE en el área variaba entre 2.50 a 80 m durante el año 1981. En la zona cañera de Zacatepec, Jojutla, Puente de Ixtla y San José Vista Hermosa varía entre 10 y 30 m. Por otro lado, la ENE corresponde a mayo-noviembre de 1981. Las curvas indican que el flujo subterráneo es primordialmente N-S, únicamente entre los poblados Cuauchichinola y la Laguna de Tequesquitengo con una dirección NO-SE. Las elevaciones mayores en la porción N y NO del área de estudio con valores de 915 msnm, al sur desciende hasta 845 msnm a la altura de la zona de descarga, en la confluencia de los ríos Amacuzac y Yautepec, con un gradiente hidráulico que varía entre  $13 \times 10^{-3}$  a  $3 \times 10^{-3}$ .

La configuración de la evolución del nivel estático para el periodo de mayo-noviembre indica una recuperación general de 0.26 m (Fig. 6.2.3.1 y tabla 6.2.3.1). Esta corresponde a la época de lluvia y comprende un lapso de 6 meses.

La interpretación de las pruebas de bombeo fue usando el método de Hantush y el simplificado de Jacob para la deducción de los parámetros hidráulicos (Fig. 6.3.2.1 y 6.3.2.8). Definiendo que el sistema corresponde a un acuífero semiconfinado, con un coeficiente de transmisividad que varía entre  $0.77 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/seg a  $26.16 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/seg y con un coeficiente de almacenamiento estimado de 0.08.

	<p>Durante los meses de mayo-noviembre la extracción por bombeo fue de <math>8.2 \times 10^6 \text{ m}^3</math> (Ver tabla 6.4.1). Para este mismo periodo calculó que la recarga por entradas horizontales es de <math>7.54 \times 10^6 \text{ m}^3</math> y las salidas por este medio son fueron de <math>3.04 \times 10^6 \text{ m}^3</math>. Mientras que la extracción por bombeo es de <math>8.2 \times 10^6 \text{ m}^3</math>. Por otro lado, los manantiales y el pozo brotante de San Gabriel las Palmas el aforó resultante entre estos es de <math>3.9 \text{ m}^3/\text{seg}</math>.</p>
--	--



<b>ESTUDIO</b>	<b>Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en varios sitios del estado de Morelos.</b>
<b>FECHA</b>	1980.
<b>EMPRESA</b>	Constructora PAREYA, S. A.
<b>TIPO</b>	Estudio.
<b>OBJETIVOS</b>	Realizar un reconocimiento geológico, con el objetivo de definir la geometría, zonas de recarga y descarga de los acuíferos. Realizar análisis para conocer la calidad y distribución del agua, además de dictaminar las condiciones geohidrológicas de las zonas.
<b>ACTIVIDADES</b>	Realizar un reconocimiento geohidrológico de la región en base a: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Censo de 180 pozos de agua y 18 manantiales.</li> <li>• Fotointerpretación.</li> <li>• Muestreo de rocas para análisis petrográfico y paleontológico.</li> <li>• Muestro de agua (65 muestras) para análisis fisicoquímicos, 44 corresponden a pozos, 18 a manantiales y 3 a lagos. Por otra parte, se recolectaron 40 muestras para análisis isotópicos (<math>^2\text{H}</math>, <math>^3\text{H}</math> y <math>^{18}\text{O}</math>).</li> <li>• 25 sondeos eléctricos verticales utilizando el dispositivo eléctrico tipo <i>Schlumberger</i>.</li> </ul>
<b>RESULTADOS</b>	<p>En conjunto de los resultados geológicos y geohidrológicos se definieron ocho zonas favorables para la explotación de agua subterránea, con condiciones geohidrológicas diferentes. Donde los acuíferos explotables para las zonas de Miacatlán-Alpuyeca, Emiliano Zapata-Chiconcuac, del Valle de Cuautla, Ticumán-Las Estacas, están constituidos por material aluvial reciente, rocas basálticas del Campo Volcánico Chichinautzin y la Formación Cuernavaca, siendo estas las unidades litológicas con mayos permeabilidad. Por otra parte, en la zona De Cuauchichinola yace sobre rocas de la Formación Cuernavaca y el Grupo Balsas, aquí este último se observa constituido por clastos calcáreos sostenidos por una matriz deleznable, con menor presencia de arcillas a diferencia del resto de las otras zonas donde este grupo es impermeable.</p> <p>Con estos resultados se define que existen tres unidades acuíferas; la primera representada por los derrames de lava del Campo Volcánico Chichinautzin, segunda por los depósitos aluviales y la Formación Cuernavaca y tercera por las calizas de la Formación Morelos y Cuautla.</p> <p>Las concentraciones de STD varía en un rango de 200 a 900 ppm (excepción del Lago de Tequesquitengo 2500 ppm), los valores altos observados en las isolíneas indican que la recarga se efectúa en la zona norte, por otro lado los valores bajos indican que el flujo es a través de rocas altamente permeables sin presencia de sales de fácil</p>

	<p>disolución. Los valores más altos en sales se observan en los albores de Temixco hacia Zacatepec y el Lago de Tequesquitengo, indicando un flujo subterráneo paralelo al superficial (NW-SE). Por otra parte, en la Zona del Valle de Cuautla en la margen derecha del río las concentraciones de STD varían de 300 (noroccidente) a 500 ppm (cercañas del margen derecho del río), indicando una recarga proveniente de la porción noroccidental.</p> <p>El estudio geofísico define a la zona de estudio como una estructura geohidrológica irregular, ocasionada por la heterogeneidad de las unidades litológicas presentes, siendo dominantes en la región norte los materiales arenosos, limosos y conglomeráticos. Mientras que al sur se manifiestan materiales, conglomerados semiconsolidados y calcáreos.</p> <p>Los datos isotópicos sugieren que las aguas de las zonas definidas proviene de diferentes fuentes; la zona occidental se infiltro aproximadamente hace 20 años, con una zona de recarga ubicada al noreste de altitudes de 300 m; en la parte central el agua se infiltro hace 30 años y su recarga procede del norte con contenido isotópicos diferentes a las otras zona; y para la zona oriental entre 30 y 40 años, el cual recibe su recarga en zonas topográficas altas con un flujo más lento y de mayor trayectoria. Por otra parte la zona de Cuautla muestra características isotópicas que indican que tiene una recarga diferente y más joven que la zona oriental.</p>
--	--

<b>ESTUDIO</b>	<b>Estudio geológico y geohidrológico del valle de Cuernavaca, Morelos.</b>
<b>FECHA</b>	Septiembre de 1970
<b>EMPRESA</b>	Servicios Geológicos, S.A.
<b>TIPO</b>	Estudio
<b>OBJETIVO</b>	Conocer las condiciones hidrogeológicas de la subcuenca de Cuernavaca y realizar un balance hidrológico superficial-subterráneo.
<b>ACTIVIDADES</b>	
<b>RESULTADOS</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Los resultados de los estudios geohidrológicos en el área (de pozos) de 60 km<sup>2</sup> del Valle de Cuernavaca, objeto del presente estudio, permiten definir que es posible obtener un caudal de 3 m<sup>3</sup>/s, correspondientes a la salida de las aguas subterráneas y adicionales a los 0.4 m<sup>3</sup>/s que se extraen en la actualidad.</li> <li>2. De acuerdo con los resultados obtenidos en la perforación y pruebas de bombeo de los pozos CIVAC-1, con observaciones en el CIVAC-2 y el conocimiento de la geología regional, se infiere que el acuífero tiene un espesor total de 300 m y que es posible hacer una extracción adicional de 3 m<sup>3</sup>/s, por medio de pozos ubicados perpendicularmente a la dirección general del flujo de las aguas subterráneas en la zona.</li> <li>3. Los abatimientos provocados por una extracción de 3 m<sup>3</sup>/s serán nulos a 1 km hacia aguas arriba del lugar donde se haga la extracción. Hacia aguas abajo existirá un abatimiento, que será parcialmente compensado por una modificación del flujo subterráneo hacia la zona afectada y esta a su vez será alimentada por acuíferos más profundos, hasta que se vuelva a establecer un nuevo equilibrio dinámico.</li> <li>4. Los caudales de entrada y salida subterráneas para el acuífero de 80 m de espesor, que es la penetración promedio de los pozos en explotación, son de 4.3 y 4 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. La diferencia de 0.3 m<sup>3</sup>/s en los caudales de salida, corresponde a las extracciones por bombeo de 0.4 m<sup>3</sup>/s menos la infiltración local de 0.1 m<sup>3</sup>/s.</li> <li>5. De la medición sistemática de los niveles estáticos efectuada en los pozos del área de estudio se tiene, que después de 11 meses de observar las evoluciones de estos, el nivel medio vuelve a su valor original, manteniendo durante este periodo una red de flujo casi indeformable.</li> <li>6. La resolución de las ecuaciones del balance hidrológico para el</li> </ol>

valle de Cuernavaca, permite definir el coeficiente medio de transmisibilidad en  $1.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $6.7 \times 10^{-3}$  para el coeficiente de almacenamiento y de 0.07 el correspondiente a la infiltración. Estos valores verifican los datos obtenidos por medio de pruebas de bombeo y que corresponde a un acuífero de tipo “parcialmente confinado”.

7. Desde el punto de vista hidrogeológico, en la zona de estudio existen dos tipos de acuíferos: a) de medios granulares, como la Formación Cuernavaca y b) los de permeabilidad en fracturas o conductos de disolución, como son las rocas ígneas basálticas para el primer caso y las calizas para el segundo.
8. Los manantiales comprendidos dentro del área de pozos estudiada, forman un sistema hidrogeológico distinto al analizado para el acuífero granular de la Formación Cuernavaca y representan un gasto adicional de  $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , que actualmente se aprovecha en riego fuera de la zona.

Con respecto a los manantiales. Se estudiaron los manantiales que se encuentran dentro del área comprendida por las redes de flujo, dichos manantiales son: Chapultepec, Tejalpa, Cuauchiles y las Fuentes, observándose que estos no modifican el flujo del agua subterránea que circula a través de los sedimentos de la Formación Cuernavaca, deduciéndose que estos manantiales forman un sistema hidrogeológico funcionando por separado del acuífero de la Formación Cuernavaca. Los mismos manantiales afloran en el contacto de la Formación Cuernavaca y los basaltos del grupo Chichinautzin y son drenados a través de estas últimas rocas basálticas, que descansan sobre los clásticos que constituyen la Formación Cuernavaca.

Con los datos de escurrimientos mensuales de los manantiales anteriores se construyeron sus hidrogramas correspondientes, con el objeto de analizarlos por curvas de decaimiento y determinar el volumen almacenado por el área de captación de cada una de ellos, pudiéndose solo obtener el volumen almacenado del manantial Cuauchiles, que es de  $24 \times 106 \text{ m}^3$ , ya que los hidrogramas de los manantiales restantes no presentaban una ley bien definida en su descenso. Concluyendo de este análisis que los manantiales representan un caudal actualmente aprovechado en riego fuera del área estudiada, igual a la suma de sus gastos parciales, que es del orden de  $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para complementar el presente estudio geohidrológico, se realizaron trabajos de tipo cualitativo, que consistieron en un “estudio hidrogeoquímico” y una interpretación del “contenido de tritio” de las aguas subterráneas del Valle de Cuernavaca.

El estudio hidrogeoquímico tuvo por objeto determinar las características de la composición química de algunos de los iones que aparecen en el agua; hacer una interpretación hidrogeoquímica para establecer el origen del agua; determinar similitudes y diferencias entre las diversas muestras de agua analizadas; fijar la distribución de las propiedades químicas del agua, a partir de configuraciones y establecer las direcciones de flujo subterráneo. Concluyendo, que el agua que circula bajo el área de estudio es de magnífica calidad; de origen meteórico; que forma dos sistemas hidrogeológicos: uno que circula a través de basaltos, que da origen a manantiales y otro acuífero profundo, que corresponde a los clásticos de la Formación Cuernavaca, cuyo flujo dominante es, en general de sentido norte-sur.

Con respecto a la interpretación del “contenido de tritio” en las aguas subterráneas del Valle de Cuernavaca, se obtuvo que las aguas provenientes de las formaciones constituidas por rocas basálticas y calizas, que afloran en forma de manantiales, están compuestas por aproximadamente un 30%+- 20% de aguas recientes y el resto de aguas viejas, probablemente producto del drenaje de un acuífero de baja permeabilidad; y que las aguas de los pozos son generalmente viejas.

En las tablas 7 y 8 se muestran los manantiales en la Subcuenca de Cuernavaca y Yautepec con su gasto medio , periodo de observación, así como su volumen medio anual calculado (**se muestran datos para los manantiales Las fuentes, San ramón, Santa Rosa, las estacas y Agua hedionda**):

Manantial	Periodo	Gasto medio anual (m <sup>3</sup> /s)	Volumen medio anual (x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Las Fuentes	56-68	0.999	31.504
San Ramón	56-68	0.475	14.980
Santa Rosa	56-68	0.500	15.768
Las Estacas	56-68	6.535	206.088
Agua Hedionda	58-60	0.319	10.060

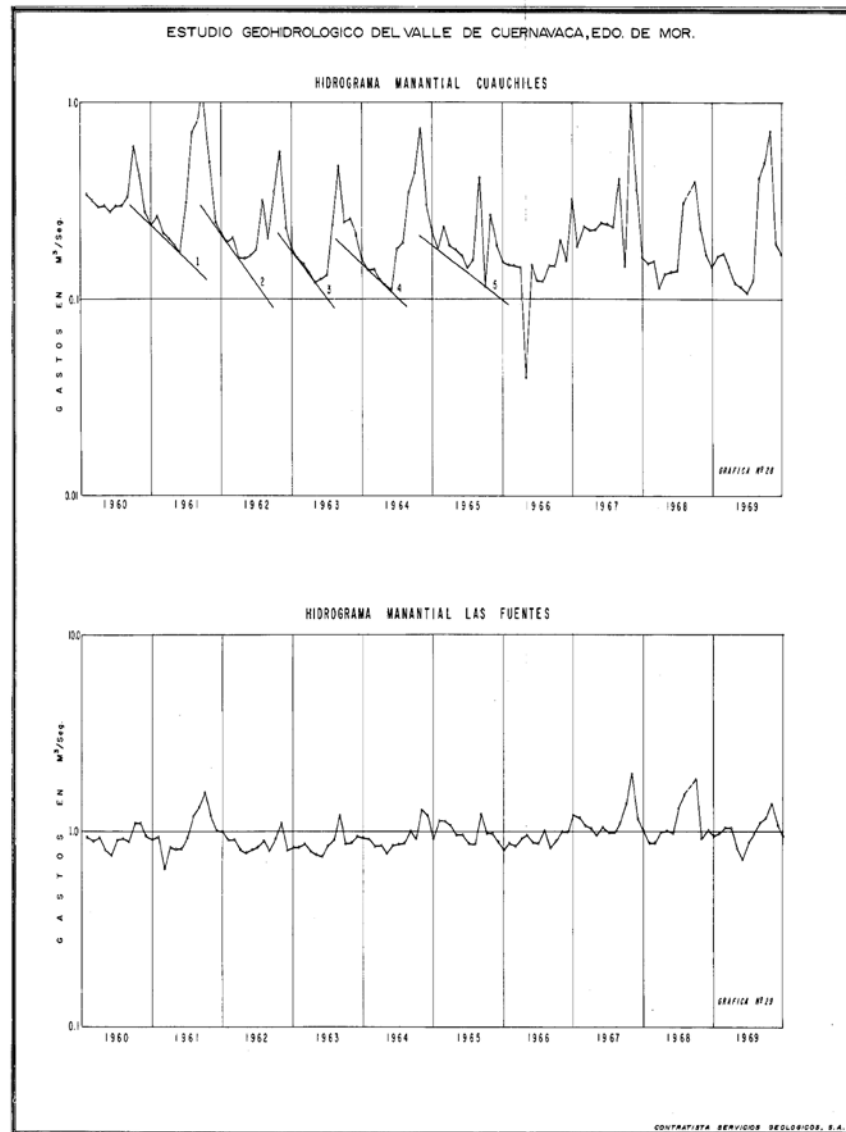
Dentro del área en estudio afloran una serie de manantiales, que aportan sus aguas a varias corrientes que drenan superficialmente la región y tienen como función principal la de riego.

En la parte oriental de la ciudad de Cuernavaca se encuentra el manantial Chapultepec, considerado como el más importante dentro de la zona de estudio. Según la clasificación de Meinzer para manantiales, el de Chapultepec se encuentra clasificado, por la magnitud de su





gastos, como de segundo orden; en su afloramiento se inicia el curso de la corriente que va a formar el río Agua Dulce, aumentada después por el manantial Acapatzingo, localizado al sureste del área y sin datos de escurrimiento. A la altura de Jiutepec se le une a la anterior, la corriente formada por las aguas de los manantiales Tejalpa (3er orden), Cuauquiles (2º y 3er orden) y Las Fuentes (2º orden), que sigue una dirección norte-sur, ya fuera del área estudiada.



## 1.5 Metodología

La metodología aplicada para la consecución del objetivo del estudio consistió en las siguientes actividades:

### **Recopilación y análisis de la información**

Se consultó y recopiló la información geológica y geohidrológica relacionada con el presente estudio, con el fin de obtener un conocimiento de la información generada en estudios realizados con anterioridad en la zona.

### **Verificación de aprovechamientos existentes, levantamiento piezométrico, nivelación de brocales y determinación del flujo subterráneo**

Se llevó a cabo un reconocimiento hidrogeológico que permitió identificar los tipos de materiales que afloran en la zona de estudio y la ocurrencia de los manantiales en estudio.

Se realizaron recorridos de campo para la verificación de los aprovechamientos existentes (pozos y norias) y el levantamiento piezométrico, en un radio de 1-2 km, en la zona de influencia de los manantiales: Las Tortugas, La Malinche, Agua hedionda-Agua Azul y Las Estacas (acuífero Cuautla-Yautepec) y en los manantiales Ojos de Agua de Cuauichinola, Palo Bolero, Santa Rosa-San Ramón y las fuentes del acuífero Cuernavaca. Para la selección espacial de los pozos de observación, se consideró la técnica de la configuración triangular de tres pozos propuesta por Driscoll (1986). En los pozos seleccionados se llevó a cabo la nivelación de sus brocales y las configuraciones de la profundidad al nivel estático y elevación del nivel estático. Finalmente, la dirección del flujo del agua subterránea en cada área del manantial en estudio se calculó mediante la conexión de la triangulación con los niveles piezométricos medidos en tres pozos.

La verificación física de los aprovechamientos se realizó utilizando para ello un posicionador geográfico (GPS) manual, cartografía del INEGI y registrando sus características más importantes.

Con la generación del mapa geológico del área de estudio y de acuerdo con la orientación de las secciones geológicas (con las cuales se realizará un modelo conceptual), se construyeron los perfiles topográficos, para posteriormente complementarlos con los datos geológicos obtenidos en campo como son: medición de la actitud (azimut e inclinación) de todas las discontinuidades encontradas en campo (estratificación, fallas, fracturas, etc.), así como reconocer todos los contactos litológicos de los paquetes que yacen dentro del área de estudio. De este modo, con el software (Arc Map 10.3) se digitalizan las secciones geológicas, mediante diversos polígonos con claves y símbolos geológicos que diferencian y representan las litologías constituyentes de la sección y por medio de líneas se representan los planos de las principales discontinuidades. Para finalizar la sección se orienta, se añaden los detalles necesarios (Leyenda, nombres de poblados y estructuras) y se escala a la gradación requerida para su futura impresión.

Dadas las condiciones geológicas de la zona de estudio, el proceso de infiltración juega un papel de suma importancia. La zona está poco drenada, lo cual parece indicar que por la presencia de materiales volcánicos fracturados una buena porción del volumen de agua de lluvia se infiltra.

## **Muestreo puntual con determinación de parámetros de campo**

### **Determinación de los parámetros de campo**

Durante la visita de campo a los manantiales en estudio, se midieron los parámetros de campo en los sitios en donde se encuentran aflorando las aguas. Para ello se utilizó una celda de aislamiento, de tal modo que se eviten cambios o alteraciones en la medición de los mismos. Los parámetros a medir son:

- **Temperatura del agua subterránea**

Se mide con un termómetro digital con aproximación de décimas de grado centígrado, con frecuencia este dispositivo instrumental viene integrado a un conductivímetro portátil.

- **Conductividad eléctrica específica**

Este parámetro se debe registrar utilizando un conductivímetro digital portátil que utilice ajuste por temperatura, mediante un termómetro digital con una aproximación de 0.1° C integrado a este instrumento. El registro de este parámetro permite identificar de manera indirecta la salinidad.

- **PH**

Para medir este parámetro se debe utilizar un potenciómetro utilizando la técnica de calibración en dos puntos, especificados a partir de soluciones buffer de pH conocidas de valores de 4.0, 7.0 o 10.0 unidades de pH. La medición de este parámetro en campo se deberá realizar en una celda de aislamiento, en la cual circule continuamente el agua subterránea proveniente del pozo, con el electrodo de pH inmerso en su interior. Se tomarán lecturas a intervalos de tiempo hasta lograr una lectura estabilizada sin variación.

- **Potencial REDOX**

Este parámetro se mide con un electrodo de tipo combinado, que consiste de un filamento de platino y un electrodo de referencia de plata-cloruro de plata. La medición del potencial REDOX, al igual que el pH y los demás parámetros medidos *insitu*, se debe realizar a diferentes intervalos de tiempo (por ejemplo cada dos minutos) hasta que obtener una medición estable, es decir hasta que la secuencia de mediciones o lecturas consecutivas se mantengan constantes. El potencial REDOX se medirá en una celda de aislamiento a circulación constante de agua subterránea.

- **Oxígeno disuelto**

La medición de la cantidad de oxígeno disuelto en el agua subterránea se llevó a cabo sumergiendo un electrodo OxiCal WTW en la celda de aislamiento por donde circula el flujo controlado de agua subterránea. En este caso específico, el sensor de oxígeno disuelto incorporado en el electrodo debe ser polarográfico de tipo “Clark” con sensor y compensación integrada por temperatura o electrodo equivalente de tipo galvánico de membrana que calibre en función de la altitud y compense por temperatura en forma automática.

- **Alcalinidad**

Se utilizará la técnica estándar de titulación con ácido sulfúrico a través de alícuotas de agua subterránea de 15 ml, aplicando el método potenciométrico de Gran. Este consiste en agregar sucesivamente a la alícuota un volumen determinado de ácido mediante un titulador digital, y midiendo inmediatamente el pH con un potenciómetro calibrado, repitiendo este proceso hasta lograr mediciones a un pH menor de 4.3 unidades.

### **Muestreo de agua subterránea**

Durante los recorridos se llevó a cabo un muestreo fisicoquímico de las aguas subterráneas para lo cual se tomaron muestras en diversos (10) sitios para análisis físico-químicos e isotópicos. Los elementos que serán analizados en laboratorio fueron definidos de común acuerdo con La CEAGUA y con base en el uso del agua se incluirán: calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, sílice, nitratos, sólidos totales disueltos, dureza, alcalinidad total, arsénico, plomo, etc. La selección de estos sitios será en base a criterios hidrogeológicos, a la disponibilidad y ubicación espacial de los aprovechamientos existentes.

### **Análisis físico químicos y bacteriológicos**

Las muestras de agua recolectadas se filtrarán y se preservarán convenientemente con temperatura y con ácido de ultra pureza, para el análisis de las siguientes especies químicas:

- Análisis físico químicos: bicarbonatos, carbonato, cloruros, color verdadero, DQO total, dureza de calcio, dureza de magnesio, dureza total, fluoruros, fosfato total, hidróxido, materia orgánica, nitrógeno de nitratos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, SDF, SDT, SDV, S sedimentos, SSF, SST, ST, STF, STV, sulfatos, fosfato orto.
- Análisis absorción Atómica: Sb, As, Ba, Be, Ca, Cu, Cr, Sn, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, K, Sr, Si, Na, <n, Digestión.

Las muestras se analizarán en laboratorios certificados ante la Entidad Mexicana de Acreditamiento o equivalentes.

## **Análisis isotópicos**

Con objeto de determinar la altura de recarga del agua de los diferentes sitios muestreados se analizarán los contenidos de deuterio (H-2) y oxígeno-18 (O-18). Asimismo, para determinar la edad relativa del agua se determinará la concentración de tritio Ambiental.

En ambos casos el tiempo de entrega de los resultados se estima sea de 30 días naturales, contados a partir de la fecha de recepción de las mismas.

## **Aforo de las descargas de manantiales**

Para la determinación del gasto o flujo, se realizará una inspección para cada sitio con la finalidad de determinar la técnica o método de aforo más adecuado.

Técnicas de aforo volumétrico. En aquellos sitios donde no se tenga flujo fuera del ojo de agua o manantial por condiciones naturales, es decir, la única manera de extraer agua sea por bombeo, será conveniente determinar los niveles de recuperación del nivel freático en el tiempo cada vez que se extrae agua por bombeo. Adicionalmente, se requerirá depósitos (en este caso las albercas de los balnearios) de dimensiones conocidas para la determinación del volumen extraído por medio de bombeo. Previamente se requerirá que estos depósitos tengan espacio suficiente para estimar el volumen extraído del manantial.

En aquellos casos donde no se cuente con depósitos de dimensiones conocidas, se deberá contar con un sólido de dimensiones conocidas de manera que desplace el líquido del ojo de agua y eleve su nivel. Toda vez que se cuente con los dos niveles en el manantial antes y después de sumergir el sólido y el tiempo transcurrido entre uno y otro nivel, será posible la determinación del gasto en ese sitio.

## **Integración, procesamiento y análisis de la información**

Toda la información recopilada debidamente depurada y ordenada, así como la generada en el presente estudio, será procesada con objeto de contar con los elementos técnicos que sustenten los resultados.

**Edición e impresión del informe final y presentación de resultados.** Una vez concluidos los trabajos anteriores, se elaborará un informe que contendrá la descripción de las actividades realizadas en el proyecto, los resultados alcanzados, así como las conclusiones y recomendaciones que se deriven. Este documento irá acompañado con mapas, figuras, tablas y con todo aquel material accesorio necesario. Se realizará la presentación del informe, resultados, conclusiones y recomendaciones.



## **2 VERIFICACIÓN DE APROCHAMIENTOS EXISTENTES, LEVANTAMIENTO PIEZOMÉTRICO, NIVELACIÓN DE BROCALES Y DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO**

En la zona de influencia de los manantiales se llevó a cabo: un recorrido de campo para la verificación de los aprovechamientos existentes (pozos y norias), en un radio de 1-2 km, los levantamientos piezométricos, la selección de una red de pozos de observación donde se realizará la nivelación de brocales, las configuraciones de la profundidad al nivel estático y elevación del nivel estático, así como la determinación de la dirección del flujo subterráneo resultante.

La verificación física de los aprovechamientos se realizó utilizando para una brigada con vehículo Pick up, posicionador geográfico (GPS) manual, cámara fotográfica, cartografía del INEGI y un formato de registro donde se anotaron las características más importantes como: la localización del aprovechamiento, los datos del aprovechamiento, sus características del equipamiento, las características constructivas y la hidrometría (cuando se cuenta con esta información).

### **2.1 Verificación de los aprovechamientos existentes**

La verificación de los aprovechamientos existentes dentro del área de influencia de los manantiales en estudio fue realizada en los meses de marzo, abril y mayo del presente año, se llevó a cabo en base al catálogo de pozos que la CONAGUA Delegación Morelos tiene identificados y seleccionados para realizar su programa de piezometría 2001-2017 en los acuíferos Cuautla-Yautepec y Cuernavaca.

En las Tablas 2.1 a 2.4 se muestran los aprovechamientos verificados en el área de influencia de los manantiales Las Tortugas, La Malinche, Agua hedionda, Agua Azul y Las Estacas emplazados en el acuífero Cuautla-Yautepec., donde se muestran sus coordenadas, la profundidad al nivel estático, la profundidad al nivel dinámico y cuando no se pudo sondear la leyenda NSPS. En las tabla 2.5 a 2.7 los aprovechamientos verificados en la influencia de los manantiales Palo Bolero-San Ramón-Santa Rosa, Los Ojos de agua de Cuauhichinola y Las Fuentes. En las Figuras 2.1 a 2.7 se puede observar la ubicación de los manantiales en estudio, los pozos existentes (pozos del catálogo de la CONAGUA) y los pozos verificados por el IMTA. En el Anexo No. 1, se muestran los formatos y álbum fotográfico de la verificación de aprovechamientos.

**Tabla 2.1 Pozos y norias verificadas (manantial Las Tortugas)**

Identificación	X	Y	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)
CNA-31	498,496.00	2,092,691	6.82	
CNA-350A	498,540.00	2,092,682		9.15
P-Ahuilican	500,901.00	2,090,959	10.05	
Manantial Chihuahuita	499,261.00	2,091,928	-	
CNA-26-07	499,505.00	2,092,491	14.96	
CNA-353	500,493.00	2,092,569	31.80	
P-E93	497,380.57	2,092,848	1.97	
Noria-1	495,251.88	2,091,416	3.51	
P-Escopeta	495,819.24	2,089,489	23.90	
P-Coatetelco 1	495,700.27	2,090,541	3.15	
Noria Coatetelco	495,673.51	2,090,524	3.54	
P-Piedra Grande	499,076.92	2,089,480	25.30	
CNA-354	499,793.00	2,091,290	NSPS	
P-Chihuahuita-4	499,165.00	2,091,860	NSPS	
P-Chihuahuita-1	499,204.00	2,091,943	NSPS	
CNA-45	496,256.36	2,089,844	NSPS	
P-La Morena	495,567.65	2,088,192	NSPS	
P-C-ARCO-A	496,967.47	2,089,464	NSPS	
CNA-26-10	500,565.00	2,091,556	NSPS	
P-Chihuahuita 2	499,289.00	2,091,827	NSPS	
CNA-350	498,355.00	2,093,370	18.00	
CNA-1702	495,793.87	2,088,611	NSPS	

**Tabla 2.2 Pozos y norias verificadas (manantial La Malinche)**

Identificación	X	Y	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)
P-Oaxtepec	503,399	2,089,759	Azolvado	
P-Oaxtepec 1	503,221	2,089,871	52.87	
P-Oaxtepec 2	503,263	2,090,103		43.19
P-Oaxtepec 3	503,327	2,090,456		14.02
P-Nuevo Frac. ARA	504,784	2,090,680	39.61	
P-Los pozuelos	503,807	2,091,248	62.46	
Noria Ejido Todos Santos	501,471	2,089,032	17.10	
N-Cocoyoc	500,407	2,088,244	17.55	
AP-Cocoyoc	503,076	2,088,083	15.40	22.40
P-Univ. El Dorado	502,252	2,090,186	27.09	
P-AP La Tehuixtlera	503,510	2,088,448	NSPS	

**Tabla 2.3 Pozos y norias verificadas (manantiales Agua hedionda y Agua Azul)**

Identificación	X	Y	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)
N-Jazmín	504,807	2,081,406	8.36	
P-Curtiduría Temola	503,773	2,078,739	4.96	
P-Ampliación Tepepan	505,434	2,078,105	NSPS	
P-Reforma	507,611	2,077,118	NSPS	
N-Revolución-Independencia	506,061	2,079,079	21.62	
N1-El Agave	508,923	2,078,223	30.59	
N2-El Agave	508,923	2,078,223	27.50	
N1-ITC	508,187	2,081,863	4.31	
N2-Yecapixtla	509,856	2,080,861	6.51	
P-SOAP-Cancha	505,724	2,081,971	NSPS	
P-CBTIS	507,569	2,078,369	NSPS	
CNA-1702	507,851	2,078,705	NSPS	

**Tabla 2.4 Pozos y norias verificadas (manantial Las Estacas)**

Identificación	X	Y	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)
P-Iglesia Ticuman	487,374	2074467	4.50	
P-Panzacola	487,298	2,076,916	NSPS	
N-CC-El Monte	488,084	2,073,561	8.15	
N-Fiscalía	486,148	2,072,258	55.64	
P-Frac Lomas de Ticuman	486,753	2,072,068	6.16	
N-Las Peñas	487,075	2,070,692	5.42	
N-Los Arcos	488,581	2,069,787	11.98	
N-Tlaltizapan-1	487,611	2,069,006	12.73	
N-MH	488,204	2,068,458	2.88	
P-Agua Linda (CNA-1702-2)	488,161	2,072,695	13.00	
CNA-1702	487,123	2,074,394	NSPS	

**Tabla 2.5 Pozos y norias verificadas (Palo Bolero-San Ramón-Santa Rosa)**

Identificación	X	Y	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)
P-La Campiña	480,948	2,075,601	23.2	
P4 -Frac Las Garzas	480,214	2,080,243	47	
P-Sámamo	479,821	2,078,451	28.63	
P-Frac-Xochitepec	474,210	2,076,524	7.85	
P-Paseos (AP-Paseos-E)	475,831	2,076,086	11	
P-El Pedregal	478,436	2,077,920	33.6	
P-La Guamuchilera	477,628	2,074,817	40.33	60.61
P-Laureles	478,837	2,073,010	29.1	
P-Cuartel	473,076	2,0736,02	67.93	
P-Colinas	474,781	2,078,078	41.01	
P-Balneario Xochitepec (P-BAL-XOCH)	474,791	2,075,723	5.6	
P-Xochitepec-Arroyos (P-XOC-ARRO)	476,216	2,075,633		36.19

P-TEZOYUCA	478,571	2,078,909	NSPS	
P-Lázaro Cárdenas (P-L-CARDEN)	477,907	2,076,673		30.76
P-Villas de Xochitepec Sección A (P-VXSECA)	476,408	2,074,721		28
P-Villas de Xochitepec Sección C (PVXSEC-C)	476,533	2,075,345		36.88
P-SOLARES	479,577	2,073,354		47.51
P-Crucero (P-CRUZERO-)	472,344	2,071,755	13.86	
P-Alpuyeca 1 (P-ALP1)	472,165	2,072,054		22.38
P-Chiconcuac (P-CHICONC1)	480,519	2,075,710		
P-Alcanfores (P-ALCANFOR)	474,172	2,078,368		52.22
P-Campo Plan (P-CAMPOPLA)	473,974	2,079,281		46.14
P-Tlazala (P-TLAZAZAL)	474,424	2,078,963		NSPS

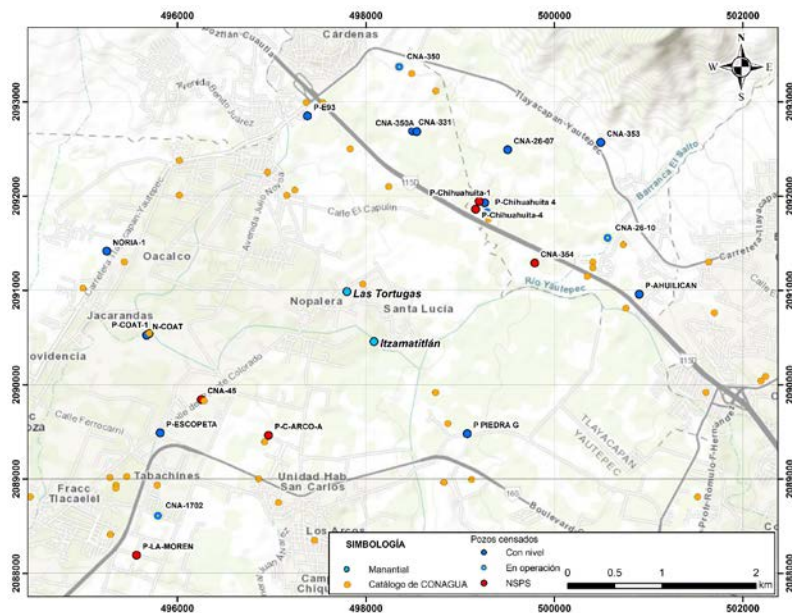
**Tabla 2.6 Pozos y norias verificadas (Los Ojos de agua de Cuauchichinola)**

Identificación	X	Y	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)
P-Palo Alto (P-PALO-GRA)	463,662	2,064,403	NSPS	
P-El jabonero (P-JABONERO)	463,336	2,065,052	85.41	
P-GRANJA	461,117	2,066,439	NSPS	
Manantial UTM (M-UTM)	464,927	2,061,177	NSPS	
P-Valle Bonito (P-VALLE-BO)	463,359	2,061,319	11.1	
P-AP-Cuauchichinola (P-AP-CUAUC)	460,450	2,065,162	34.07	
P-AGR-CUAU	459,753	2,062,882		58.85
P-EJ-GUARI	461,027	2,061,977	NSPS	
P-BCA-DEL-	461,114	2,061,564	NSPS	
N-PTE-DE-I	464,955	2,058,319	10.02	
P-4AP-PIXT	465,486	2,058,150		42
P3-LLANO-D	461,117	2,061,547	84.35	
P-AGR-GAS	466,009	2,060,191	15.50	



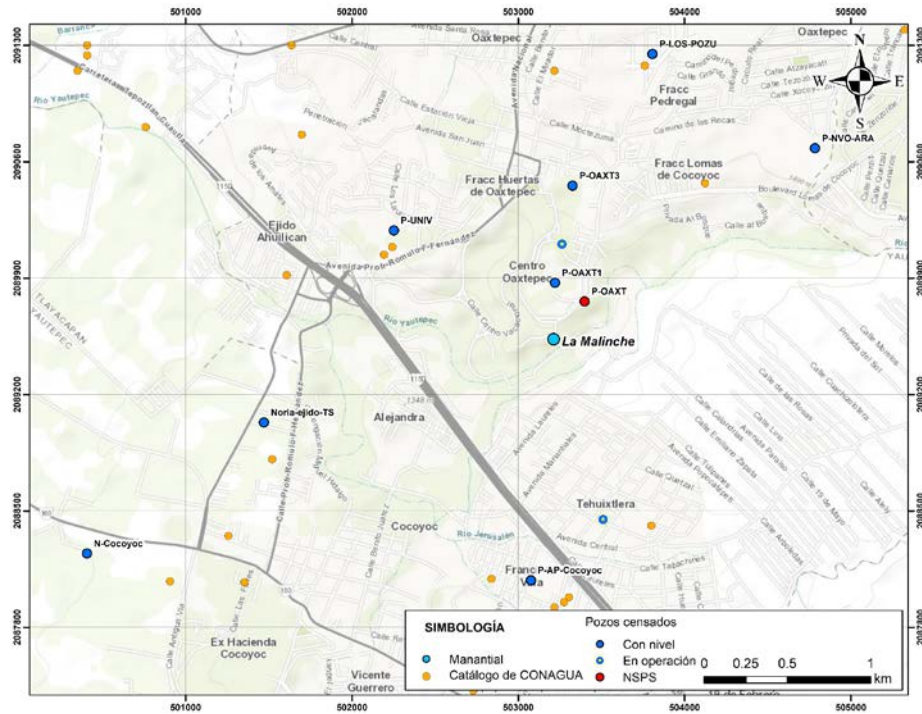
**Tabla 2.7 Pozos y norias verificadas (Las Fuentes)**

Identificación	X	Y	Nivel estático	Nivel dinámico
P-Las Fincas	480,388	2,087,238	51	66.85
P-Pedregal de las Fuentes	482,608	2,087,844	27.06	65.74
P-Frac. Las Moras	482,441	2,086,354	25.96	64.24
P-Jardín Juárez	483,445	2,086,463	30.16	75.4
P-Las Norias (N-CUAUCHIL)	483,212	2,088,483	NSPS	
P-SN-FCO	483,872	2,089,016	NSPS	
Manantial Cuauchiles (MAN-CUAUCH)	483,286	2,088,689	-	
Manantial El Texcal (MAN-TEXCAL)	484,187	2,089,317	-	
P-Villas del Descanso (VILLAS-J)	482,144	2,089,396	54.76	68.6
P-IMTA	483,203	2,088,020	34.52	

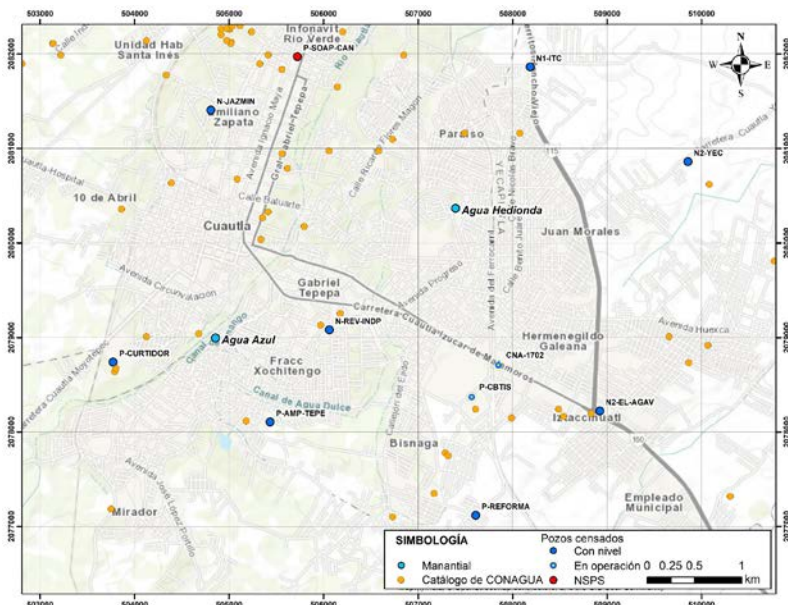


**Figura 2.1 Aprovechamientos existentes y verificación en el área de influencia del manantial Las Tortugas**

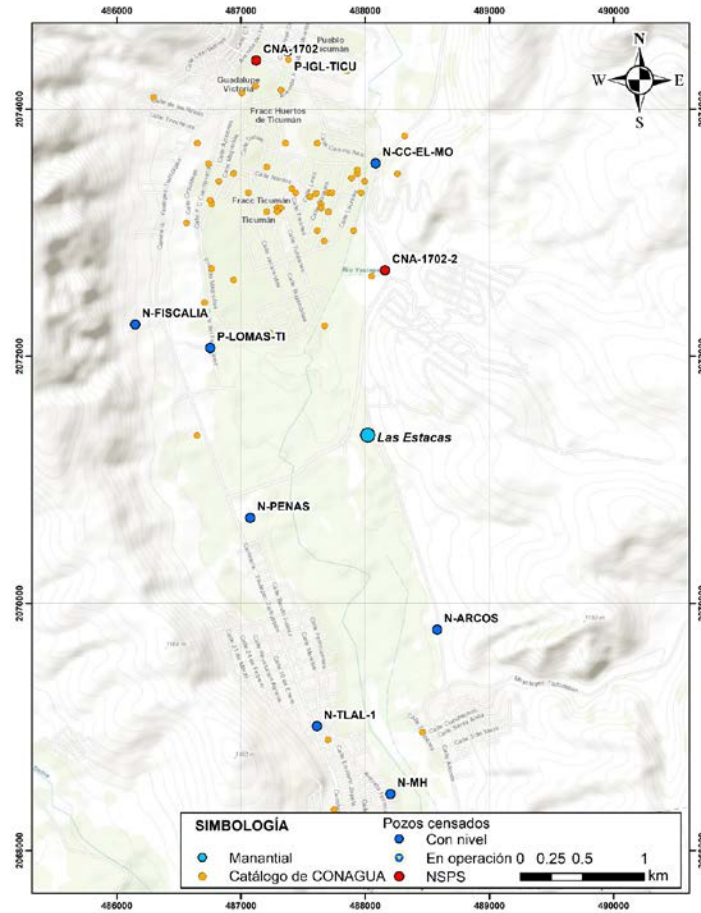
Caracterización de manantiales impactados por el sismo en el Estado de Morelos



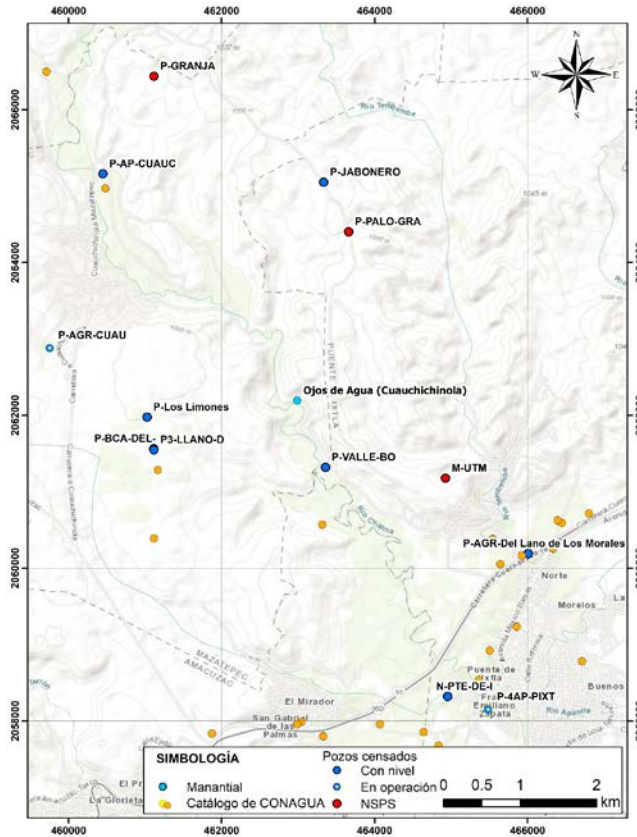
**Figura 2.2** Aprovechamientos existentes y verificación en el área de influencia del manantial La Malinche.



**Figura 2.3** Aprovechamientos existentes y verificación en el área de influencia de los manantiales Agua Hedionda y Agua Azul.



**Figura 2.4 Aprovechamientos existentes y verificación en el área de influencia del manantial Las Estacas.**



**Figura 2.5** Aprovechamientos existentes y verificación en el área de influencia del manantial Ojos de Agua de Cuauchichinola.

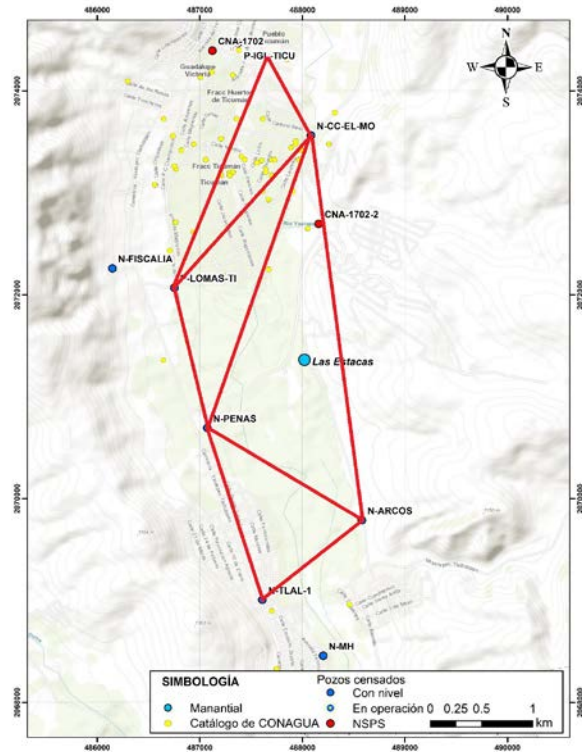






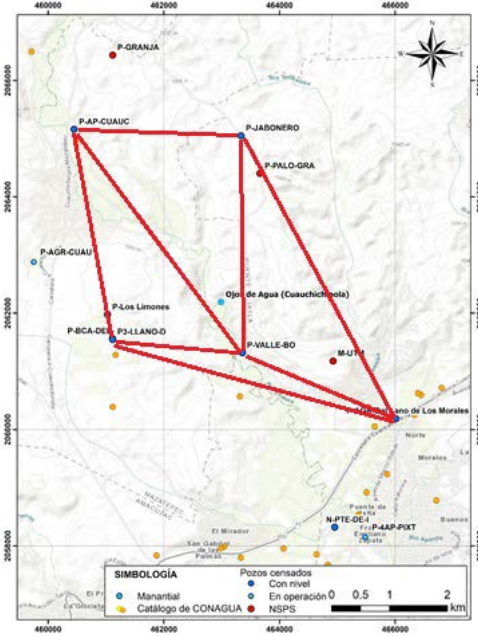




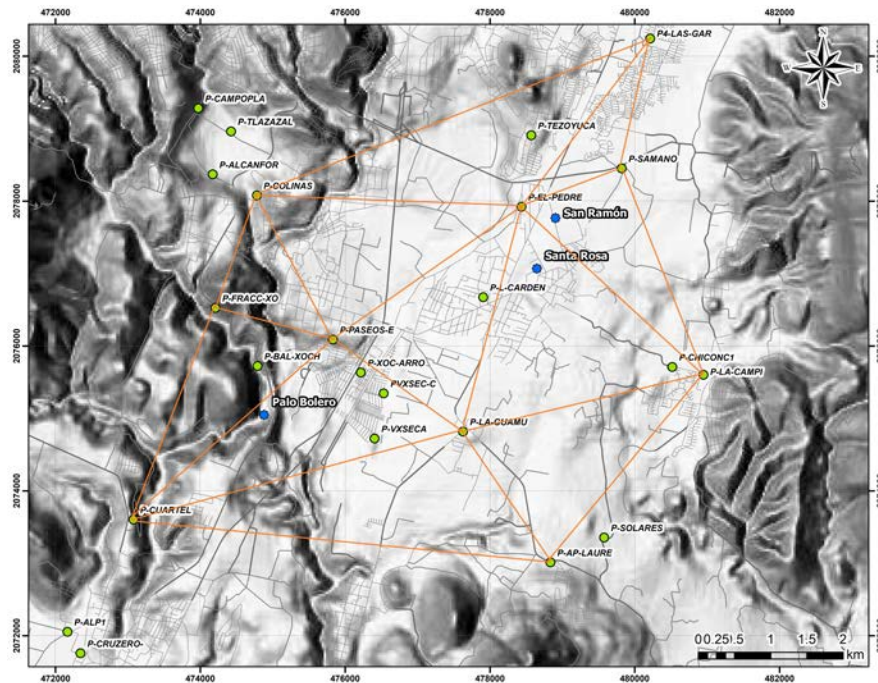


**Figura 2.11** Red de pozos de observación seleccionados y triangulación en la zona del manantial Las Estacas



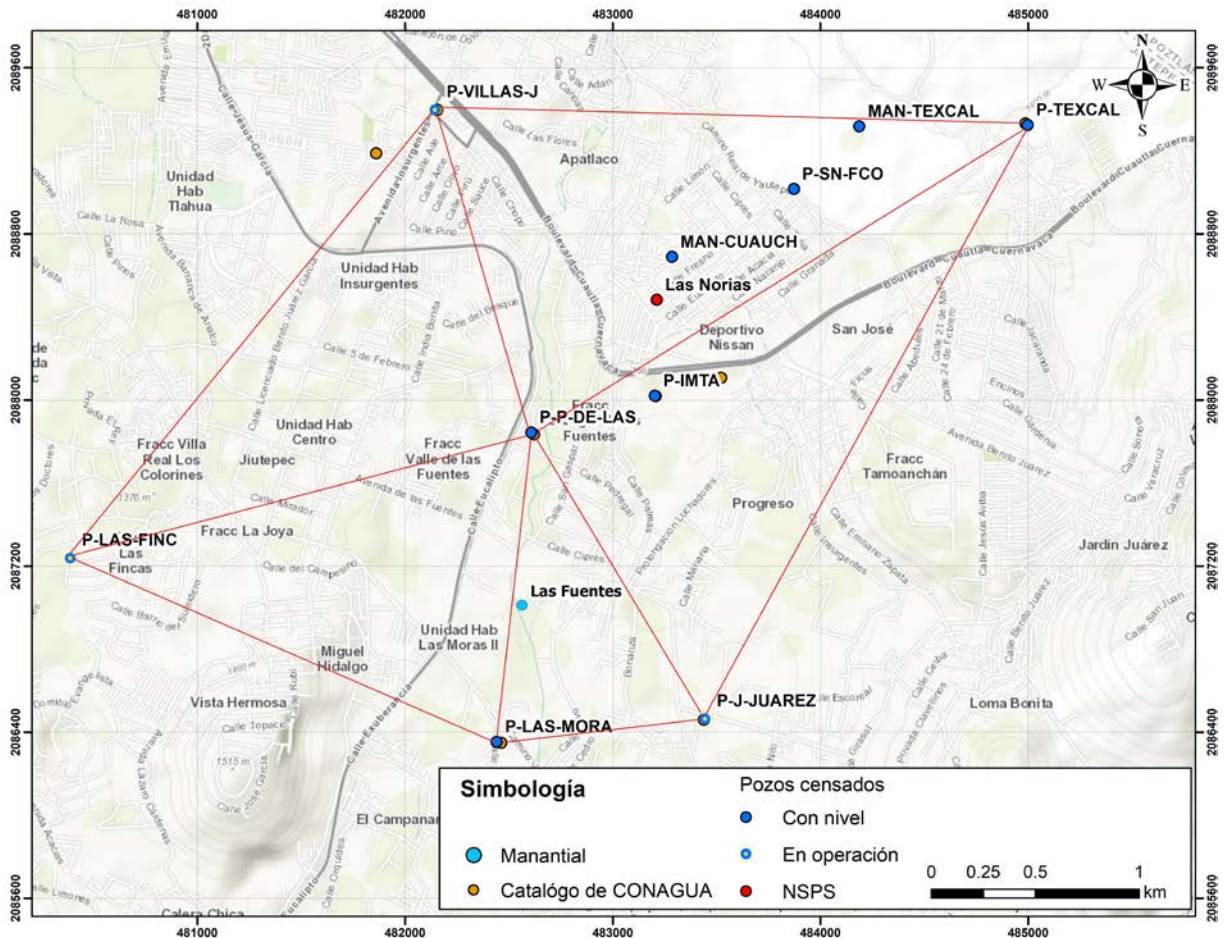


**Figura 2.12** Red de pozos de observación seleccionados y triangulación en la zona del manantial los Ojos de agua en Cuauchichinola



**Figura 2.13** Red de pozos de observación seleccionados y triangulación en la zona de los manantiales Palo Bolero, San Ramón y Santa Rosa.

Caracterización de manantiales impactados por el sismo en el Estado de Morelos



**Figura 2.14** Red de pozos de observación seleccionados y triangulación en la zona del manantial Las Fuentes.



## 2.3 Profundidad al nivel estático

### Acuífero Cuautla-Yautepec

En la zona de influencia de cada uno de los manantiales en estudio de este acuífero, se determinó la profundidad al nivel estático (PNE) en pozos y norias en el mes de marzo de 2018, utilizando para ello sondas eléctricas calibradas.

La profundidad al nivel estático en cada una de las zonas de influencia de los manantiales en estudio se describe a continuación:

- i) En la zona del manantial Las Tortugas fluctúa de 3.15 m (noria Campo Coatetelco hacia el poniente) a 14.96 m en el pozo CNA-26-07 ubicado al norte del manantial (en esta zona se encuentran varios pozos de uso agrícola intenso);
- ii) En el área del manantial La Malinche entre los 15.4 m (En Cocoyoc y Ejido Todos Santos, al sur y suroeste, respectivamente) y los 62.46 m (al norte del manantial);
- iii) En los alrededores de los manantiales Agua Hedionda y Agua Azul: al noreste (noria Instituto Tecnológico de Cuautla) es de 4.31 m; al noroeste (noria Jazmín) es de 5 m; al suroeste del manantial Agua Azul (Curtiduría Temola) es de 4.96 m; al sur de Agua Hedionda y sureste de Agua Azul (pozo Ampliación Reforma) es de 27 m y al sureste de Agua Hedionda en la noria El Agave (cruceo libramiento oriente) es de 27.5 m., y
- iv) En la zona del manantial las Estacas, la PNE varía entre 5.5 a 8.15 m en Ticuman a 5.42 y 12.73 m en Tlaltizapan.

En las tablas (2.8 a 2.11) y Figuras (2.15 a 2.18), se reporta la profundidad al nivel estático y las configuraciones para los aprovechamientos seleccionados como pozos de observación en los manantiales Las Tortugas, La Malinche, Agua Hedionda-Agua Azul y Las estacas en el acuífero Cuautla-Yautepec.

**Tabla 2.8 Profundidad al nivel estático (Las Tortugas)**

Identificación	Profundidad al nivel estático
P-AHUILICAN	10.05
CNA-26-07	14.96
P-E93	1.97
N-COAT	3.15
P PIEDRA G	25.30

**Tabla 2.9 Profundidad al nivel estático (La Malinche)**

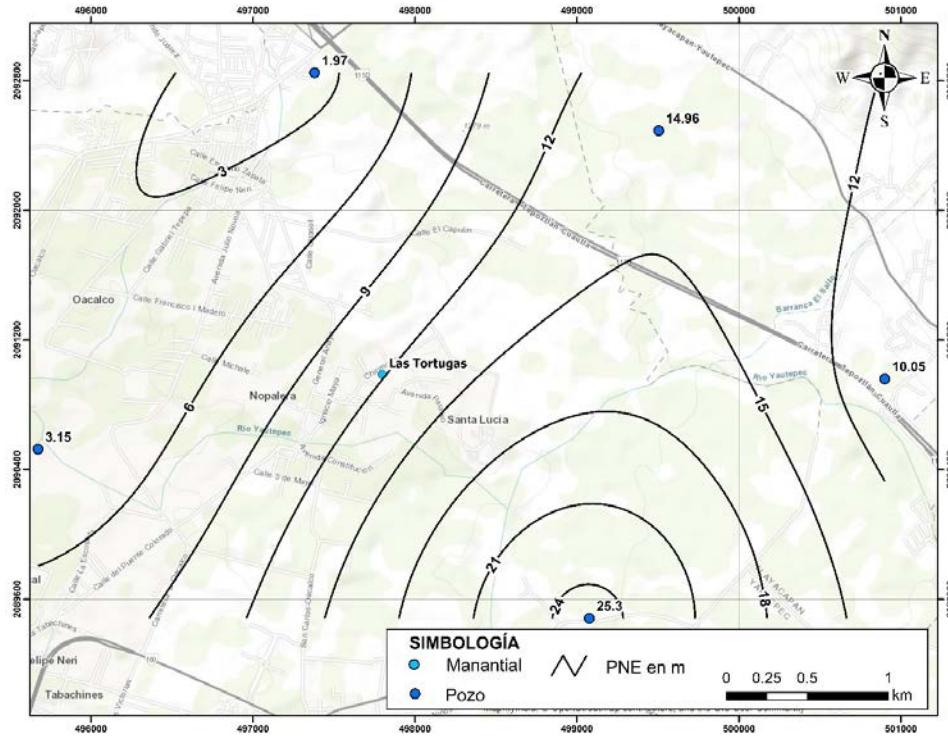
Identificación	Profundidad al nivel estático
P-OAXT1	52.87
P-NVO-ARA	39.61
P-LOS-POZU	62.46
Noria-ejido-TS	17.1
P-AP-Cocoyoc	15.4
P-UNIV	27.09

**Tabla 2.10 Profundidad al nivel estático (Agua hedionda-Agua Azul)**

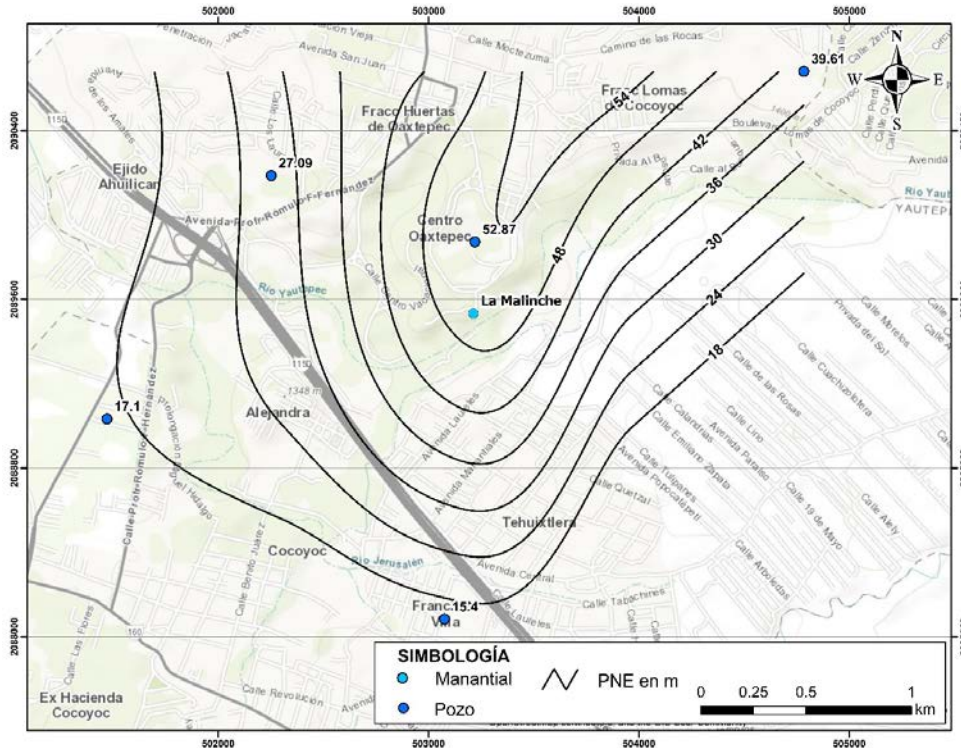
Identificación	Profundidad al nivel estático
N-JAZMIN	8.36
P-CURTIDOR	4.96
P-REFORMA	29.00
N-REV-INDP	21.62
N2-EL-AGAV	27.5
N1-ITC	4.31

**Tabla 2.11 Profundidad al nivel estático (Las Estacas)**

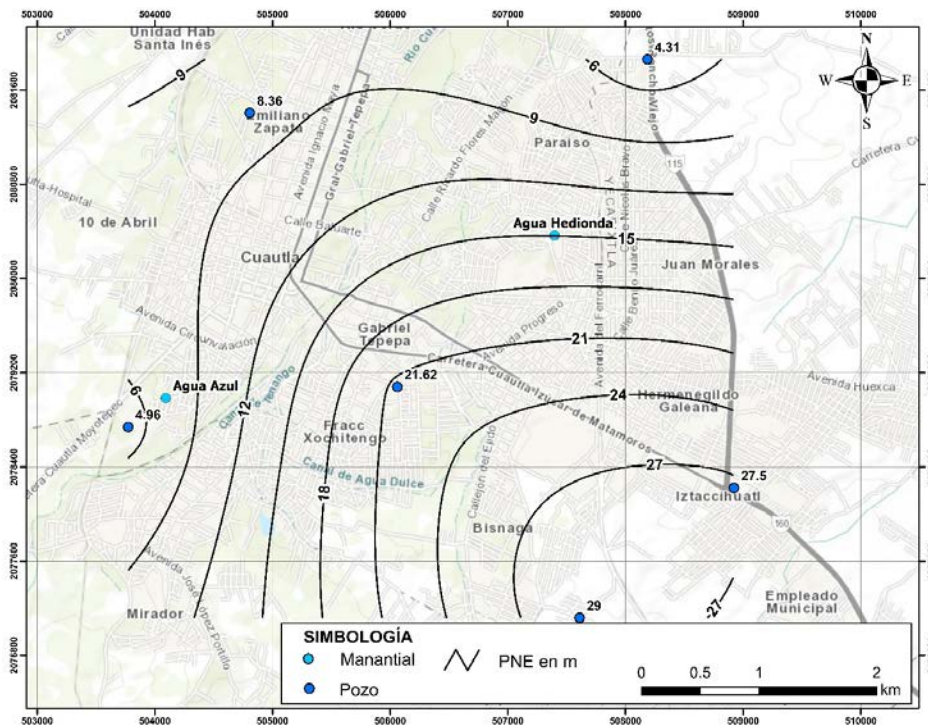
Identificación	Profundidad al nivel estático
P-IGL-TICU	5.5
N-CC-EL-MO	8.15
P-LOMAS-TI	6.16
N-PENAS	5.42
N-ARCOS	11.98
N-TLAL-1	12.73



**Figura 2.15 Configuración de la profundidad al nivel estático (Las Tortugas).**

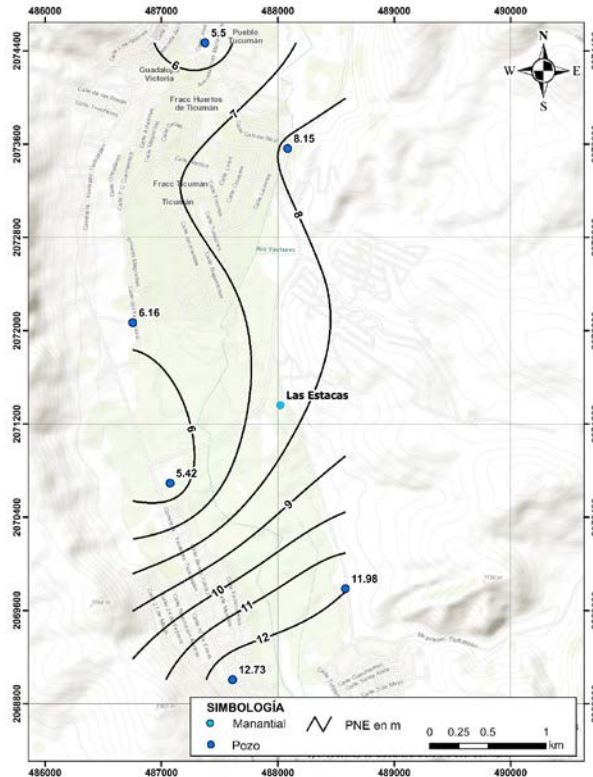


**Figura 2.16 Configuración de la profundidad al nivel estático (La Malinche).**



**Figura 2.17 Configuración de la profundidad al nivel estático (Agua Hedionda-Agua Azul)**





**Figura 2.18 Configuración de la profundidad al nivel estático (Las estacas).**

### Acuífero Cuernavaca

En la zona de influencia de cada uno de los manantiales en estudio de este acuífero, se determinó la profundidad al nivel estático (PNE) en pozos y norias en los meses de marzo y abril de 2018.

La profundidad al nivel estático en cada una de las zonas de influencia de los manantiales en estudio se describe a continuación:

- i) En la zona del manantial **Palo Bolero**, al norte en el fraccionamiento Xochitepec se registró una PNE de 7.85m, al suroeste en el pozo Cuartel se registró una PNE de 67.93, al oriente en el pozo Paseos (Pozo E) del Sistema de Agua potable del Municipio de Xochitepec (SAPMX), se registró una PNE de 11.00 m, encontrando fluctúa de manera general entre 8 y 68 m;
- ii) En el área de los manantiales **San Ramón-Santa Rosa**, hacia el noroeste y muy cerca de San ramón, se emplaza el pozo El Pedregal del SAPMX, donde se registró una PNE de 33.6 m (es un pozo recién perforado y equipado, reportan una disminución en su rendimiento); al noreste, en el pozo Sámano (Ejido Chiconcuac)



se registró una PNE de 28.63 m; al suroeste, en el pozo La Guamuchilera del SAPMX una PNE de 40.33 m. Podemos concluir que los pozos alrededor de estos manantiales operan intensamente, ya que suministran agua a las poblaciones.

### Acuífero Zacatepec

- iii) En el área de los manantiales Los Ojos de Agua de Cuauchichinola, se verificaron pozos al norte y noroeste de los manantiales, como es el caso del pozo Palo Alto de uso agrícola (cultivan especias) y donde la PNE es de 85 m, al oeste en el poblado de Cuauchichinola la PNE es de 34 m y al oriente en la colonia Valle Bonito el pozo ubicado en la margen izquierda del río la PNE es de 11 m. Y iv) en el zona del manantial Las Fuentes, los pozos Pedregal de Las Fuentes e IMTA se registra una PNE de 27.06 y 34.52, respectivamente.

En las tablas 2.12 a 2.14 y Figuras (2.19 a 2.21), se reporta los valores de la profundidad al nivel estático y las configuraciones de la profundidad al nivel estático en la zona de influencia de los manantiales Palo Bolero-San ramón-Santa Rosa, los ojos de agua en Cuauchichinola y Las Fuentes en el acuífero Cuautla-Yautepec.

**Tabla 2.12 Profundidad al nivel estático (manantiales Palo Bolero-San ramón-Santa Rosa)**

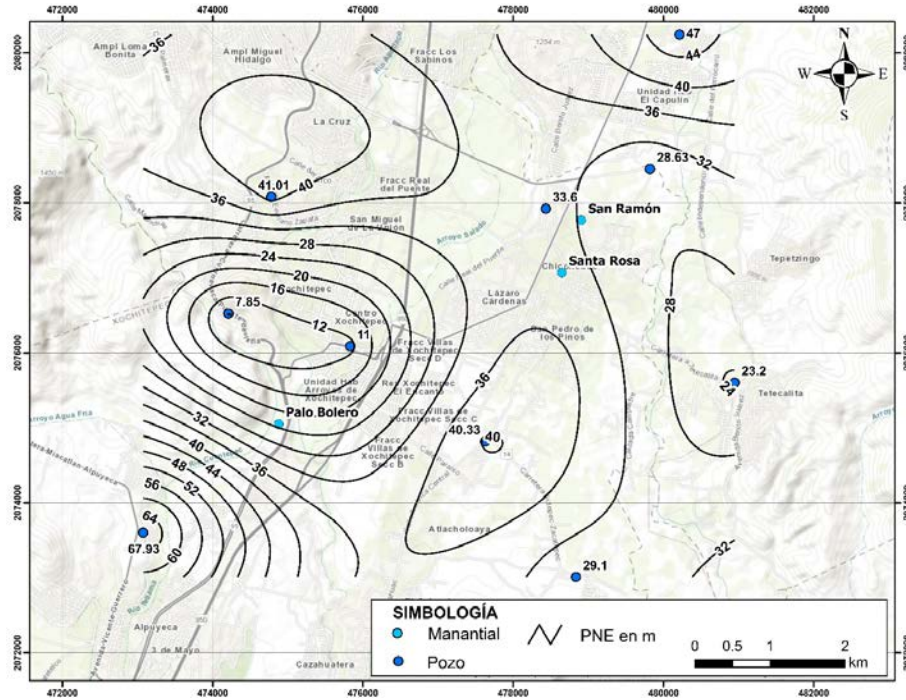
Identificación	Profundidad al nivel estático
P-La Campiña	23.2
P4 -Frac Las Garzas	47
P-Sámano	28.63
P-Frac-Xochitepec	7.85
AP-Paseos-E	11
P-El Pedregal	33.6
P-La Guamuchilera	40.33
P-Laureles	29.1
P-Cuartel	67.93
P-Colinas	41.01

**Tabla 2.13 Profundidad al nivel estático (los ojos de agua en Cuauchichinola).**

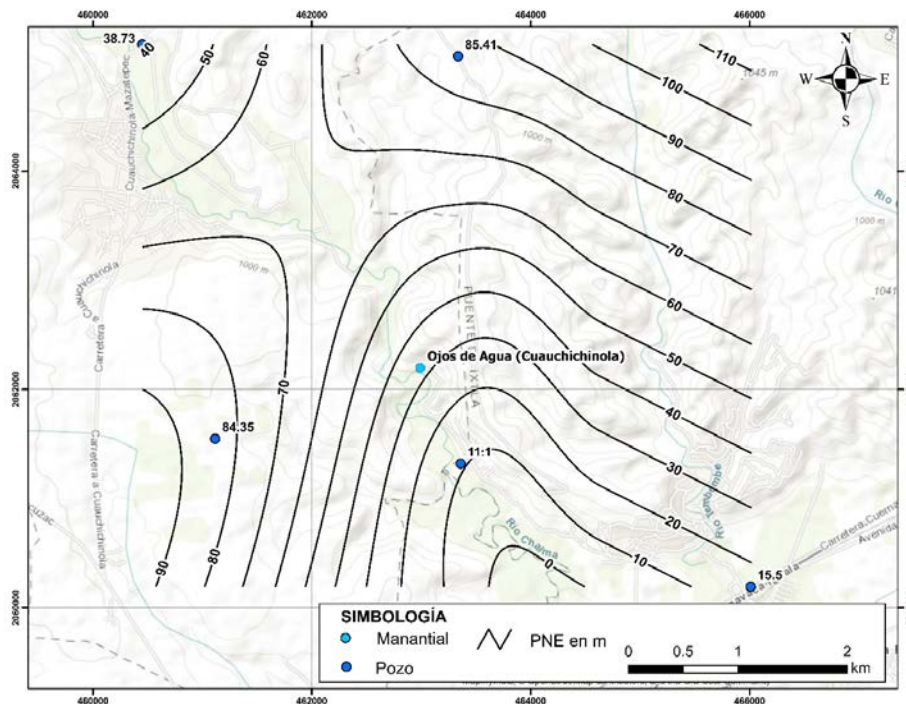
Identificación	Profundidad al nivel estático
Valle Bonito	11.1
El Jabonero	85.41
AP Cuauchichinola	34.07
Agrícola gasolinera Puente de Ixtla	15.5
No. 3 Llano del Guarín	84.31

**Tabla 2.14 Profundidad al nivel estático (Las Fuentes).**

Identificación	Profundidad al nivel estático
P-Las Fincas	51.00
P-Pedregal de las Fuentes	27.06
P-Frac. Las Moras	25.96
P-Jardín Juárez	30.16
P-Villas del Descanso (VILLAS-J)	54.76
P-IMTA	34.52



**Figura 2.19 Configuración de la profundidad al nivel estático (manantiales Palo Bolero-San Ramón-Santa Rosa)**



**Figura 2.20 Configuración de la profundidad al nivel estático (los ojos de agua en Cuachichinola).**



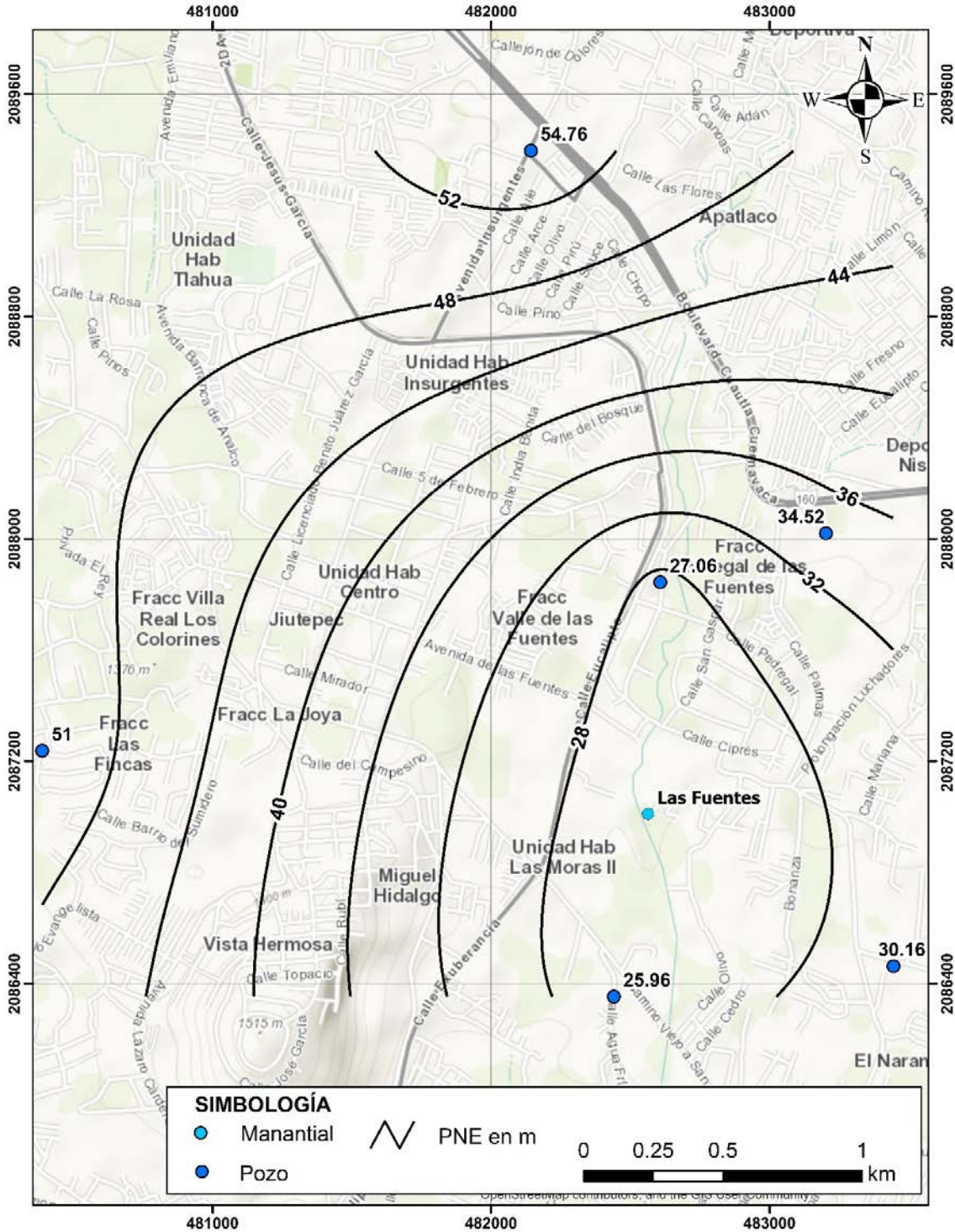


Figura 2.21 Configuración de la profundidad al nivel estático (Las Fuentes)

## 2.4 Nivelación de brocales

De acuerdo con la verificación de aprovechamientos y la selección de la red de pozos de observación en cada zona de influencia de los manantiales en estudio (acuíferos Cuautla-Yautepec, Cuernavaca y Zacatepec), los cuales servirán de apoyo para medir la profundidad del nivel del agua, calcular la elevación de su brocal, determinar la elevación del nivel estático y como un resultado definir la dirección del flujo subterráneo en cada zona.

Uno de los principales elementos requeridos para dicho estudio es la elevación referida sobre el nivel medio del mar de cada punto, para ello fue necesario realizar una nivelación topográfica a través de un método directo. A continuación se muestra la metodología, características y demás aspectos relacionados al trabajo topográfico realizado para conocer las elevaciones de los puntos ya mencionados.

### Introducción

El trabajo topográfico ha existido desde todo momento, con la necesidad de conocer la superficie terrestre y con ella estudiarla para mejorar las condiciones de vida y comunicación del ser humano. Con los diferentes métodos de medición es posible obtener la configuración de un lugar mediante distancias, ángulos y niveles, y así poder proyectar grandes diseños de ingeniería que satisfacen las diferentes necesidades de la sociedad.

La Topografía opera sobre porciones pequeñas de terreno, no teniendo en cuenta la verdadera forma de la Tierra, sino considerando la superficie terrestre como un plano. Cuando se trata de medir grandes extensiones de tierra, como por ejemplo, para confeccionar la carta de un país, de un estado o de una ciudad grande, no se puede aceptar la aproximación que da la topografía, teniéndose entonces que considerar la verdadera forma de la Tierra y por consiguiente la superficie ya no se considera un plano sino se toma como parte de la superficie de un elipsoide y tendremos que acudir a la Geodesia.

La geodesia es la ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra. Esto incluye la determinación del campo gravitatorio externo de la tierra y la superficie del fondo oceánico, además de la orientación y posición de la Tierra en el espacio.

Una parte fundamental de la geodesia es la determinación de la posición de puntos sobre la superficie terrestre mediante coordenadas (latitud, longitud, altura). La materialización de estos puntos sobre el terreno constituyen las redes geodésicas, conformadas por una serie de puntos (vértices geodésicos o también señales de nivelación), con coordenadas que configuran la base de la cartografía de un país, por lo que también se dice que es "la infraestructura de las infraestructuras" (Instituto Geográfico Nacional, España 2014).

A través de Levantamientos Geodésicos realizados en campo con el apoyo de equipos GPS, se pueden obtener las coordenadas Geográficas (Latitud, Longitud) de cualquier punto sobre la tierra así como su elevación referidos al nivel medio del mar, para una posterior transformación a un Sistema de Coordenadas sobre una Proyección (Este, Norte, altura o X, Y, Z). El levantamiento Geodésico a comparación de los levantamientos topográficos tradicionales, basan sus coordenadas en Sistemas de Referencia (Datum), los cuales sirven



de base para dar, obtener y propagar coordenadas precisas y geo referidas de un lugar específico sobre la superficie terrestre.

### **Objetivo**

De acuerdo con la selección y establecimiento de la red de pozos de observación, se tiene como objetivo obtener las elevaciones referidas sobre el nivel medio del mar en los brocales en pozos ubicados en los acuíferos de Cuautla-Yautepec, Cuernavaca y Zacatepec.

### **Levantamiento geodésico**

#### **Metodología**

Para la adecuada planificación y realización del levantamiento Geodésico de los puntos ya señalados anteriormente, fue necesario conocer y tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Ubicación y localización. Esto refiere a asegurar las condiciones físicas que permitan la adecuada ejecución del trabajo ya que la presencia de árboles y/o vegetación alta, interfieren con la recepción de señal de satélites empleados por el equipo GPS.
- b) Rutas de acceso
- c) Distancia entre puntos
- d) Tiempo de recorrido

Los principales obstáculos que se pudieran presentar para la realización del levantamiento fueron, las rutas de acceso sean transitables para que el traslado entre un punto a otro no excediera en tiempo hasta una hora de recorrido, además de la falta de un banco de nivel fijo o una placa geodésica previamente establecida por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), aledañas o ubicadas en los municipios anteriormente mencionados.

Conociendo dichas situaciones, se obtendrán las coordenadas UTM en posición plana y ortométrica (m.s.m.n.) de elevación de los brocales de los pozos realizando un levantamiento topográfico con equipo satelital de alta precisión tipo GPS RTK marca LEICA 09 o similar (base y móvil), con capacidad de recibir señal de diferentes satélites de posicionamiento (GPS-NAVSTAR) equipados con radios para comunicación, con controladora inalámbrica para uso rudo, protección contra agua y polvo, bluetooth interno para comunicación con los GPS fijo y móvil.

Para la obtención de las coordenadas geográficas y elevaciones de los brocales de los pozos respecto al nivel medio del mar se deberán ubicar puntos de control como base ligada a la RGNA (Red Geodésica Nacional Activa) del INEGI, instalando un equipo geodésico satelital como base durante todo el tiempo que se esté trasladando la estación móvil en cada uno de los puntos a nivelar.

La estación móvil deberá realizar la colecta de datos de cada sitio en un tiempo no menor de 10 minutos.

Una vez realizado el levantamiento de cada uno de los puntos se procederá a descargar la información de las estaciones base y móvil para su postproceso en gabinete con Software para postproceso con capacidad de transformación de coordenadas, visualización y análisis de los resultados del trabajo y exportación de datos en ASCII, NMEA, CR5, CRD o DXF.

Los datos se ligarán a la estación de referencia de la RGNA, para la obtención de los datos en coordenadas UTM, geográficas y la altura elipsoidal especificando la calidad de cada punto observado.

Para la obtención de las alturas ortométricas, se utilizará la página del INEGI, la cual se alimenta con cada coordenada y su respectiva altura elipsoidal, obteniendo el resultado con la altura ya calculada usando el modelo GGM10.

### Trabajo de campo

Conociendo la ubicación de los puntos a levantar, posibles obstáculos que entorpecieran el levantamiento y la metodología para la ejecución del trabajo, se procedió a iniciar con el levantamiento y recolección de información en campo.

La colocación del equipo GPS dependió de los puntos a tomar. Para el caso de los Aprovechamientos de agua subterránea el equipo se centró y niveló de tal manera que el punto a tomar fuera el brocal del pozo, el punto de medición, o a nivel de terreno natural. Foto 1.



**Foto 1 Medición del brocal del pozo Nuevo ARA (Oaxtepec).**

Una vez colocado el equipo GPS sobre los puntos a levantar, se encendió el equipo se calibró y actualizó la fecha y hora correspondiente al día del levantamiento, se esperó la recepción de satélites ubicados sobre el firmamento, esperando a que el equipo detectara un mínimo de tres satélites para iniciar con la recolección de información. Una vez detectado un número adecuado de satélites, se iniciaba el levantamiento, para ello se midió la distancia vertical que existía entre la antena y el brocal del pozo, para ingresarla al equipo y darle un tiempo de espera para la recolección de datos de un aproximado de cuarenta minutos a una hora, para así tener la información necesaria y obtener la precisión deseada. El tiempo de espera y precisión de levantamiento de tipo Geodésico, es directamente proporcional a la recepción de satélites que detecte el equipo, entre más satélites capte el equipo, menor será la espera y mayor será la precisión.

Durante el tiempo de espera que duraba la recolección de datos con el equipo GPS se observó que el límite del PDOP (Position Dilution of Precision), no fuera mayor a un rango de tres, el PDOP indica la calidad de la geométrica de los satélites GPS en el horizonte, un PDOP bajo indica una geometría buena tres o menor. Un PDOP alto indica problemas en la geometría de los satélites y si es mayor de diez existen errores con la precisión de las coordenadas obtenidas.

Durante la toma de coordenadas de los puntos levantados el rango PDOP no excedió a 2.5.

## Resultados

**Tabla 2.15 Nivelación de brocales en pozos de observación**

<b>Las Tortugas</b>			
<b>Identificación</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z (msnm)</b>
P-AHUILICAN	500,901	2,090,959	1275.283
CNA-26-07	499,505	2,092,491	1273.761
P-E93	497,380	2,092,848	1253.698
N-COAT	495,673	2,090,524	1215.058
P PIEDRA G	499,076	2,089,480	1265.120
<b>Zona de la Malinche</b>			
<b>Identificación</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z (msnm)</b>
P-OAXT1	503,220	2,089,871	1353.017
P-NVO-ARA	504,784	2,090,680	1402.789
Noria-ejido-TS	501,471	2,089,032	1298.767
P-AP-Cocoyoc	503,076	2,088,082	1339.97
P-UNIV	502,252	2,090,186	1326.00

<b>Zona de Agua Hedionda – Agua Azul</b>			
<b>Identificación</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z (msnm)</b>
N-JAZMIN	504,807	2,081,406	1304.311
P-CURTIDOR	503,773	2,078,739	1259.725
P-REFORMA	507,610	2,077,118	1324.147
N-REV-INDP	506,061	2,079,079	1305.732
N2-EL-AGAV	508,923	2,078,222	1359.458
N1-ITC	508,187	2,081,862	1339.308
<b>Las Estacas</b>			
<b>Identificación</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z (msnm)</b>
P-IGL-TICU	487,374	2,074,467	953.234
N-CC-EL-MO	488,084	2,073,561	952.045
P-LOMAS-TI	486,753	2,072,068	951.005
N-PENAS	487,074	2,070,692	947.675
N-ARCOS	488,581	2,069,786	950.878
N-TLAL-1	487,611	2,069,006	948.809
<b>Zona Palo Bolero, Santa Rosa y San Ramón</b>			
<b>Identificación</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z (msnm)</b>
P-La Campiña	480,948	2,075,601	1133.573
P4 -Frac Las Garzas	480,214	2,080,243	1205.645
P-Sámamo	479,820	2,078,451	1190.854
P-Frac-Xochitepec	474,210	2,076,524	1069.544
AP-Paseos-E	475,831	2,076,086	1072.785
P-El Pedregal	478436	2,077,920	1165.827
P-La Guamuchilera	477,628	2,074,817	1122.392
P-Laureles	478,837	2,073,010	1113.572
P-Cuartel	473,076	2,073,602	1080.158
P-Colinas	474,780	2,078,078	1109.784
<b>Ojos de agua de Cuauchichinola</b>			

Identificación	X	Y	Z (msnm)
P-VALLE-BO	463,359	2,061,319	901.930
P-JABONERO	463,336	2,065,051	980.361
P-AP-CUAUC	460,450	2,065,162	928.463
P-AGRI-GAS-PI	466,009	2,060,190	891.929
P3-LLANO-D	461,117	2,061,546	978.836
Las Fuentes			
Identificación	X	Y	Z (msnm)
P-Las Fincas	480,388	2,087,237	1350.054
P-Pedregal de las Fuentes	482,608	2,087,844	1340.887
P-Frac. Las Moras	482,441	2,086,353	1314.918
P-Jardin Juarez	483,445	2,086,463	1319.672
P-Villas del Descanso	482,143	2,089,396	1393.00
P-IMTA	483,202	2,088,020	1347.712

## 2.5 Elevación del nivel estático

De acuerdo con los pozos seleccionados, se midió la profundidad al nivel estático (PNE) y se calculó la elevación sobre el nivel medio del mar de sus respectivos brocales, con lo cual se determinó (mediante la sustracción de la elevación de los brocales y la PNE), la elevación del nivel estático en cada uno de los pozos y con ello la configuración de la elevación del nivel estático en cada zona de influencia de los manantiales en estudio. A continuación se describen las variaciones de las equipotenciales por acuífero.

### Acuífero Cuautla-Yautepec

Las variaciones de la elevación del nivel estático en cada zona de estudio son como sigue:

- i) En la zona del manantial Las Tortugas fluctúa de 1265 msnm en el pozo Ahuilican al norte del manantial a 1211 msnm en la noria Coatetelco al suroeste del manantial;
- ii) En el área del manantial La Malinche entre los 1363 msnm al norte en el fraccionamiento ARA a los 1281 msnm (noria Todos Santos al suroeste);
- iii) En los manantiales Agua Hedionda y Agua Azul, de 1334 a 1254 msnm, respectivamente, y



iv) En la zona del manantial las Estacas, de 947 a 936 msnm, respectivamente.

En la tabla 2.16 se muestran los valores obtenidos de la elevación del nivel estático y en la Figuras (2.23 a 2.26) las configuraciones de la elevación en la zona de los manantiales Las Tortugas, La Malinche, Agua Hedionda-Agua Azul y Las estacas.

**Tabla 2.16 Elevación del nivel estático (Acuífero Cuautla-Yautepec)**

Identificación del pozo	Elevación del nivel estático
<b>Las Tortugas</b>	
P-AHUILICAN	1265.233
CNA-26-07	1258.801
P-E93	1251.728
N-COAT	1211.908
P PIEDRA G	1239.820
<b>La Malinche</b>	
P-OAXT1	1300.147
P-NVO-ARA	1363.179
Noria-ejido-TS	1281.667
P-AP-Cocoyoc	1324.57
P-UNIV	1298.91
<b>Agua Hedionda-Agua Azul</b>	
N-JAZMIN	1295.951
P-CURTIDOR	1254.765
P-REFORMA	1295.147
N-REV-INDP	1284.112
N2-EL-AGAV	1331.958
N1-ITC	1334.998
<b>Las Estacas</b>	
P-IGL-TICU	947.734
N-CC-EL-MO	943.895
P-LOMAS-TI	944.845
N-PENAS	942.255
N-ARCOS	938.898
N-TLAL-1	936.079

### Acuífero Cuernavaca

La elevación del nivel estático en cada una de las zonas de influencia de los manantiales en estudio se describe a continuación:

- i) En la zona de los manantiales **Palo Bolero, San Ramón-Santa Rosa**, fluctúa de 1158 msnm (Tezoyuca, Chiconcuac y Tetecalita), a 1012 msnm al norte de Alpuyecá (pozo El cuartel del SAPMX);
- ii) **En la zona del manantial Las Fuentes**, varía entre 1338 (pozo villas del descanso) a 1289 msnm (pozos Las Moras y Jardín Juárez), respectivamente.

### Acuífero Zacatepec

La elevación del nivel estático para la zona de influencia del manantial los Ojos de agua en Cuauchichinola se describe a continuación:

- i) **En el área de los manantiales Los Ojos de Agua de Cuauchichinola**, varía entre 894 (pozo El jabonero y pozo 3 Llano del Guarín) a 876 msnm (Pozo agrícola “de los Morales” en Puente de Ixtla), respectivamente.

En la tabla 2.17 se muestran los valores obtenidos de la elevación del nivel estático y en las Figuras 2.28, 2.29 y 2.31, las configuraciones de la elevación en el área de los manantiales Palo Bolero-San Ramón-Santa Rosa, Las Fuentes y los Ojos de agua en Cuauchichinola.

**Tabla 2.17 Elevación del nivel estático en las zonas de influencia de los manantiales del acuífero Cuernavaca**

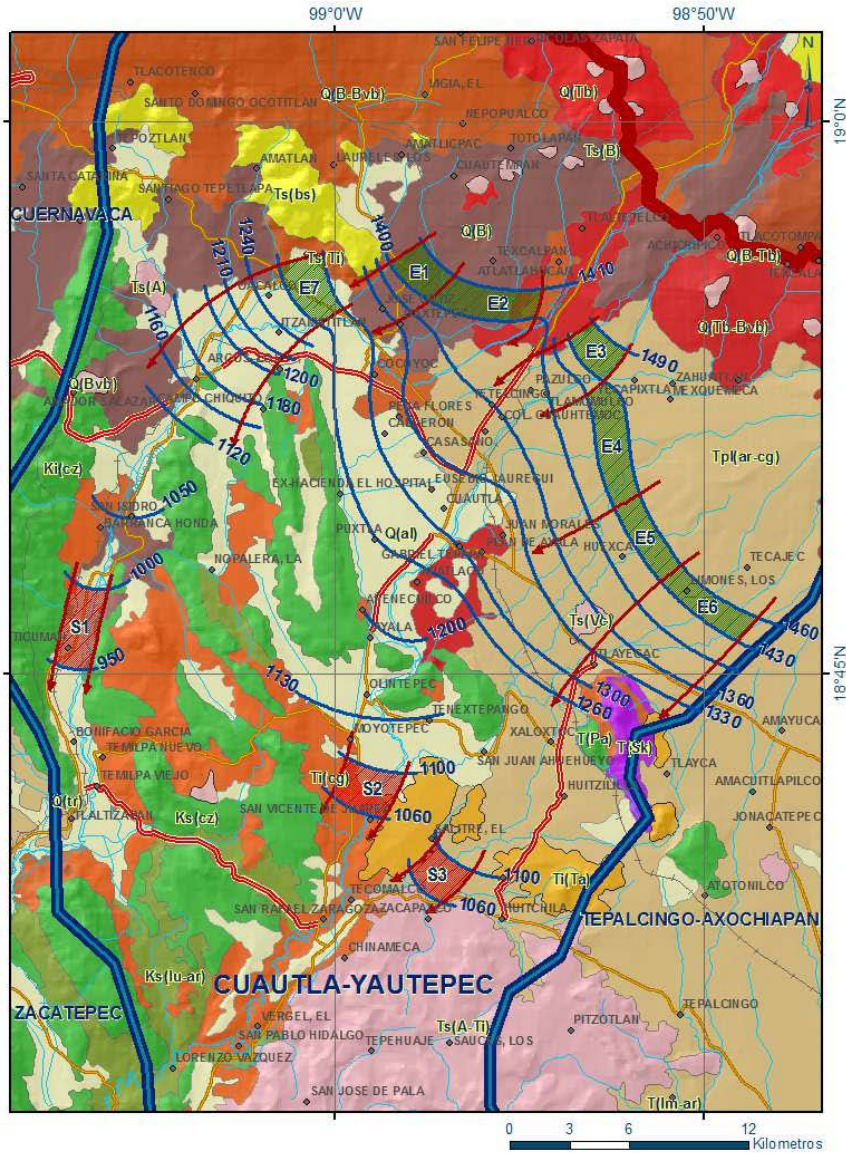
Identificación del pozo	Elevación del nivel estático (msnm)
<b>Palo Bolero-Santa Rosa-San Ramón</b>	
P-La Campiña	1110.373
P4 -Frac Las Garzas	1158.645
P-Sámáno	1162.224
P-Frac-Xochitepec	1061.694
AP-Paseos-E	1061.785
P-El Pedregal	1132.227
P-La Guamuchilera	1082.062
P-Laureles	1084.472
P-Cuartel	1012.228
P-Colinas	1068.774

<b>Las Fuentes</b>	
P-Las Fincas	1299.054
P-Pedregal de las Fuentes	1313.827
P-Frac. Las Moras	1288.958
P-Jardín Juárez	1289.512
P-Villas del Descanso (VILLAS-J)	1338.240
P-IMTA	1313.192
<b>Ojos de agua (acuífero Zacatepec)</b>	
Valle Bonito	890.83
El Jabonero	894.951
AP Cuauchichinola	889.733
Agrícola gasolinera Puente de	876.429
Pozo 3 Llano del Guarín	894.486

## 2.6 Determinación de la dirección del flujo subterráneo

### Acuífero Cautla-Yautepec

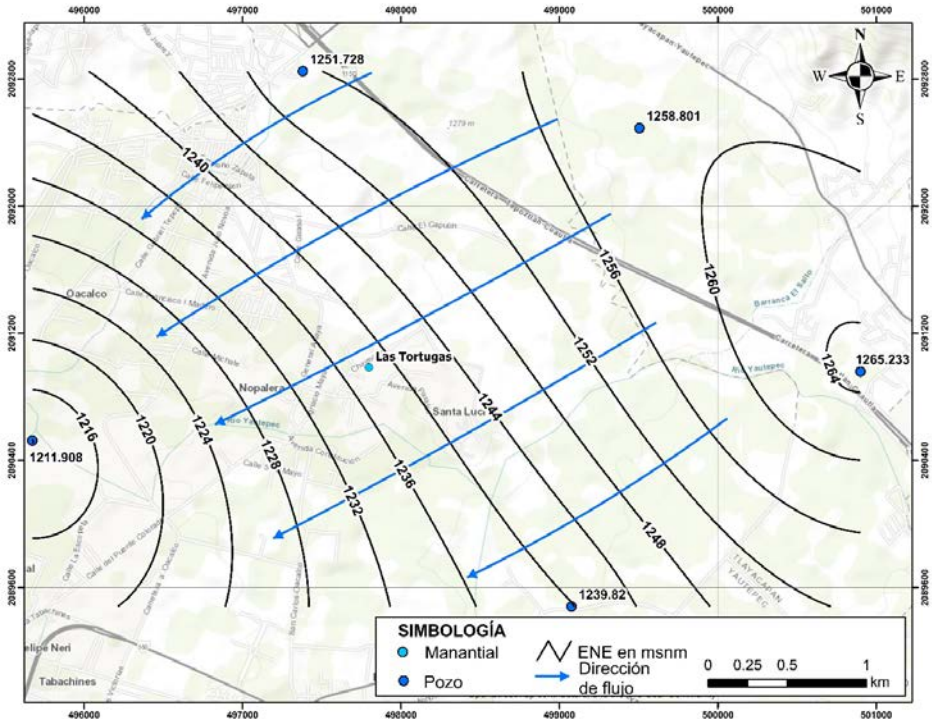
La CONAGUA (2013), para el acuífero Cautla-Yautepec menciona que en la configuración de elevación del nivel estático para el año 2010, de manera general, la dirección preferencial del flujo subterráneo es de noreste hacia el suroeste.



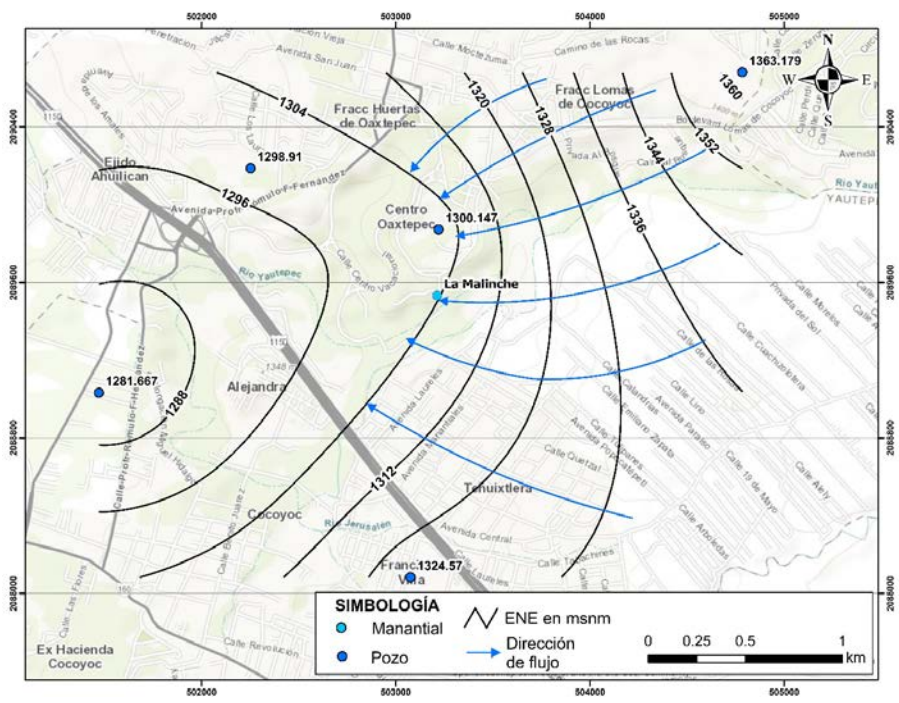
**Figura 2.22 Configuración de le elevación del nivel estático y dirección del flujo del acuífero Cuautla-Yautepec (CONAGUA, 2013)**

Acorde con la dirección preferencial del flujo subterráneo en todo el acuífero Cuautla-Yautepec, la dirección de flujo resultante en las zonas de los manantiales Las Tortugas (Figura 2.23), La Malinche (Figura 2.24), Agua Hedionda-Agua Azul (Figura 2.25) y Las Estacas (Figura 2.26) presentan una dirección preferencial del noreste hacia el suroeste. Por lo que podemos concluir que la dirección resultante en estas zonas se mantiene, de acuerdo con la configuración regional de la CONAGUA.



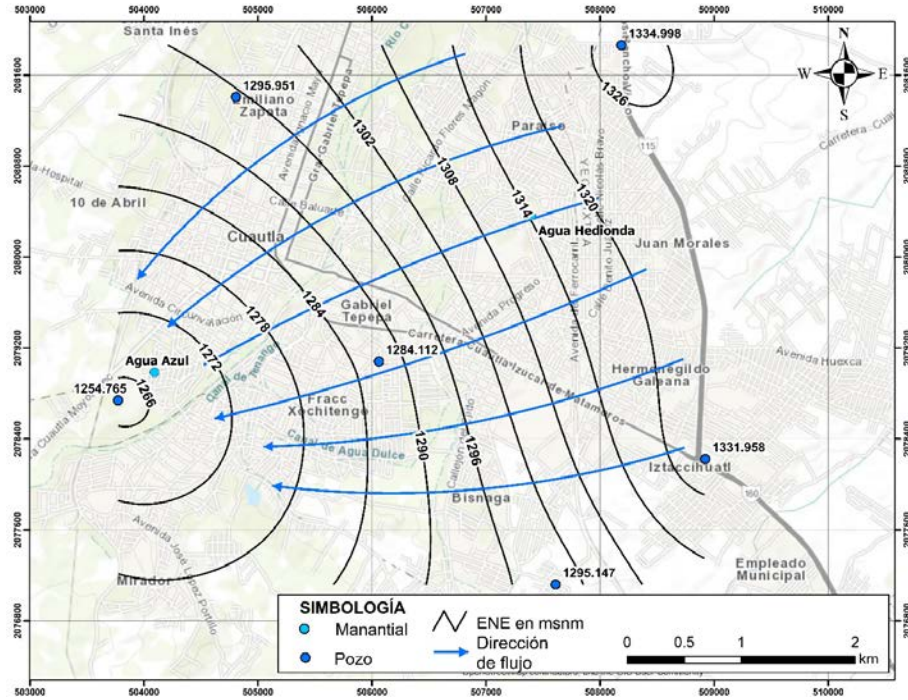


**Figura 2.23 Configuración de la elevación del nivel estático y dirección del flujo (las Tortugas)**

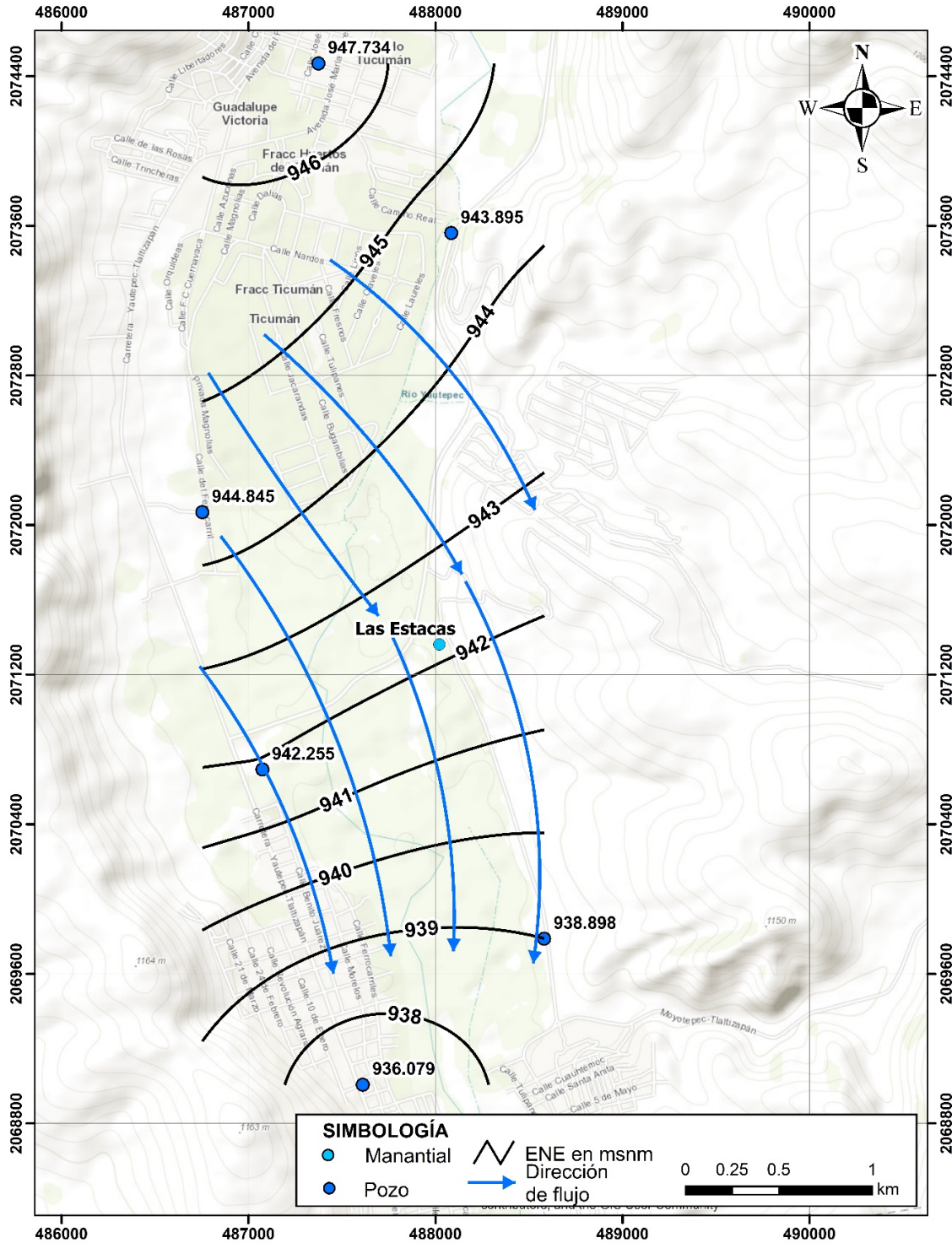


**Figura 2.24 Configuración de la elevación del nivel estático y dirección del flujo (la Malinche)**





**Figura 2.25 Configuración de la elevación del nivel estático y dirección del flujo (Agua Hedionda-Agua Azul)**

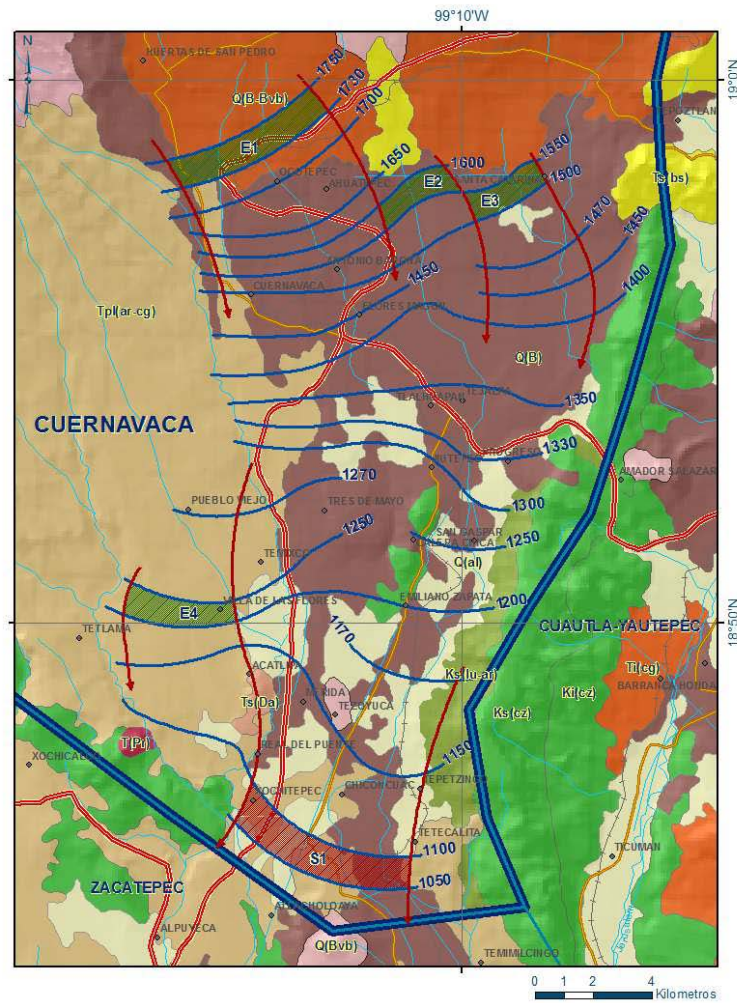


**Figura 2.26 Configuración de la elevación del nivel estático y dirección del flujo (Las Estacas).**



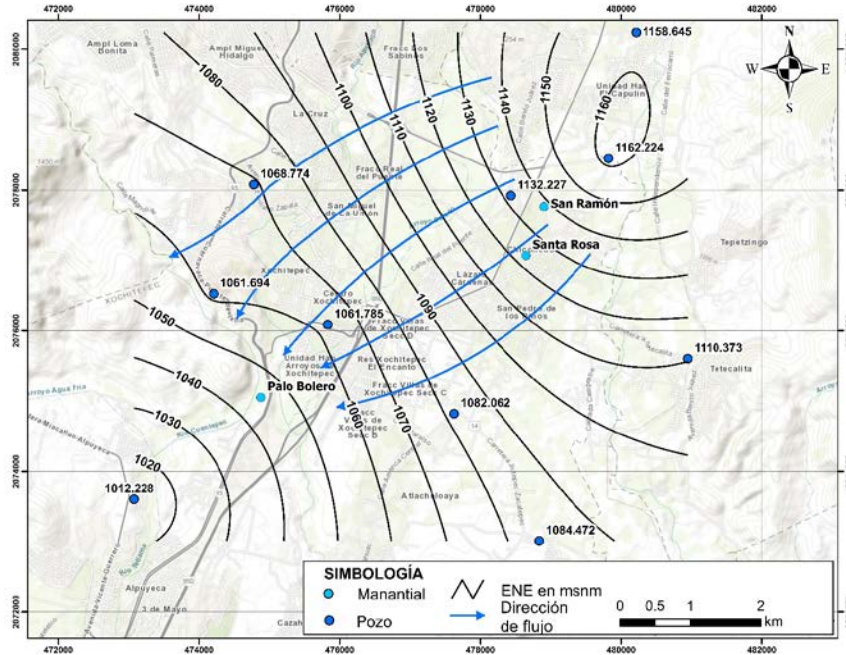
### Acuífero Cuernavaca

La CONAGUA (2013), presenta la configuración de elevación del nivel estático (2010), donde los valores varían de 1050 a 1750 msnm. Con una dirección preferencial del flujo subterráneo de norte-sur (Figura 2.27).

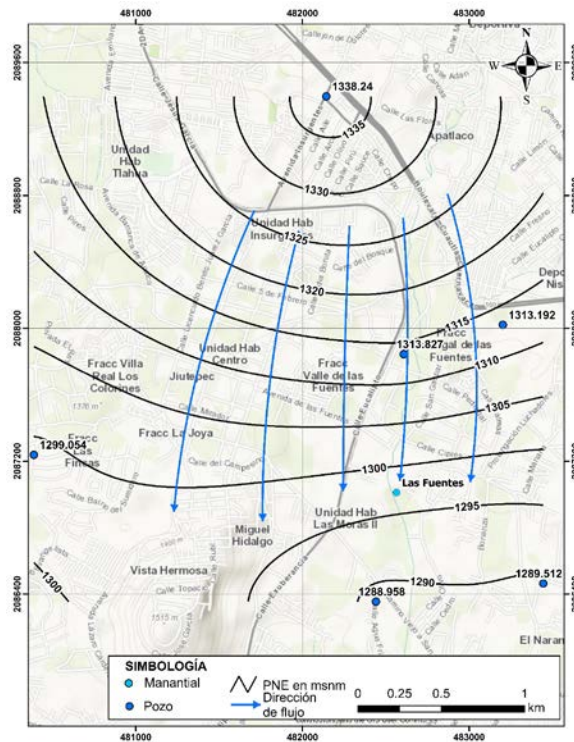


**Figura 2.27 Configuración de la elevación del nivel estático y dirección del flujo para el acuífero Cuernavaca (CONAGUA, 2013)**

La dirección del flujo subterráneo en la zona de los manantiales San Ramón, Santa Rosa y palo Bolero, muestra una dirección preferencial noreste a suroeste (Figura 2.28). Cabe mencionar que esta dirección es similar a la presentada por la CONAGUA en 2010, ya que si se observa más detalladamente la configuración de la CONAGUA, no es exactamente Norte a Sur.



**Figura 2.28 Configuración de la elevación del nivel estático y dirección del flujo (Palo Bolero-San Ramón-Santa Rosa)**

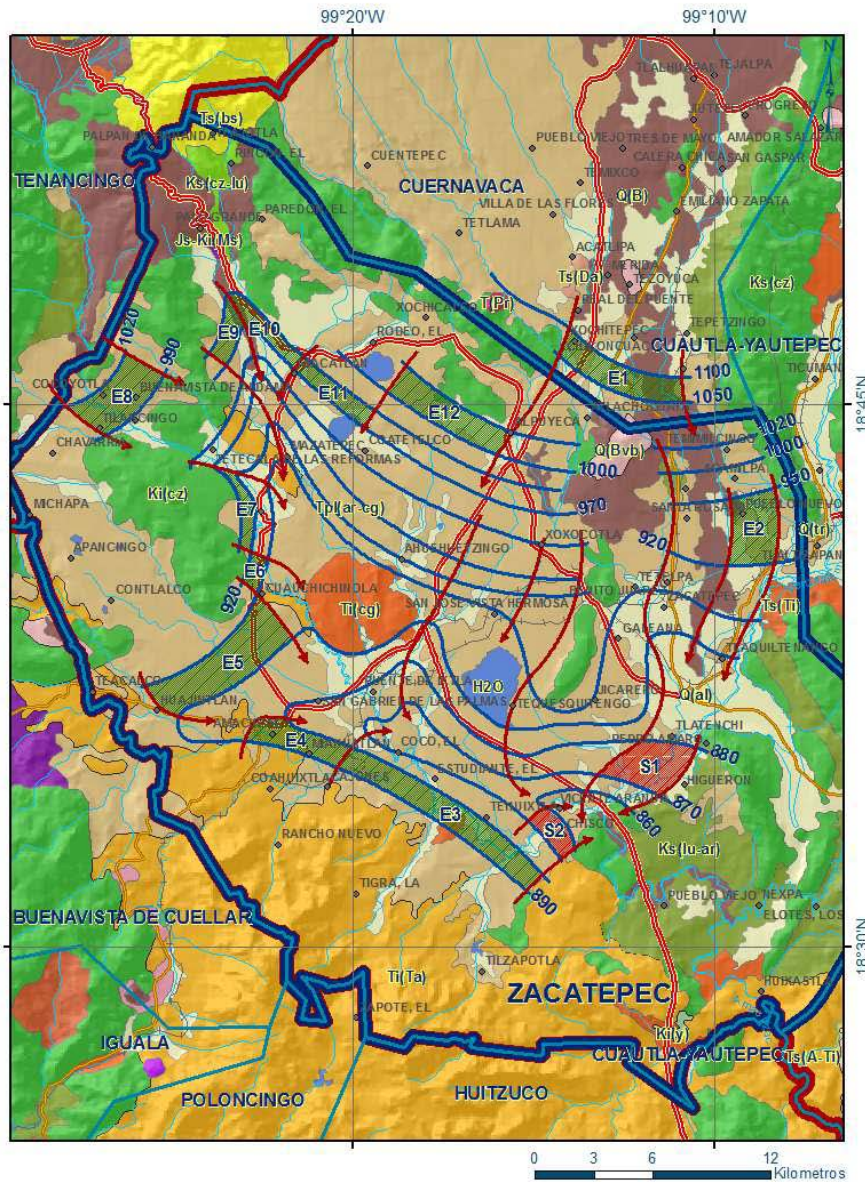


**Figura 2.29 Configuración de la elevación del nivel estático y dirección del flujo (Las Fuentes)**



### Acuífero Zacatepec

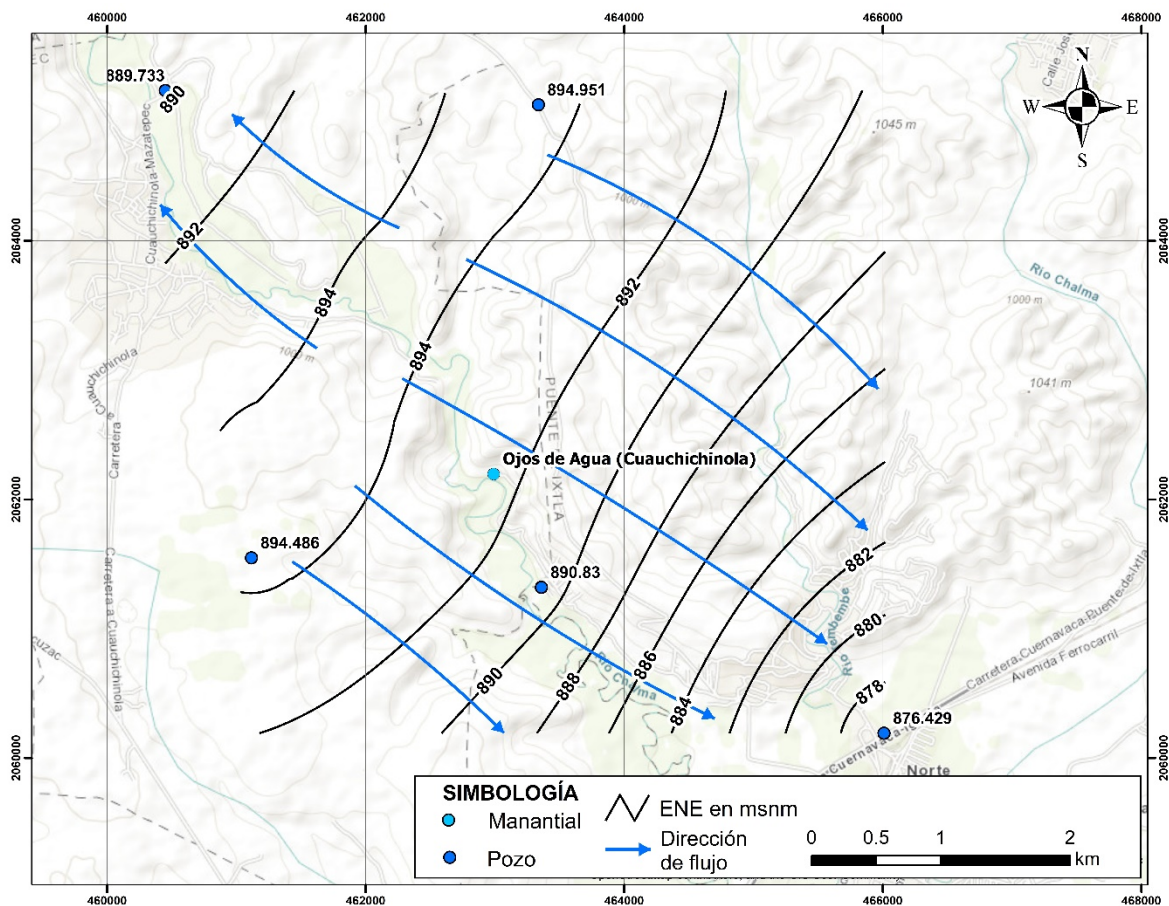
La CONAGUA (2015), presenta la configuración de elevación del nivel estático (2010), que de manera general van de 860 a 1100 msnm, con una dirección preferencial del flujo subterráneo de norte-sur. En la zona de Cuauhchichinola las equipotenciales varían de 930 a 910 msnm, con una dirección preferencial de noroeste a sureste (Figura 2.30).



**Figura 2.30** Configuración de la elevación del nivel estático para el acuífero Zacatepec en msnm (2010).



De acuerdo con la configuración de la elevación del nivel estático registrado en los pozos de observación en el mes de abril del 2018, la dirección preferencial del flujo subterráneo en la zona del manantial los Ojos de Agua de Cuauchichinola muestra una dirección preferencial de noroeste a sureste (Figura 2.31). Acorde con la configuración y descripción del estudio de TACSA (1981), que en la configuración de la elevación del nivel estático para el año 1981 menciona que: **Las curvas indican que el flujo subterráneo es primordialmente N-S, únicamente entre los poblados Cuauchichinola y la Laguna de Tequesquitengo con una dirección Noroeste-Sureste.**

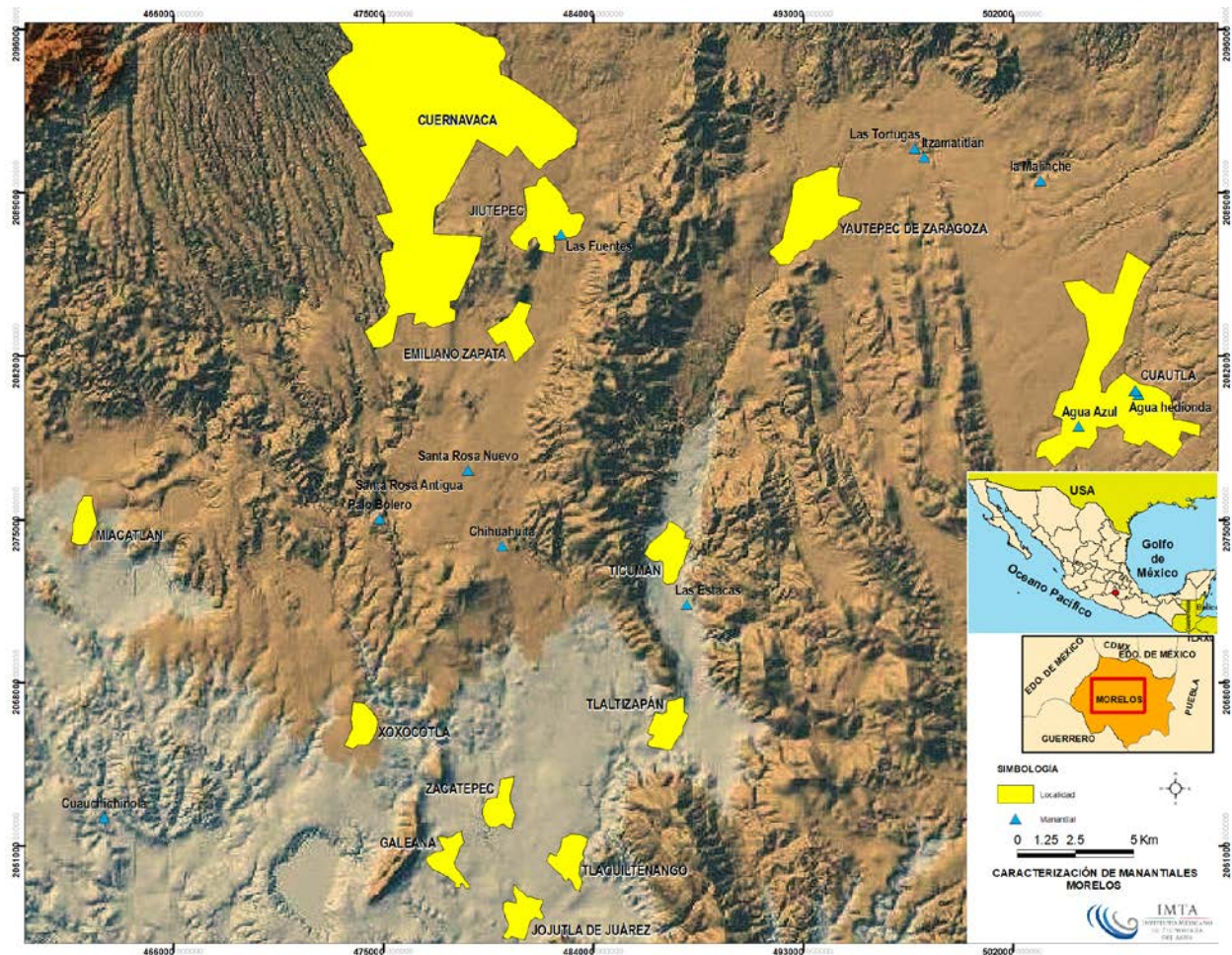


**Figura 2.31 Configuración de la elevación del nivel estático y dirección del flujo (Ojos de agua de Cuauchichinola).**

### 3 MUESTREO PUNTUAL CON DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CAMPO

Las descargas de agua subterránea monitoreados mediante toma de muestras y medición de parámetros de campo comprendieron trece manantiales: 1. Las Tortugas; 2. Itzamatitlan; 3. La Malinche; 4. Agua Hedionda Alberca Grande; 5. Agua Hedionda Albercas Familiares; 6. Agua Hedionda descarga salida; 7. Agua Azul; 8. Las Estacas; 9. Las Fuentes; 10. Palo Bolero; 11. Chihuahuita (Santa Rosa Antigua); 12. Santa Rosa (Nuevo) y 13. Los Ojos de agua en Cuahuchichinola (Figura 3.1).

Posteriormente por razones administrativas quedaron fuera del estudio los manantiales: Itzamatitlan, Agua Hedionda descarga salida y Chihuahuita (santa Rosa antigua).



**Figura 3.1** Localización de manantiales considerados en el estudio, donde se realizaron medición de parámetros de campo (T, CE, pH, Eh, OD, Alcalinidad Total) y toma de muestras para análisis fisicoquímicos e isotópicos, en el estado de Morelos.



Los parámetros de campo medidos in situ son:

Temperatura del agua subterránea. Se midió con un termómetro digital con aproximación de decimas de grado centígrado, este dispositivo instrumental viene integrado al conductivímetro portátil.

Conductividad eléctrica específica. Este parámetro se registró utilizando un conductivímetro digital portátil que se ajusta por temperatura, mediante un termómetro digital con una aproximación de 0.1° C integrado a este instrumento. El registro de este parámetro permitió identificar de manera indirecta la salinidad.

pH. Para la determinación de este parámetro se utilizó un potenciómetro calibrado en dos puntos, especificados a partir de soluciones buffer de pH conocidas de valores 4.0, 7.0 y 10.00 unidades de pH. Se tomaron lecturas a intervalos de tiempo hasta lograr una lectura estabilizada.

Potencial Redox. Se midió con un electrodo de tipo combinado, que consiste de un filamento de platino y un electrodo de referencia de plata-cloruro de plata. La medición del potencial redox se realizó a diferentes intervalos, hasta obtener una medición estable.

Oxígeno disuelto. La medición de la cantidad de oxígeno disuelto en el agua subterránea se llevó a cabo sumergiendo un electrodo OxiCal WTW en la celda de aislamiento por donde circula el flujo controlado de agua subterránea. En este caso específico, el sensor de oxígeno disuelto incorporado en el electrodo debe ser polarográfico de tipo "Clark" con sensor y compensación integrada por temperatura o electrodo equivalente de tipo galvánico de membrana que calibre en función de la altitud y compense por temperatura en forma automática.

Alcalinidad. Se utilizó la técnica estándar de titulación con ácido sulfúrico a través de alícuotas de agua subterránea de 15 ml, aplicando el método potenciométrico de Gran. Este consiste en agregar sucesivamente a la alícuota un volumen determinado de ácido mediante un titulador digital y midiendo inmediatamente el pH, repitiendo este proceso hasta lograr mediciones a un pH menor de 4.3 unidades.

En la tabla 3.1 se muestran los parámetros de campo medidos por el Laboratorio de calidad del agua y en la tabla 3.2 los parámetros de campo determinados por el laboratorio de isotopía e hidrogeoquímica.

**Tabla 3.1 Resultados de los parámetros de campo y bacteriológicos**

MANANTIAL	Parámetros de campo			
	Fecha de muestreo	Temperatura (°C)	pH (unidades de pH)	Conductividad electrolítica (µS/cm)
Agua Hedionda principal	Octubre/2017	24.5	6.5	163
Las Estacas	Enero/2018	22.4	7.9	2,349
Chihuahuita (Sta. Rosa)	Enero/2018	20.6	7.4	835
Palo Bolero	Enero/2018	21.3	6.8	4,188
Agua Azul	Enero/2018	21.5	7.4	1,982
Las Tortugas	Enero/2018	24.9	5.8	6,322
Itzamatitlan	Enero/2018	22.1	6.7	4,439
Las Fuentes	Enero/2018	15.5	8.0	247
Sta. Rosa	Febrero/2018	16.9	6.7	1,160
Ojos de Agua	Febrero/2018	24.9	6.7	812
La Malinche	Febrero/2018	21.2	6.3	662
Agua Hedionda principal	Mayo/2018	26.0	7.05	3,392
Agua Hedionda principal	Junio/2018	25.88	7.30	2,646

**Tabla 3.2. Resultados de los parámetros de campo (primer trimestre de 2018)**

MANANTIAL	Fecha de muestreo	PARÁMETROS DE CAMPO					
		Temperatura (°C)	pH (unidades de pH)	Conductividad electrolítica (µS/cm)	Redox (mV)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Alcalinidad total (mg/L)
Las Fuentes		15.6	7.38	135	476	7.8	46
Palo Bolero		22.1	6.57	2,160	50.4	6.9	362
Las Estacas		22.6	6.91	1,250	376	3.8	264
Agua Hedionda principal		26.4	6.26	2,310	317	1.5	576
Agua Hedionda albercas		26.5	6.24	2,590	-37.3	0.1	640
Agua Azul		21.1	6.77	1,019	312	3.3	352
Las Tortugas		24.5	6.28	2,580	200	2.0	552
Itzamatitlan		22.3	6.38	2,350	351	4.6	440
Agua Hedionda descarga		-	7.18	1,906	-	-	480
Cuauchichinola		26.2	7.08	811	426	1.4	237
Santa Rosa antigua		20.0	7.00	1,159	-216	0.2	325
Santa Rosa nuevo		20.0	7.00	1,160	83	0.2	312
La Malinche		21.6	6.20	371	487	4.9	94

La medición de parámetros de campo se realizó mediante el empleo de una celda de aislamiento para controlar al máximo la modificación de las propiedades fisicoquímicas prevalientes del agua subterránea (Figura 3.2). Esta celda se conectó por medio de una bomba sumergible, la cual se introduce en el sitio de afloramiento del agua subterránea, permitiendo que el flujo de agua extraída se mantenga en forma controlada, continua e inalterada en el interior de la celda, ello permite la introducción de los electrodos de medición, para llevar a cabo las mediciones de campo en forma inalterada (T, pH, C.E., O.D. y Eh). Particularmente, permite la estabilización de las lecturas de los transductores, especialmente los de oxígeno disuelto, pH y potencial Redox.





**Figura 3.2** Medición de parámetros de campo con electrodos multiparamétricos y celda de aislamiento en el manantial Las Fuentes en el Estado de Morelos

## 4 ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS

### 4.1 Antecedentes

Entre los recursos hídricos naturales con los que cuenta el Estado de Morelos, se encuentran los manantiales, cuya diversidad en temperatura y composición química han favorecido durante décadas su uso en centros recreativos.

Las aguas termales por su temperatura se clasifican en hipertermales (temperaturas mayores de 45°C), meso termales (de 35°C a 45°C), hipo termales (de 21°C a 35°C) y aguas frías (menos de 20°C). Con respecto a su composición química, la clasificación se basa en el contenido de iones predominantes, el anión o catión debe representar más de 20% de mineralización global para clasificar un agua como tal, p. ej.: las aguas sulfatadas, son aquellas en las que predomina el anión sulfato; las sulfuradas, contienen más de 1 mg/L de azufre bivalente y se percibe olor a huevo podrido, como resultado de la actividad de los microorganismos sobre materia orgánica; en las cloruradas, predomina el anión cloruro y cationes como el sodio, calcio o magnesio. Algunos otros manantiales, son utilizados como fuentes de abastecimiento de agua para uso y consumo humano, debido a que sus características fisicoquímicas y organolépticas permiten este uso.

Como consecuencia de los sismos registrados en el mes de septiembre del año 2017, los manantiales se vieron afectados tanto en caudales como en sus propiedades organolépticas (el color y olor). Bajo estas condiciones, la Comisión Estatal de Agua solicitó se muestreara y analizara la calidad del agua en once manantiales: seis de uso recreativo, en donde el agua es aprovechada en albercas y cinco fuentes de abastecimiento.

Los balnearios monitoreados fueron: Agua Hedionda, Las Estacas, Palo Bolero, Las Tortugas, Las Fuentes y Ojos de Agua; se considera prioritario, desde el punto de vista sanitario, determinar la calidad microbiológica del agua, de conformidad con la norma oficial mexicana NOM-245-SSA1-2010, requisitos sanitarios y calidad del agua que deben cumplir las albercas (Secretaría de Salud, 2012).

Los cinco manantiales que son utilizados como fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano incluidos en el estudio fueron: Manantial Chihuahuita, Manantial Agua Azul, Itzamatitlán, Santa Rosa y La Malinche, que deben cumplir con los límites máximos permisibles para los parámetros organolépticos, microbiológicos, fisicoquímicos y de metales pesados regulados en la modificación del año 2000 a Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización (Secretaría de Salud, 2000).

### 4.2 Metodología

#### 4.2.1 Muestreo

La colecta de muestras para la determinación de parámetros de calidad del agua, requiere de una serie de procedimientos, bien documentados, vigilados y evidenciados, estos

procedimientos o actividades son: preparación de material y preservadores, equipo, selección de punto y modo de muestreo, identificación, manejo, transporte y entrega de muestras.

### Material de muestreo

Existen condiciones particulares para el uso de envases de acuerdo a las características los parámetros a muestrear, para evitar que haya modificaciones en el agua durante el transporte y almacenamiento hasta su análisis, para tratar de mantener las condiciones iniciales en el momento de muestreo de calidad del agua se utilizan algunos preservadores. En la Tabla 4.1, se muestra los parámetros, así como el tipo de envase usado y su preservación.


**Tabla 4.1 Tipo de envase, preservación y tiempo máximo para análisis por parámetro**

PARÁMETRO	ENVASES	PRESERVACIÓN	TIEMPO MÁXIMO PARA SU ANÁLISIS
<b>Bacteriológicos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Coliformes totales</li> <li>• Coliformes fecales</li> </ul>	Bolsas estériles con cierre hermético y capacidad de 125 ml.	Hielo	24 horas
<b>Fisicoquímicos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cloruros</li> <li>• Color verdadero</li> <li>• Fluoruros</li> <li>• Dureza total</li> <li>• Nitritos (nitrógeno de)</li> <li>• Nitratos (nitrógeno de)</li> <li>• Sulfatos</li> <li>• Sólidos disueltos totales</li> </ul>	Envases de plástico, con tapones del mismo material que proporcionen cierre hermético	Hielo	24 horas
<b>Físico-químicos:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sustancias activas al azul de metileno (SAAM).</li> <li>• Nitrógeno amoniacal</li> </ul>		Ácido Sulfúrico pH < 2	7 días
Fenoles	Envase de vidrio ámbar, cierre hermético	Sulfato de cobre + Ácido Sulfúrico pH < 2	28 días
<b>Metales:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, hierro, manganeso, plomo, sodio y zinc.</li> </ul>	Envases de plástico, con tapones del mismo material que proporcionen cierre hermético	Ácido nítrico	6 meses
<b>Mercurio</b>		Solución de dicromato de potasio + ácido nítrico	28 días
<b>Parámetros de campo:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencial de hidrogeno</li> <li>• Temperatura</li> <li>• Conductividad electrolítica</li> </ul>	No aplica	No aplica	Analizados en el sitio directamente

## Equipo

Termómetro con escala de -10 a 110°C; potenciómetro para determinación de pH; comparador visual para determinación de cloro residual; hielera con bolsas con hielo y agua destilada o desionizada.

Para la medición de los parámetros de campo reportados en este informe se utilizó un multiparamétrico con compensador de temperatura con las características descritas en la figura 4.1.

MULTIPARÁMETRO HACH POCKET PRO + MULTI 2 TESTER	INTERVALO DE MEDICIÓN	PRECISIÓN
	T(C°) 0 a 45	±0.5°C
	Cond.(mS/cm) 0 - 20	±1%
	Salinidad (ppt) 0.00- 1.00	±0.1 ppt
	pH 0.00 – 14.00	±0.02
	SDT (ppt ) 0.0 a 10.00	±1

**Figura 4.1** Características del equipo multiparamétrico utilizado.

### 4.2.2 Procedimiento para la colecta de muestras

Personal técnico del Laboratorio de Calidad del Agua del IMTA acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación (ema), muestreó el agua de los manantiales, conforme a la norma oficial mexicana NOM-230-SSA1-2002. Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que deben cumplir en los sistemas de abastecimientos públicos y privados durante el manejo de agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo (Secretaría de Salud, 2005) y a los procedimientos establecidos en el Laboratorio de Calidad del Agua, acreditado ante la misma entidad.

### Manejo de muestras

Las muestras deben colocarse en hielera con bolsas de hielo para su transporte al laboratorio, de preferencia a una temperatura entre los 4 y 10°C, evitando la congelación. El periodo máximo que debe transcurrir entre la toma de muestra y el análisis dependerá del parámetro muestreado (figura 4.2)



**Figura 4.2** Manejo de las muestras para su almacenamiento y transporte

### Identificación y control de muestras

Para la identificación, las muestras deben etiquetarse los frascos y envases con la siguiente información: número de registro para identificar la muestra, fecha y hora de muestreo. El control de la muestra debe llevarse un registro con los datos indicados en la etiqueta del envase (Figura 4.3), así como la siguiente información:



- Identificación del punto o sitio de muestreo.
- Temperatura ambiente y temperatura del agua,
- pH,
- Cloro residual,
- Tipo de análisis a efectuar
- Técnica de preservación empleada,
- Observaciones relativas a la toma de muestra
- Nombre de la persona que realiza el muestreo.

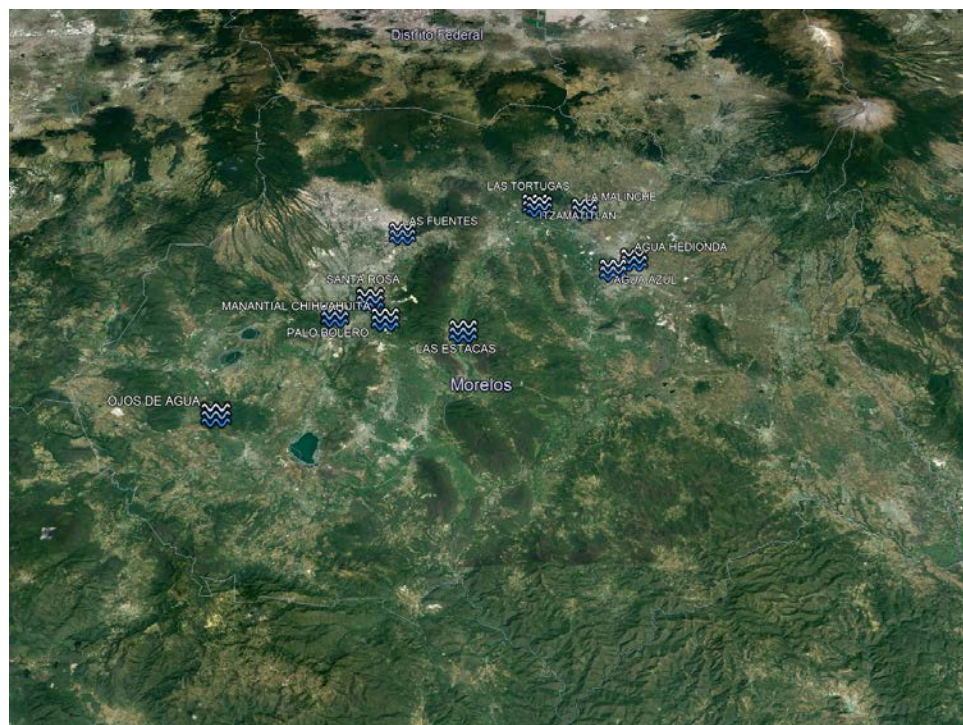
**Figura 4.3** Identificación y control de las muestras

#### 4.2.3 Puntos de muestreo

La selección de puntos de muestreo debe considerarse individualmente para cada sistema, como ya se anotó, los balnearios monitoreados son (Figura 4.4): Agua Hedionda, Las Estacas, Palo Bolero, Las Tortugas, Las Fuentes y Ojos de Agua y, los cinco manantiales que son utilizados como fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano incluidos



en el estudio fueron: Manantial Chihuahuita, Manantial Agua Azul, Itzamatlán, Santa Rosa y La Malinche.



**Figura 4.4 Sitios de muestreo**

#### 4.2.4 Análisis de las muestras

Las muestras fueron analizadas dentro de los períodos establecidos en los procedimientos del Manual de Control de Calidad Analítico del Laboratorio de Calidad del Agua (Tabla 4.2):

**Tabla 4.2 Pruebas y métodos de referencia**

PRUEBA	NORMA Y/O MÉTODO DE REFERENCIA
Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-004-SCFI-2013
Determinación de Materia Flotante en aguas residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-006-SCFI-2010
Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-007-SCFI-2013
Análisis de agua. - medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. -método de prueba-	NMX-AA-008-SCFI-2016
Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO <sub>5</sub> ) y residuales tratadas.	NMX-AA-028-SCFI-2001
Análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba	NMX-AA-034-SCFI-2015
Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y	NMX-AA-036-SCFI-2001

PRUEBA	NORMA Y/O MÉTODO DE REFERENCIA
residuales tratadas.	
Determinación de color verdadero platino- cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-045-SCFI-2001
Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-072-SCFI-2001
Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-073-SCFI-2001
Determinación de la Conductividad Electrolítica.	NMX-AA-093-SCFI-2000
Determinación de dureza de calcio.	STD Methods, Sección 3500-Ca B 20a edición, 1998
Determinación de Nitrógeno Amoniacal.	STD Methods, Sección 4500-N-NH <sub>3</sub> , 20a edición, 1998
Determinación de nitrógeno total Kjeldahl.	Procedimiento Interno IMTA-CAQAF6-61
Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-029-SCFI-2001
Medición del ión sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-074-SCFI-2014
Determinación de fluoruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-077-SCFI-2001
Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-079-SCFI-2001
Determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-099-SCFI-2006
Análisis de agua - Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y <i>Escherichia coli</i> – Método del número más probable en tubos múltiples.	NMX-AA-042-SCFI-2015
Análisis de agua-Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - por Flama: Al, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Zn y Ag. Generador de Hidruros: As, Sb, Se, Sn y Hg. Horno de Grafito: Al, Be, Cd, Cr, Pb y Sn.	NMX-AA-051-SCFI-2016

### 4.3 Resultados de laboratorio

Se llevaron a cabo cinco muestreos en la zona:

- a) Octubre de 2017. Agua Hedionda (manantial principal).
- b) Enero de 2018. Manantiales Las Estacas, Chihuahuita Santa Rosa, Palo Bolero, Agua Azul, Las Tortugas, Itzamatitlán y Las Fuentes.
- c) Febrero de 2018. Manantiales: Santa Rosa, Ojos de Agua y La Malinche.
- d) Mayo de 2018. Agua Hedionda (manantial principal).
- e) Junio de 2018. Agua Hedionda (manantial principal).

Los resultados de campo y laboratorio se presentan en las tablas 4.3

**Tabla 4.3 Resultados de los parámetros de campo y microbiológicos**

MANANTIAL	Fecha de muestreo	PARÁMETROS DE CAMPO			PARÁMETROS BACTERIOLÓGICOS (NMP/100 mL)	
		Temperatura (°C)	pH (unidades de pH)	Conductividad electrolítica (µS/cm)	Coliformes Fecales	Coliformes Totales
Agua Hedionda	Octubre/2017	24.5	6.5	163	430	2300
Agua Hedionda	Mayo/2018	26.0	7.05	3392	120	120
Principal	Junio/2018				210	210
Las Estacas	Enero/2018	22.4	7.9	2349	3	75
Chihuahuita (Sta. Rosa)	Enero/2018	20.6	7.4	835	43	230
Palo Bolero	Enero/2018	21.3	6.8	4188	<3	23
Agua Azul	Enero/2018	21.5	7.4	1982	9	930
Las Tortugas	Enero/2018	24.9	5.8	6322	23	43
Itzamatitlan	Enero/2018	22.1	6.7	4439	<3	<3
Las Fuentes	Enero/2018	15.5	8.0	247	3	7
Sta. Rosa	Febrero/2018	16.9	6.7	1160	4	43
Ojos de Agua	Febrero/2018	24.9	6.7	812	4	23
La Malinche	Febrero/2018	21.2	6.3	662	93	230

En la tabla 4.4, se reportan los parámetros fisicoquímicos, principalmente los aniones y cationes de mayor relevancia, así como algunos parámetros indicadores de presencia de materia orgánica. En la tabla 4.5 se presentan los valores obtenidos en los metales analizados.

**Tabla 4.4 Resultados de parámetros fisicoquímicos**

MANANTIAL	PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS														
	Bicarbonatos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Cloruros Totales (mg/L)	Color verdadero (U Pt-Co)	Turbiedad (UNT)	DQO (mg/L)	Dureza de calcio (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Dureza de magnesio (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Fluoruros (mg/L)	Fosfatos Totales (mg/L)	Hidróxidos (mg/L)	Ion Sulfato (mg/L)	Materia Orgánica (%)	Nitrógeno Amoniacal (mg/L)
Agua Hedionda	257	<0,188	44,4	5	18,0	<15,0	551	292	843	1,05	<0,92	0	774	10,68	<0,200
Principal	627	<1,31	48,6	<2,5	<0,05	<15,0	732	254	986	1,08	0,11	0	712	26,18	<0,200
Las Estacas	585	<1,31	45,5	<2,5	0,65	<15,0	718	210	928	1,53	0,06	0	579	28,66	0,200
Chihuahuita (Sta. Rosa)	339	<0,188	33,8	<2,5	0,05	<15,0	463	195	658	0,676	<0,92	0	461	12,14	<0,200
Palo Bolero	192	<0,188	11,6	<2,5	0,60	<15,0	113	75,8	189	0,293	<0,92	0	55,1	23,21	<0,200
Agua azul	448	<0,188	18,4	<2,5	0,30	<15,0	1076	352	1428	1,45	<0,92	0	1164	8,46	<0,200
Las Tortugas	478	<0,188	22,3	<2,5	0,30	<15,0	342	199	541	0,682	<0,92	0	220	18,13	<0,200
Itzamatitlan	717	<0,188	51,1	3	13	<15,0	1643	644	2287	2,18	<0,92	0	1901	10,57	<0,200
Las Fuentes	556	<0,188	32	3	0,25	<15,0	1015	422	1437	1,4	<0,92	0	1123	11,31	<0,200
Sta. Rosa	60,5	<0,188	1,07	<2,5	<0,05	<15,0	12,4	30,8	43,2	0,314	<0,92	0	14,9	96	<0,200
Ojos de agua	393	<0,188	12,0	<2,5	0,10	<15,0	468	189	657	0,698	<0,92	0	337	15,66	<0,200
La Malinche	308	<0,188	5,39	<2,5	<0,05	<15,0	294	126	421	0,414	<0,92	0	181	23,05	<0,200
	147	<0,188	10,0	<2,5	0,30	18,9	53	78,1	131	0,282	<0,92	0	27,1	21,43	<0,200

MANANTIAL	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS (continuación)													
	Nitrógeno de nitritos (mg/L)	Nitrógeno de nitratos (mg/L)	Nitrógeno total (mg/L)	Ortofosfatos (mg/L)	Sólidos disueltos fijos (mg/L)	Sólidos disueltos totales (mg/L)	Sólidos disueltos volátiles (mg/L)	Sólidos sedimentables (mg/L)	Sólidos suspendidos fijos (mg/L)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	Sólidos suspendidos volátiles (mg/L)	Sólidos totales fijos (mg/L)	Sólidos totales volátiles (mg/L)	Sulfuros (mg/L)
Agua Hedionda	<0,0200	3,12	3,12	< 0,92	928	1038	110	< 0,5	5,20	6,00	0,800	964	106	1,13
Principal	<0,0200	<0,100	<1,12	<0,046	1204	1552	348	<0,5	<1,57	3,2	2,93	1053	370	1,59
Las Estacas	<0,0200	0,443	<1,12	<0,92	1318	1699	381	<0,5	<1,57	<3,14	<1,57	1318	381	1,44
Chihuahuita (Sta. Rosa)	<0,0200	2,37	2,37	<0,92	512	623	111	<0,5	<1,57	<3,14	1,83	854	122	<1,44
Palo Bolero	<0,0200	4,41	4,41	<0,92	196	236	40	<0,5	<1,57	<3,14	2,67	258	78	<1,44
Agua azul	<0,0200	<0,100	<1,12	<0,92	1178	1290	112	<0,5	<1,57	<3,14	<1,57	1926	178	1,94
Las Tortugas	<0,0200	2,72	2,72	<0,92	566	650	84,0	<0,5	<1,57	<3,14	2,00	632	140	2,52
Itzamtitlan	<0,0200	<0,100	<1,12	<0,92	1468	1742	274	<0,5	10	11,0	<1,57	2854	337	<1,44
Las Fuentes	<0,0200	1,52	1,52	<0,92	944	1146	202	<0,5	1,60	3,20	1,60	1788	228	<1,44
Sta. Rosa	<0,0200	0,889	0,889	<0,92	42,0	68,0	26,0	<0,5	<1,57	<3,14	<1,57	82,0	12,0	<1,44
Ojos de agua	<0,0200	<0,100	<1,12	<0,92	700	836	136	<0,5	<1,57	<3,14	<1,57	795	147	<1,44
La Malinche	<0,0200	0,542	<1,12	<0,92	471	557	85,3	<0,5	<1,57	<3,14	<1,57	474	142	<1,44
	<0,0200	1,87	1,87	<0,92	362	396	34	<0,5	<1,57	<3,14	<1,57	198	54	<1,44



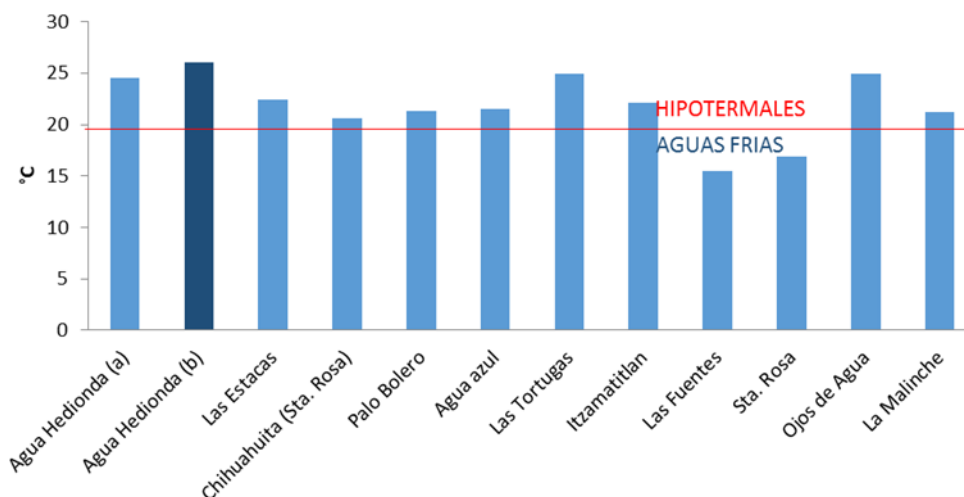
**Tabla 4.5 Resultados de los parámetros de calidad del agua, metales.**

MANANTIAL	ARSÉNICO Y METALES PESADOS (mg/L)									
	Antimonio	Arsénico	Bario	Berilio	Calcio	Cobre	Cromo	Estaño	Hierro	Magnesio
Agua Hedionda	ND	0,0349	<0,500	<0,05	227,9	<0,050	0,0051	ND	0,913	68,6
Agua Hedionda Principal	0,0029	0,0580	<0,500	<0,10	72,17	<0,100	<0,005	<0,005	<0,10	12,02
Las Estacas	0,0023	0,0785				<0,05			0,19	<0,15
Las Estacas	0,0011	0,0172	<0,500	<0,05	209,2	<0,050	<0,0050	<0,005	<0,10	42,7
Chihuahuita (Sta. Rosa)	<0,0010	0,0020	<0,500	<0,05	47,10	<0,050	<0,0050	<0,005	<0,10	15,5
Palo Bolero	<0,0010	0,0035	<0,500	<0,05	491	<0,050	<0,0050	<0,005	<0,10	79,4
Agua azul	<0,0010	0,0028	<0,500	<0,05	183,6	<0,050	<0,0050	<0,005	<0,10	45,6
Las Tortugas	0,0020	0,0350	<0,500	<0,05	731,5	<0,050	<0,0050	<0,005	1,261	131,12
Itzamtitlan	0,0015	0,0141	<0,500	<0,05	494	<0,050	<0,0050	<0,005	<0,10	94,8
Las Fuentes	<0,0010	0,0012	<0,500	<0,05	7,38	<0,050	<0,0050	<0,005	<0,10	5,6
Sta. Rosa	0,0030	0,0520	<0,500	<0,05	186,25	<0,050	<0,0050	<0,005	<0,010	46
Ojos de agua	0,0012	0,0177	<0,500	<0,05	115,25	<0,050	<0,0050	<0,005	<0,010	32,9
La Malinche	<0,0010	0,0011	<0,500	<0,05	21,8	<0,050	<0,0050	<0,005	<0,010	20,9

MANANTIAL	METALES PESADOS en mg/L (continuación)								
	Manganeso	Molibdeno	Níquel	Plomo	Potasio	Selenio	Silicio	Sodio	Zinc
Agua Hedionda	<0,05	ND	<0,10	<0,0050	6,57	ND	ND	55,28	0,29
Agua Hedionda Principal	<0,05	<0,75	<0,10	<0,0050	4,85	<0,005	28,63	46,35	<0,10
Las Estacas	<0,050	<0,75	<0,10	<0,0050	4,85	<0,005	31,26	31,41	<0,10
Chihuahuita (Sta. Rosa)	<0,050	<0,75	<0,10	<0,0050	3,06	<0,005	29,44	19,67	<0,10
Palo Bolero	<0,050	<0,75	<0,10	<0,0050	3,62	<0,005	26,90	20,83	<0,10
Agua azul	<0,050	<0,75	<0,10	<0,0050	4,91	<0,005	37,02	38,88	<0,10
Las Tortugas	0,051	<0,75	<0,10	<0,0050	7,733	<0,005	35,24	59,77	<0,10
Itzamtitlan	<0,050	<0,75	<0,10	<0,0050	6,31	<0,005	35,29	53	<0,10
Las Fuentes	<0,050	<0,75	<0,10	<0,0050	1,9	<0,005	22,86	9,87	<0,10
Sta. Rosa	<0,050	<0,75	<0,010	<0,0050	2,93	<0,005	22,90	17,03	<0,10
Ojos de agua	<0,050	<0,75	<0,010	<0,0050	2,38	<0,005	18,08	9,57	<0,10
La Malinche	<0,050	<0,75	<0,010	<0,0050	3,7	<0,005	35,80	18,02	<0,10

#### 4.4 Interpretación de resultados

Del análisis de los datos de la temperatura, de los cuerpos agua (Figura 4.5), se identifican dos tipos de aguas, los manantiales hipotermales y aguas frías. Entre los primeros, la temperatura oscila de 21°C a 35°C y se encuentran: Las Estacas, Palo Bolero, Agua Azul, Itzamatitlan y La Malinche, destacando Agua Hedionda, Las Tortugas y Ojos de Agua. Los manantiales de agua fría, donde la temperatura es menor a los 20°C, se incluye a: Las Fuentes y Santa Rosa. De acuerdo a los comentarios de los propietarios, la temperatura del agua se mantiene constante durante todo el año.

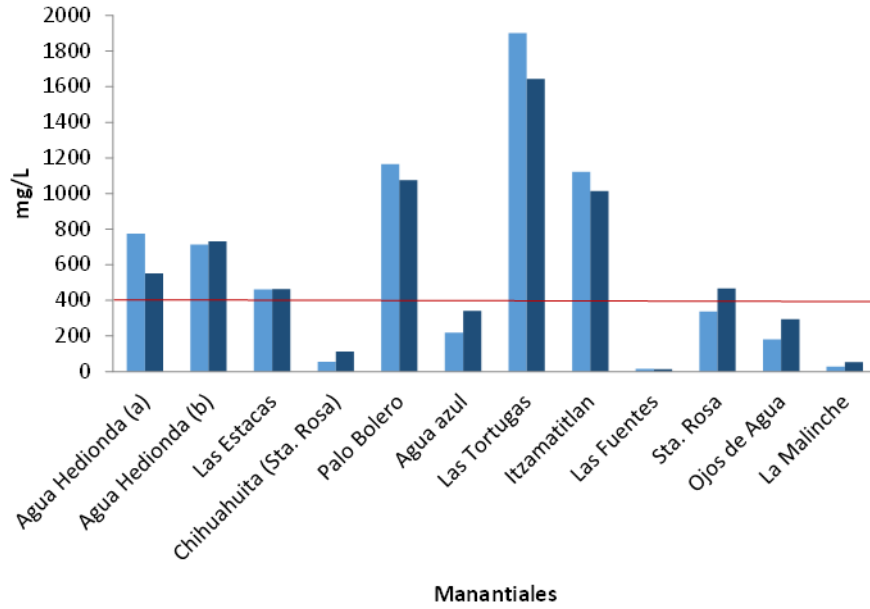


**Figura 4.5 Temperatura registrada en los manantiales.**

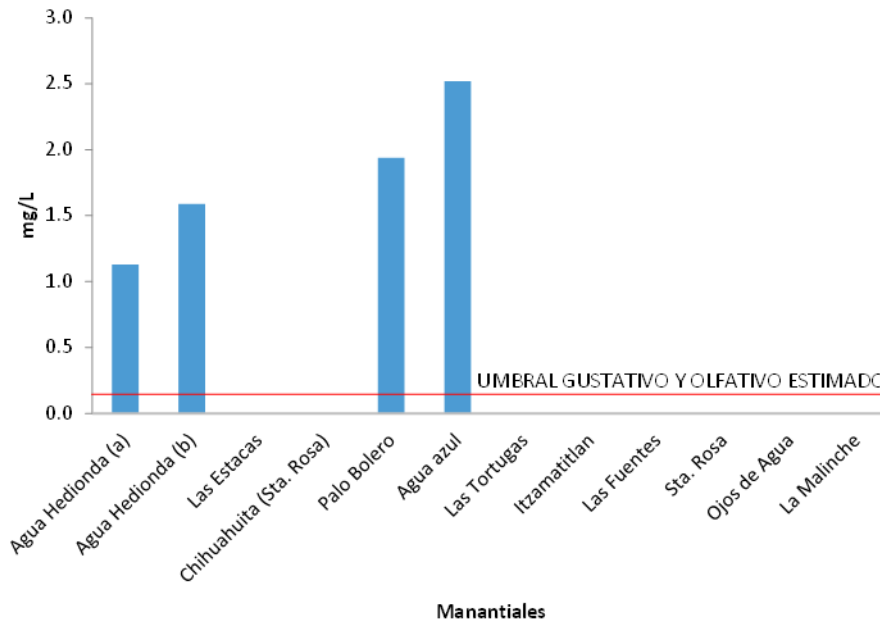
Con respecto a la relación de ion sulfato y dureza de calcio los manantiales Agua Hedionda, Palo Bolero, Las Tortugas e Itzamatitlan (Figura 4.6), las concentraciones son mayores a 400 mg/L, características de aguas sulfatadas cálcicas, cuyos contenidos del ion sulfato están en el rango de 400 mg/L a 1500 mg/L, y los contenidos de calcio llegan a superar los 700 mg/L (Coloma, 1998).

Las concentraciones de ion sulfuro, son mayores a 1 mg/L en los manantiales Agua Hedionda, Palo Bolero y Agua Azul (Figura 4.7). La Organización Mundial de la Salud, no recomienda ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud. Se calcula que los umbrales gustativo y olfativo (olor a huevo podrido), del sulfuro de hidrógeno en el agua se encuentran entre 0,05 y 0,1 mg/L.

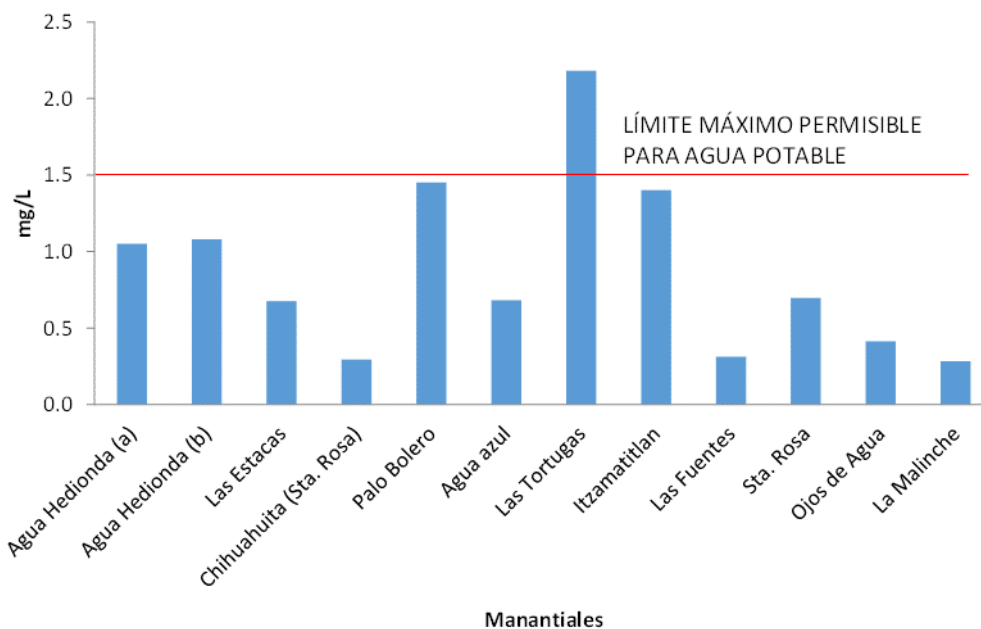
Los manantiales Agua Hedionda, Palo Bolero, Las Tortugas e Itzamatitlan, contienen concentraciones por arriba de 1 mg/L de fluoruros (Figura 4.8), lo cual no representa un riesgo para la salud pública asociado al uso recreativo de estos cuerpos de agua; sin embargo, habría que dar vigilancia a este parámetro si se pretende utilizarlos como fuentes de abastecimiento para consumo humano, ya que el límite máximo permisible establecido en la normativa mexicana actual es de 1,5 mg/L (Secretaría de Salud, 2000).



**Figura 4.6 Relación ion sulfato - dureza de calcio en los manantiales**



**Figura 4.7 Sulfuros en manantiales**



**Figura 4.8 Fluoruros en manantiales**

Con respecto a la calidad sanitaria del agua de los manantiales, la norma oficial mexicana NOM-NOM-245-SSA1-2010, que establece las especificaciones sanitarias que deben cumplir las albercas con el propósito de minimizar o controlar riesgos a la salud de los usuarios y es aplicable a todas las albercas de centros vacacionales, clubes deportivos, balnearios, centros de enseñanza, hoteles, moteles, desarrollos turísticos, parques acuáticos o cualquiera que preste un servicio público, pone énfasis en la calidad microbiológica del agua.

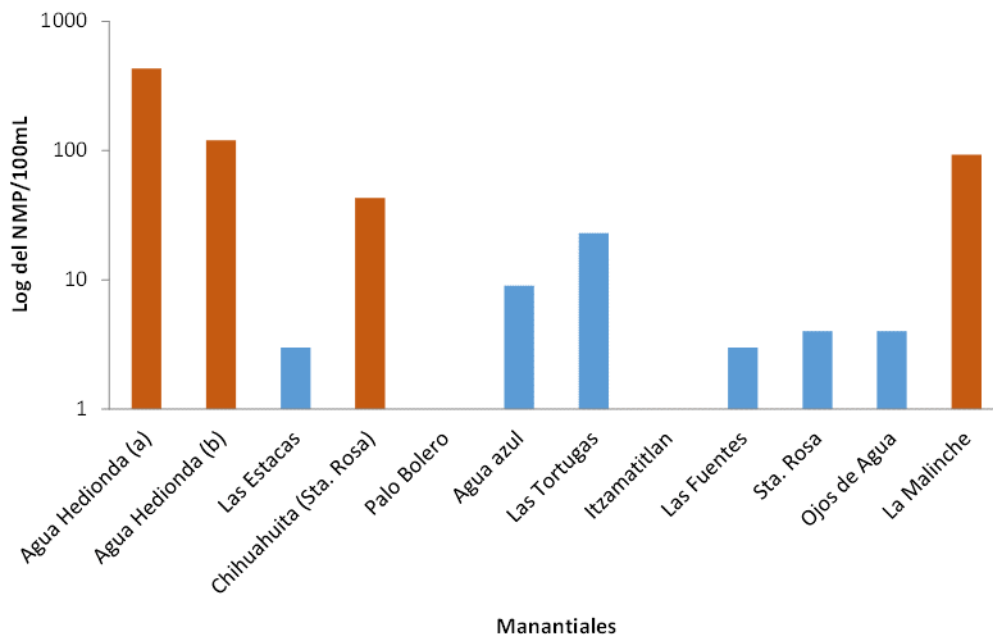
Asimismo, la norma indica que el agua debe cumplir con los límites máximos permisibles para: pH, turbidez, cloro residual libre, cloraminas, bromo residual libre, bromaminas, coliformes fecales y amebas de vida libre (si la temperatura es mayor a 30°C). Dada la naturaleza de los balnearios ubicados en la zona de interés para este estudio, si las albercas están construidas por encauce de una corriente superficial o de un manantial, estarán exentas de cumplir con algunos parámetros fisicoquímicos cuando presenten las características siguientes:

Haya renovación de agua por lo menos tres veces al día durante el horario de servicio, asegurando por lo tanto ausencia de remolino y,

El agua de estas albercas deberá muestrearse por lo menos tres veces en un mes, antes del inicio de temporada de mayor afluencia de visitantes para corroborar que se cumplen los límites permisibles de coliformes fecales.

El límite máximo permisible de coliformes fecales es <40 NMP/100 mL, en este marco, los manantiales Agua Hedionda, Chihuahuita y la Malinche presentan un contenido de bacterias mayor a dicho límite (Figura 4.9).

En aquéllos cuyo uso es el abastecimiento para uso y consumo humano de la población, esto es los manantiales Chihuahuita, Agua Azul, Itzamatitlan, Sta. Rosa y la Malinche, cumplen con lo indicado en los Criterios Ecológicos (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, 1989), como fuente de abastecimiento (menos de 1000 como número más probable por 100 mililitros (NMP/100 mL).



**Figura 4.9 Coliformes fecales, manantiales que operan como centros recreativos.**

Analizando la información de los parámetros de calidad del agua regulados en la modificación del año 2000 a la norma oficial mexicana, NOM-127-SSA1-1994, los manantiales Agua Azul, Itzamatitlan y Sta. Rosa, presentan niveles de dureza superiores al límite máximo permisible de 500 mg/L. En Itzamatitlan el contenido de sólidos es mayor al límite de 1000 mg/L y los fluoruros son muy cercanos (1.4 mg/L) al límite máximo permisible de 1.5 mg/L.

En Sta. Rosa, el arsénico se encuentra fuera de norma, al duplicar el límite máximo permisible de 0.025 mg/L establecido en la misma NOM-127-SSA1-1994, modificación del año 2000. Esto es preocupante, ya que existe una fuerte evidencia epidemiológica sobre la toxicidad y carcinogenicidad para humanos asociadas a este metaloide.

En todas las fuentes de abastecimiento se requiere asegurar la desinfección del agua, manteniendo un residual de cloro libre de entre 0.2 y 1.5 mg/L. En los manantiales Agua Azul, Itzamatitlan y Sta. Rosa, se requiere tratar el agua para su potabilización, a fin de cumplir con los límites máximos permisibles de



Con el sismo ocurrido en septiembre de 2017, una de las preocupaciones fue la relacionada con los cambios en los volúmenes de agua de los manantiales y su calidad, particularmente para Agua Hedionda. El análisis de datos se basa en gráficos de control, tratando de visualizar la variabilidad en las concentraciones de diferentes analitos y si existieran valores atípicos que no obedecieran a un comportamiento estadístico normal. La información utilizada para este análisis se presenta en la Tabla 4.6.

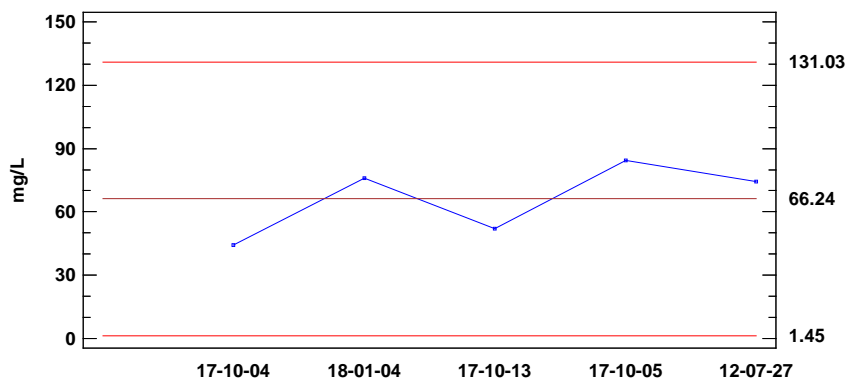
**Tabla 4.6 Valores analizados en diferentes fechas en el manantial principal Agua Hedionda.**

Fecha de análisis	Temperatura (°C)	pH (U de pH)	Conductividad electrolítica (µS/cm)	Cloruros Totales (mg/L)	Dureza Total mg/L CaCO <sub>3</sub>	Fluoruros (mg/L)	Ion Sulfato (mg/L)	Sólidos disueltos totales (mg/L)
04/10/2017	24,5	6,5	1630	44,4	843	1,05	774	1038
04/01/2018	*	7,8	*	75,93	720	1,17	500	1400
13/10/2017	26,8	6,1	1650	52,11	780	0,14	700	1450
05/10/2017	26,9	6,1	2580	84,32	1642	1,64	956	2632
27/07/2012	*	7,8	*	74,44	570	1,02	182	580

\* No analizado

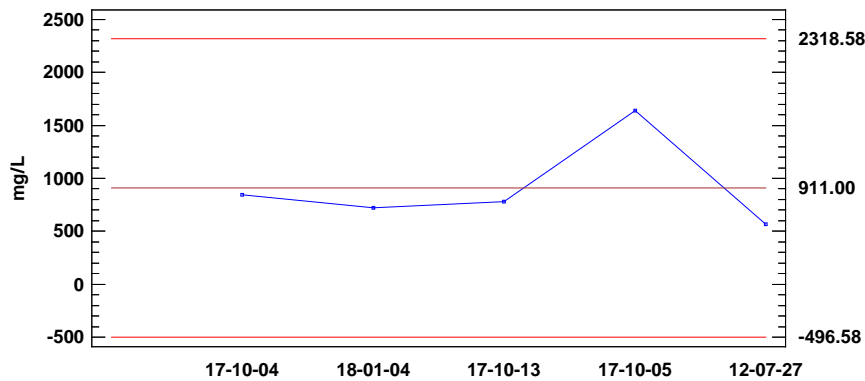
En la gráfica de cloruros totales (Figura 4.10), se observa que las variaciones no están fuera del mismo orden de magnitud, están alrededor del promedio de 66.24 mg/L.

**Gráfico de control de Cloruros totales**

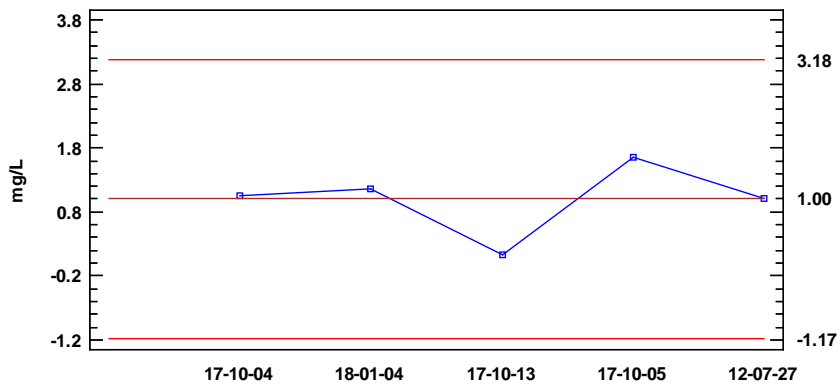


**Figura 4.10 Gráfico de control de cloruros totales en el manantial Agua Hedionda**

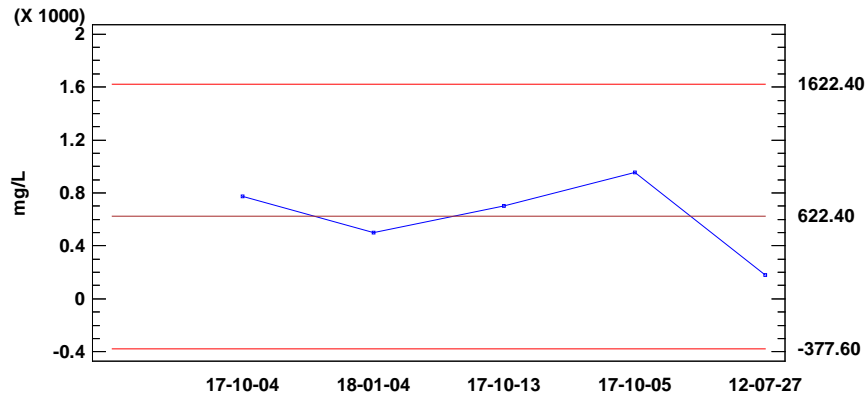
El mismo comportamiento se observa con respecto a los parámetros de dureza total (Figura 4.11), fluoruros (Figura 4.12) y el ion sulfato (Figura 4.13), esto es, los valores están dentro del mismo orden de magnitud, la variación es normal con un promedio de 911 mg/L, 1 mg/L y 622.4 mg/L respectivamente; lo que sí es posible observar es una baja concentración del ion sulfato y de la dureza total en el año 2012.



**Figura 4.11 Gráfico de control de dureza total en el manantial Agua Hedionda**



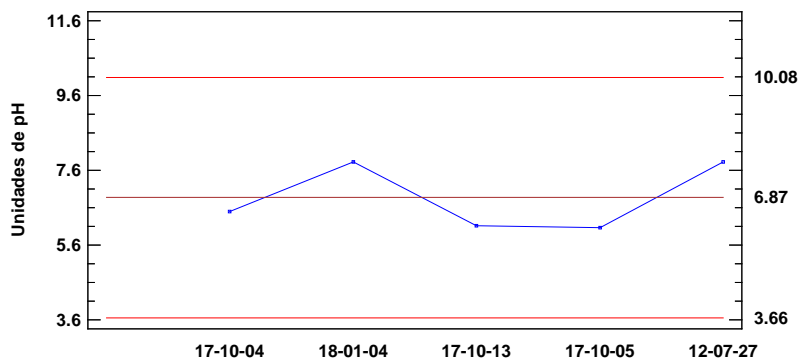
**Figura 4.12 Gráfico de control de fluoruros en el manantial Agua Hedionda**



**Figura 4.13 Gráfico de control para ion sulfato en el manantial Agua Hedionda.**

Los valores promedio para de pH (Figura 4.14), temperatura (Figura 4.15) y sólidos disueltos totales (Figura 4.16) son de: 6.9 unidades de pH, 26 °C y 1420 mg/L. Tampoco se presentan valores atípicos, aunque los sólidos disueltos totales presentan su punto más bajo en el año 2012.

Gráfico de control para pH



**Figura 4.14 Gráfico de control pH en el manantial Agua Hedionda.**

Gráfico X para Temperatura

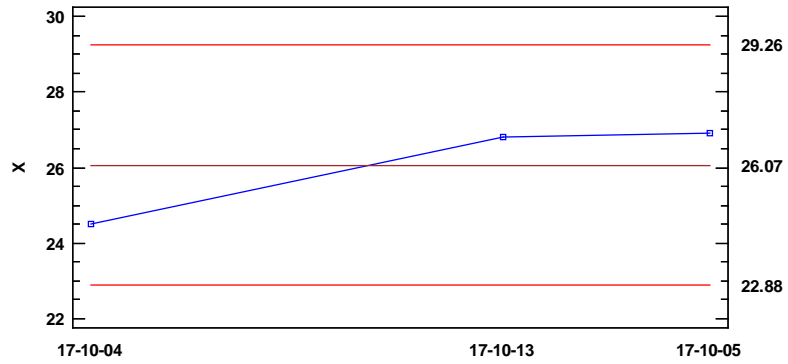


Figura 4.15 Gráfico de control de la temperatura en el manantial Agua Hedionda.

Gráfico de control para Sólidos disueltos totales

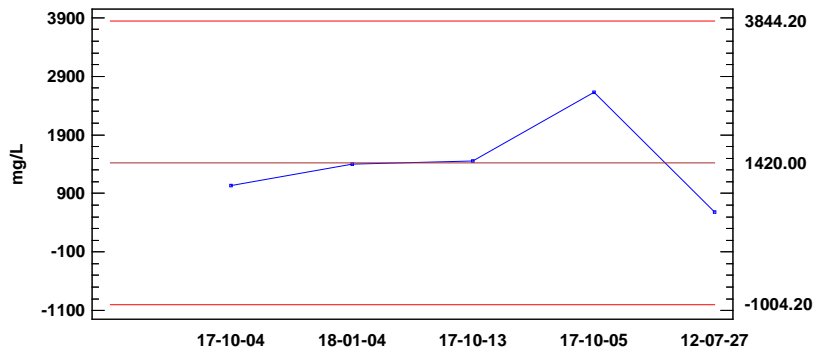


Figura 4.16 Graficas de control de los sólidos disueltos totales en el manantial Agua Hedionda

## 5 ANÁLISIS ISOTÓPICOS

### 5.1 Toma de muestras de agua

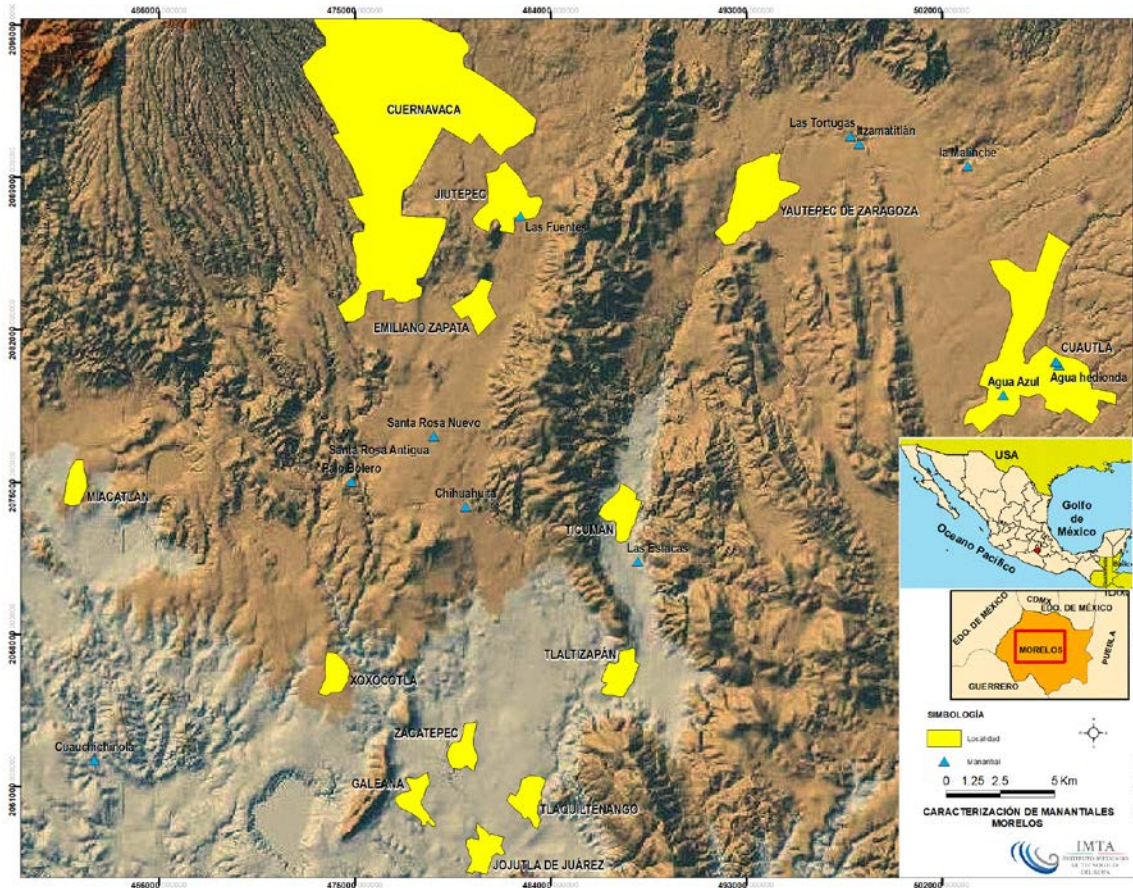
La toma de muestras de agua se realizó bajo condiciones de recolección, que permitieron asegurar la representatividad fisicoquímica y composición de la isotopía del agua (isótopos estables de H y O, contenido de tritio ambiental y contenido de carbono-14), bajo las condiciones a las que está sometida en el medio físico. Especialmente, evitando el contacto del agua con la atmósfera, lo cual ocasiona la recombinación de iones, precipitación de minerales, aumento del pH y cambios en el potencial redox, debido al escape hacia la fase gaseosa de componentes disueltos en el agua como dióxido de carbono y en algunos casos de ácido sulfhídrico (Hutton, L.G., 1983). Lo cual puede generar resultados analíticos alterados de las muestras analizadas y, por lo tanto, orientar la interpretación hidrogeoquímica de manera incorrecta (Claassen, H.C., 1982).

El muestreo comprendió la recolección de volúmenes convenientes de agua para análisis de metales y metaloides, aniones, isótopos estables de hidrógeno y oxígeno, contenido de tritio ambiental y contenido de carbono-14 y alcalinidad total por la técnica de Gran. La localización de los aprovechamientos muestreados se ilustra en la (Figura 5.1).

Para eliminar las partículas de materiales en suspensión, que pudieran afectar la composición química de las especies disueltas en el agua por intercambio iónico, se realizó el filtrado de las muestras mediante membranas de celulosa con tamaño de poro de 0.45 micrones, utilizando presión positiva (Figura 5.2).

Las muestras de agua recolectadas para la determinación de los diferentes parámetros, se envasaron en botellas de polietileno de alta densidad, evitando el contacto del agua con la atmósfera (Figura 5.3). Las muestras se preservaron de acuerdo con las especificaciones dadas por los laboratorios especializados de análisis contratados. Las muestras para metales se acidificaron a  $\text{pH} < 2$  con ácido nítrico de ultra alta pureza. Las muestras para análisis de isótopos estables de H y O, contenido de tritio ambiental, aniones y contenido de carbono 14 se preservaron únicamente a  $4^{\circ}\text{C}$ .





**Figura 5.1** Localización de manantiales considerados en el estudio.



**Figura 5.2** Filtrado de muestras de agua con membrana de celulosa de  $0.45\mu$  a presión positiva.



**Figura 5.3 Toma de muestras para análisis físico-químicos e isotópicos.**

Las muestras recolectadas para la determinación de los diferentes parámetros, se enviaron a laboratorios especializados para su análisis correspondiente, de acuerdo con la siguiente relación:

- a. Especies químicas (cationes y aniones): *Activation Laboratories LTD, Canadá*. En la medición de metales y metaloides se utilizó inducción de plasma acoplado a espectroscopía óptica (ICP/OES por sus siglas en inglés), así como espectrometría de masas (ICP/MS), los resultados de laboratorio incluyeron los siguientes parámetros: Ag, Al, As, Au, Br, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf, Hg, Ho, I, In, K, La, Lu, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Nd, Ni, Os, P, Pb, Pd, Pr, Pt, Re, Ru, S, Sb, Se, Si, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr. La medición de aniones se determinó por cromatografía líquida de iones, de las siguientes especies: F, Cl, Br, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub>.
- b. Contenido de tritio ambiental: Laboratorio de Hidrología isotópica del IMTA, el análisis se determinó por enriquecimiento electrolítico de la muestra original y por centelleo líquido de la emisión beta del tritio, mediante un contador de alta sensibilidad y ultrabajo nivel de actividad Packard 2560TR/XL. En el procedimiento se utilizan estándares certificados del National Institute of Standards and Technology (NIST).
- c. Composición de isótopos estables de H y O en las muestras de agua natural: Laboratorio de Hidrología Isotópica del IMTA, se realizó en un analizador láser Cavity Ringdown Spectrometer L2110-i Isotopic H<sub>2</sub>O Picarro, con vaporizador de alta precisión A0211. El método es instrumental y permite determinar las abundancias relativas versus el estándar VSMOW.



- d. Contenido de carbono-14: La medición del contenido de carbono-14 se realizó en el laboratorio Beta Analytic Inc. de Miami FL de los EUA, mediante espectrometría de masas de iones acelerados (AMS por sus siglas en inglés). El proceso de medición comprende la transformación de las especies carbonatadas disueltas en la muestra a bióxido de carbono, y posteriormente en grafito por reducción del CO<sub>2</sub> sobre una catálisis de cobalto. El resultado analítico (“BP” o “pMC”) se obtiene al medir la razón C14/C13 de la muestra relativo al estándar certificado de ácido oxálico II (NIST-4990C).

## 5.2 Medición de parámetros de campo

En cada manantial se realizó la determinación de los parámetros de campo: T, CE, OD, pH, Redox y Alcalinidad total. Los manantiales medidos con sus valores de campo se muestran en la tabla 5.1. Los aprovechamientos monitoreados mediante toma de muestras y medición de parámetros de campo comprendieron trece manantiales: Las Fuentes, Palo Bolero, Las Estacas, Agua Hedionda Alberca Grande, Agua Hedionda Albercas Familiares, Agua Azul, Las Tortugas, Itzamtitlan, Agua Hedionda descarga salida, Cuahuchichinola, Santa Rosa Antigua, Santa Rosa Nuevo y La Malinche (Figura 5.1 y Anexo No. 2).

La medición de parámetros de campo se realizó mediante el empleo de una celda de aislamiento para controlar al máximo la modificación de las propiedades fisicoquímicas prevalecientes del agua subterránea (Figura 5.4). La celda se conecta por medio de una bomba sumergible provista de una manguera que se introduce en el sitio de afloramiento del borbollón, permitiendo que el flujo de agua extraída se mantenga en forma controlada, continua e inalterada en el interior de la celda, ello permite la introducción de los electrodos de medición, para llevar a cabo las mediciones de campo en forma inalterada (T, pH, C.E., O.D. y Eh). Particularmente, permite la estabilización de las lecturas de los transductores, especialmente de oxígeno disuelto, pH y potencial redox.



**Figura 5.4** Medición de parámetros de campo con electrodos y equipos multiparamétricos, celda de aislamiento y bomba subacuática de flujo continuo regulado.

La importancia y descripción de cada parámetro de campo medido se anotan a continuación:

- a. La temperatura es un factor abiótico que puede afectar las propiedades físicas y químicas en un ecosistema e impactar en otros factores como la solubilidad de gases, pH, potencial redox. Por otro lado y de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2000 que hace referencia al análisis de agua, medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas; la medición de la temperatura es útil como indicador en la determinación o no, de la presencia de compuestos y/o contaminantes en el agua. La temperatura elevada en el agua puede indicar diversas situaciones, ya sea actividad biológica, química o física, además de tiempos de residencia de la misma. Además, tiene un rol muy importante en los ecosistemas al regular o no aspectos como la solubilidad de nutrientes, solubilidad de gases, pH, Eh, entre otros. Por otro lado, es un criterio de calidad para las fuentes de abastecimiento de agua potable, es un parámetro que ha sido establecido como límite permisible en las descargas de aguas residuales (SSA 2000).

**Tabla 5.1. Resultados de campo y laboratorio de manantiales en el Estado de Morelos.**

Identificación	Coordenadas			Temperatura Ambiente	Temperatura de la Muestra	pH
	X	Y	Altitud	(°C)	(°C)	
Manantial Las Fuentes	18.8770	99.1651	1345m	23.4	15.6	7.38
Manantial Palo Bolero	18.7665	99.2386	1086m	26.7	22.1	6.57
Manantial Las Estacas	18.7335	99.1136	951m		22.6	6.91
Manantial Agua Hedionda Alberca Grande	18.8150	98.9296	1317m	22.8	26.4	6.26
Manantial Agua Hedionda Albercas Familiares	18.8164	98.9314	1319m	22.0	26.5	6.24
Manantial Agua Azul	18.8028	98.9541	1282m	19.0	21.1	6.77
Manantial Las Tortugas	18.9102	99.0209	1253m	22.9	24.5	6.28
Manantial Itzamatlán	18.9071	99.0168	1258m	19.9	22.3	6.38
Manantial Agua Hedionda descarga salida	18.8164	98.9308	1314m			7.18
Manantial Cuauchichinola	18.6506	99.3506	923m	29.0	26.2	7.08
Manantial Santa Rosa Antigua	18.7854	99.2026	1165m	25.6	20.0	7.00
Manantial Santa Rosa Nuevo	18.7854	99.2026	1165m	24.2	20.0	7.00
Manantial la Malinche	18.8980	98.9695	1359m	27.8	21.6	6.20

**Tabla 5.1 Continuación**

Identificación	CE (µS/cm)	OD (mg/L)	Redox (mV)	Alcalinidad Total (mg/L)	HCO <sub>3</sub> (mg/L)	SDT (mg/L)
Manantial Las Fuentes	135.0	7.8	476	46.0	56.1	101.3
Manantial Palo Bolero	2160	6.9	50.4	362	442	1620
Manantial Las Estacas	1250	3.8	376	264	322	937.5
Manantial Agua Hedionda Alberca Grande	2310	1.5	317	576	703	1733
Manantial Agua Hedionda Albercas Familiares	2590	0.1	-37.3	640	781	1943
Manantial Agua Azul	1019	3.3	312	352	429	764.3
Manantial Las Tortugas	2580	2.0	200	552	673	1935
Manantial Itzamatlán	2350	4.6	351	440	537	1763
Manantial Agua Hedionda descarga salida	1906			480	586	1430
Manantial Cuauchichinola	811.0	1.4	426	237	289	608.3
Manantial Santa Rosa Antigua	1159	0.2	-216	325	397	869.3
Manantial Santa Rosa Nuevo	1160	0.2	83.0	312	381	870.0
Manantial la Malinche	371.0	4.9	487	94.0	115	278.3

- b. El potencial de hidrógeno (pH) constituye un parámetro importante de medición, permite observar la tendencia a lo básico o ácido de la muestra en cuestión. El pH de una solución acuosa es una medida del número de iones hidrogeno o protones presentes. Por definición el pH es el logaritmo negativo de la actividad del ion hidrogeno. Va de un rango de 0 (más ácido) a 14 (más básico) a una temperatura de 25°C, un pH de 7 significa que la muestra de agua es neutra. Los valores encontrados mayores a 7 muestran una tendencia básica y tendrá una cantidad más grande de iones OH<sup>-</sup>, por el contrario aquellos con valores inferiores muestran una tendencia ácida, con predominio de iones H<sup>+</sup>. Valores extremos pudieran ser indicadores de la existencia de contaminación debido a distintos factores, ya sea antropogénicos o naturales. Además, existen distintos factores que hacen variar los valores de pH en los cuerpos de agua, como la temperatura, presión parcial del CO<sub>2</sub>, precipitación ácida, entre otros. El pH de una solución es especialmente sensible a la cantidad de CO<sub>2</sub> disuelto, y muestra un efecto sobre las proporciones de las especies iónicas en el agua formadas a partir de CO<sub>2</sub>, en valores de pH menores a 6 prevalece el CO<sub>2</sub>, la aparición de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> se hace evidente entre 7 y 9, finalmente para valores superiores a 9 la especie iónica dominante es el CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>.
- c. La conductividad eléctrica (CE) es la capacidad que tienen las sales inorgánicas en solución para conducir electricidad, a medida que la concentración iónica aumenta, aumenta también la conductividad. Generalmente cuanto mayor sea la cantidad de sólidos disueltos, mayor será la conductividad eléctrica. La medición de este parámetro será un indicativo de la concentración del ion que varía de acuerdo a su carga, tamaño y en la manera en la que interactúe con el solvente, se mide en (µS/cm). La CE y la temperatura están relacionadas ya que, un aumento en la temperatura hace que la viscosidad disminuya, por lo que los iones se mueven más rápido y conducen más electricidad. El agua pura tiene un valor bajo de conductividad eléctrica de pocos micro Siemens por centímetro a 25°C, aunque este valor es únicamente teórico, ya que el agua pura es difícil de producir. La presencia de especies iónicas cargadas en solución hace la solución conductiva. A medida que la concentración del ion aumente, la conductancia de la solución aumenta; por lo tanto la medición de la conductividad indica la concentración del ion.
- d. El oxígeno se disuelve en el agua hasta que su presión parcial iguala a la existente en la atmósfera, es decir hasta que las presiones en la fase gaseosa y líquida alcanzan el equilibrio. El agua disuelve aproximadamente 9 mg/L de oxígeno a una temperatura de 20 °C y una presión atmosférica de 1013 milibares en estado saturado. La concentración de oxígeno depende de varios factores; tales como: temperatura, altitud (presión atmosférica), consumo de oxígeno por biodegradación por microorganismos, reacciones químicas en el medio subterráneo, etc. Además, su importancia radica en la capacidad que tiene de oxidar diferentes especies que se encuentran en su forma reducida y alterar su solubilidad. El oxígeno presente en la atmósfera se disuelve fácilmente en el agua y tiende a difundirse lentamente. Además de provenir de la atmósfera, el O.D. puede producirse durante la fotosíntesis de las plantas acuáticas donde éstas eliminan el CO<sub>2</sub> y lo reemplazan por oxígeno. Por otro lado el oxígeno es consumido por las bacterias que degradan materia



orgánica. Durante el proceso de descomposición, las bacterias hacen uso del oxígeno para oxidar y alterar el material. En cuanto los organismos comienzan a multiplicarse, la velocidad con la que utilizan el oxígeno puede superar la velocidad con la que éste es incorporado de la atmósfera. De esta manera la concentración de O.D. disminuye desencadenando un incremento en el bicarbonato generado. El agua fría puede contener más O.D. que el agua caliente, así como el agua dulce respecto de la salobre. El potencial redox es afectado por la concentración de oxígeno disuelto. A medida que baja el potencial redox en aguas y sedimentos, se observa una disminución en la concentración de O.D. y la reducción de iones y moléculas importantes para la nutrición de microorganismos y formas de vida superior.

- e. El potencial redox (Eh) es una característica fisicoquímica de aquellos solutos que tienen la facilidad de intercambiar electrones, es decir oxidar o reducir ciertas sustancias. Finalmente es una medida de la actividad de ellos y que está relacionado con el pH y la cantidad de oxígeno presente en el medio. Las actividades de ciertos elementos se ven afectadas por la variación del Eh en el medio, así como la distribución y actividad microbiana. A falta de oxígeno, la materia orgánica se oxida a costa de la reducción de otros compuestos, por ejemplo pasa de sulfato a sulfito o de nitrato a nitrito. Un valor alto y positivo de este parámetro es indicativo de un medio favorecedor para reacciones de oxidación; por otro lado, un valor pequeño o negativo indica un medio reductor. Diversas actividades de algunos elementos son sensibles a las variaciones de Eh, ya que influye en el orden de reducción de algunos compuestos de la siguiente manera:  $O_2$ ,  $NO_3^-$ ,  $Mn^{4+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $CO_2$  y  $H^+$  a las formas reducidas:  $H_2O$ ,  $NH_4^+$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $S_2^-$ ,  $CH_4$  y  $H_2$ . Para la verificación del funcionamiento del equipo de medición y para referenciar la lectura de campo al electrodo de hidrógeno, se utiliza una solución Zobell's estándar (mezcla de reactivos de ferrocianuro y ferricianuro de potasio) de 428 mV, se mide bajo las mismas condiciones de temperatura del agua de cada aprovechamiento.
- f. La alcalinidad total es la capacidad del agua para neutralizar ácidos y representa la suma de las bases que pueden ser tituladas. Dado que la alcalinidad del agua está determinada por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, ésta se toma como un indicador de dichas especies iónicas y se determina por titulación con una solución estándar de un ácido mineral fuerte a los puntos sucesivos de equivalencia del bicarbonato y el ácido carbónico (pH  $\approx$  4,5 - 4,3). Una vez tomada la muestra de agua, es factible que la alcalinidad se modifique al paso del tiempo; por lo cual, se recomienda que este parámetro sea medido directamente en campo. Para ello, se utiliza la técnica estándar de titulación con ácido sulfúrico en alícuotas de agua del pozo de 50 ml, aplicando el método potenciométrico de Gran. Este método consiste en agregar a la alícuota, un volumen determinado de ácido mediante un titulador digital, y medir inmediatamente el pH de la muestra con un potenciómetro calibrado, repitiendo este proceso de manera sucesiva hasta lograr un pH menor del valor 4.3.

### 5.3 Isotopía de manantiales

Los isótopos estables del hidrógeno y del oxígeno, intrínsecos de la molécula de agua, son trazadores gratuitos que permiten estudiar el origen y evolución de las aguas atmosféricas,

superficiales y subterráneas. Existen de manera natural, razón por la cual se denominan isótopos ambientales.

En la naturaleza se conocen 3 isótopos del Hidrógeno, dos estables y uno radioactivo:

$^1\text{H}$  o H: 99,98 % del hidrógeno total; estable

$^2\text{H}$  o D (Deuterio): 0,016 %; estable

$^3\text{H}$  o T (Tritio):  $5 \cdot 10^{-6}$  %; radioactivo

De los diferentes isótopos de oxígeno, solo son de interés en hidrogeología:

$^{16}\text{O}$ : constituye el 99,76 % de todo el oxígeno

$^{17}\text{O}$ : el 0,04 %

$^{18}\text{O}$ : el 0,20 %

El  $^{17}\text{O}$  es el menos abundante de los tres, por ello se mide con más incertidumbre que el  $^{16}\text{O}$ . Por esta razón generalmente se usa la relación  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , que ofrece un mayor contraste y una mayor facilidad de medición.

La combinación de los diferentes isótopos existentes de hidrógeno y de oxígeno permite formar hasta 18 moléculas de agua diferentes. De ellas, las más usuales desde un punto de vista probabilístico son:  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{16}\text{O}$  y  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ .

Las propiedades de los diferentes isótopos de un mismo elemento son muy similares, pero las pequeñas diferencias de movilidad iónica, tensión de vapor, difusividad, etc., hacen que el agua natural tenga ligeras diferencias de composición isotópica según su origen en el ciclo hidrológico. Así, el agua de mar es más pesada o enriquecida en  $\text{HD}^{16}\text{O}$  y  $\text{HD}^{18}\text{O}$  que el agua dulce, mientras que el vapor de agua de mar es más ligero o enriquecido en  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  respecto al agua de mar de la que es originario. El vapor de agua de lago o embalse es más pesado o enriquecido en  $\text{HD}^{16}\text{O}$  y  $\text{HD}^{18}\text{O}$  que el agua de la que procede. Es decir, existe un fraccionamiento isotópico al pasar de un estado a otro, lo cual resulta útil para estudiar procesos ocurridos en el ciclo hidrológico.

El agua de lluvia constituye una de las principales fuentes de las aguas subterráneas y del agua de la zona de poro de la Zona No Saturada. La variación espacial y temporal del contenido isotópico de la lluvia puede usarse para estudiar tanto la zona de la recarga en los acuíferos, como la época en que tiene lugar ésta.

La aplicación de isótopos en hidrología es complementaria de los resultados derivados de otras metodologías, tales como geología, geofísica, geoquímica, hidrogeología, etc. Permiten precisar el comportamiento del agua en la naturaleza, particularmente, el funcionamiento de los acuíferos y obtener conclusiones más confiables. En casos especiales aportan información única sobre la naturaleza de las aguas subterráneas (IAEA, 2005).

La manera precisa de expresar la composición isotópica de cualquier muestra de agua, se hace mediante un patrón de agua que sirve de referencia a los distintos laboratorios dedicados a la medición del contenido isotópico de muestras de agua. Para ello, se preparó

el “Patrón Medio de Agua de Mar” conocido como *SMOW* (por sus siglas en inglés) (Craig, H., 1961). En la actualidad este patrón ha sido sustituido por el *VSMOW* (por sus siglas en inglés de *Vienna Standard Mean Ocean Water*), y es reproducido de manera regular por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA).

Las variaciones isotópicas para oxígeno-18 o deuterio, con respecto al patrón *VSMOW*, se expresan como desviaciones delta por mil ( $\delta$  ‰), mediante la expresión:

$$\delta \text{ (‰)} = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{VSMOW}}}{R_{\text{VSMOW}}} \times 10^3$$

En donde R está definida por la expresión

$$R = \frac{\text{Núm. de moléculas del tipo } ^1\text{H } ^2\text{H } ^{16}\text{O} \text{ (ó } ^1\text{H}_2^{18}\text{O})}{\text{Núm. de moléculas del tipo } ^1\text{H}_2^{16}\text{O}}$$

El valor de la  $\delta$  puede ser positivo o negativo, dependiendo de que la muestra esté más enriquecida o empobrecida que el *VSMOW*. Una  $\delta$  positiva indica mayor concentración en el isótopo pesado que el *VSMOW*, según corresponda ( $^{18}\text{O}$  ó  $^2\text{H}$ ).

La desviación  $\delta$  en las aguas meteóricas varía entre límites amplios debido a diferentes causas. Una es el fraccionamiento producido durante los cambios de fase, el cual es motivado por la diferencia de presión de vapor de las tres especies moleculares. Si designamos por P a esta presión de vapor, se cumple:

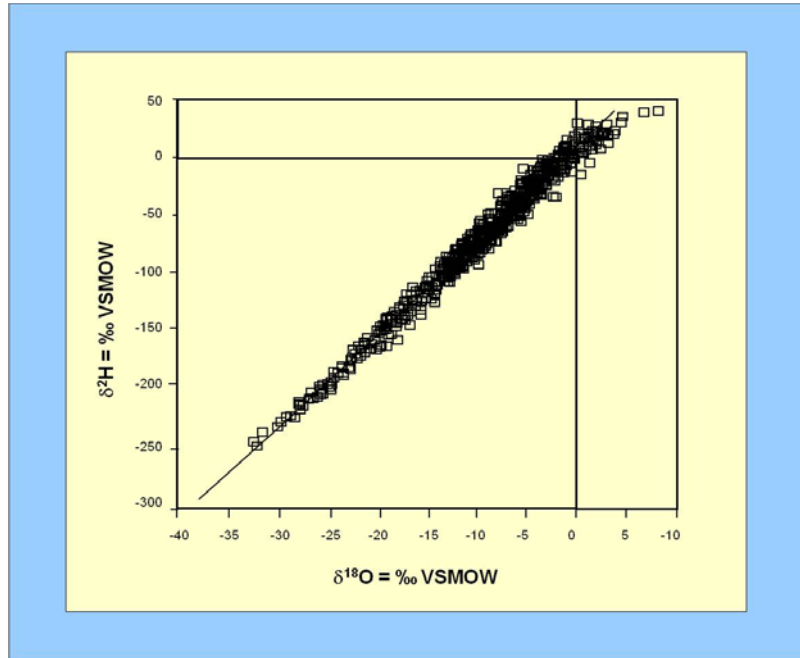
$$P(^1\text{H}_2^{16}\text{O}) > P(^1\text{H}_2^{18}\text{O}) > P(^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O})$$

La presión de vapor determina la velocidad de evaporación o de condensación del agua. Por tanto las moléculas ligeras ( $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ ) que tienen mayor presión de vapor, se evaporan más rápido y se condensan más lentamente que las moléculas pesadas, es decir, presentan una tendencia mayor a permanecer en la fase de vapor durante el cambio de fase (Clark, I.D. and Fritz, P., 1997).

La lluvia a nivel global presenta una composición isotópica lineal que se ajusta a la ecuación:

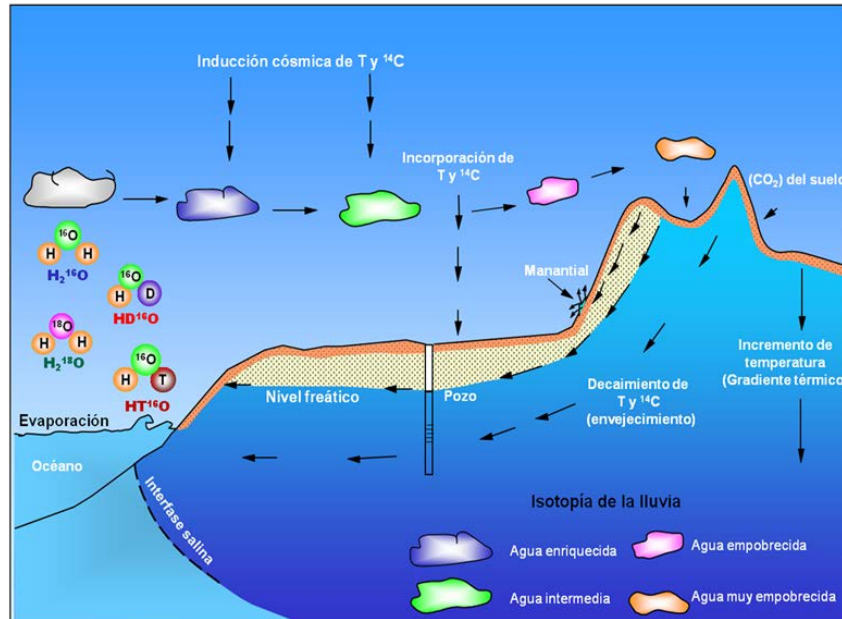
$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$$

Esta ecuación es válida para todas las aguas meteóricas que se precipitan sobre la superficie de la tierra y describe a la denominada Línea Meteórica Global (GMWL por sus siglas en inglés). La ordenada al origen de valor 10 se denomina exceso de deuterio. La pendiente y el exceso de deuterio pueden variar ligeramente para cada región debido a las condiciones climatológicas locales. En algunos casos se cuenta con líneas meteóricas locales que permiten la interpretación de los resultados isotópicos estables (Figura 5.5)



**Figura 5.5** Distribución de la composición isotópica estable de las aguas meteóricas a nivel global. Los valores  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  se ajustan a una recta de pendiente ocho y ordenada al origen 10 denominada Línea Meteórica Global.

La composición isotópica de la lluvia depende de la génesis que experimenta, desde el momento de salir del mar en forma de vapor hasta que se incorpora en forma líquida en cualquiera de los componentes del ciclo hidrológico. A medida que la nube avanza, va perdiendo agua por condensaciones sucesivas hasta que el frente nuboso pierde su actividad. Debido a que las moléculas pesadas  $^1H^2H^{16}O$  y  $^1H_2^{18}O$  condensan de forma preferente, la nube se va empobreciendo en estas dos especies moleculares (Clark, I.D., and Fritz, P., 1997). Esto hace que las precipitaciones tengan valores más negativos a medida que se alejan de la fuente de producción de vapor, se denomina efecto continental; es decir, se produce un empobrecimiento de isótopos pesados de la lluvia en función de la distancia (Figura 5.6).



**Figura 5.6 Evolución isotópica de las aguas superficiales y subterráneas en el ciclo hidrológico**

Otro factor muy importante que influye en la composición isotópica de las precipitaciones pluviales de zonas montañosas, es el llamado efecto de altitud, derivado de la mayor velocidad de difusión de las moléculas ligeras en la atmósfera. Durante el desarrollo vertical de las nubes, hay un aumento de la condensación del vapor de agua a medida que disminuye la temperatura. Debido a que las moléculas pesadas condensan de manera preferencial con respecto a las ligeras, se tiene como resultado que las precipitaciones de cotas más elevadas sean más negativas o estén más empobrecidas en isótopos pesados (Figura 5.6). Por este efecto, la  $\delta^{18}\text{O}$  varía entre -0.15 y -0.5‰ y la  $\delta^2\text{H}$  entre -1 y -4‰ por cada 100 metros de diferencia de altitud.

Otro fenómeno que cambia la composición isotópica original de un tipo de agua, es el denominado efecto de evaporación. Cuando el agua experimenta procesos de evaporación intensa sus deltas de deuterio y oxígeno-18 evolucionan a lo largo de una línea de evaporación de coeficiente angular menor al de la línea meteórica mundial (GMWL por sus siglas en inglés). Típicamente, esta situación se presenta cuando el agua es almacenada en una presa o cuando se aplica mediante riego en agricultura. Al estar sometida a evaporación intensa, el agua registra un fraccionamiento isotópico de su composición original (Figura 5.7). Al haber recarga proveniente de un embalse o por infiltración de retornos de riego, en el acuífero se genera una mezcla de agua con un sello característico de este proceso (Mazor, E., 1991).

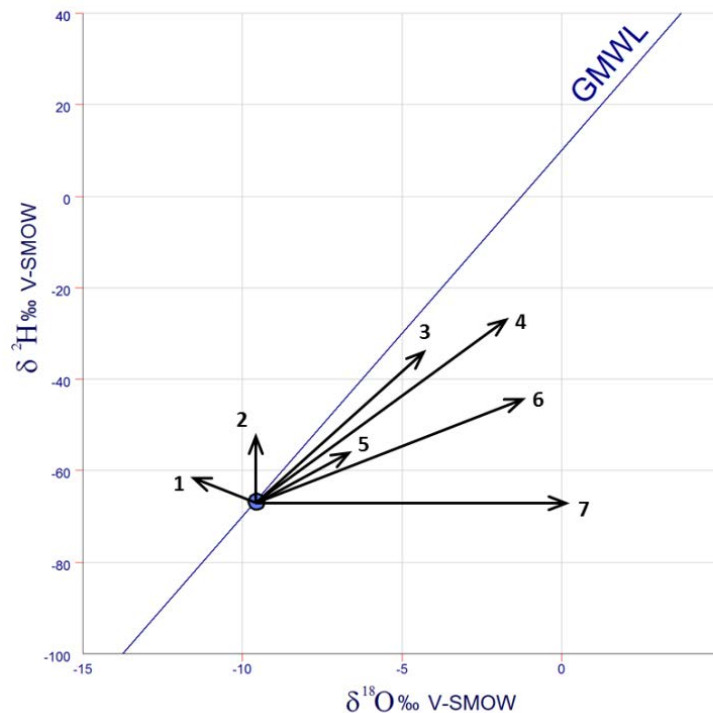
Existen otros procesos que causan fraccionamiento isotópico del tipo de agua original, entre los cuales destaca la reducción del sulfato. En condiciones anaeróbicas del agua subterránea y alta concentración de sulfato, la acción bacteriana es la responsable de la



oxidación de la materia orgánica. Durante este proceso, las bacterias transforman el sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en sulfito ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) y posteriormente en sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Las bacterias preferentemente utilizan el  $^{16}\text{O}$  durante la reducción del ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) a ( $\text{SO}_3^{2-}$ ), por lo cual el sulfito se enriquece en  $^{18}\text{O}$ . Diversos estudios (Fritz, Drimmie and Qureshi, 1989) han mostrado que cuando el sulfito es creado, rápidamente intercambia  $^{18}\text{O}$  con el agua subterránea buscando un equilibrio isotópico. Debido a este intercambio, el agua subterránea se enriquece en  $^{18}\text{O}$ . Como resultado de este proceso, el agua subterránea original evoluciona isotópicamente a lo largo de una recta de pendiente con coeficiente angular menor al de la GMWL (Figura 5.7) (Horita, J., 2005).

El registro de los efectos antes mencionados permiten establecer el origen y la dinámica del agua subterránea, particularmente identificar las zonas de recarga efectiva y los procesos de mezcla de los flujos subterráneos.

### EVOLUCIÓN ISOTÓPICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA



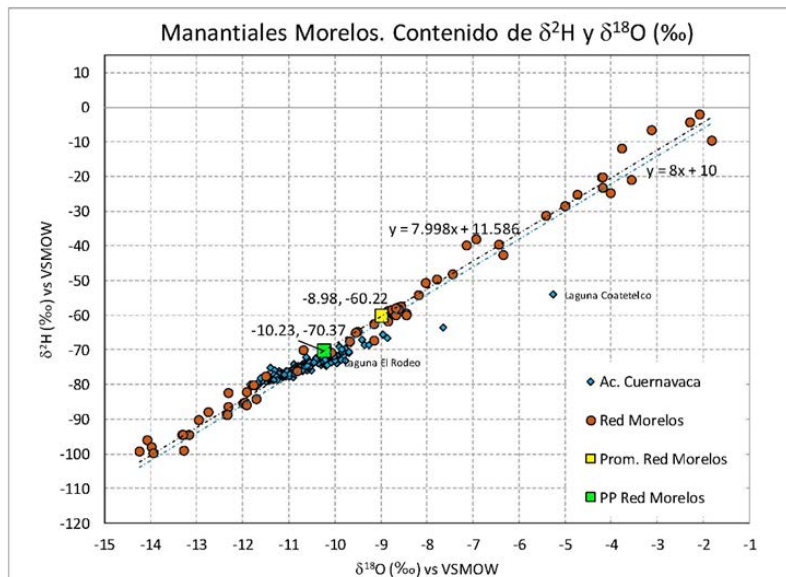
**Figura 5.7 Evolución isotópica del agua subterránea en cuencas sedimentarias: 1. Hidratación de silicatos; 2. Intercambio con  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$  e hidrocarburos; 3. Reducción de sulfatos, oxidación de compuestos orgánicos e hidrógeno molecular; 4. Evaporación de agua dulce; 5,6 y7?.**

## 5.4 Discusión de resultados

La caracterización isotópica estable y geoquímica de las aguas superficiales y subterráneas de la zona de estudio, se realizó mediante el análisis conjunto de los resultados de campo y laboratorio. Los resultados analíticos de cada laboratorio aparecen en los Anexos 3 y 4.

### 5.4.1 Isotopía estable y tritio ambiental

Los resultados de isótopos estables de H y O, especies químicas disueltas, mediciones de campo y contenido de tritio ambiental graficados en diagramas de dispersión X vs. Y, así como en diagramas químicos, permiten simplificar y explicar el funcionamiento de los flujos subterráneos que alimentan a los manantiales existentes en la zona de estudio. Los resultados de campo y laboratorio considerados en el análisis aparecen en la tabla 5.1 y los resultados de los parámetros medidos en campo y laboratorio, aparecen en su totalidad en el Anexo 3.



**Figura 5.8 Composición isotópica estable de la precipitación pluvial en la zona de estudio.**

Para definir la fuente de recarga de los flujos subterráneos que alimentan a los manantiales, se consideró la red de colectores de lluvia acumulada que permiten la caracterización de la composición isotópica de la lluvia en la zona del acuífero Cuernavaca, colindante con la cuenca del acuífero Cuautla-Yautepec. Los datos isotópicos de la precipitación pluvial caen sobre una línea meteórica local definida por:

$$\delta^2\text{H} = 7.89 \cdot \delta^{18}\text{O} + 11.35$$

La distribución del contenido isotópico de la lluvia (Figura 5.8) muestra valores que cubren un amplio rango de valores. Normalmente, la composición isotópica de la recarga efectiva de un acuífero, la determina el promedio pesado de los contenidos isotópicos de la precipitación pluvial, es decir mediante la relación:

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{\sum \delta^{18}\text{O}_i P_i}{\sum P_i}$$

Donde:

$\delta^{18}\text{O}_i$ : Valor característico de la lluvia del episodio  $i$  y

$P_i$ : Lluvia en milímetros del episodio  $i$

De la cual se obtiene que los valores ponderados son  $\delta^{18}\text{O} = -10.23\text{‰}$  y  $\delta^2\text{H} = -70.37\text{‰}$ , sin embargo, en el caso de los manantiales de Morelos y algunos pozos, que han sido considerados en el presente estudio para contrastar o referenciar los resultados químicos e isotópicos de los manantiales, muestran que la composición isotópica de los flujos subterráneos son ligeramente más negativos, es decir las deltas de oxígeno 18 van de  $-10.4\text{‰}$  a  $-11.7\text{‰}$  y las deltas de deuterio, de  $-74\text{‰}$  a  $-79\text{‰}$  (Figura 5.9). Lo cual indica, que la recarga efectiva se lleva a cabo en los meses de verano y que proviene de la precipitación pluvial de la zona, tal como lo muestra la Figura 5.10, donde los promedios pesados de la composición isotópica de verano son  $\delta^{18}\text{O} = -10.62\text{‰}$  y  $\delta^2\text{H} = -73.4\text{‰}$ .

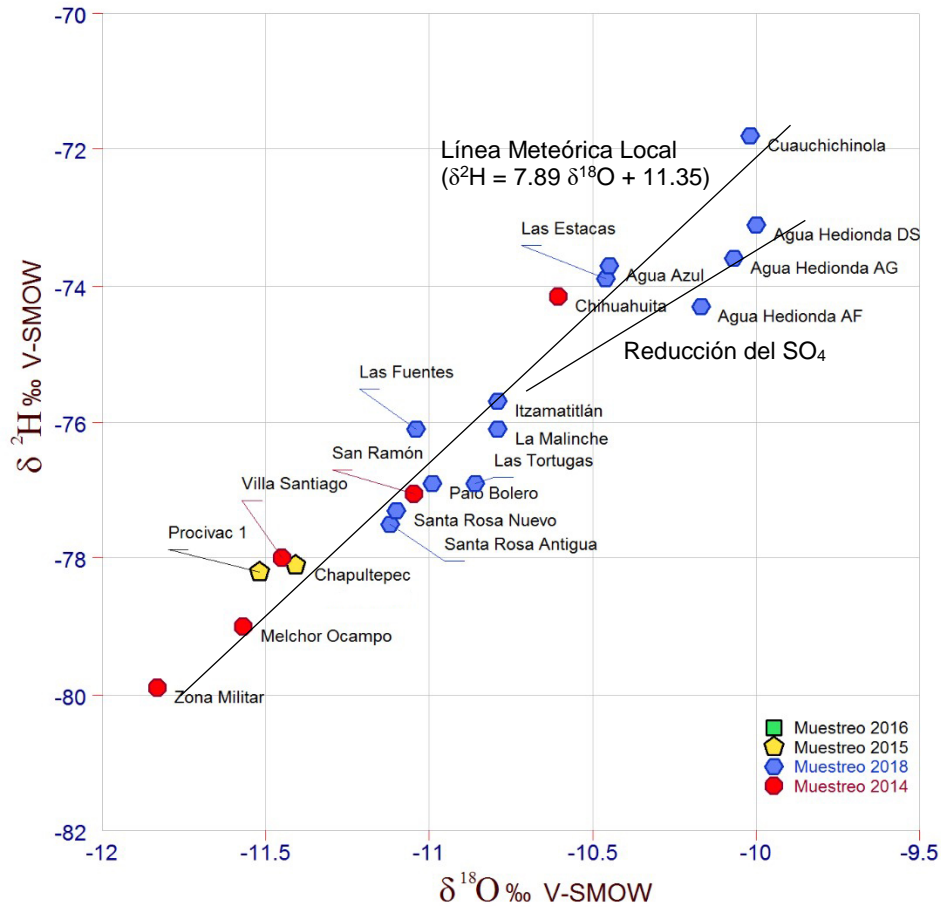
La gráfica de  $\delta^{18}\text{O} \text{‰}$  Vs.  $\delta^2\text{H} \text{‰}$  de la Figura 5.9 muestra un evidente efecto de altitud en los contenidos de isótopos estables del agua de los diferentes aprovechamientos muestreados. Se observan cuatro grupos de aprovechamientos con contenidos isotópicos estables ligeramente diferentes: El grupo más empobrecido isotópicamente está integrado por pozos y manantiales de la zona de estudio, cuyos datos corresponden a los años 2014, 2015 y 2016 y que han sido utilizados con el propósito de comparar los datos químicos e isotópicos de los manantiales en estudio. En promedio presentan las composiciones:  $\delta^{18}\text{O} = -11.5\text{‰}$  y  $\delta^2\text{H} = -78.5\text{‰}$ .

El grupo formado por los manantiales: Santa Rosa, las Tortugas, Palo Bolero, Itzamatlán, Las Fuentes y La Malinche presentan valores para la  $\delta^{18}\text{O}$  que van de  $-10.7\text{‰}$  a  $-10.9\text{‰}$  y en la  $\delta^2\text{H}$  de  $-76.3\text{‰}$  a  $-76.8\text{‰}$ .

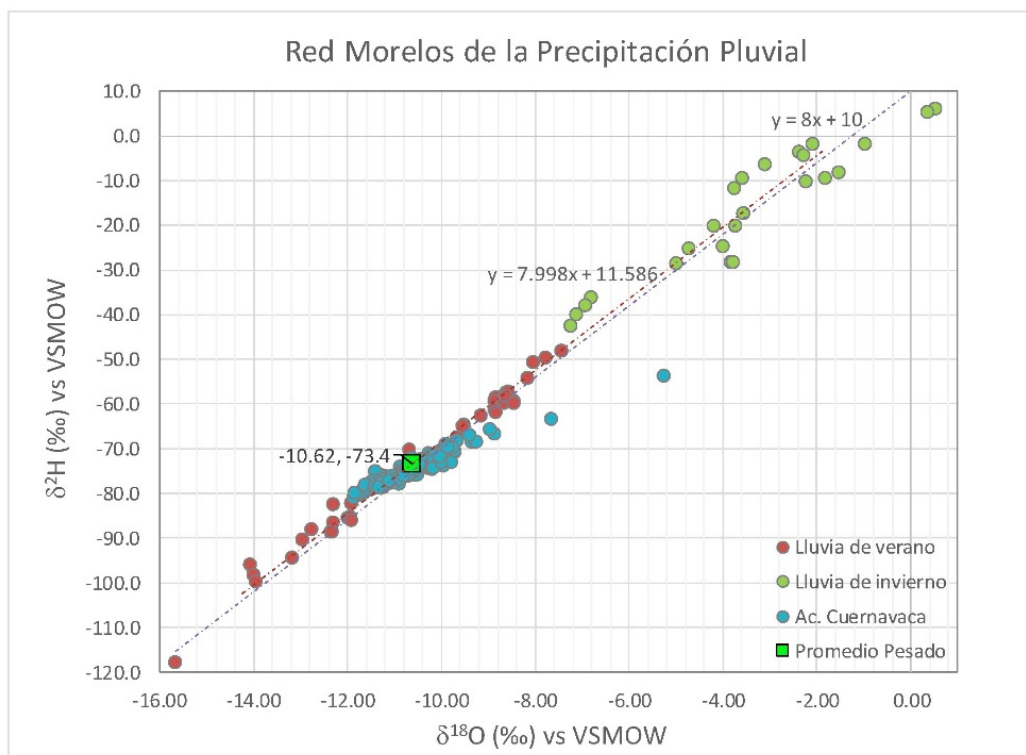
El grupo formado por los manantiales: Las Estacas y Agua Azul presentan para la  $\delta^{18}\text{O} = -10.5\text{‰}$  y  $\delta^2\text{H} = -74\text{‰}$ .

Finalmente al manantial Cuauichichinola le corresponde una  $\delta^{18}\text{O} = -10\text{‰}$  y  $\delta^2\text{H} = -72\text{‰}$ . En el caso de los manantiales Agua Hedionda presentan composiciones isotópicas que han evolucionado por la reducción del sulfato y que probablemente los flujos que los alimentan provienen de zonas de recarga de altitudes similares a las de los manantiales Santa Rosa, las Tortugas, Palo Bolero, Itzamatlán, Las Fuentes y La Malinche.

### MANANTIALES DE MORELOS: d18O Vs. d2H



**Figura 5.9** Composición isotópica estable de pozos y manantiales del estado de Morelos. Los manantiales aparecen en color azul y el resto de aprovechamientos considerados en el estudio, corresponden a datos generados en años anteriores al 2018.



**Figura 5.10** La recarga efectiva del agua subterránea que alimenta a los manantiales proviene de la lluvia que se precipita en la zona durante los meses de verano.

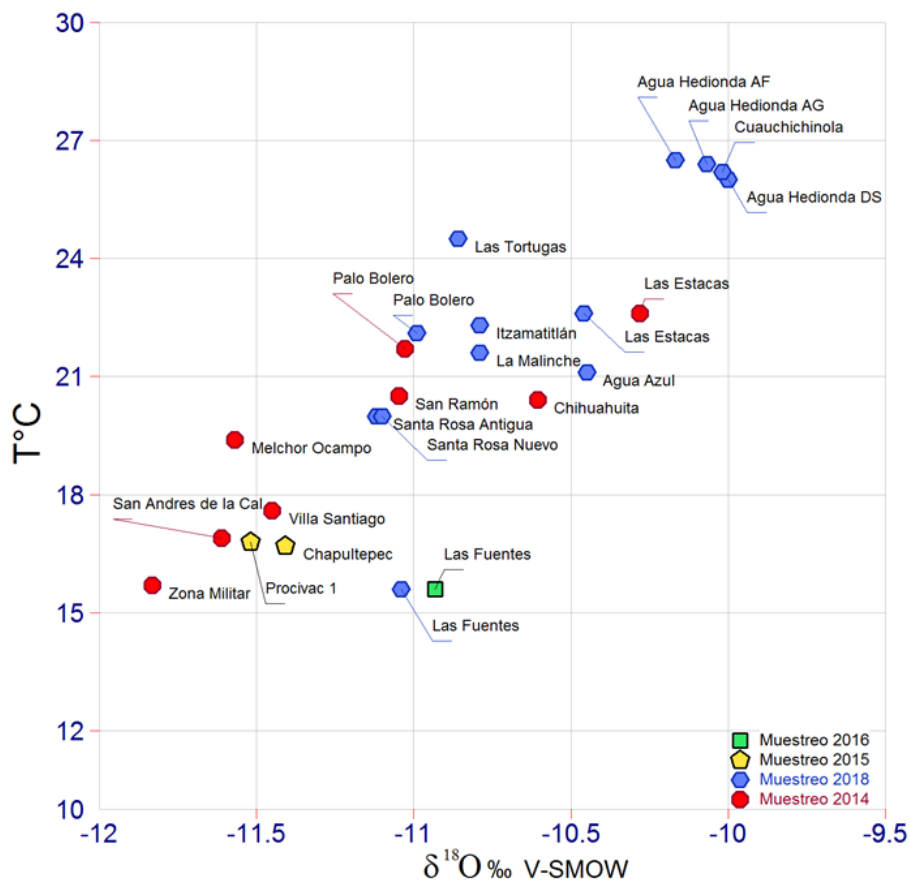
Es importante destacar que los valores delta de todas las muestras se agrupan sobre la línea meteórica local, indicando que los flujos que alimentan a los aprovechamientos muestreados se originan de agua de lluvia infiltrada sin haber sufrido evaporación. Con excepción de los manantiales Agua Hedionda, cuya  $\delta^{18}\text{O}$  está enriquecida por reducción del  $\text{SO}_4$  por acción bacteriana en condiciones reductoras, como se explica en párrafos posteriores.

La composición isotópica del agua subterránea indica que existen variaciones debidas al gradiente de altitud, es decir las aguas que se precipitan a mayor altitud presentan valores más empobrecidos en isótopos pesados, tal como lo muestran los aprovechamientos (pozos: Melchor Ocampo, Zona Militar, ProciVac 1, Villa Santiago, y manantial Chapultepec) utilizados para referenciar los datos isotópicos de los manantiales objeto del presente estudio (Figura 5.9).

El efecto de altitud en la composición isotópica se refleja en la temperatura del agua de los aprovechamientos considerados. Las aguas más frías corresponden a los valores isotópicos más empobrecidos, por recibir recarga proveniente de cotas de mayor altitud (Figura 5.11). A medida que la recarga proviene de zonas de menor altitud el agua subterránea presenta temperaturas ligeramente mayores.



### GRÁFICA d18O Vs. T



**Figura 5.11 Las aguas más frías corresponden a las δ<sup>18</sup>O más negativas es decir composiciones más empobrecidas en isótopos pesados.**

De acuerdo con el contenido de isótopos estables de H y O hay evidencia de la evolución que experimentan los manantiales Agua Hedionda (Figura 5.9). Esta evolución se debe a las condiciones redox bajo las cuales el agua interacciona con la roca en condiciones totalmente anaeróbicas en las cuales hay acción bacteriana que reducen el SO<sub>4</sub> para oxidar la materia orgánica.

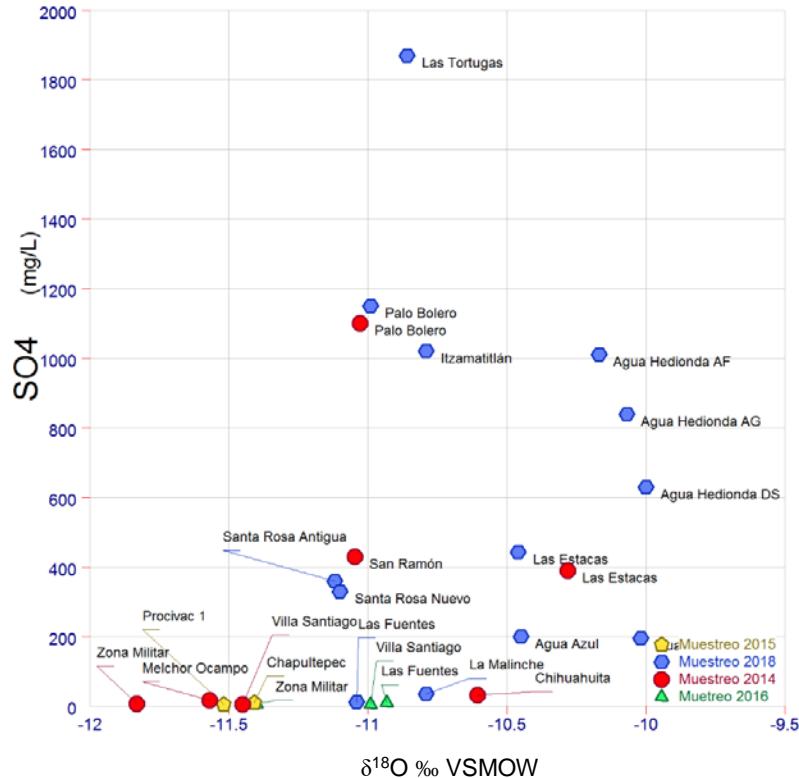
Durante el proceso de oxidación las bacterias consumen preferentemente el <sup>16</sup>O del SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> enriqueciendo el producto SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> en <sup>18</sup>O, el cual se intercambia rápidamente con el agua subterránea hasta alcanzar un equilibrio isotópico. Como resultado, el agua subterránea se enriquece en <sup>18</sup>O (Figura 5.9) (Betts and Voss, 1970; Fritz, Drimmie and Qureshi, 1989).

Debido a que el agua subterránea de los manantiales está en contacto con rocas solubles de origen marino, los procesos de mineralización disuelven la roca incrementando la concentración de sulfato, tal como lo muestra la Figura 5.12. Las concentraciones de SO<sub>4</sub><sup>=</sup>

más elevadas se observan en los manantiales: Las Tortugas, Palo Bolero, Itzamatitlán, y Agua Hedionda. Con menor concentración, por debajo de los 500 mg/L están los manantiales Santa Rosa, San Ramón y Las Estacas.

Es importante destacar que el manantial San Ramón fue afectado por los sismos de septiembre de 2017, dejando de emerger, el resultado que aparece en el gráfico corresponde a datos obtenidos en un muestreo realizado en el 2014 (Figura 5.12). Con el propósito de comparar resultados de los manantiales muestreados en 2018 con resultados históricos de los manantiales Las Estacas y Palo Bolero, se han graficado mostrando pequeñas diferencias en sus resultados hidroquímicos e isotópicos.

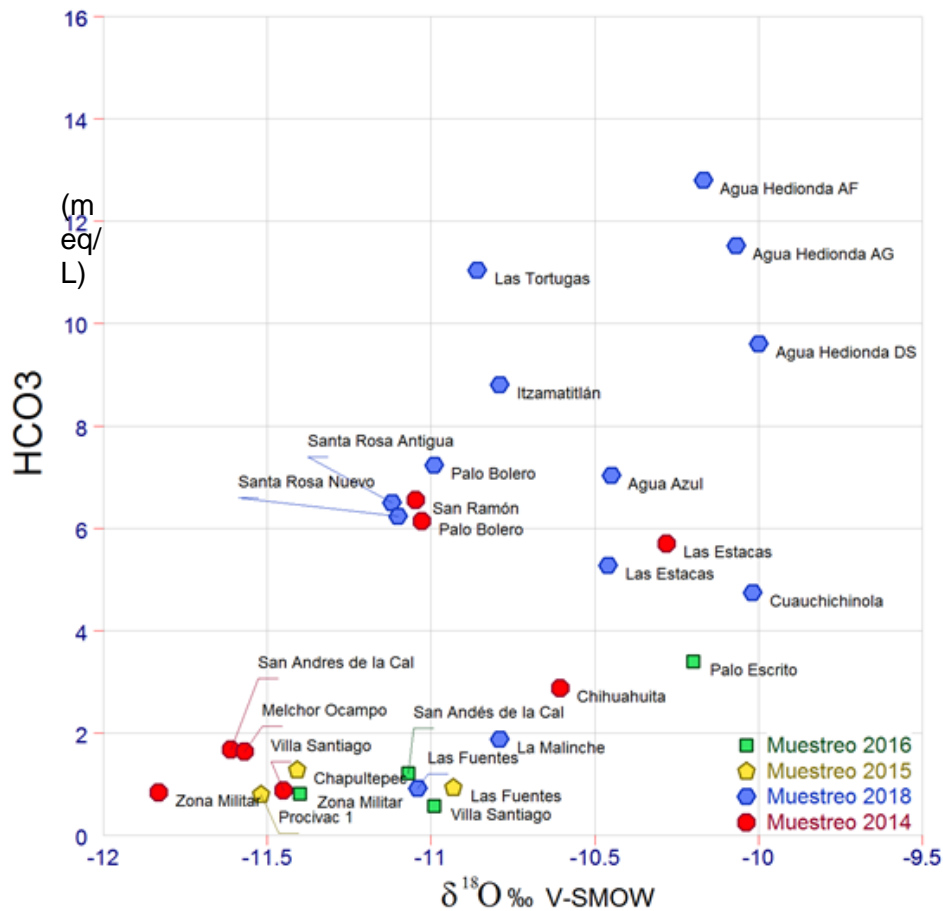
**GRÁFICA d18O Vs. SO4**



**Figura 5.12 Interacción del agua con la roca caliza, en donde las mayores concentraciones se presentan en los manantiales las Tortugas, Palo Bolero, Itzamatitlán y Agua Hedionda.**

El mismo efecto de interacción del agua con la roca lo muestra el gráfico de la Figura 5.13, en donde las concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$  son elevadas en los manantiales: Agua Hedionda, Las Tortugas, Itzamatitlán, Santa Rosa, Agua Azul, Las Estacas y Cuauchichinola. Las concentraciones de bicarbonato en los aprovechamientos que captan flujos que interaccionan con rocas de origen volcánico de la Sierra Chichinautzin son bajas, como es el caso de los manantiales La Malinche y Las Fuentes, así como de los pozos: muestreados en los años 2014, 2015 y 2016.

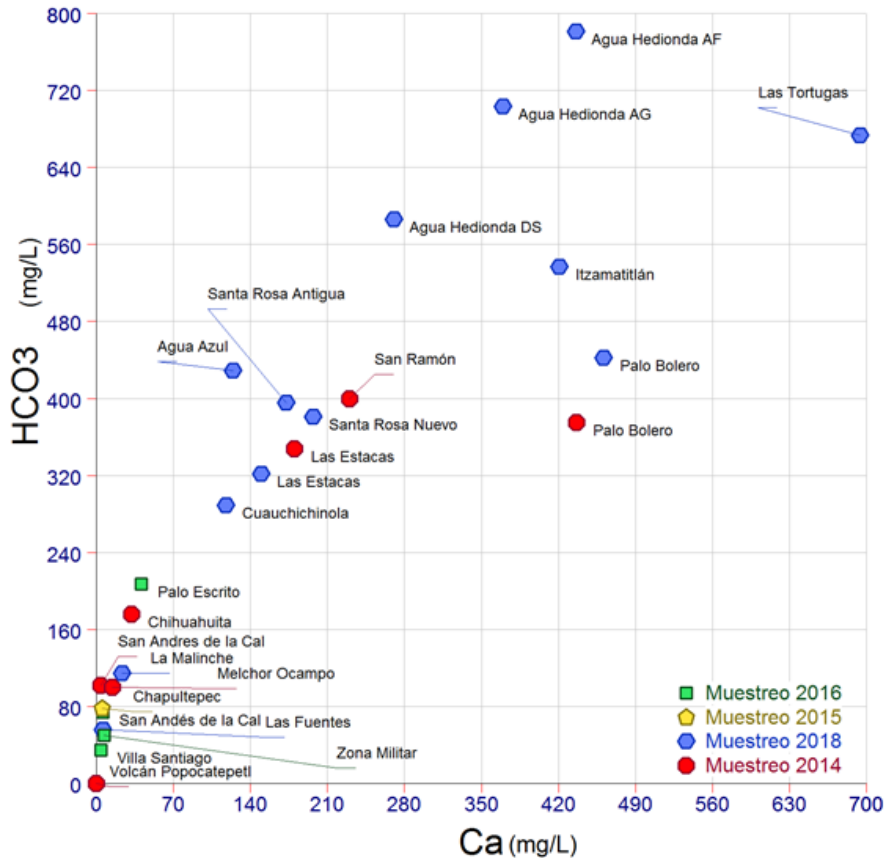
### GRÁFICA d18O V-SMOW Vs. HCO3



**Figura 5.13** Interacción del agua con la roca muestra concentraciones elevadas de HCO<sub>3</sub>- en los manantiales cuyos flujos circulan por rocas carbonatadas.

La disolución de la roca al interactuar con el agua en las formaciones calizas incrementa la concentración de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y de Ca<sup>++</sup> tal como lo muestra la Figura 5.14:

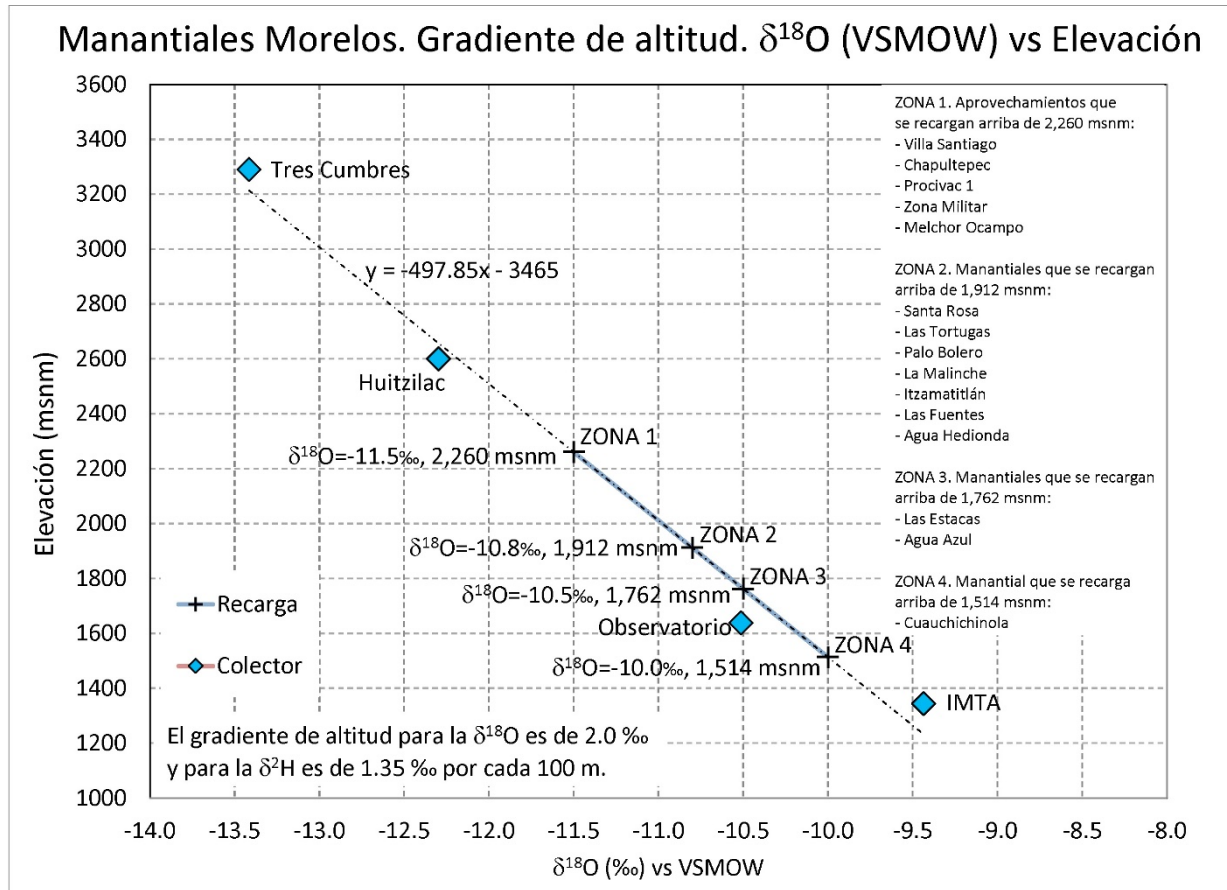
### GRÁFICA Ca Vs. HCO<sub>3</sub>



**Figura 5.14** Disolución de roca carbonatada en los flujos que alimentan a los manantiales Agua Hedionda, las Tortugas Itzamatitlán, San Ramón, Palo Bolero, Agua Azul, Santa Rosa, y Cuauichinola.

Las zonas de recarga efectiva se determinan mediante las composición isotópica de la precipitación pluvial colectada sobre el terreno a diferentes altitudes. El gradiente de altitud se calculó con la red de colectores de lluvia acumulada instalados por el IMTA en la zona del acuífero Cuernavaca, colindante con la zona del acuífero Cuautla-Yautepec.

La gráfica de la Figura 5.15 muestra el gradiente de altitud determinado con la red Morelos, e indica que el gradiente de altitud para la  $\delta^{18}\text{O}$  es de 0.2‰ y para la  $\delta^2\text{H}$  de 1.35‰ por cada 100 metros. Por tanto, la zona de recarga efectiva de los manantiales Agua Hedionda, Las Estacas y Agua Azul está por arriba de los 2011 msnm de altitud, y de los manantiales Santa Rosa, Palo Bolero, La Malinche, Itzamatitlán y Las Fuentes se localiza en cotas por arriba de los 2260 msnm de altitud. El manantial Cuauichinola su zona de recarga efectiva se localiza por arriba de la cota 1300 msnm.



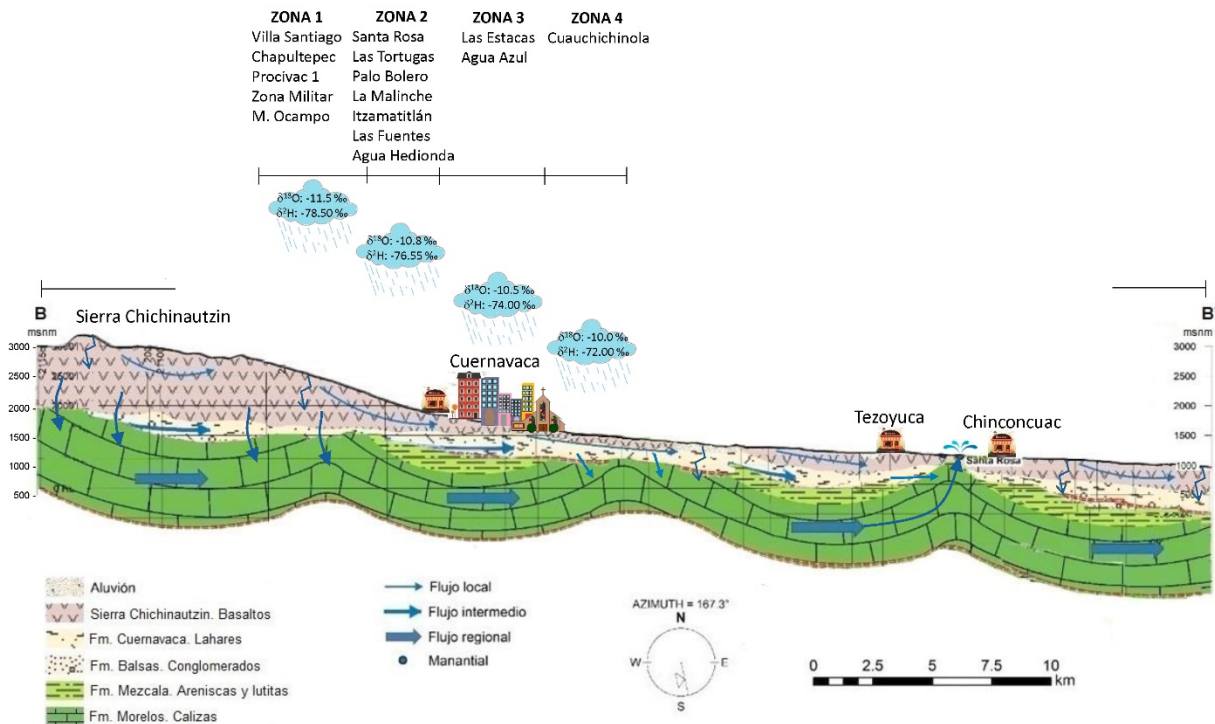
**Figura 5.15 Gradiente de altitud de la composición isotópica de la lluvia utilizado para determinar las zonas de recarga efectiva de los manantiales.**

El perfil geológico de la Figura 5.16 muestra las zonas de recarga de los diferentes aprovechamientos considerados en el estudio, determinadas con la composición isotópica del agua de las descargas de los diferentes aprovechamientos, y considerando el gradiente de altitud determinado con la red de monitoreo de la composición isotópica de la lluvia en la zona del acuífero Cuernavaca (Figura 5.15).

Existen cuatro zonas de recarga efectiva ubicadas a diferentes altitudes, tal como se indica en las Figuras 5.15 y 5.16. Los flujos más empobrecidos en isótopos pesados corresponden a los pozos Zona Militar, Melchor Ocampo, Proquivac 1 y Villa Santiago, así como al manantial Chapultepec, cuyas recargas se realizan por arriba de la cota 2,260 msnm. Los manantiales: Las Fuentes, Santa Rosa, Palo Bolero, Las Tortugas, La Malinche e Itzamatlán se recargan a una altitud por arriba de los 1,986 msnm. Los manantiales Las Estacas, Agua Azul y Chihuahuita por arriba de los 1,613 msnm. El manantial Cuauchichinola a una altitud de 1,514 msnm. En el caso de los manantiales Agua Hedionda es probable que se recarguen a la misma altitud que el grupo de manantiales Itzamatlán y La Malinche es decir por arriba de la cota 1,986 msnm, ya que por el cambio en su composición isotópica debido a la reducción



del  $\text{SO}_4^-$  por acción bacteriana, el flujo adquiere una composición isotópica más enriquecida en isótopos pesados.



**Figura 5.16 Zonas de recarga efectiva de los manantiales de la zona de Morelos determinadas con el gradiente de altitud de la composici6n isot6pica de la lluvia.**

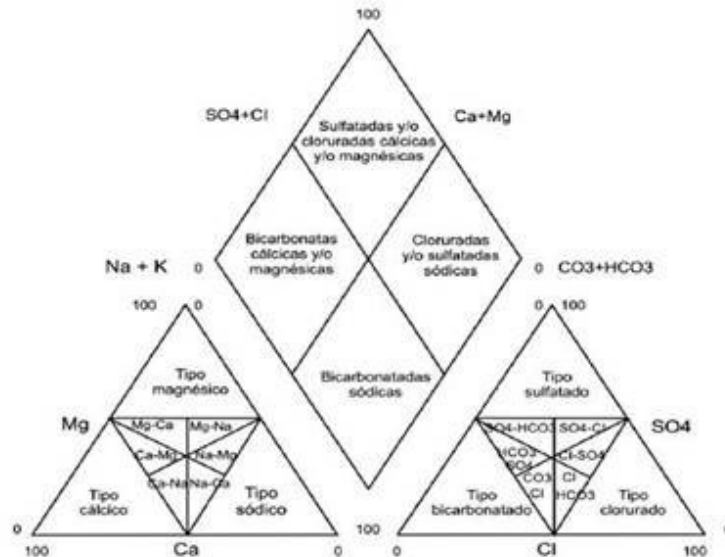
### 5.4.2 Hidroquímica

Los diagramas hidroquímicos son representaciones gráficas que facilitan la visualizaci6n de las características químicas del agua para su clasificaci6n en tipos y familias de agua. El tipo de agua se define por los constituyentes químicos disueltos que contribuyen desde el punto de vista ani6nico y cati6nico, que permiten establecer las principales familias de agua presentes en la zona de estudio, y comprender su contexto hidrogeoquímico.

Con el diagrama de Piper, se obtiene el tipo o familia de agua a la que pertenecen las muestras de agua analizadas. Los cationes y aniones se representan en un gráfico compuesto por tres partes, dos triángulos y un rombo (Figura 5.17). El diagrama se construye expresando las concentraciones de los parámetros químicos mayoritarios en miliequivalentes por litro (meq/l) y posteriormente se convierten en porcentajes. Los triángulos únicamente indican las proporciones de los cationes y aniones presentes en la muestra de agua, no su concentraci6n.

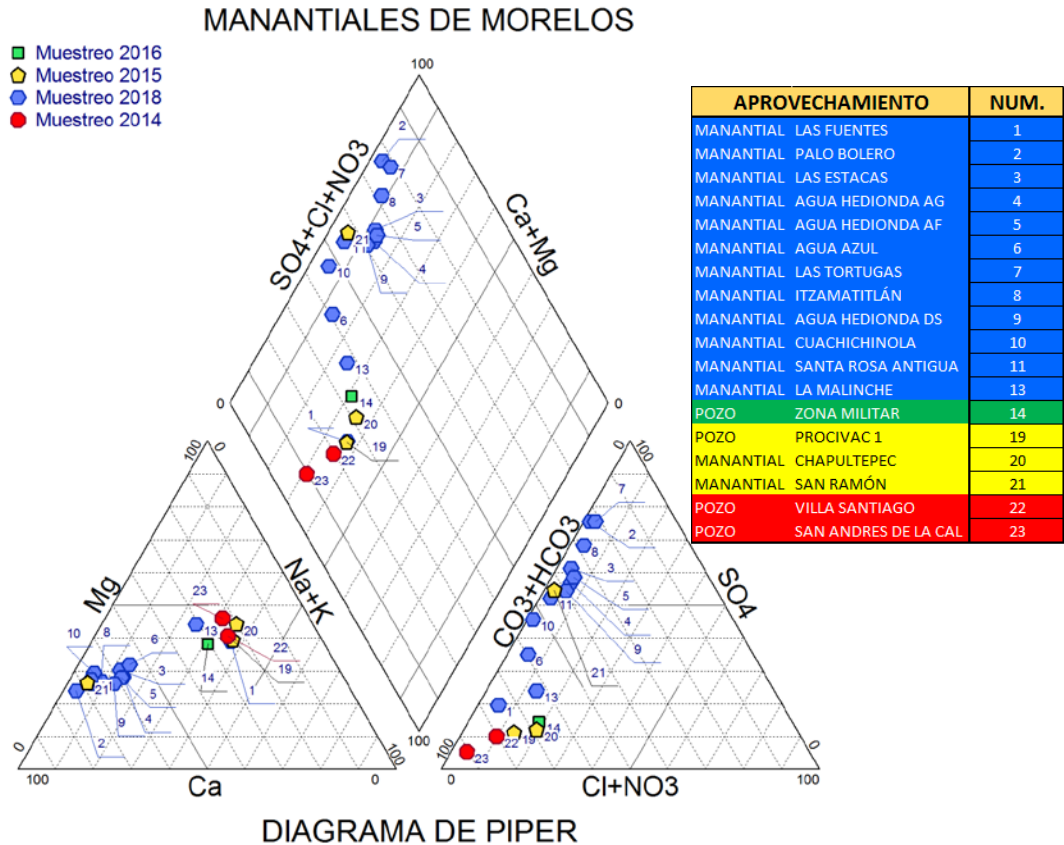
En los vértices del triángulo izquierdo del diagrama se grafican los cationes principales,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , y en los vértices del triángulo de la derecha, los aniones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$ , a

cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión. Los valores de los cationes y aniones graficados en cada triángulo, son proyectados en el rombo de la parte central del diagrama para obtener la clasificación de la familia o tipo de agua. Se define al agua mixta como aquella que se grafica al centro de cada triángulo por no haber ion predominante.



**Figura 5.17 Diagrama de Piper con la clasificación de las familias o tipos de agua.**

De acuerdo con el diagrama de Piper de la Figura 5.18, las aguas de los manantiales alimentados con flujos alojados en rocas volcánicas presentan agua de tipo Bicarbonatada-Cálcica, como son los manantiales Cuauchichinola, Agua Azul y La Malinche; la familia bicarbonatada-mixta, por el manantial Las Fuentes y los aprovechamientos que se han agregado en la interpretación de resultados para comparar la calidad hidroquímica e isotopía de las aguas, como son los pozos Zona Militar, Villa Santiago, Procivac 1 y San Andrés de la Cal, así como el Manantial Chapultepec, los cuales son recargados por flujos provenientes de la Formación Chichinautzin; y finalmente la familia Sulfatada-Cálcica integrada por los manantiales Palo Bolero, Las Estacas, Agua Hedionda AG, Agua Hedionda AF, Las Tortugas, Itzamatitlán, Santa Rosa Antigua, Santa Rosa Nuevo, San Ramón (química e isotopía de archivo, actualmente no hay afloramiento de agua) y la descarga superficial Agua Hedionda DS (aun cuando está formada por mezcla de aguas de diferente origen).



**Figura 5.18** Clasificación de las aguas de los manantiales. El diagrama de Piper indica la evolución de la calidad de los flujos subterráneos que alimentan a los manantiales, siendo bicarbonatada-cálcica, bicarbonatada-mixta y sulfatada-cálcica.

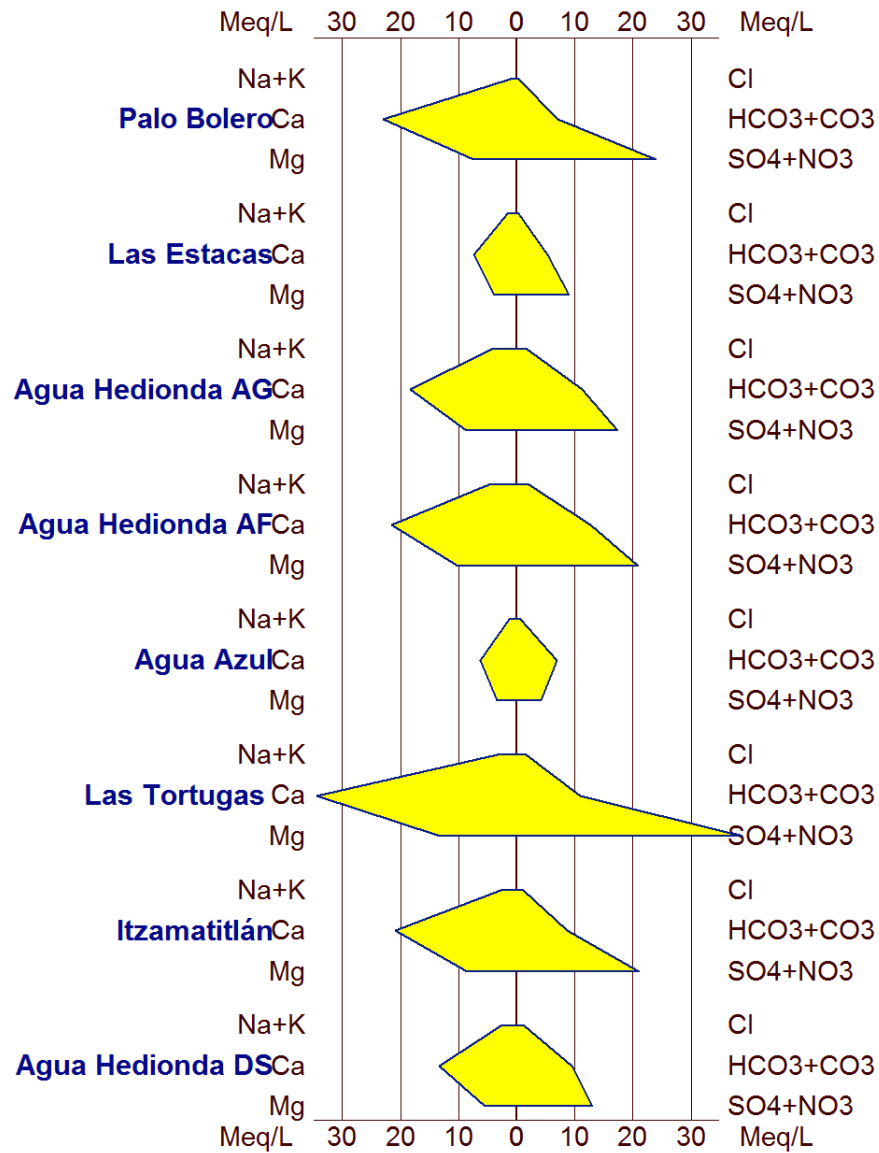
Adicionalmente, se utilizó el diagrama de Stiff, que es otro tipo de representación gráfica para los datos químicos, donde la proporción de concentraciones de los cationes ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ) y los aniones ( $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ) de la muestra de agua, se presentan mediante vértices que se extienden horizontalmente indicando la cantidad existente de cada uno de los iones expresados, de la misma manera que en el diagrama de Piper, en meq/l. Hacia el lado izquierdo de la figura se presentan los cationes y hacia el derecho los aniones. La forma del polígono resultante permite visualizar diferentes tipos de agua o la mineralización de la misma. Este diagrama fue elaborado también para todas las muestras analizadas (Figuras 5.19 y 5.20).

Los diagramas de Stiff presentan la misma forma para los manantiales cuyos flujos están en contacto con roca caliza, con altas concentraciones predominantes de  $SO_4^{2-}$  y  $Ca^{2+}$ : Palo Bolero, Agua Hedionda AG, Agua Hedionda AF, Agua Hedionda DS, Las Tortugas e Itzamtitlán. Los manantiales Las Estacas, Santa Rosa Antiguo, Santa Rosa Nuevo, y San Ramón, muestran la misma forma, sin embargo contienen concentraciones relativamente mucho menores que los manantiales anteriormente mencionados. Todos ellos son del tipo de agua Sulfatada-Cálcica.

Los manantiales Agua Azul, Las fuentes, Cuauchichinola y La Malinche, presentan formas diferentes, indicando que son del tipo de agua Bicarbonatada-mixta o Bicarbonatada-Cálcica. Los flujos de estos manantiales presentan concentraciones de iones mayoritarios relativamente menores a las concentraciones de los manantiales de la familia Sulfatada-Cálcica.

### MANANTIALES DE MORELOS

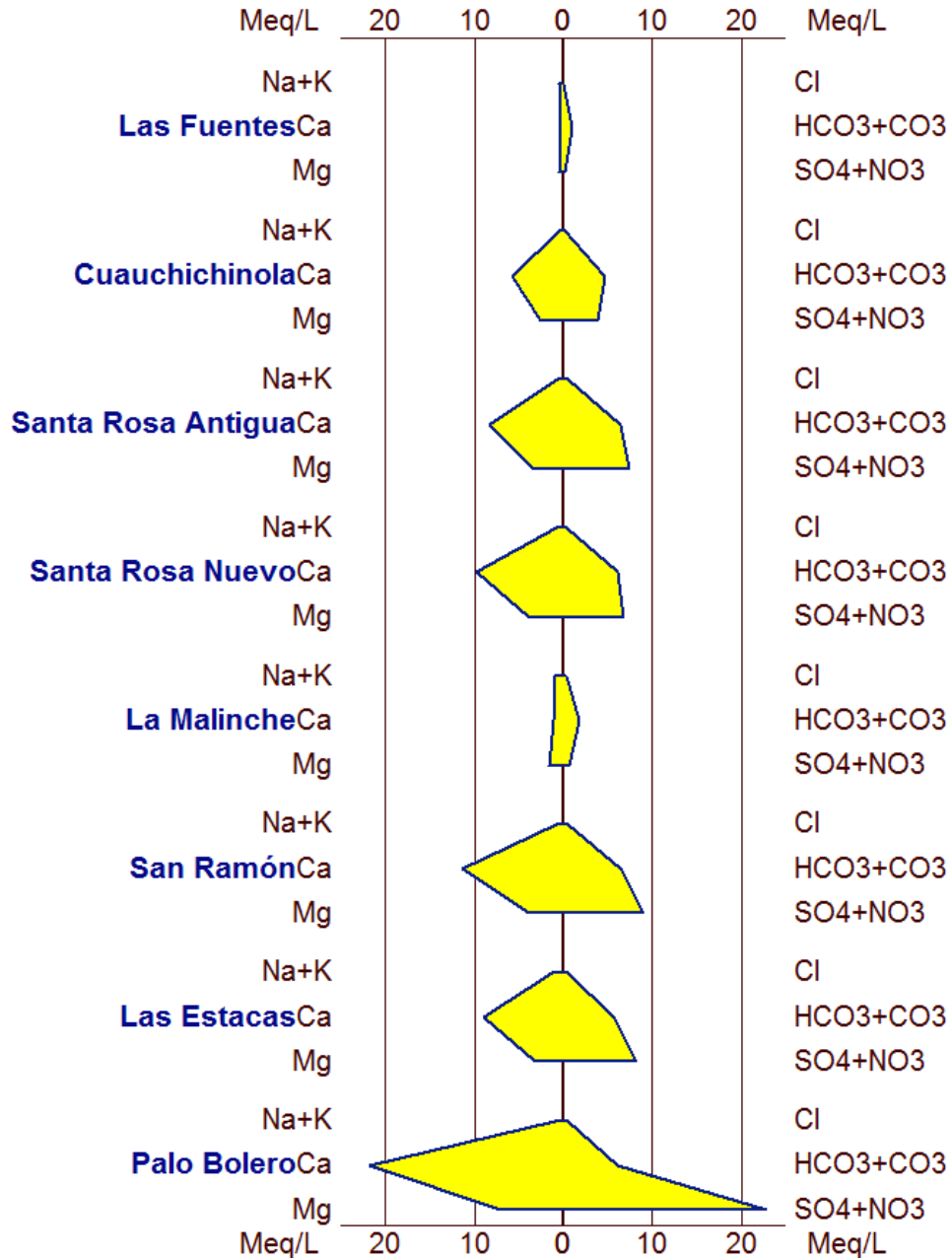
**Stiff**



**Figura 5.19 Diagrama de Stiff (que muestra los tipos de mineralización de los flujos que alimentan a los manantiales. Las aguas más mineralizadas corresponden a los manantiales Palo Bolero, Aguas Hedionda y Las Tortugas).**

## MANANTIALES DE MORELOS

**Stiff**



**Figura 5.20** Diagramas de Stiff (muestran que las aguas menos mineralizadas corresponden a los manantiales Las Fuentes, La Malinche y Cuauchichinola. En forma contraria los más mineralizadas corresponden a los manantiales Palo Bolero San Ramón y Santa Rosa).



Es importante recordar que el potencial redox proporciona una medida de la fuerza electromotriz (voltaje inducido) de una determinada agua o sea la dominancia relativa de las especies oxidadas vs reducidas en solución. El redox se mide en volts relativo al electrodo estándar de hidrógeno Eh, el cual por convención tiene potencial cero.

El  $\text{SO}_4^-$  es la forma más oxidada y estable del azufre en las aguas subterráneas bajo condiciones aeróbicas. Por lo general es el anión mayoritario presente en las aguas naturales y geoquímicamente ejerce un control primario sobre las reacciones de óxido reducción en los sistemas naturales.

La reducción del sulfato ocurre ampliamente en las aguas subterráneas, es una especie química que define el redox de la secuencia terminal de los procesos de aceptación de electrones, ocurre después de la reducción del hierro y antes de la reducción del metano. En el caso de los manantiales Las Tortugas, Palo Bolero, Santa Rosa y Agua Hedionda existen condiciones anaeróbicas por la ausencia de oxígeno disuelto (Figuras 5.21 y 5.22). El potencial redox que determina la dominancia relativa de las especies oxidadas vs reducidas en solución, está directamente relacionado con el contenido de oxígeno disuelto. Las aguas que presentan aireación presentan valores mayores  $\text{Eh} > 400$  mV, las aguas subterráneas intermedias en profundidad presentan Eh's comprendidos entre 200 y 400 mV y aguas en condiciones anaeróbicas o aguas congénitas presentan valores entre -200 y 100 mV.

El gráfico de OD Vs. Eh de la Figura 5.22 indica que los manantiales con condiciones anóxicas, donde se favorece el crecimiento bacteriano que consume el oxígeno presente en especies químicas como el  $\text{NO}_3^-$  y el  $\text{SO}_4^-$  para oxidar materia orgánica son los manantiales Agua Hedionda.

GRÁFICA d18O Vs. OD

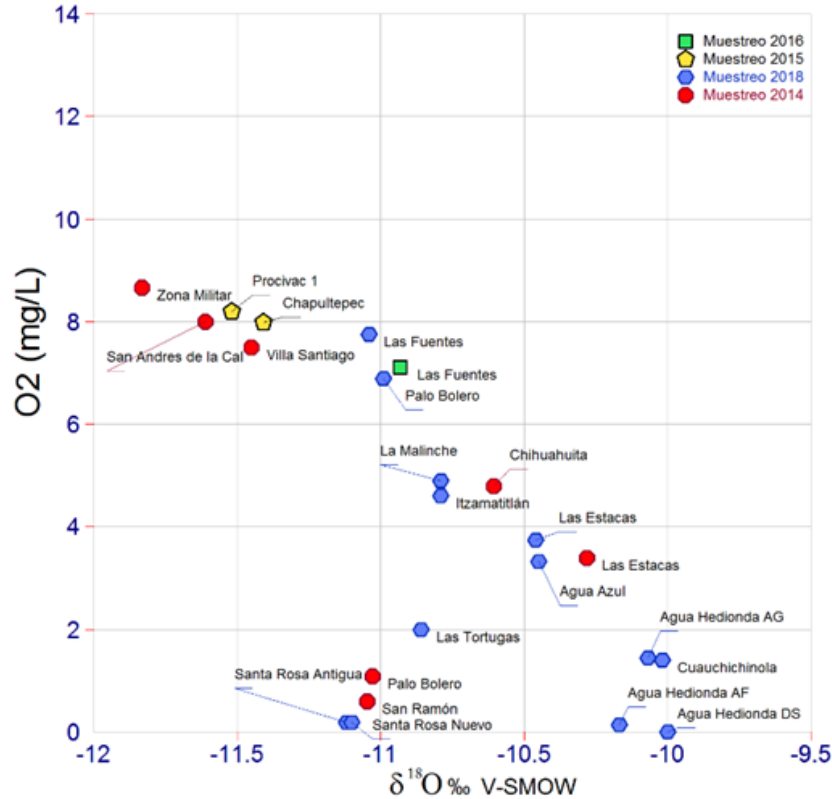


Figura 5.21 Los manantiales Santa Rosa Palo Bolero, San Ramón, Agua hedionda y Cuauchichinola presenta condiciones anaeróbicas. El contenido de oxígeno del manantial Palo Bolero 2018 es erróneo por haber sido medido en agua extraída por bombeo durante el llenado de albercas.

GRÁFICA OD Vs. Eh

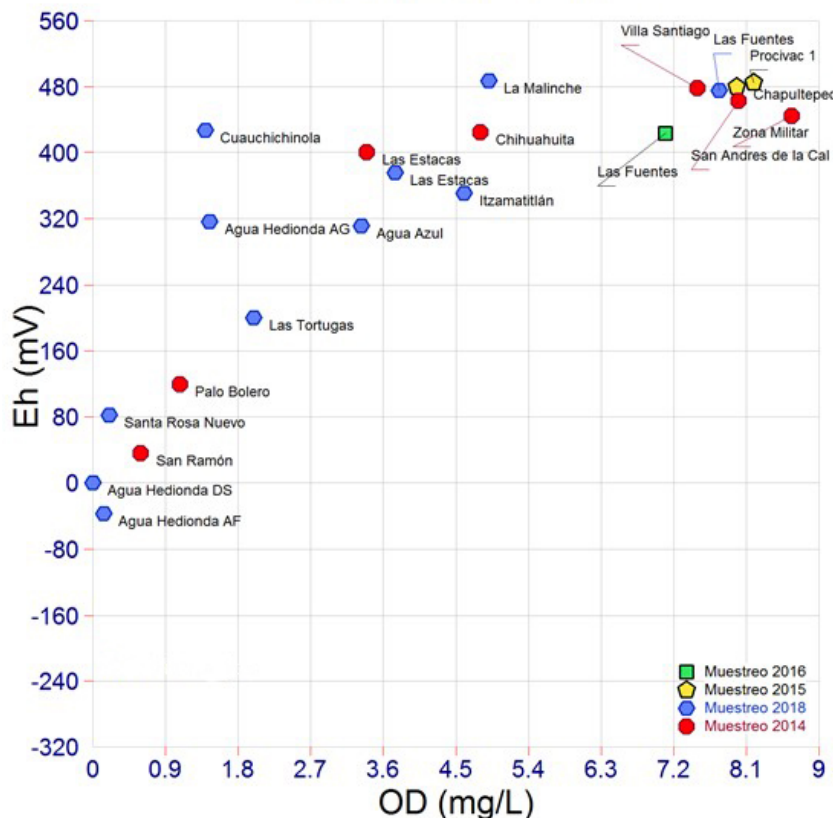
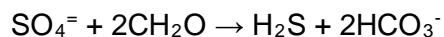


Figura 5.22 Los potenciales redox más bajos corresponden a los manantiales Santa Rosa y Agua Hedionda.

Los resultados indican que existe reducción del  $\text{SO}_4^-$ , producción de  $\text{HCO}_3^-$  (Figuras 5.12 y 5.13). Especialmente, en los manantiales Agua Hedionda hay producción de ácido sulfhídrico, debido a la biodegradación bacteriana de materia orgánica. Este tipo de proceso lo conduce bajo condiciones ambientales el grupo de bacterias especializadas prokaryotic a través de reacciones químicas en las cuales la materia orgánica es oxidada mediante la reducción del  $\text{SO}_4^-$  (Canfield 2001a, b), de acuerdo con:

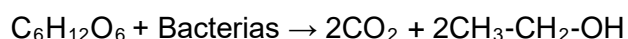


En la reacción se produce ácido sulfhídrico y bicarbonato tal como lo muestran la Figura 5.13. Este proceso geoquímico junto con cambios en las condiciones redox y en las especies químicas sensibles al potencial óxido-reducción son evidencias de la reducción de sulfato en los flujos que alimentan a los manantiales, especialmente los de Agua Hedionda. Las bacterias que ocasionan este proceso bajo condiciones anaeróbicas, obtienen energía para su desarrollo de la oxidación de materia orgánica, utilizando el sulfato como como aceptor final de electrones (Hao et al. 1996; Barton and Tomei 1995).

La reducción del sulfato se presenta acompañada de la producción de H<sub>2</sub>S, el cual tiene olor característico a huevos podridos. En el sistema existe también, disolución de minerales que contienen azufre como el yeso lo muestra la Figura 5.14, la cual indica el incremento de SO<sub>4</sub><sup>=</sup> y Ca<sup>++</sup> en los flujos que alimentan a los manantiales.

El comportamiento de especies químicas sensibles a la dominancia redox, así como de las concentraciones del SO<sub>4</sub><sup>=</sup> proporciona evidencia de la reducción del sulfato.

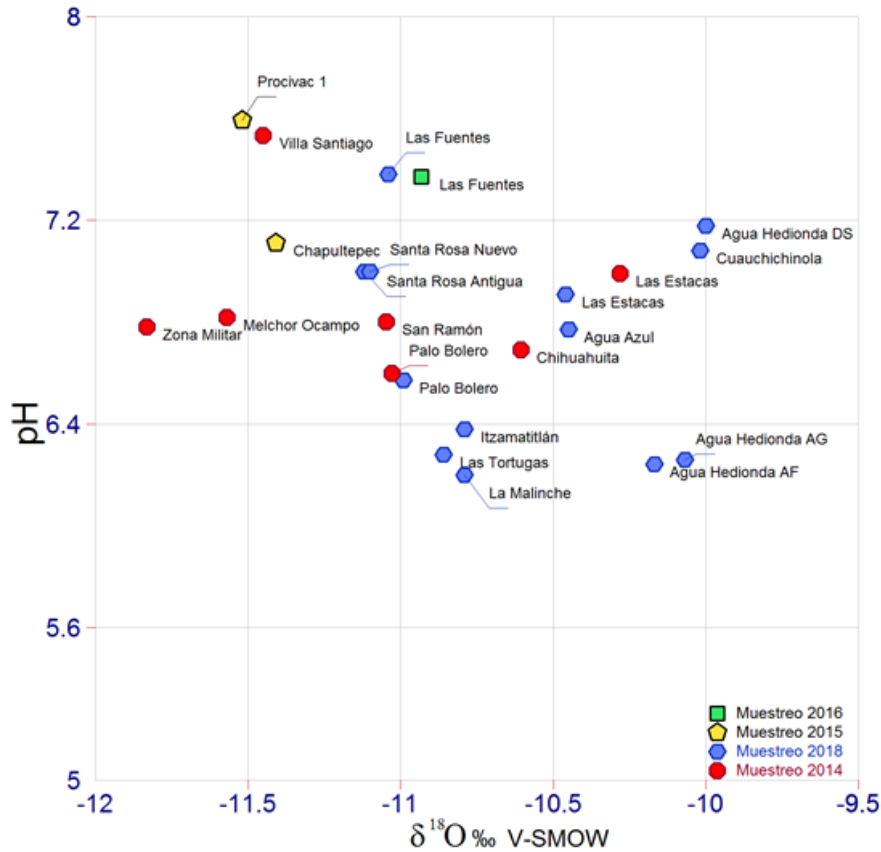
La mayoría de la materia orgánica que contamina el agua procede de desechos de alimentos, de aguas negras domésticas, y de industrias. Se descompone por bacterias, protozoarios y diversos organismos mayores. En el caso de algunos manantiales como Agua Hedionda, la descomposición de la materia orgánica es de tipo anaeróbica es decir en escasos o ausencia de oxígeno:



La producción de CO<sub>2</sub> es evidente en el caso del manantial Agua Hedionda ya que al reaccionar con el agua forma ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), el cual reduce el pH a valores por debajo de 7 (Figura 5.23).

La composición isotópica estable de las descargas de los manantiales también evidencian los procesos de reducción bacteriana del sulfato. Específicamente el compuesto padre se enriquece isotópicamente en el isótopo pesado y se empobrece en el isótopo ligero durante la biotransformación bacteriana. Durante el proceso de oxidación de materia orgánica las bacterias consumen preferentemente el <sup>16</sup>O durante la reducción del (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) enriqueciendo el producto (SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) en <sup>18</sup>O, el cual al intercambiarse rápidamente con el agua subterránea alcanza un equilibrio isotópico. Como resultado, el agua subterránea se enriquece en <sup>18</sup>O (Figura 5.9) (Betts and Voss, 1970; Fritz, Drimmie and Qureshi, 1989).

GRAFICA d18O Vs. pH



**Figura 5.23** Los manantiales Itzamatitlán Las Tortugas La Malinche y Agua Hedionda presentan valores de pH ligeramente ácidos por la producción de CO<sub>2</sub> por acción bacteriana de reducción del SO<sub>4</sub>=.

Los contenidos de tritio (<sup>3</sup>H) ambiental medidos en unidades de tritio (UT) y de radiocarbono, medido en porcentaje de carbono moderno (PCM) de los manantiales considerados en el presente estudio (Anexos 3 y 4), están comprendidos en el rango de 0.8 UT (manantiales: Cuauchichinola, Itzamatitlan y La Malinche), hasta valores de 3.78 UT (manantial Las Fuentes), indicando que su recarga es de precipitación reciente. El valor de 0.6 UT es el límite del contenido de tritio ambiental del método de medición utilizado por enriquecimiento electrolítico.

Mediciones del contenido de tritio ambiental en lluvia realizadas en la red de monitoreo isotópico de la precipitación pluvial de la zona estudiada, muestran que los contenidos de tritio son de 3.8 UT. Ello implica que el tiempo que tarda el agua desde el momento que se infiltra en la zona de recarga hasta que fluye en el manantial Las Fuentes, es de uno o dos años. En el caso de los manantiales Cuauchichinola (0.89 UT), Itzamatitlán (0.87 UT),



Chihuahuita (1.44 UT) y La Malinche (2.17 UT), los tiempos de residencia son mayores, comprendidos en el rango de una a dos décadas.

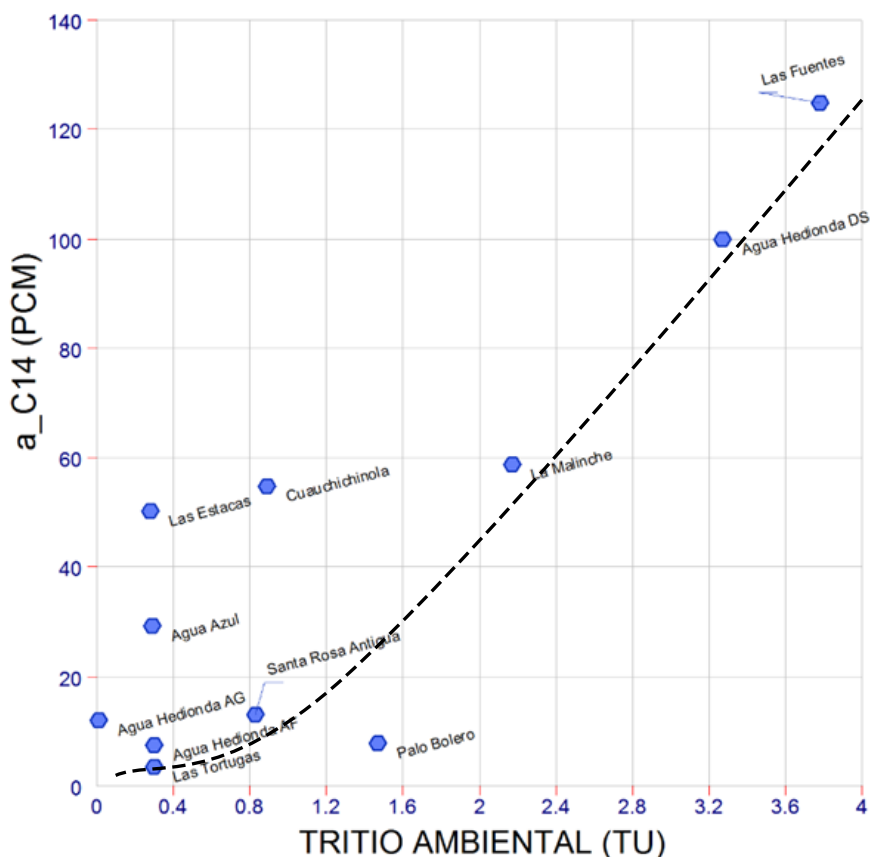
El agua de la descarga denominada Agua Hedionda DS (Descarga Salida) (3.27 UT), corresponde a una mezcla de escurrimientos de drenaje local y agua del flujo que alimenta a los manantiales Agua Hedionda AG (Alberca Grande) y Agua Hedionda AF (Alberca Familiar), estando además en contacto con la atmósfera, hecho que altera sus contenidos de tritio y de carbono-14 (Anexo 3).

En el caso del manantial Palo Bolero, el contenido de tritio que presenta (1.47 UT), indica que está recibiendo agua de recarga reciente y no es consistente con el contenido de radiocarbono (7.80 PCM). Ello se debe probablemente, a que por la afectación que sufrió el manantial por el sismo de septiembre de 2017, el sitio de obtención de la muestra es un afloramiento adjunto al manantial original, en el que se extrae el agua por bombeo y se vierte a las albercas del balneario. En las maniobras de extracción y llenado de albercas se vertía agua en las proximidades del afloramiento. Probablemente se generaron filtraciones o escurrimientos hacia el manantial que alteraron el contenido ambiental del agua subterránea.

Los resultados de tritio de los manantiales: Las Fuentes (3.78 UT), Cuauchichinola (0.89 UT), Itzamatitlán (0.87 UT), Chihuahuita (1.44 UT) y La Malinche (2.17 UT) son consistentes con los porcentajes de radiocarbono. Los cuales van del 127 a 50 PCM indicando edades aparentes de carbono 14 de aguas de recarga reciente, hasta flujos con tiempos de residencia del orden de cinco mil años.

Los manantiales donde hay ausencia total de tritio ambiental, los flujos que los recargan tienen tiempos de residencia de más de cuarenta años (Figura 5.24). Estos manantiales presentan contenidos de radiocarbono de 50.3 a 3.50 PCM. Las edades aparentes de radio carbono estimadas para estos manantiales van de 5,520 hasta 26,910 años. Estas edades aparentes están influenciadas por el ciclo del carbono que se verifica en el ambiente subterráneo, el cual tiene una naturaleza muy compleja en la química de las especies carbonatadas presentes en el ambiente subterráneo, especialmente en las rocas calizas.

GRÁFICA TRITIO Vs. C-14



**Figura 5.24** Comportamiento de los contenidos de tritio y carbono-14 en las muestras de los manantiales. El límite de medición de tritio ambiental es de 0.6 UT por el método de enriquecimiento electrolítico utilizado.

### 5.4.3 Calidad de los manantiales para riego

Debido a la creciente demanda de agua para riego, se ha optado por la utilización de agua de diversa procedencia, no solamente las aguas superficiales y subterráneas, sino también en algunos casos la reutilización de aguas residuales. Por ello, la efectividad de la irrigación depende de la calidad del agua de riego. Con la finalidad de establecer la calidad agronómica de las aguas de los manantiales analizados, en el presente informe se han aplicado diagramas químicos para determinar los riesgos de salinidad y sodicidad que podrían causar daños directos sobre los cultivos (Ayers, R.S. y Westcot, D.W., 1985).

Los constituyentes salinos son principalmente cationes de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^{++}$  y  $\text{K}^{+}$ ; entre los aniones más frecuentes figuran los  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , y  $\text{F}^-$ . La mayoría proceden de la disolución y alteración de rocas calizas, yesos, margas y arcillas. Estos constituyentes

químicos, aun cuando presenten concentraciones bajas, pueden producir daños directos sobre los cultivos, convirtiendo al riego en fuente de sales y en la causa de salinización del suelo.

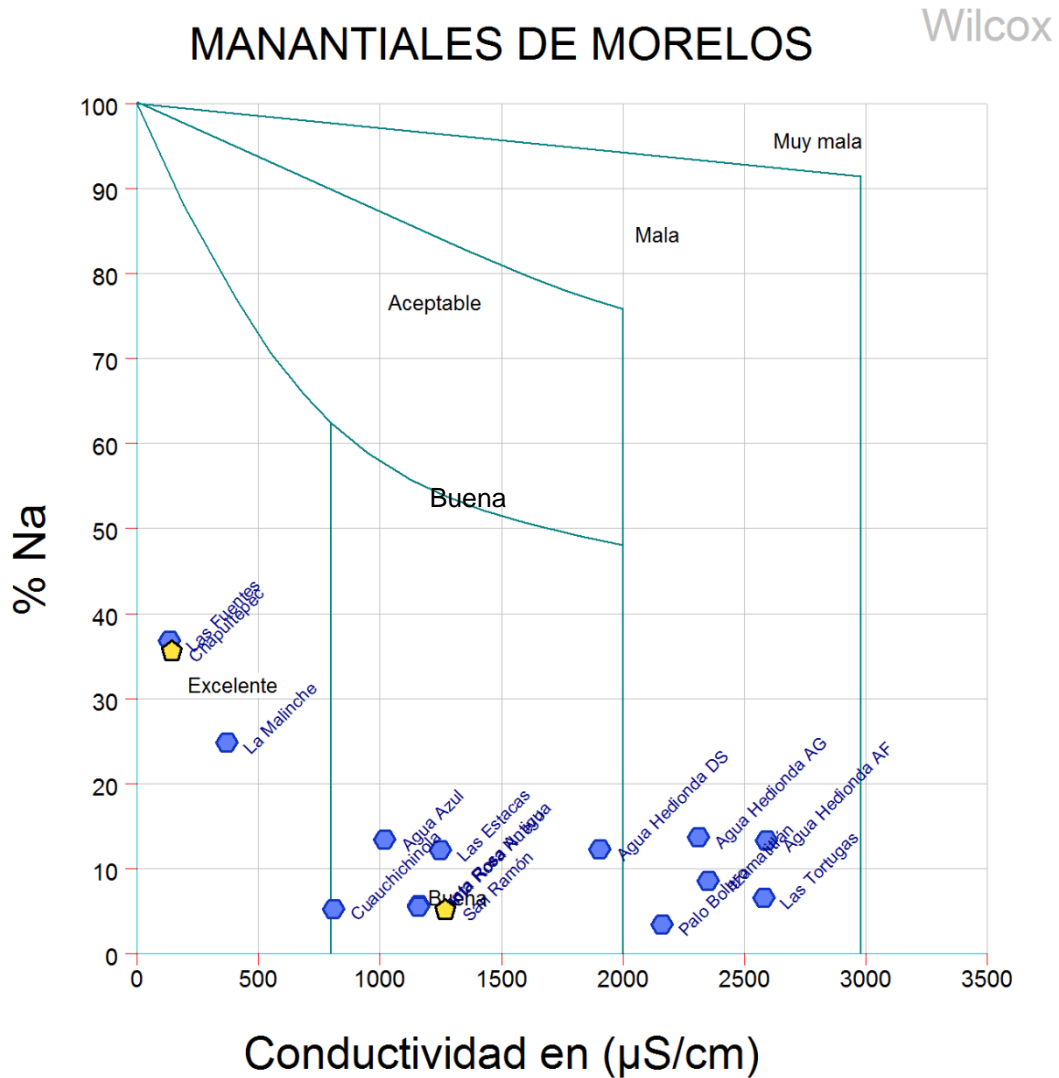
El diagrama de clasificación de Wilcox expresa la salinidad del agua como Conductividad Eléctrica (CE) a 25°C y en unidades de  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y mantiene para la alcalinidad el criterio de porcentaje de  $\text{Na}^+$  (Figura 5.25). El diagrama indica que las aguas de los manantiales cubren diferentes calidades, desde excelente (manantiales Las fuentes y La Malinche) hasta mala. Destaca el agua de los manantiales Agua Hedionda, Palo Bolero y Las Tortugas, la cual se califica como mala para la irrigación.

Otro factor importante del agua de riego es el riesgo de alcalinización o sodificación que va asociado con los problemas de infiltración del agua en el suelo. El elevado contenido de sodio genera progresivamente la disminución de la permeabilidad de suelo de cultivo, ocasionando la reducción de agua a la planta. En el caso de la salinidad lo que disminuye es la disponibilidad misma del agua, mientras que en el caso de la sodicidad lo que se produce es una reducción total del agua infiltrada en la zona radicular.

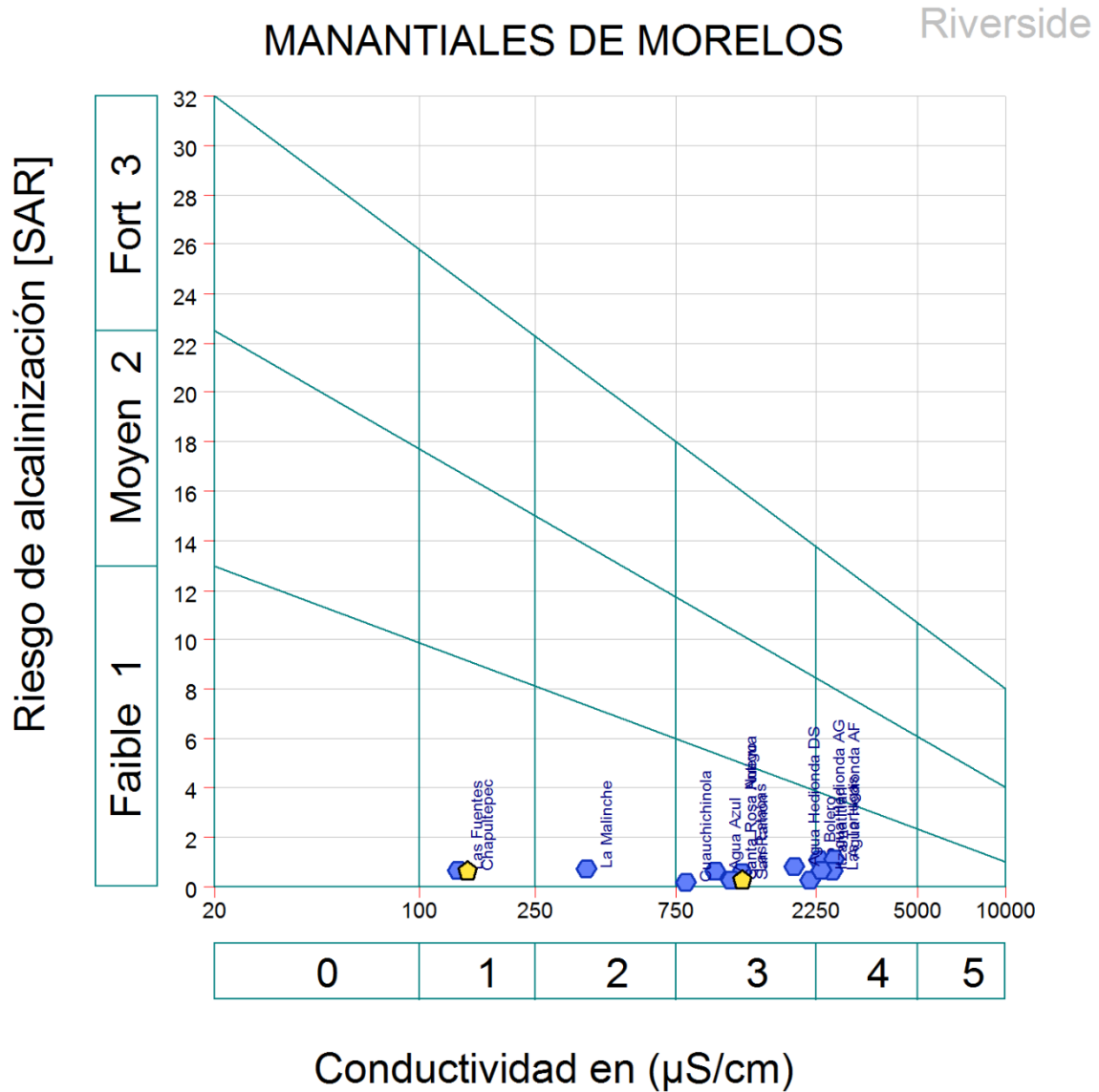
El riesgo de sodicidad se establece mediante el diagrama de la (Figura 5.26). En las abscisas se representa en escala logarítmica los valores de la C.E. en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 25 °C, y en las ordenadas se introduce el índice SAR (razón de adsorción del sodio, SAR por sus siglas en inglés), cuya expresión es del tipo:

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}}$$

Expresando cada uno de los parámetros en unidades de meq/l.



**Figura 5.25** Gráfico de %Na vs. Conductividad eléctrica. Las aguas de los manantiales presentan diferentes calidades aptas para irrigación. Los manantiales Agua Hedionda, Palo Bolero y Las Tortugas califican como mala para la agricultura.



**Figura 5.26** Riesgo de alcalinización o sodificación del suelo. El contenido de sodio cuando es elevado genera progresivamente la disminución de la permeabilidad del suelo de cultivo.



## **6 AFORO DE LAS DESCARGAS DE MANANTIALES**

### **6.1 Antecedentes**

Derivado del sismo del 19 de septiembre de 2017, varios manantiales del estado de Morelos sufrieron diversas afectaciones, principalmente en sus volúmenes de descarga. Los manantiales "Agua Hedionda" y "San Ramón" fueron los más afectados ya que su caudal se redujo considerablemente, mientras que los manantiales "Palo Bolero" y "Apotla" presentaron afectaciones parciales. En contraste, se reportó un aumento en el volumen de descarga del manantial en Oaxtepec, mientras que el manantial "Las Huertas" se observó un cambio de coloración. Derivado de lo anterior, existe la necesidad de realizar un diagnóstico de varios de los manantiales ubicados en el estado de Morelos y revisar la información histórica con el fin de atender la emergencia. Por lo anterior, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua presentó a consideración de la Comisión Estatal del Agua del Estado de Morelos el presente proyecto, el cual se encuentra alineado al Objetivo 3. "Fortalecer el abastecimiento de agua y el acceso a los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento" y al Objetivo 5 "Asegurar el agua para el riego agrícola, energía, industria, turismo y otras actividades económicas y financieras de manera sustentable" del Programa Nacional Hídrico 2014-2018

### **6.2 Metodología**

Para la determinación del gasto o flujo en los manantiales en estudio, se realizó una visita a cada uno de los sitios sujetos del proyecto con la finalidad de determinar la técnica o método de aforo más adecuado para cada uno de ellos. La metodología para la aplicación y selección de las diversas técnicas de medición, se puede consultar en el Anexo 5.

### **6.3 Resultados**

#### **6.3.1 Manantial "Agua Hedionda" (Alberca principal)**

El manantial principal "Agua Hedionda" se encuentra dentro del balneario del mismo nombre, ubicado en el municipio de Cuautla, Morelos.

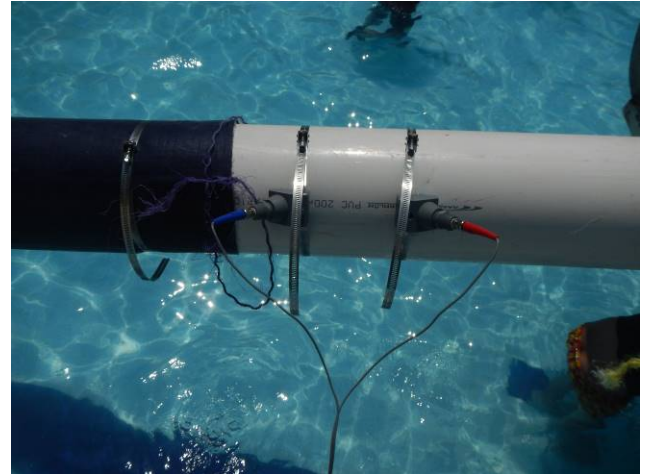
El balneario cuenta con dos albercas (una de 80x20 m y otra de 50x20 m aproximadamente) y son alimentadas por el manantial principal.

El uso preferente del manantial principal es el recreativo, sin embargo, también contribuye al caudal que va hacia el canal de Tenango que riega aproximadamente 2,600 hectáreas de cultivo.

Los aforos se realizaron de marzo a julio, en la descarga del manantial principal de "Agua Hedionda" (Figuras 6.1, 6.2 y 6.3).

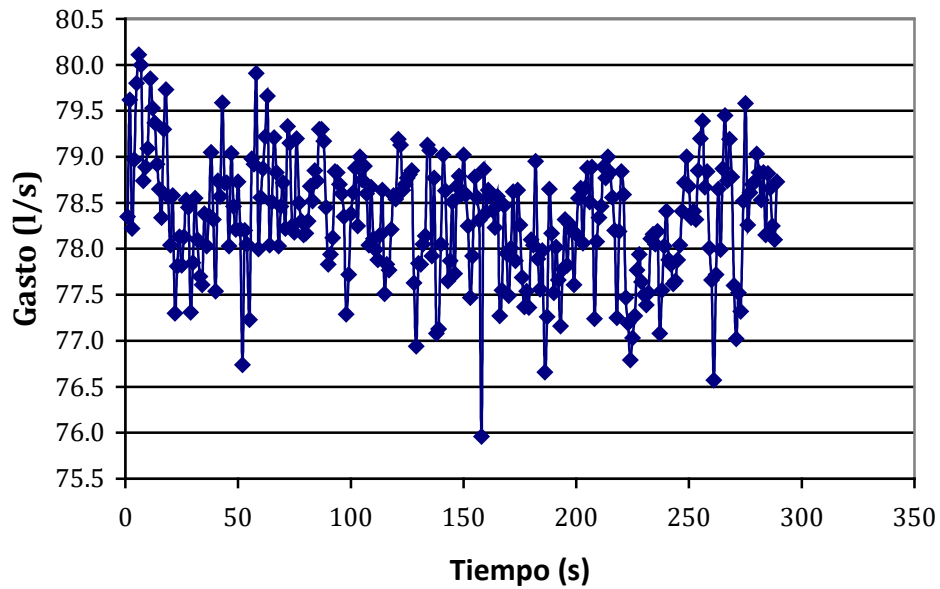


a) Salida del manantial principal "Agua Hedionda" mediante bombeo.

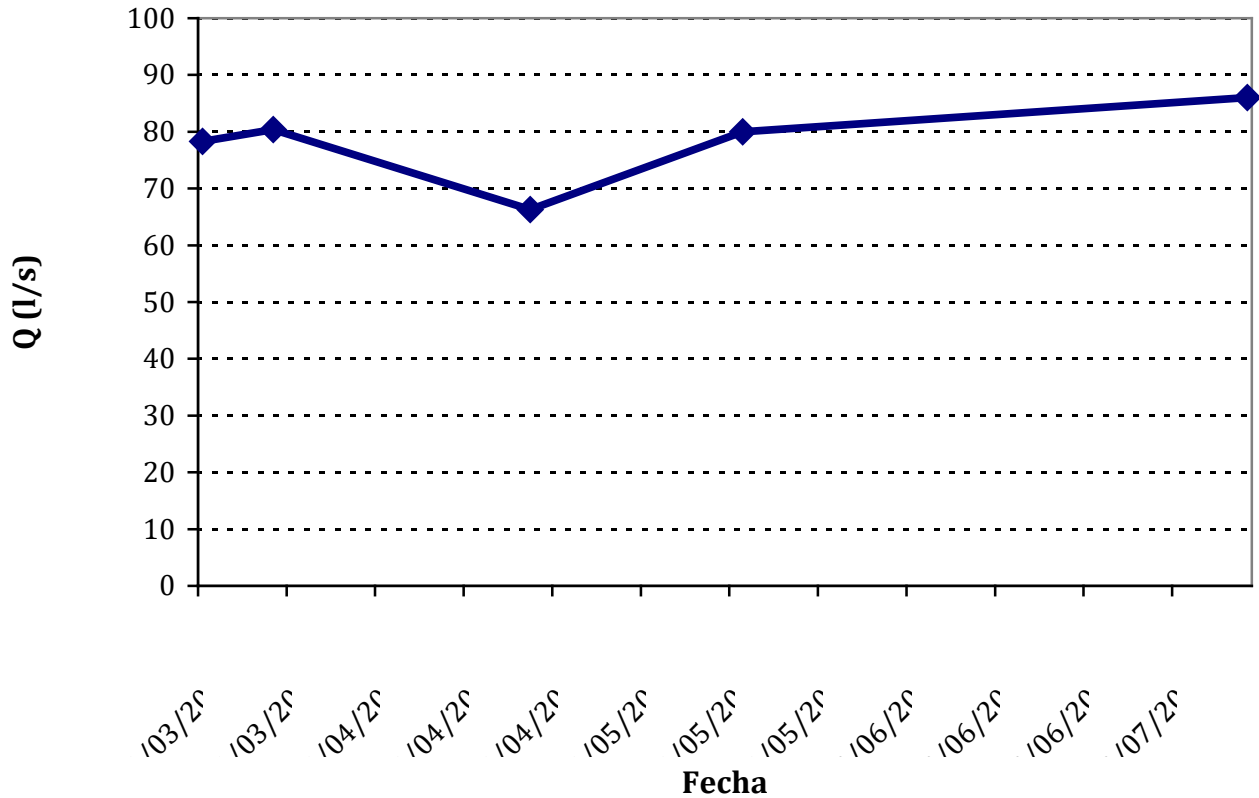


b) Colocación de transductores para la realización del aforo

**Figura 6.1 Aforo del manantial principal "Agua Hedionda".**



**Figura 6.2 Comportamiento de aforo en el manantial principal "Agua Hedionda"**



**Figura 6.3 Gráfico de aforos del manantial principal “Agua Hedionda”**

### 6.3.2 Manantial “Agua Hedionda” (albercas familiares)

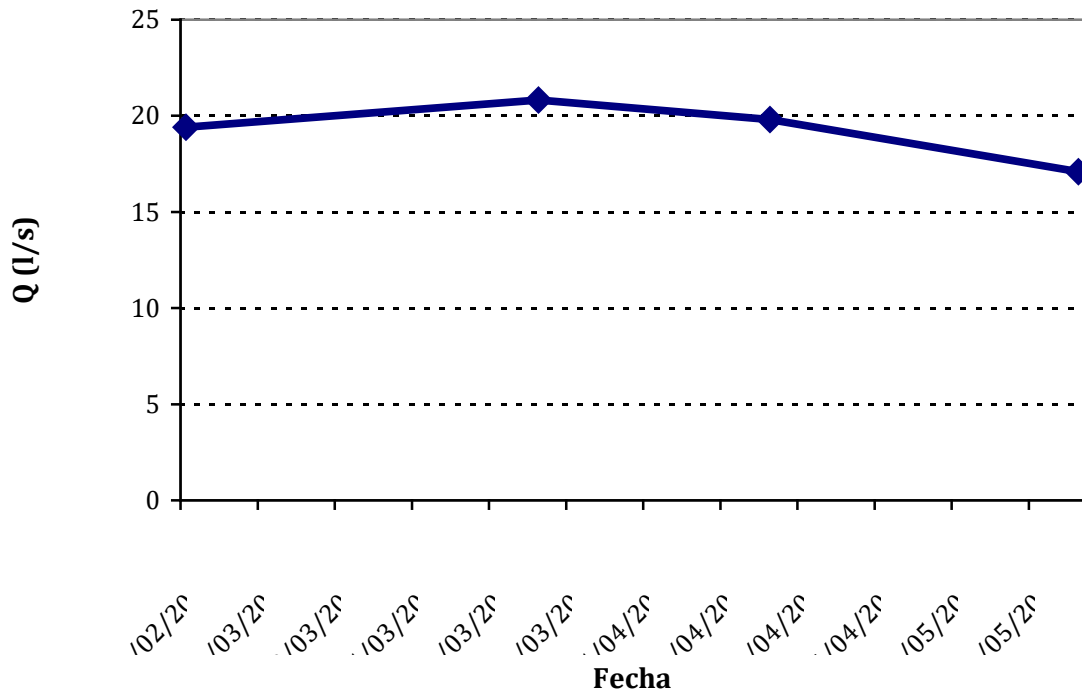
El manantial “Agua Hedionda” denominado como albercas familiares es parte del balneario del mismo nombre, ubicado en el municipio de Cuautla, Morelos, sin embargo, este manantial se encuentra en otra sección del balneario en las coordenadas 18°48'59.6"N 98°55'52.7"O.

Este manantial alimenta ocho albercas privadas o familiares, el uso preferente del manantial es el recreativo, sin embargo, al igual que el manantial principal “Agua Hedionda”, este también contribuye al caudal que va hacia el canal de Tenango que riega áreas de cultivo.

Los aforos se realizaron en las descargas de cada una de las ocho albercas familiares para después integrar los resultados y estimar el aforo total del manantial (Figuras 6.4 y 6.5).



**Figura 6.4** Aforo del manantial “Agua Hedionda” en la descarga de una de las albercas familiares



**Figura 6.5** Aforos del manantial “Agua Hedionda” albercas familiares durante la campaña de medición



### 6.3.3 Manantial “La Malinche”

El manantial “La Malinche” descarga dentro de las instalaciones del Centro Vacacional Oaxtepec en el municipio de Yautepec, Morelos en las coordenadas 18°53'53.30"N, 98°58'8.70"O.

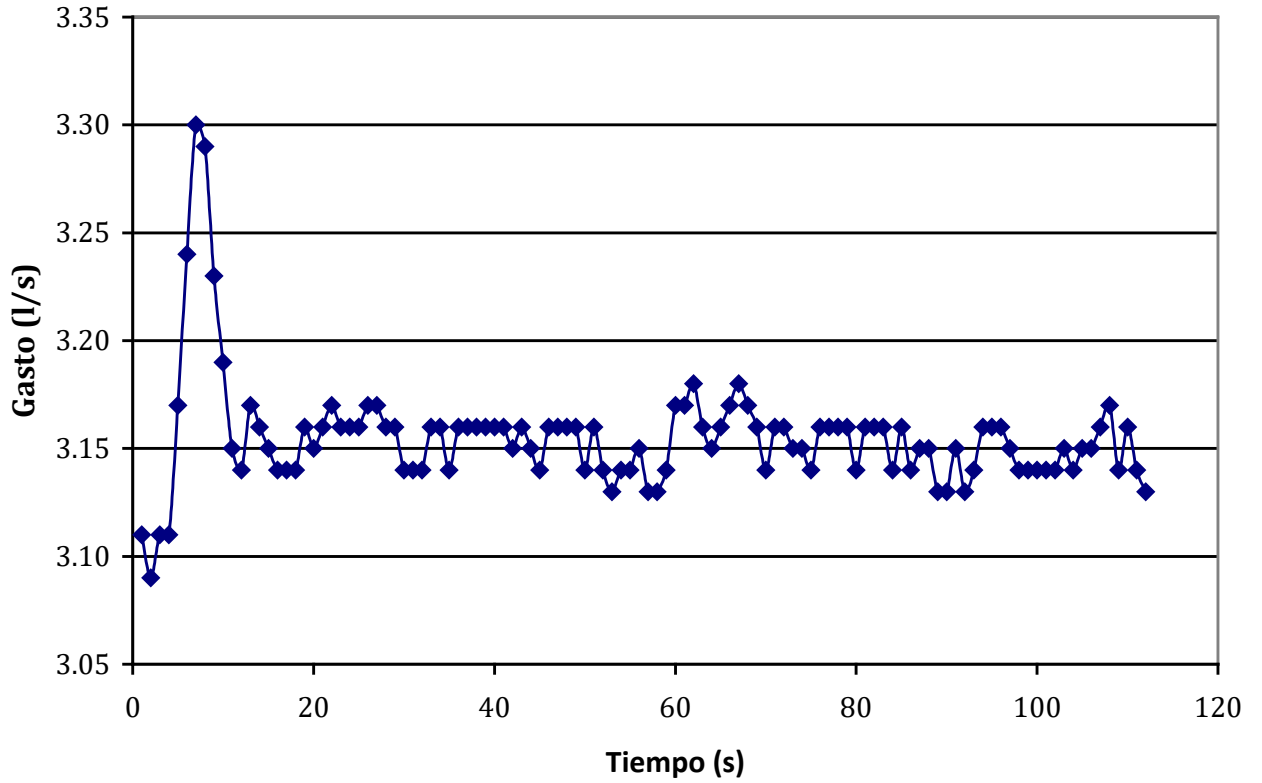
El agua ocurre en tres descargas que son conducidas por medio de una tubería a la colonia Alejandra de Cocoyoc en el municipio de Yautepec, Morelos. Por lo que se decidió, junto con las autoridades del agua de la misma colonia, que el punto de medición del gasto fuera en la tubería antes de llegar al tanque de almacenamiento del sistema de agua en las coordenadas 18°53'31.72"N, 98°58'33.43"O.

El agua se utiliza exclusivamente para el abastecimiento de la población de la Colonia Alejandra de Cocoyoc. En las figuras 6.6, 6.7 y 6.8 se muestran los aforos y comportamiento del caudal realizados en el manantial “La Malinche”.

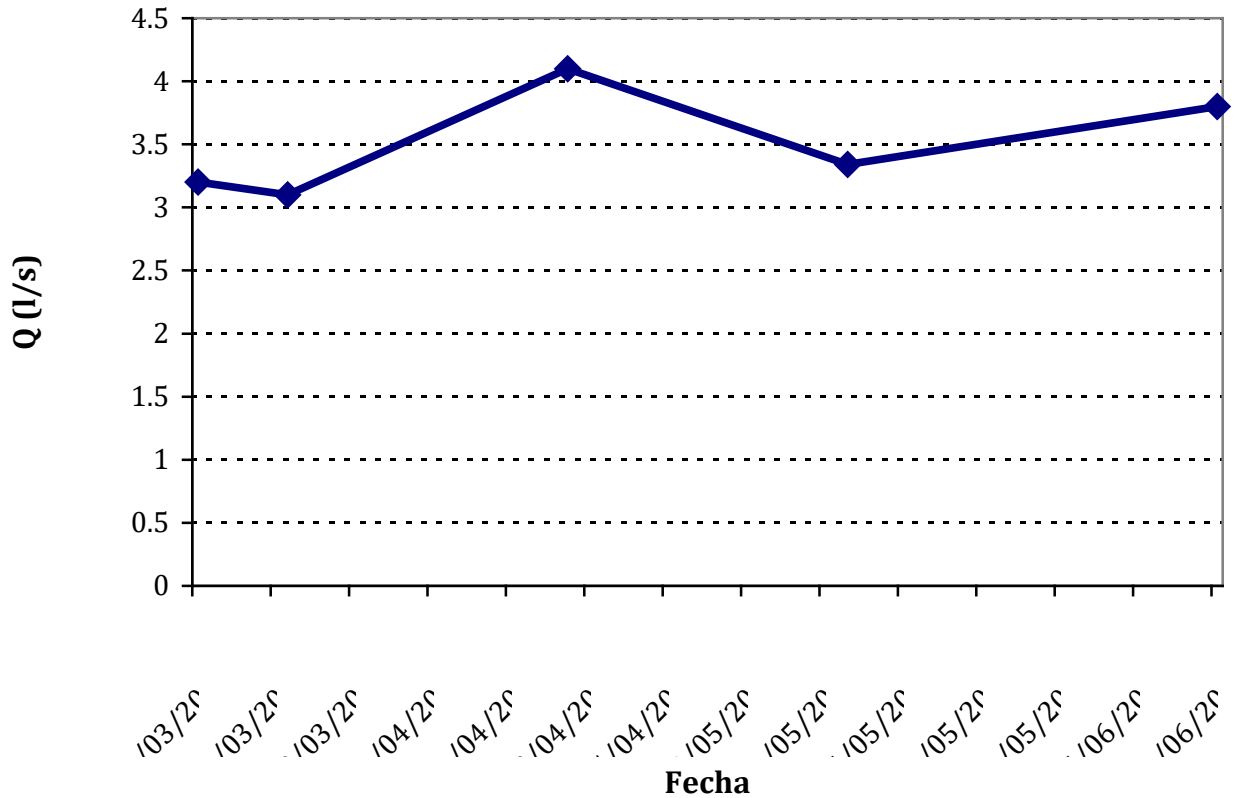


Figura 6.6 Aforo del manantial “La Malinche”.





**Figura 6.7** Comportamiento del aforo del manantial “La Malinche”.

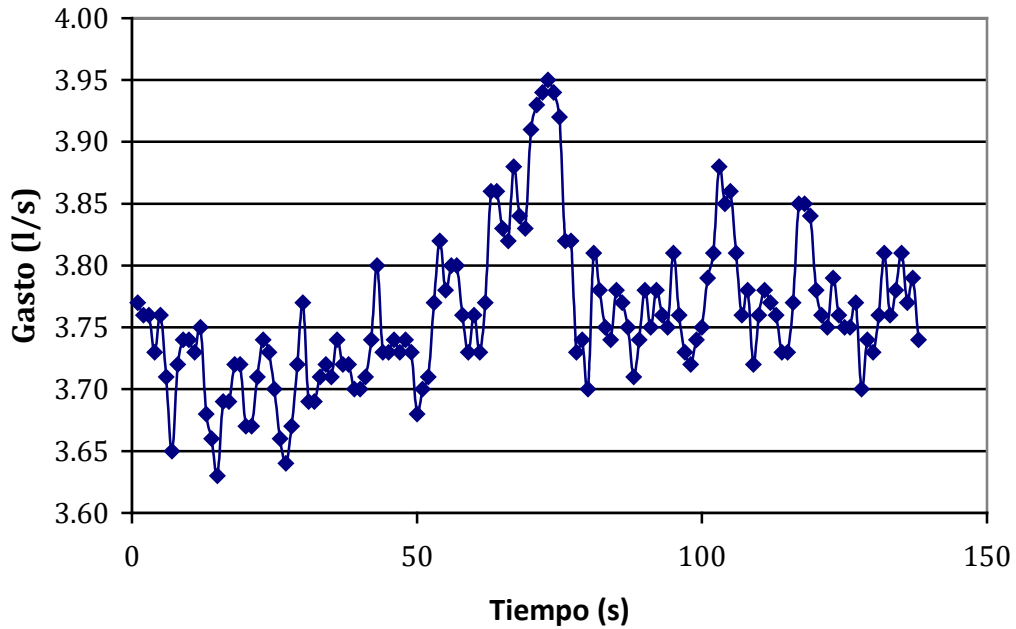


**Figura 6.8 Aforos del manantial “La Malinche” durante la campaña de medición**

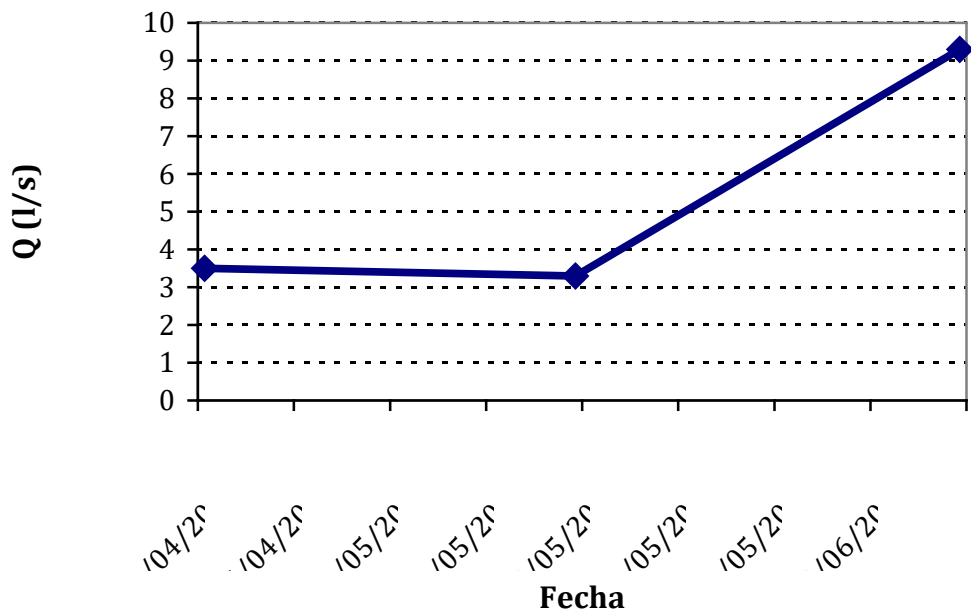
### 6.3.4 Manantial “Palo Bolero”

El manantial “Palo Bolero” se localiza en el balneario con el mismo nombre en el municipio de Xochitepec, Morelos en las coordenadas 18°45'59.49"N, 99°14'18.90"O.

Inicialmente, el balneario era abastecido por dos manantiales, sin embargo, después del sismo del 19 de septiembre de 2017 uno de los dos manantiales dejó de producir agua. El uso principal del agua de este manantial es para el abastecimiento del mismo balneario y la descarga del mismo es hacia el río Cuentepec. Las figuras 6.9 y 6.10 muestran los aforos realizados al manantial “Palo Bolero”.



**Figura 6.9** Comportamiento del aforo del manantial “Palo Bolero”.



**Figura 6.10** Aforos del manantial “Palo Bolero” durante la campaña de medición.

La variación en el gasto se debió principalmente a que los aforos realizados el 18 de abril y 15 de mayo del 2018 fueron realizados con un equipo de bombeo del propio balneario, el cual tenía poco mantenimiento además de que era demasiado viejo, por lo que, a pesar de tener una potencia nominal de 15 HP, en realidad la potencia suministrada era mucho menor. A partir del mes de junio de 2018 se instaló un equipo de bombeo nuevo también de 15 HP, pero este dio un mayor rendimiento, por lo que se pudieron aforar hasta más de 9 l/s (aforo realizado el 12 de junio de 2018) manteniendo el espejo de agua constante durante el monitoreo.

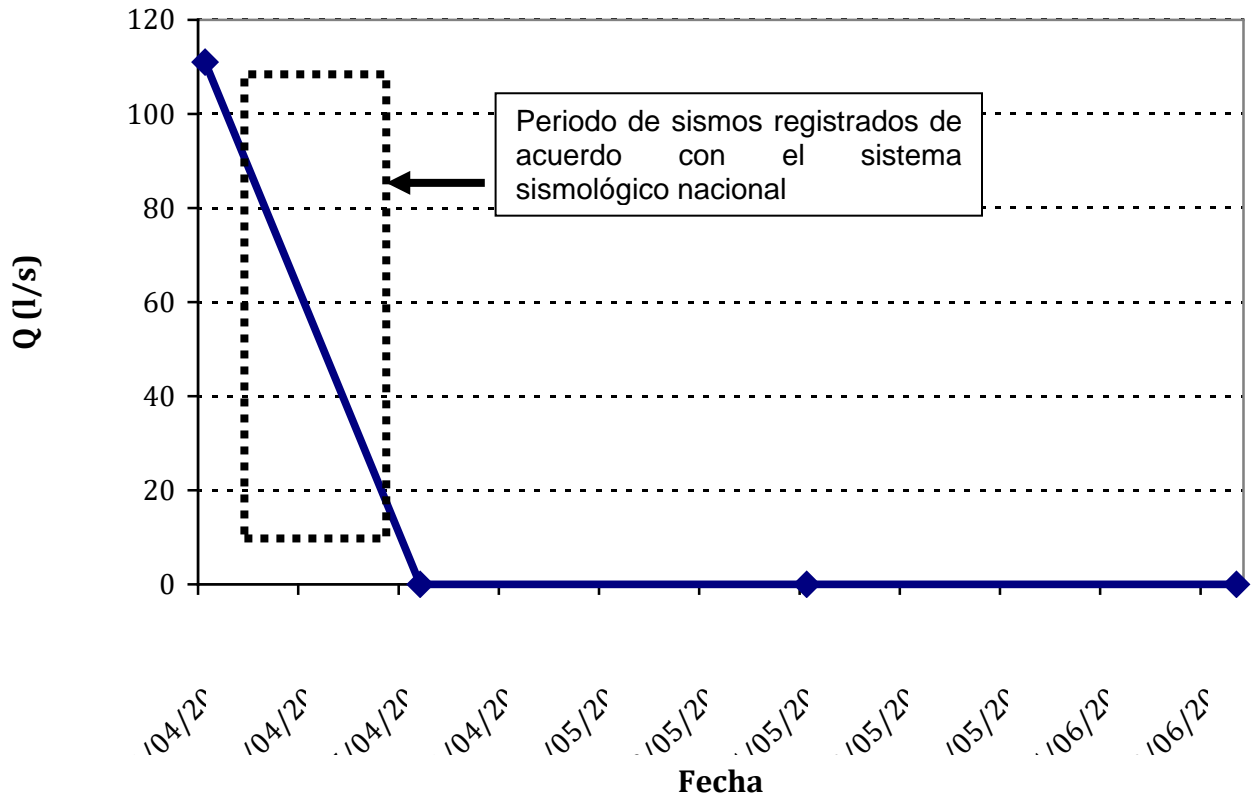
### 6.3.5 Manantial “Cuauchichinola”

El manantial “Los Ojos de agua” está situado en la localidad de Cuauchichinola, municipio de Mazatepec, Morelos, cuyas aguas se utilizaban para suministrar agua tanto al balneario “Paraíso escondido” como para riego de campos agrícolas en Puente de Ixtla.

El manantial de Cuauchichinola cuenta con estructuras metálicas que soportan tres bombas verticales que podían extraer 100 l/s cada una, antes de desaparecer el manantial. El equipo de bombeo descargaba a una pila la cual conducía el agua hacia un canal de concreto para finalmente trasportar el agua a los campos agrícolas. Las figuras 6.11 y 6.12 muestran los aforos realizados al manantial de Cuauchichinola.



**Figura 6.11 Aforo del manantial “Cuauchichinola”.**



**Figura 6.12 Aforos del manantial “Cuauchichinola” durante la campaña de medición**

Durante el periodo del 03 al 17 de abril del 2018 se registraron varios sismos lo que ocasiono que el flujo de agua dentro del manantial fuera disminuyendo hasta quedar completamente seco. Al principio todavía se podía bombear con bombas pequeñas y mangueras flexibles ya que era imposible por las bombas fijas debido a que el nivel del espejo de agua era inferior al de las pichanchas. Finalmente, se retiraron las bombas móviles ante la imposibilidad de extraer líquido del manantial.

### 6.3.6 Manantial “Las Fuentes”

El manantial denominado como las Fuentes se ubica dentro del balneario ejidal “Las Fuentes” en la localidad de Jiutepec, Morelos.

El manantial, alimenta al balneario a través de canales y válvulas que comunican las diferentes albercas que derivan el agua por gravedad a diferentes niveles. Por otro lado,



dentro del mismo balneario se encuentra un área de bombeo por la que se extrae agua hacia una batería de camiones tipo cisterna para venta de agua para uso y consumo humano. De manera simultánea el manantial tiene conectadas una serie de tuberías con las que se realizan una serie de derivaciones para el abastecimiento de agua para uso y consumo humano para diferentes localidades y colonias de los municipios como Zapata y Temixco, entre otros.

El exceso de agua del manantial pasa a través de unas estructuras reguladoras que se encuentran en pésimas condiciones (compuertas deformadas y sin capacidad de sellado) para finalmente ser descargado a un canal que se ubica a un lado del balneario. Las figuras 6.13, 6.14 y 6.15 muestran los aforos realizados al manantial “Las Fuentes”.



**Figura 6.13 Aforo del manantial “Las Fuentes”.**

### Manantial “Las Fuentes”

Ancho del canal (m): 1.483.

Área hidráulica (m<sup>2</sup>): 0.693.

Velocidad media (m/s): 2.015.

Gasto total (m<sup>3</sup>/s): 0.590.

Profundidad máxima medida (m): 1.219.

Velocidad máxima medida (m/s): 1.051

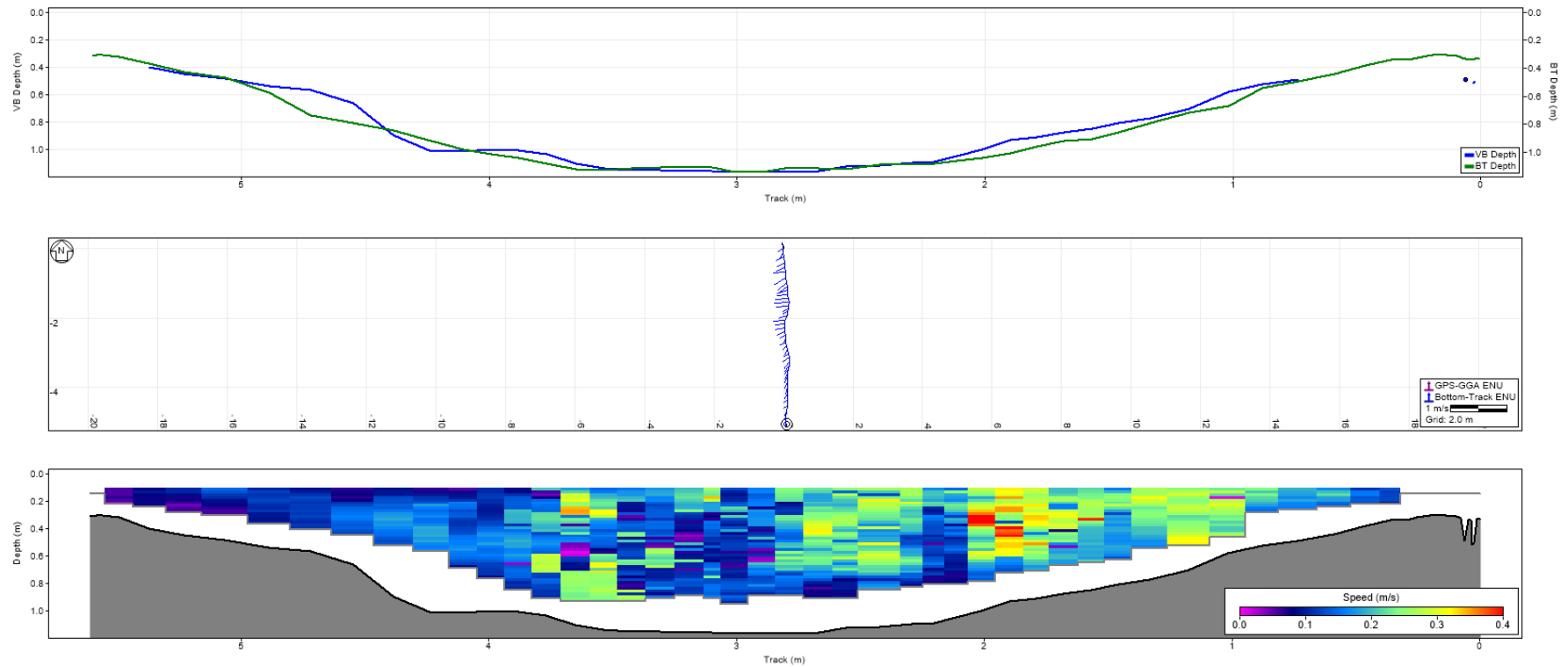
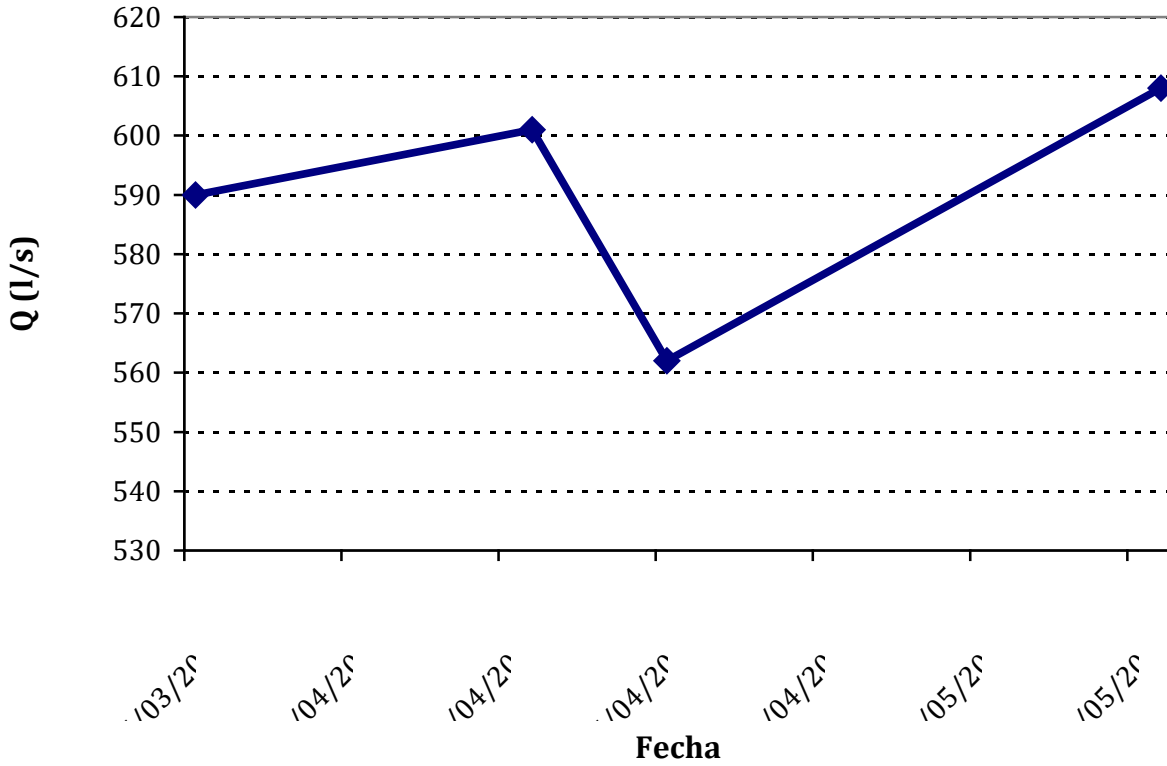


Figura 6.14 Aforo del manantial “Las Fuentes”.



**Figura 6.15 Aforos del manantial “Las Fuentes” durante la campaña de medición.**

La variación en el gasto se debió a que existen dos extracciones de agua del manantial de las cuales no se tiene control, por un lado, la extracción de agua por medio de pipas tipo cisterna de las cuales no se lleva ni un registro en cuanto al número de pipas ni al volumen de agua que estas extraen diariamente. Por otro lado, existe una red de tuberías conectadas al manantial principal de las cuales tampoco se tiene ni el número ni el diámetro de las mismas, y muchos menos se tiene contabilizada la cantidad de agua que se extrae del manantial por este medio. De ahí las variaciones significativas de los aforos de este manantial.

### 6.3.7 Manantial “Santa Rosa”

El manantial “Santa Rosa” se localiza dentro de una propiedad privada en la localidad de Chiconcuac, municipio de Xochitepec, Morelos. Al no obtener autorización por parte del propietario de dicha propiedad, se decidió realizar el aforo en la calle paralela al manantial, ya que, por debajo de esta calle, pasa el canal que conduce la mayor parte del caudal del manantial. Cabe destacar que las autoridades del municipio de Xochitepec, Mor. al realizar labores de mantenimiento, abrieron la calle dejando al descubierto el canal, por lo que se aprovechó el momento para realizar los aforos correspondientes. El punto de aforo, está ubicado en las siguientes coordenadas 18°47'6.63"N, 99°12'9.54"O. Las figuras 6.16, 6.17 y 6.18 muestran el aforo realizado al manantial “Santa Rosa”.



**Figura 6.16 Aforo del manantial “Santa Rosa”.**



### Manantial “Santa Rosa”

Ancho del canal (m): 1.545.

Área hidráulica (m<sup>2</sup>): 0.594.

Velocidad media (m/s): 0.590.

Gasto total (m<sup>3</sup>/s): 0.276.

Profundidad máxima medida (m): 0.592

Velocidad máxima medida (m/s): 1.303

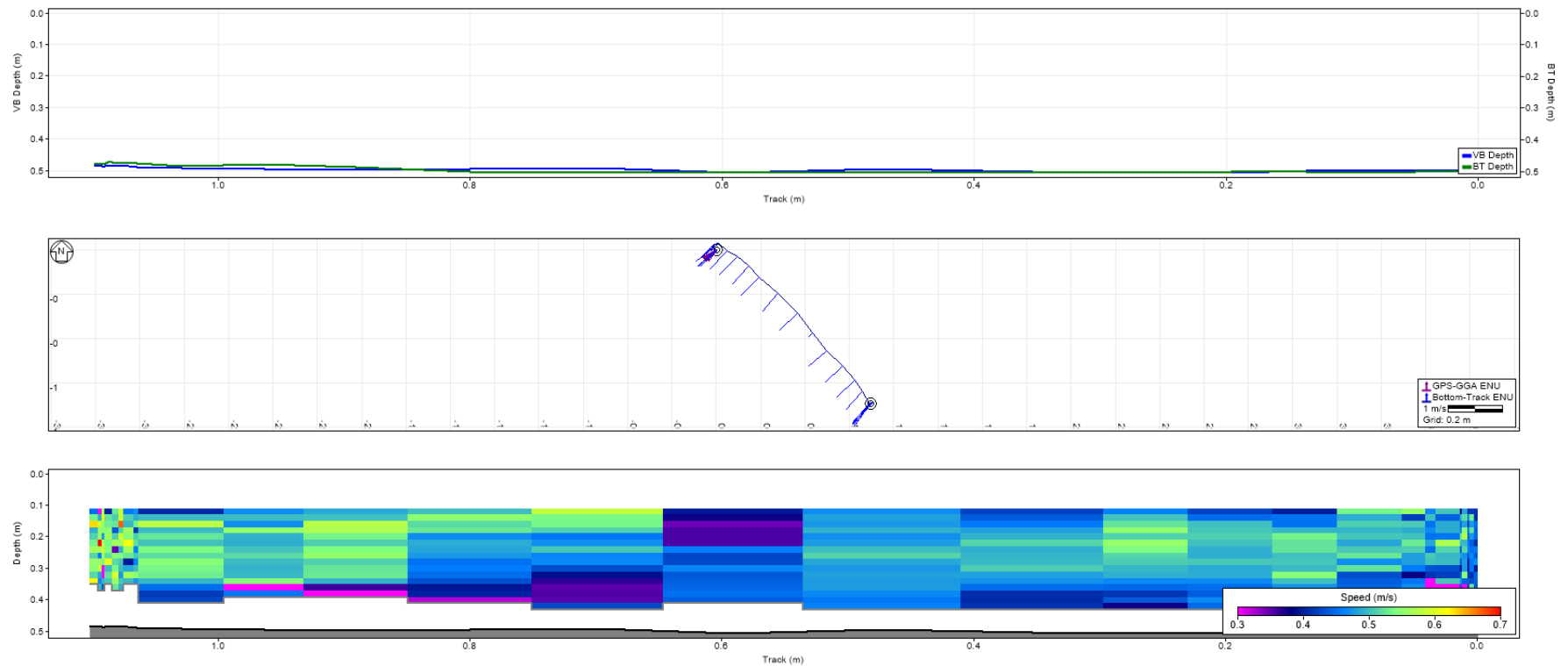
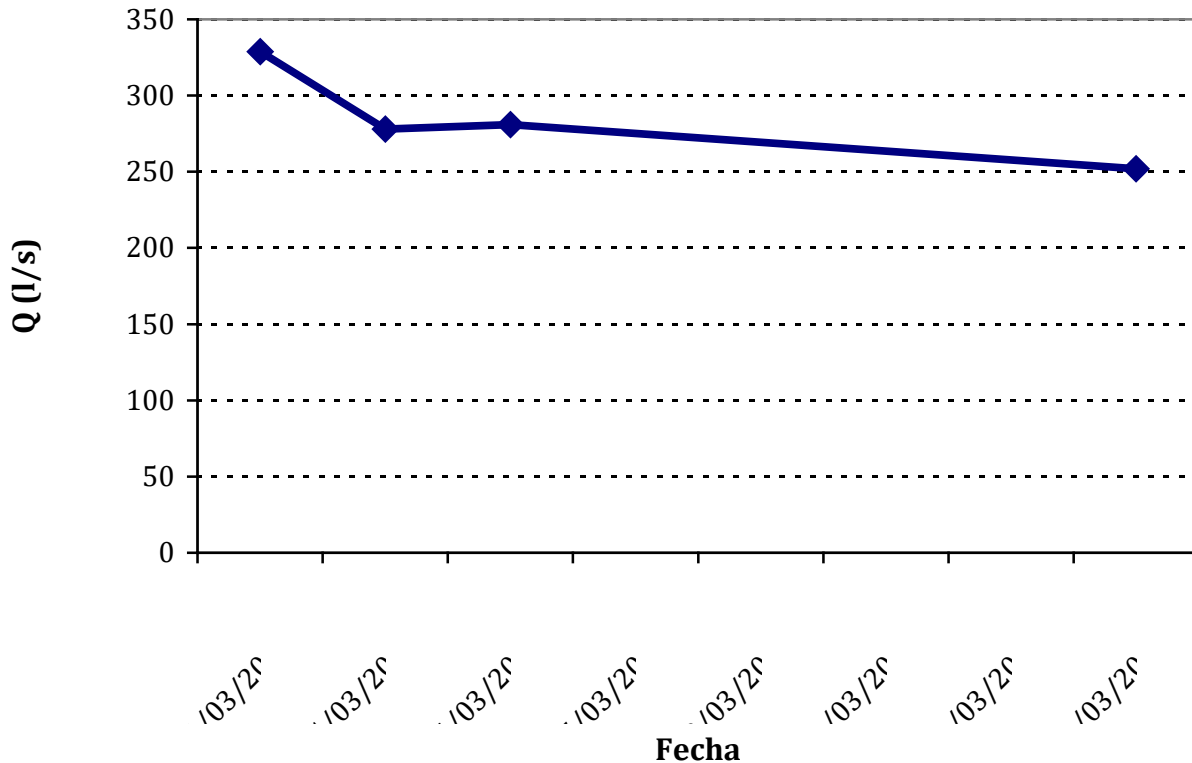


Figura 6.17 Resultados del aforo del manantial “Santa Rosa”





**Figura 6.18 Aforos del manantial “Santa Rosa” durante la campaña de medición.**

### 6.3.8 Manantial “Las Estacas”

El manantial “Las Estacas” se encuentra ubicado en la localidad Bonifacio Garcia (colonia Alejandra) en el municipio de Tlaltizapán, Morelos. El surgimiento más importante de agua tiene lugar en el “Borbollón”, arriba de este, se encuentra una estación de bombas y una compuerta que permite desviar el flujo de agua hacia un canal de riego o hacia el “Borbollón” aumentando el gasto que pasa a través del balneario. Cuando se bombea el agua al canal de riego, parte del flujo del canal libra no se adiciona al caudal del “Borbollón”. Otro punto importante de afluente de agua hacia el balneario es el agua proveniente del balneario “Santa Isabel” que también vierte hacia e “Borbollón”.

Una decena de metros aguas abajo del “Borbollón”, se encuentra un limnógrafo de la estación hidrométrica donde la Comisión Nacional del Agua mide el caudal total del manantial.

El punto de aforo se ubicó metros aguas debajo de la estación hidrométrica de la Comisión Nacional del Agua (coordenadas 18°43'48.60"N, 99° 6'49.56"O). El uso principal del agua de este manantial es para uso recreativo, sin embargo, una vez que ha pasado por el balneario, el agua es utilizada para riego agrícola. Las figuras 6.19, 6.20 y 6.21 muestran los resultados de los aforos realizados.



**Figura 6.19**Aforo del manantial “Las Estacas”

### Manantial “Las Estacas”

Ancho del canal (m): 11.600.

Área hidráulica (m<sup>2</sup>): 20.902.

Velocidad media (m/s): 3.034.

Gasto total (m<sup>3</sup>/s): 6.923.

Profundidad máxima medida (m): 2.276.

Velocidad máxima medida (m/s): 1.303

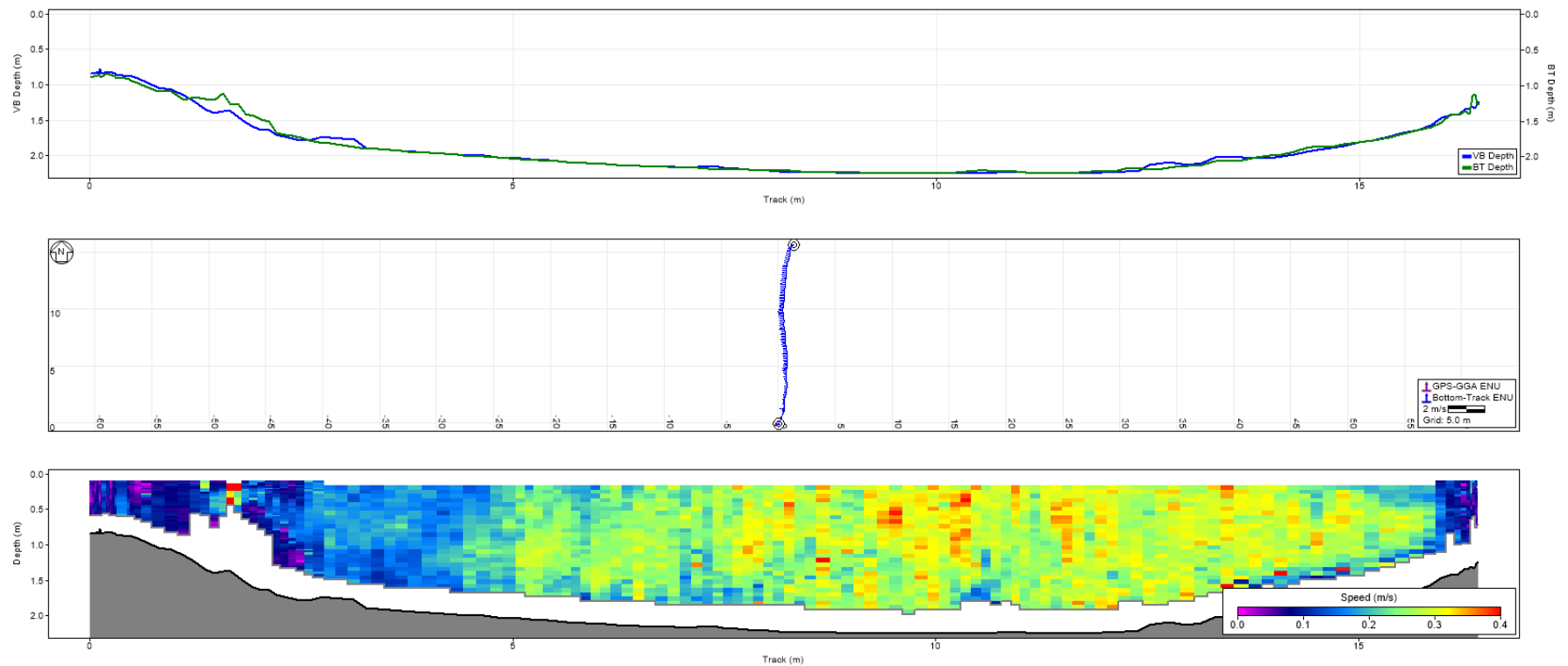
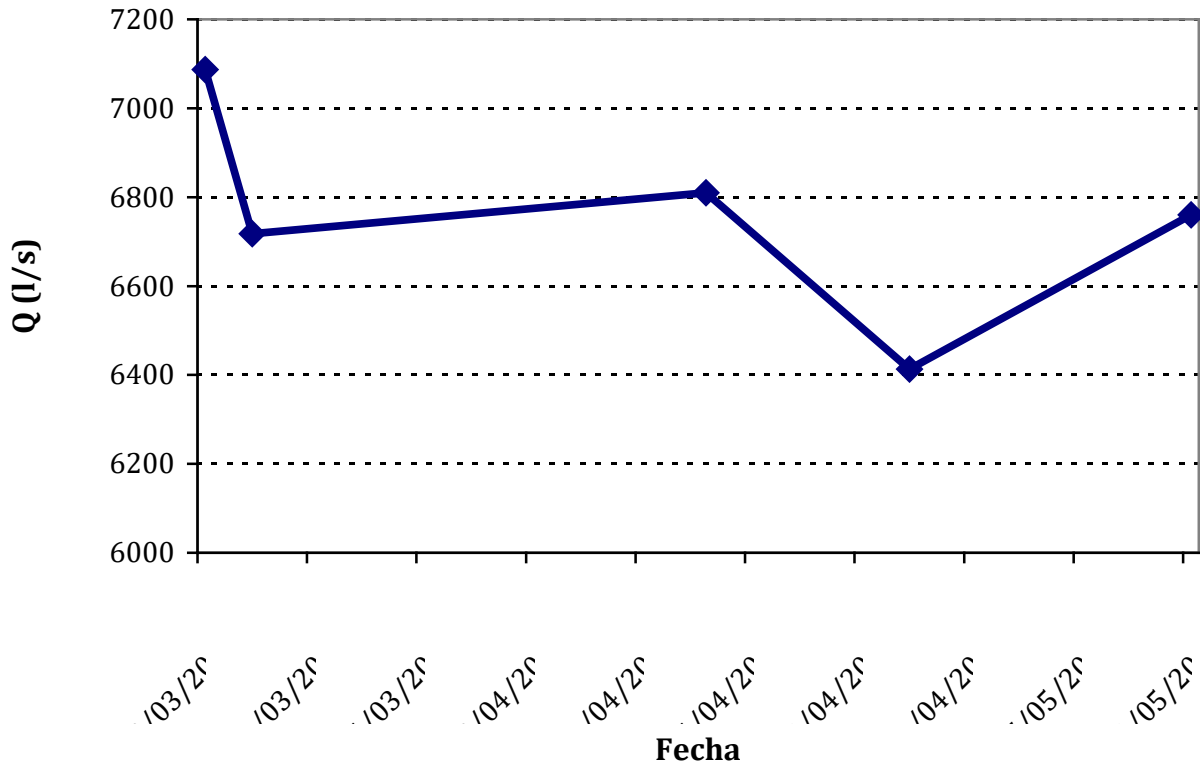


Figura 6.20 Resultados del aforo del manantial “Las Estacas”



**Figura 6.21 Aforos del manantial “Las Estacas” durante la campaña de medición.**

La variación en el gasto de este manantial se debe a que existen aportaciones de otros afluentes como es el caso del afluente proveniente del balneario Santa Isabel, que una parte del volumen de agua de este balneario es aportada al manantial de “Las Estacas”. El otro afluente que contribuye a la variación del aforo es el agua proveniente de un canal destinado para riego agrícola. Tanto el canal de riego como el afluente del balneario Santa Isabel, se encuentran a un lado del borbollón principal.

### 6.3.9 Manantial “Agua Azul”

El manantial “Agua Azul” se encuentra ubicado en la localidad de Cuautla, municipio de Cuautla, Morelos. Este manantial es un balneario rústico y sus aguas son utilizadas para regar tanto los campos de cultivo de este municipio como del municipio vecino. El agua que emerge del manantial es retenida en una pequeña represa mediante costales llenos de arena para permitir actividades de recreación. Después de la represa, existen pequeños lloraderos en el talud de la margen izquierda de la corriente que se unen a la corriente principal para posteriormente llegar a una segunda represa donde se localiza una estación de bombeo que envía una parte del agua para regar los campos agrícolas de los ejidatarios de la localidad de San Pedro Apatlaco, municipio de Ayala, Morelos. El resto del agua se utiliza para riego de los campos del municipio de Cuautla, Morelos. Debido a que después del sismo del 19 de septiembre de 2017 se registraron diferentes lloraderos después del



manantial principal, se decidió realizar los aforos agua abajo de la estación de bombeo (coordenadas 18°48'6.33"N, 98°57'19.63"O) con la intención de cuantificar tanto el gasto que emerge del manantial principal como de los lloraderos. Las figuras 6.22, 6.23, 6.24 y 6.25 muestran los aforos realizados al manantial "Agua Azul".



**Figura 6.22** Aforo del manantial "Agua Azul" utilizando el equipo portátil perfilador Doppler





**Figura 6.23** Aforo del manantial “Agua Azul” utilizando el equipo portátil velocímetro Doppler

### Manantial “Agua Azul”

Ancho del canal (m): 1.148.

Área hidráulica (m<sup>2</sup>): 0.206.

Velocidad media (m/s): 1.534.

Gasto total (m<sup>3</sup>/s): 0.293 (293 l/s).

Profundidad máxima medida (m): 1.158.

Velocidad máxima medida (m/s): 1.099

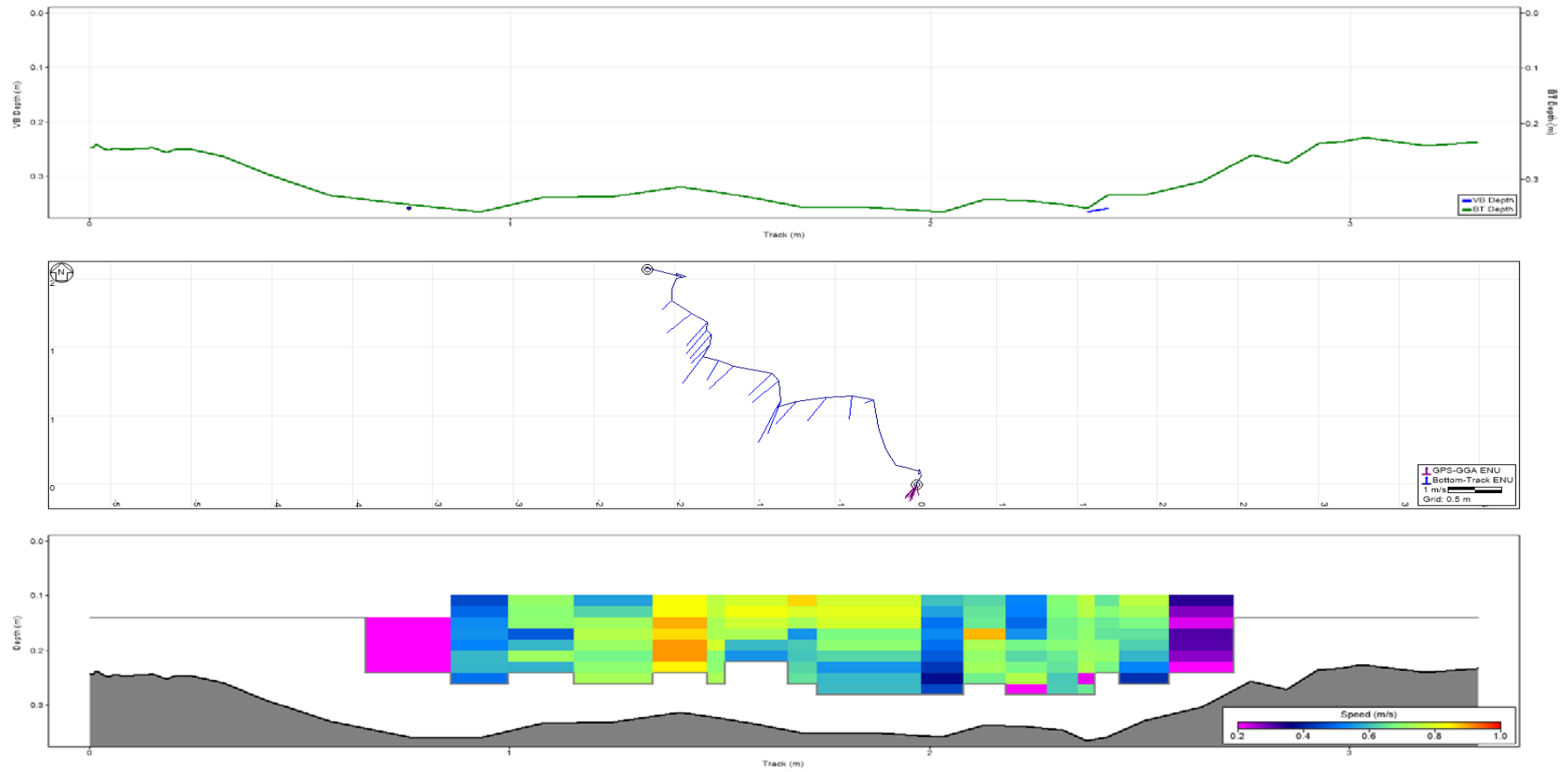
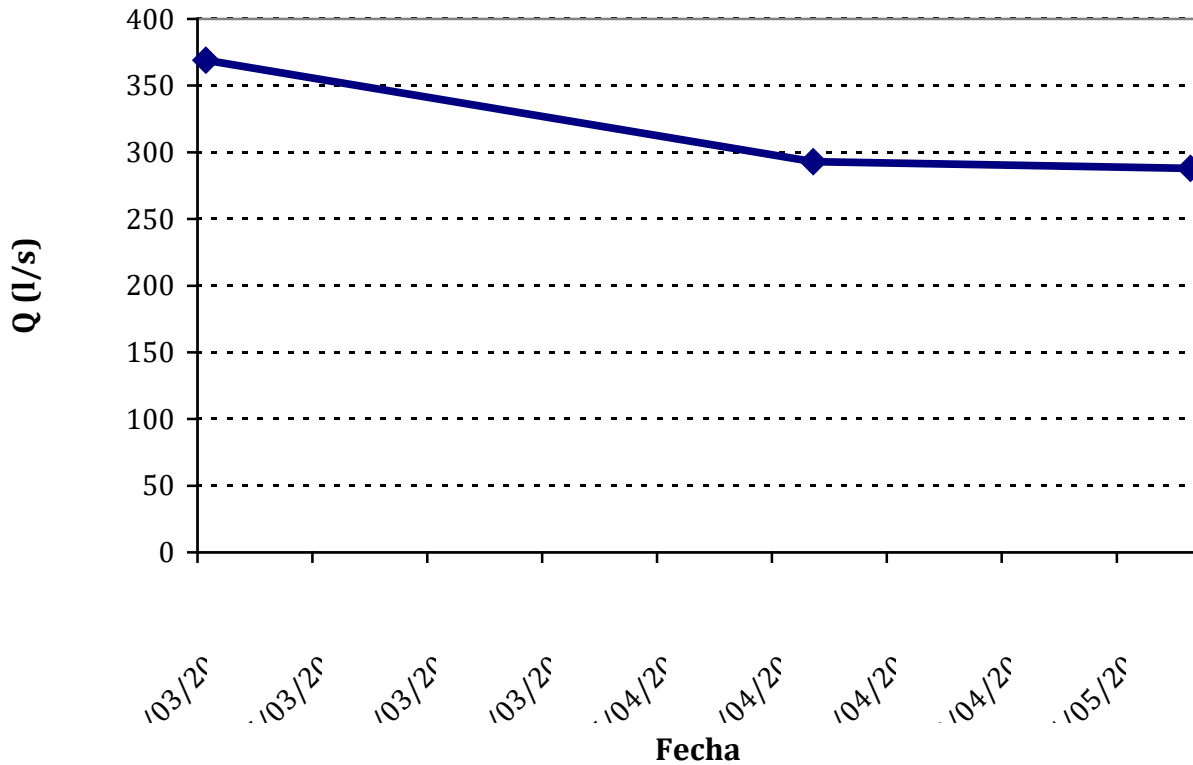


Figura 6.24 Afore del manantial “Agua Azul”

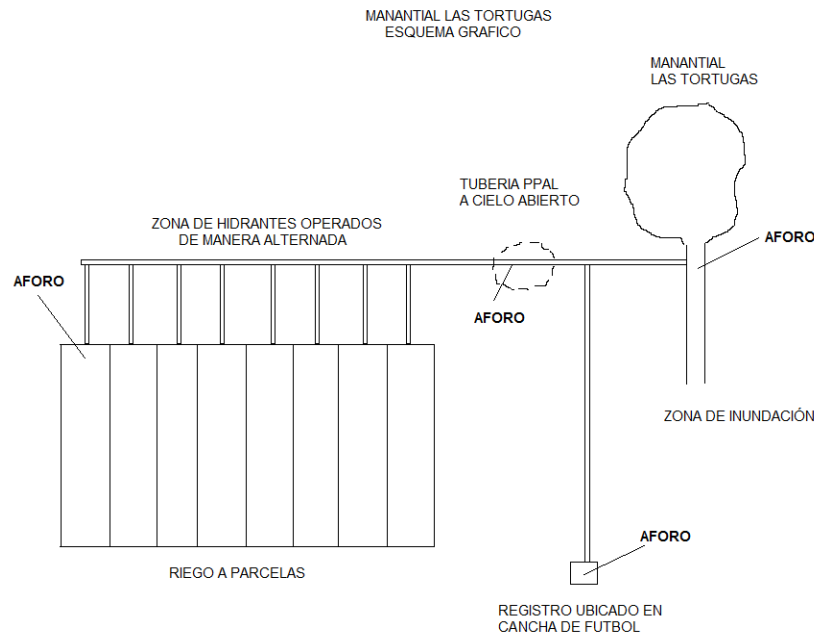


**Figura 6.25 Aforos del manantial “Agua Azul” durante la campaña de medición.**

### 6.3.10 Manantial “Las Tortugas”

El manantial “Las Tortugas” se ubica en la localidad de Itzamatitlán, municipio de Yautepec, Morelos. El acceso al manantial es por la carretera Cuernavaca-Cuatla hasta el cruce a Oacalco y a partir de ahí alrededor de 2.6 km al manantial.

A la salida del manantial, el agua se conduce por una tubería hacia una barranca. Esta tubería cuenta con una compuerta que, al cerrarla, el agua es conducida por otra tubería que se bifurca a la altura de la cancha de fútbol de la localidad en otras dos tuberías (Figura 6.26).

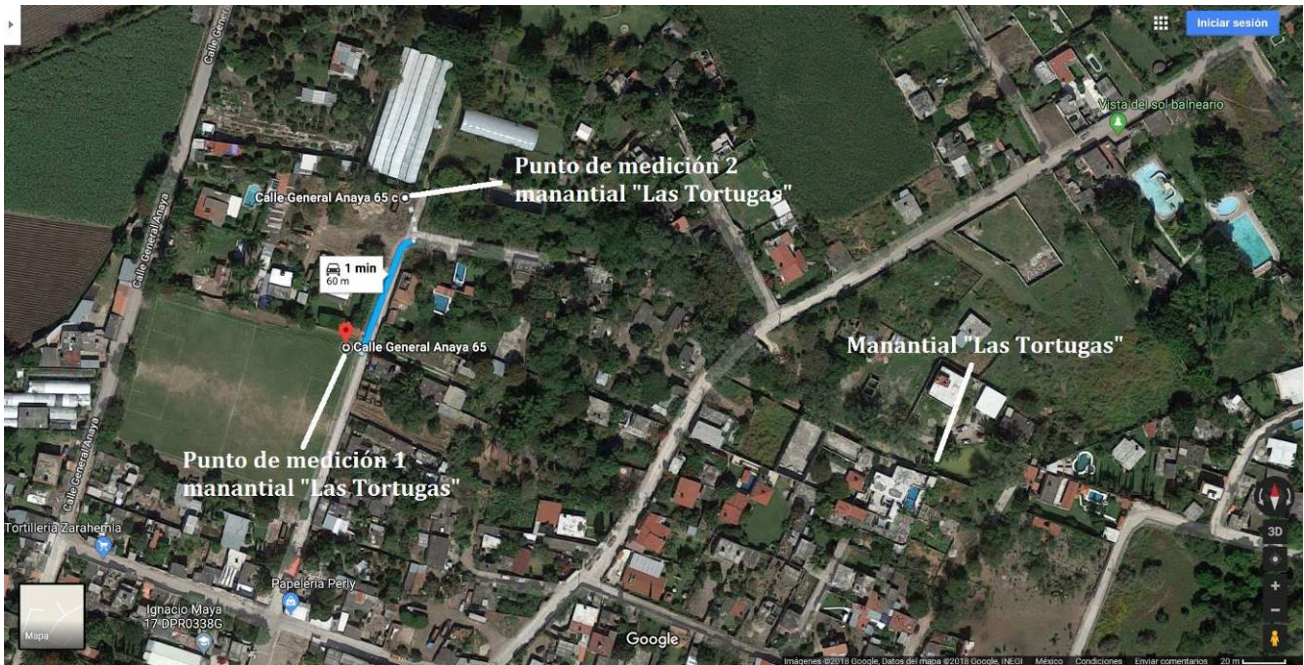


**Figura 6.26 Esquema de la derivación del flujo del manantial “Las Tortugas”.**

La tubería principal de esta bifurcación conduce el agua hasta unas parcelas que son regadas alternadamente mediante una serie de válvulas y por gravedad. La tubería secundaria descarga en un registro a cielo abierto, esta descarga es controlada de manera improvisada por medio de un costal que obtura la salida del flujo y lo poco que se fuga, es lo que se conduce por un canal natural de pequeñas dimensiones (una sección transversal de aproximadamente 25 x 15 cm). Dadas las condiciones del manantial, se decidió realizar los aforos tanto en la tubería que conduce el agua hasta las parcelas como en el canal natural que llega al campo de futbol (Figura 6.27, coordenadas 18°54'41.41"N, 99° 1'24.36"O y 18°54'39.11"N, 99° 1'25.33"O respectivamente).

En el mismo punto de la salida del manantial, existe un canal de mampostería (Figura 6.28) que, cuando el nivel del agua dentro del manantial se incrementa, el canal sirve para desahogar el exceso de agua llevándola al final del mismo donde existe una zona de inundación. Sin embargo, si el flujo de agua del manantial llega a incrementarse de manera importante, al agua puede llegar hasta la calle más cercana al manantial en donde simplemente se desperdicia.





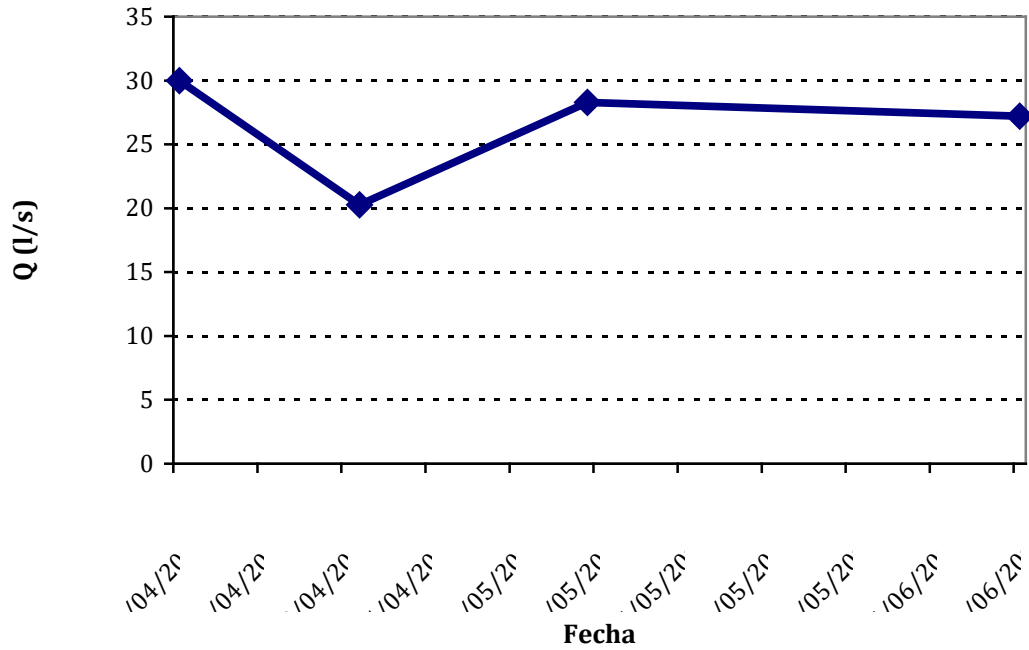
**Figura 6.27** Ubicación de los puntos de medición del manantial “Las Tortugas”



**Figura 6.28** Descarga del manantial “Las Tortugas”.



Los resultados se presentan en la Figura 6.29.



**Figura 6.29 Aforos del manantial “Agua Azul” durante la campaña de medición.**

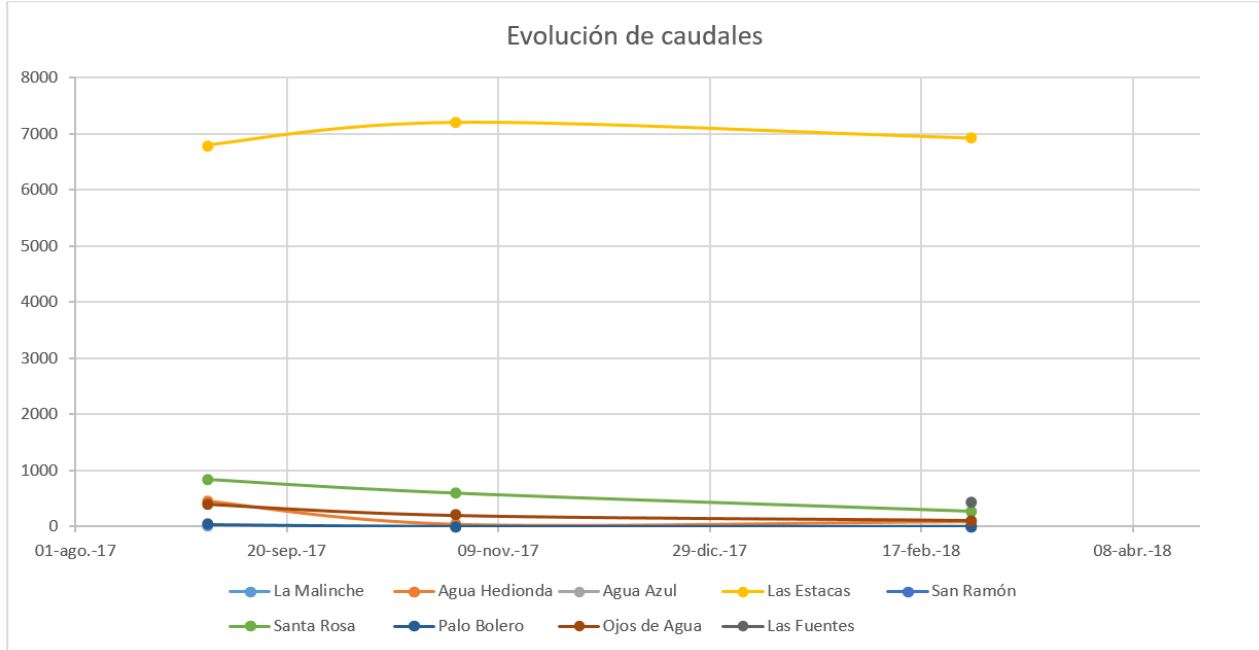
La tabla 6.1 se muestra un resumen con el caudal promedio realizados a los manantiales que ahí se mencionan. En la tabla 6.2 se muestran datos de aforos recopilados y en la Figura 6.30 se muestra la evolución de los caudales disponible y generada de las descargas de agua subterránea en el tiempo.

**Tabla 6.1 Aforo de los diferentes manantiales visitados.**

Manantial	Caudal Promedio (l/s)	Método
Las Tortugas	26.44	Área-Velocidad
La malinche	3.51	Área-Velocidad
Agua Hedionda* (principal)	76.25	Área-Velocidad
Agua Hedionda (albercas)	19.28	Volumen-Tiempo
Agua Azul	316.67	Área-Velocidad
Las Estacas	6,757.60	Área-Velocidad
Las Fuentes	590.25	Área-Velocidad
Santa Rosa	284.97	Área-Velocidad
Palo Bolero	5.37	Área-Velocidad
Ojos de agua	111.00	Área-Velocidad

**Tabla 6.2 Caudales en los manantiales estudiados.**

Manantial	1970	1981	1982	1986 (Jun)	1987 (Mar)	1987 (Mayo)	1998	2017 (Sep)	2017 (Oct-Nov)	2018	2018 (mayo)
Acuífero Cuautla-Yautepec											
Las Tortugas											
La Malinche								18		5	
Agua Hedionda				233.2	354	269.2		450	30	78.3	65
Agua Azul											
Las Estacas	7,000	6,800	7,066	6,533	6,266			6,800	7,205	6,923	
Acuífero Cuernavaca											
San Ramón	450		220				100		0	0	
Santa Rosa			416					845	600	276	
Palo Bolero								30	0	0	
Ojos de Agua		671	1,098					400	200	111	Seco
Las fuentes	980		600							434	



**Figura 6.30 Evolución de caudales en los manantiales en estudio**

## 7 INTEGRACIÓN, PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

### 7.1 Introducción

En este apartado se procesa e integra la información recopilada de los estudios previos que fueron realizados dentro de la zona de interés y/o el acuífero al que pertenece y la generada en los apartados que integran la metodología propuesta para conseguir el objetivo planteado mediante la realización de la caracterización hidrogeológica.

En primer lugar, mediante la organización y simplificación de la información geológica, hidrológica, geohidrológica y geofísica se construye un modelo conceptual en la zona de cada manantial en estudio, que corresponde a una representación gráfica mediante secciones hidrogeológicas donde se esquematizan los estratos geológicos que afloran y subsacen en la zona, así como los sistemas de flujo subterráneo.

### 7.2 Marco Geológico.

Los manantiales en estudio yacen en rocas comprendidas en dos provincias geológicas; La primera de mayor cobertura en el estado de Morelos, es la **Plataforma Guerrero-Morelos (PG-M)**, esta es una secuencia sedimentaria marina del Cretácico y esta a su vez es cubierta por secuencias continentales del Terciario y Cenozoico. La PG-M se observa en estructuras alargadas orientadas casi norte-sur, plegada y con un abundante fallamiento, representando la continuación de la deformación Laramídica en el sur de México (Ferrari *et al.*, 2007). La segunda provincia corresponde a la denominada **Faja Volcánica Transmexicana (FVTM)**, la cual tiene lugar desde el Mioceno hasta el Cuaternario (Ferrari, 2000; Gómez-Tuena *et al.*, 2005; Lenhard *et al.*, 2010), una de sus características es la de presentar una orientación este-oeste y está constituida por al menos 8,000 estructuras volcánicas con una amplia variación composicional (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

Hasta principios del Mioceno las Cuencas de México y Cuernavaca, compartían un sistema de drenaje superficial que atravesaba el Valle de México y descargaba hacia el Valle de Cuernavaca (Mooser, 1956). Este drenaje se vio interrumpido durante el Pleistoceno temprano (1.2 Ma), con el emplazamiento del Campo Volcánico Chichinautzin (CVC) (Arce *et al.*, 2013b). Este bloqueo del drenaje dio como resultado en la Cuenca de México la formación de los lagos y por consecuencia el inicio de la sedimentación lacustre (Siebe *et al.*, 2005; Arce *et al.*, 2013b). Por otro lado, hacia el sur esta obstrucción dio origen a la Cuenca hidrográfica del río Amacuzac.

### 7.3 Estratigrafía.

La secuencia litológica del estado de Morelos consiste de depósitos aluviales, rocas volcánicas, conglomerados del Terciario y Cuaternario, que sobreyacen a rocas



sedimentarias del Cretácico (Fries, 1960; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989) (Figura 7.1).

Entre las rocas del Terciario y Cretácico existe una gran discordancia puesto que no se tiene evidencias de rocas del Paleoceno sino hasta el Eoceno Medio (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989) (Figura 7.2).

A continuación, se describen brevemente las unidades litológicas observadas y que afloran en los alrededores de los manantiales y principalmente las que condicionan las áreas de descarga de agua subterránea de estos. Dicha secuencia estratigráfica será descrita en una división propuesta constituida por la secuencia sedimentaria del Cretácico, Formación Balsas y la secuencia volcánica del Cenozoico, cada una de acuerdo a su orden geocronológico.

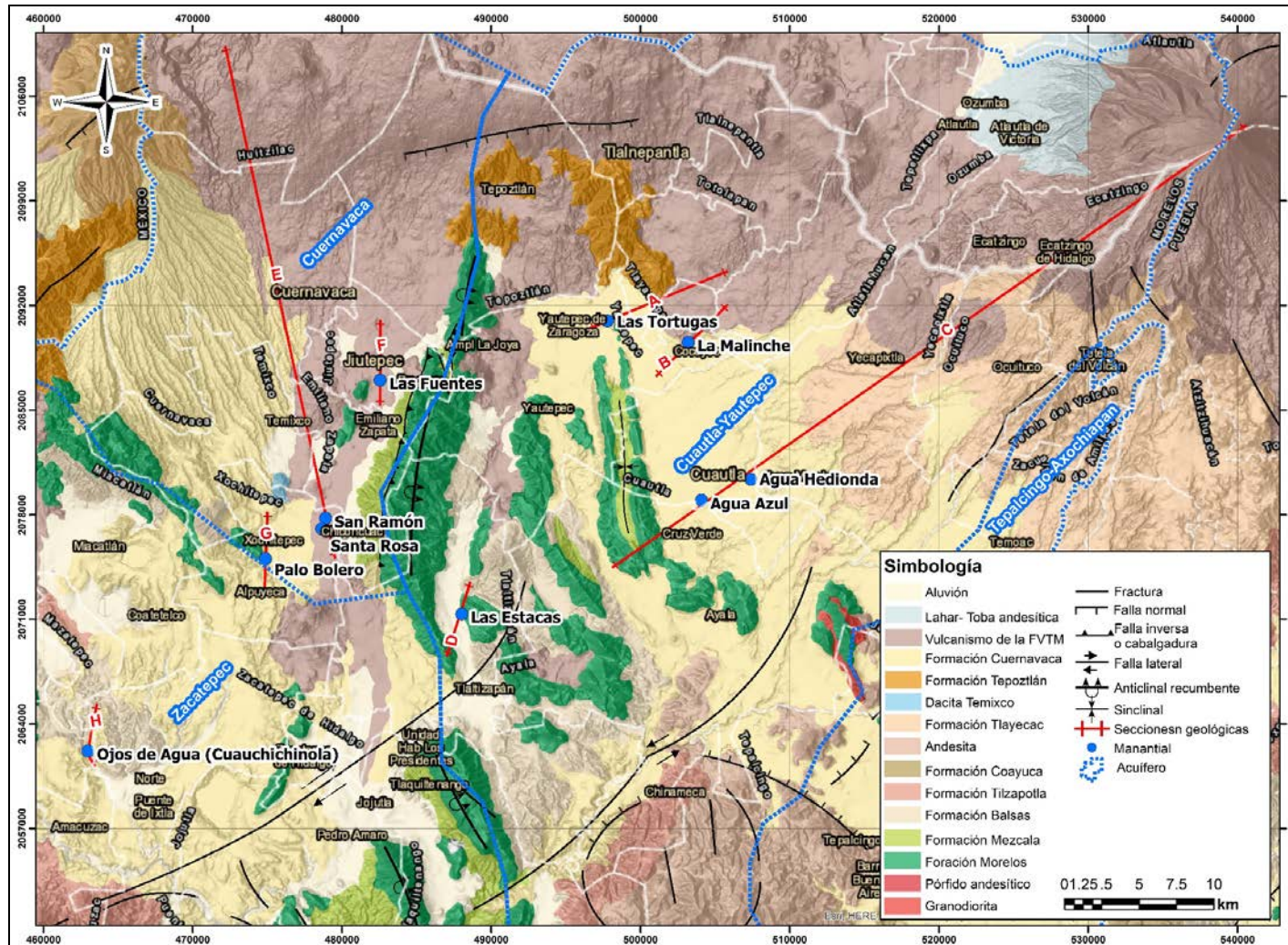


Figura 7.1 Mapa Geológico Regional del Estado de Morelos (base cartográfica del SGM)

### ***Secuencia sedimentaria del Cretácico.***

Los sedimentos marinos de esta secuencia en conjunto tienen un grosor mayor a los 2,000 m, la cual fue sujeta a plegamientos y desplazamientos a través de fallas inversas durante la Orogenia Laramide del Eoceno inferior. Esta constituye el sustrato de la secuencia volcánica, sedimentaria del Terciario, del Cuaternario en el estado de Morelos y es constituida por las formaciones Xochicalco, Morelos y Cuautla, estas en el mapa geológico no son divididas cartográficamente (Figura 7.1). Debido a que se consideran unidades transicionales dentro de las facies de la misma Formación Morelos, no existe discordancia entre sus contactos, sino que estos contactos son de carácter transicional respectivamente (Minero, S.G.M. 2008); La Formación Xochicalco es considerada como una variación de facies de la base de esta secuencia. Por otro lado, La Formación Cuautla, es considerado como la cima de la misma secuencia. Sus características litológicas en su misma base son muy similares a las rocas de la Formación Morelos y en su cima presenta condiciones similares a la Formación Mezcala, es decir, esta puede considerarse la transición del Cretácico Inferior con los principios del Cretácico Superior (Minero, S.G.M. 2008).

***Formación Xochicalco (Aptiano).*** Descrita por Fries, (1960) como una sucesión constituida de capas de calizas arcillosas densas y margas de espesor variable de muy delgado a mediano, con una estratificación bien definida característica por presentar una laminación fina (Figura 7.3a). Los colores que exhibe varían de gris oscuro a negro, según el contenido carbonoso. En la parte superior se observa intercalada con bandas de pedernal. Esta formación presenta una mayor deformación y un estado de mayor erosión con respecto a la Formación Morelos, debido al carácter arcilloso, carbonoso y la estratificación delgada de la caliza Xochicalco, dando como resultado un comportamiento mecánico no homogéneo. Presenta pliegues en forma de chevrón y un espesor de aproximadamente de 400 m (Campa-Uranga, 1978).

***Formación Morelos (Albiano-Cenomaniano).*** Constituida en su base por yesos, anhidritas y dolomías, regularmente es constituida de potentes estratos gruesos y masivos (Figura 7.3b), depositados en ambientes lagunares y marinos de plataforma somera; contienen arrecifes de rudistas, bancos de caracoles y almejas (Fries, 1960). Las estructuras presentes son bioturbación, laminación planar, estructuras fenestrales y grietas de desecación (Aguilera-Franco, 2004). Esta formación tiene un espesor promedio de 1000 m, la cual disminuye hacia el sur debido a procesos de erosión antes del depósito de la Formación Cuautla (Campa-Uranga, 1978; Fries, 1960), aunque en otras zonas es cubierta por la Formación Mezcala. La Formación Morelos descansa discordantemente con el esquistó Taxco y sobre rocas del Complejo Acatlán (De Cserna y Fries, 1981).



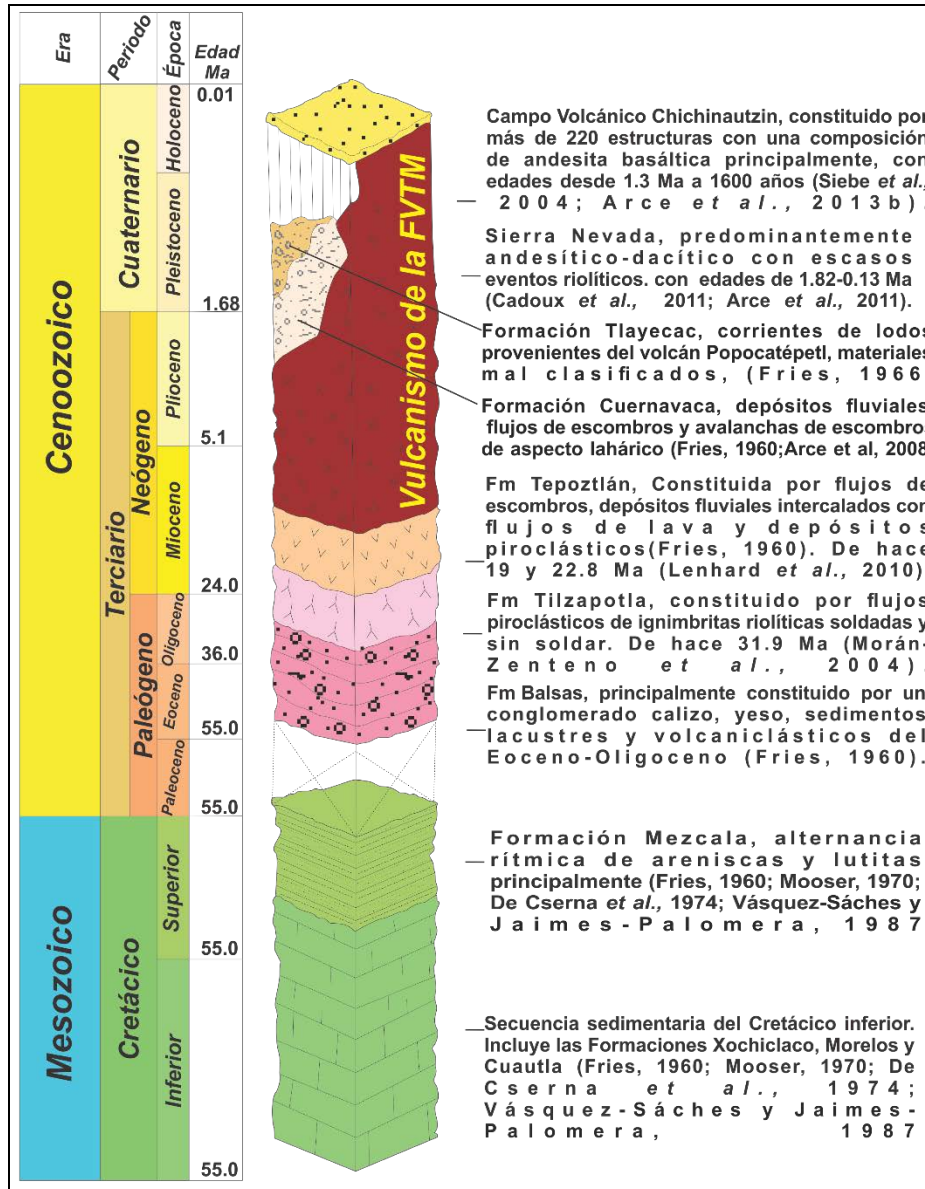
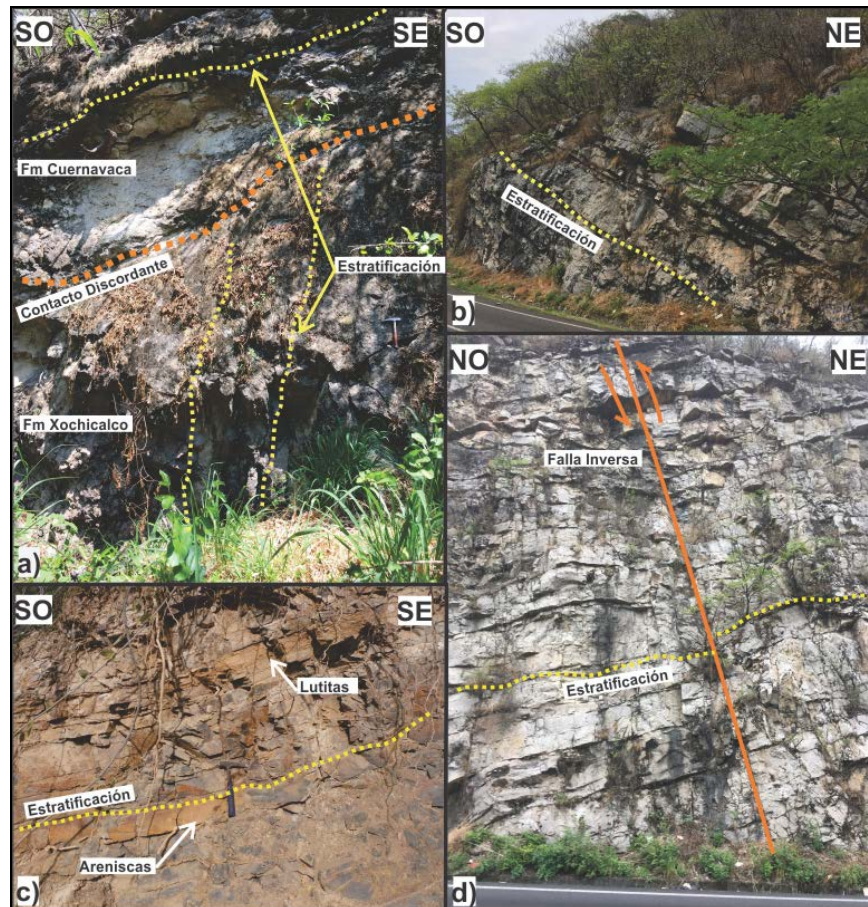


Figura 7.2 Columna estratigráfica general del área de estudio.

**Formación Cuautla (Cenomaniano tardío-Turoniano).** Descrita por Fries, (1960) como tres facies con sentido lateral. La facie predominante en el estado de Morelos es una secuencia de calizas gruesas a masivas (Figura 7.3d), sin embargo, en el área de Tlaltiquenango, se observa en capas de 5-20 cm de grosor, intercaladas con nódulos de pedernal. Tiene un espesor aproximado de 400 a 750 m, estratigráficamente descansa sobre la Formación Morelos y la suprayace la Formación Mezcala (Fries, 1960).

**Formación Mezcala (Turoniano-Campaniano).** Definida como un depósito tipo *flysh* alpino (Campa-Uranga, 1978), constituida por una alternancia rítmica de lutitas, areniscas, limolita, lutita calcárea y escasos lentes delgados de calizas (Fries, 1960) (Figura 7.3c), por otra parte, su base es constituida de calizas arcillosas de bioclastos (Aguilera-Franco, 2000). Tiene un espesor aproximado de 600 a 2000 m y su contacto inferior es de carácter transicional con la Formación Morelos y es cubierta indistintamente por el Grupo Balsas y la Formación Cuernavaca (Fries, 1960).



**Figura 7.3 Afloramientos de la Secuencia sedimentaria del Cretácico**

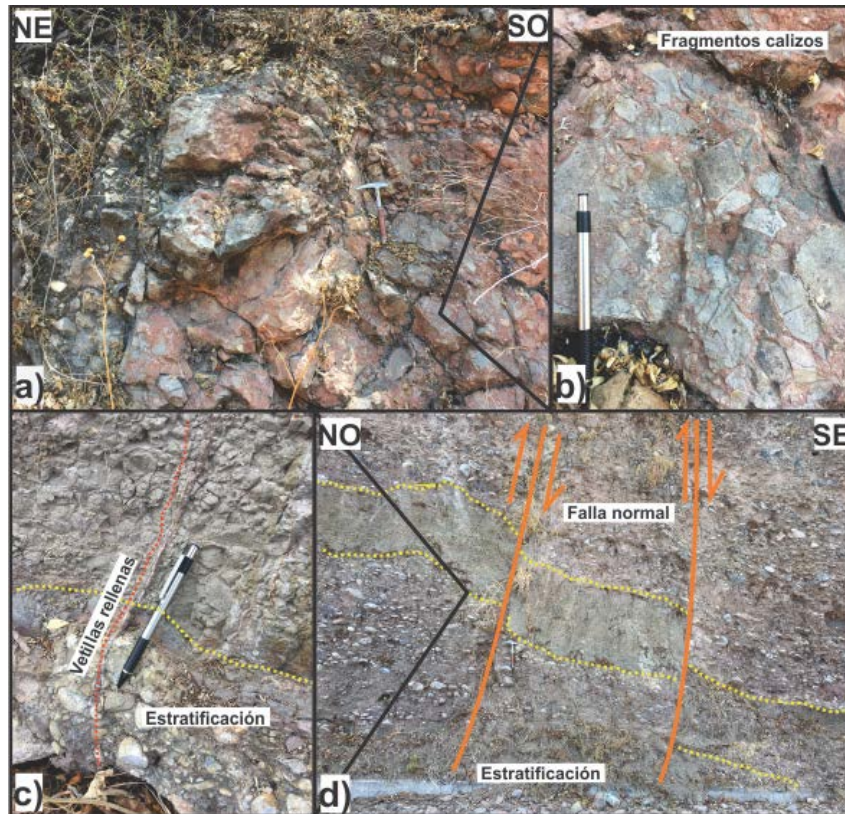
**Formación Balsas (Eoceno-Oligoceno medio).**

Las rocas de la secuencia sedimentaria del Cretácico se encuentran cubiertas por una serie de sedimentos continentales del Cenozoico. Y las rocas más antiguas de esta cubierta continental corresponden a la Formación Balsas (Figura 7.4), esta representa el Terciario de la secuencia.



Definido inicialmente por Fries, (1960) como una sucesión de depósitos terrígenos, de espesores y una variedad litológica variable. Posteriormente De Cserna (1965), cambia de rango de Grupo a Formación. Es constituida desde yeso, caliza lacustre, conglomerado calizo, conglomerado volcánico, arenisca tobácea, limolita tobácea, toba riolítica y corrientes lávicas interestratificadas. Esta unidad se define del Terciario por su sobreposición sobre la secuencia del Cretácico y su deformación que contrasta con las unidades del Neógeno y Cuaternario (Fries, 1960).

Recientemente Morán-Zenteno *et al.* (2007b) en el sector Amacuzac-Zacapulco, dividen al Grupo Balsas en la Formación Huajintlán y Formación Tepetlapa. Estos autores hicieron dataciones K-Ar de  $44 \pm 0.7$  Ma (Eoceno) en roca total proveniente de un flujo andesítico intercalado con la Formación Tepetlapa. Esta unidad descansa discordantemente sobre la secuencia sedimentaria del Cretácico, y es cubierta por la Riolita Tilzapotla y la Formación Cuernavaca en relaciones angulares (Fries, 1960; Morán-Zenteno *et al.* 2007b). La distribución de sus unidades no presenta una secuencia horizontal ni vertical, el espesor alcanza hasta los 2500 m, pero comúnmente se encuentre de 300 a 500 metros de grosor (Minero, S.G.M. 2008).



**Figura 7.4 Afloramientos de la Formación Balsas.**

### ***Secuencias volcánicas del Cenozoico.***

Subsecuentemente aparecen rocas volcánicas, que en conjunto componen una amplia columna estratigráfica (Figura 7.2). Sin embargo, solo se describirán las unidades condicionantes y las presentes en los alrededores de los manantiales en estudio.

#### ***Formación Tepoztlán (Mioceno).***

La Formación Tepoztlán aflora al noroeste y noreste de Cuernavaca, es constituida por rocas volcaniclásticas de andesita a dacita incluyendo riolita (Lenhardt *et al.*, 2010), depositadas en capas que varían de 50 cm hasta 10 m de espesor y estas en conjunto llegan a alcanzar un espesor total de 1000 m (Fries, 1960). Este mismo autor le asignó una edad por posición estratigráfica del Mioceno temprano y García-Palomo *et al.*, (2000), llevaron a cabo fechamientos por el método K-Ar determinando una edad de 21.6 Ma, finalmente Lenhardt *et al.*, (2010), fecharon lavas de esta formación con edades tan antiguas como 22.8 Ma.

#### ***Formación Cuernavaca (Plioceno superior-Pleistoceno inferior).***

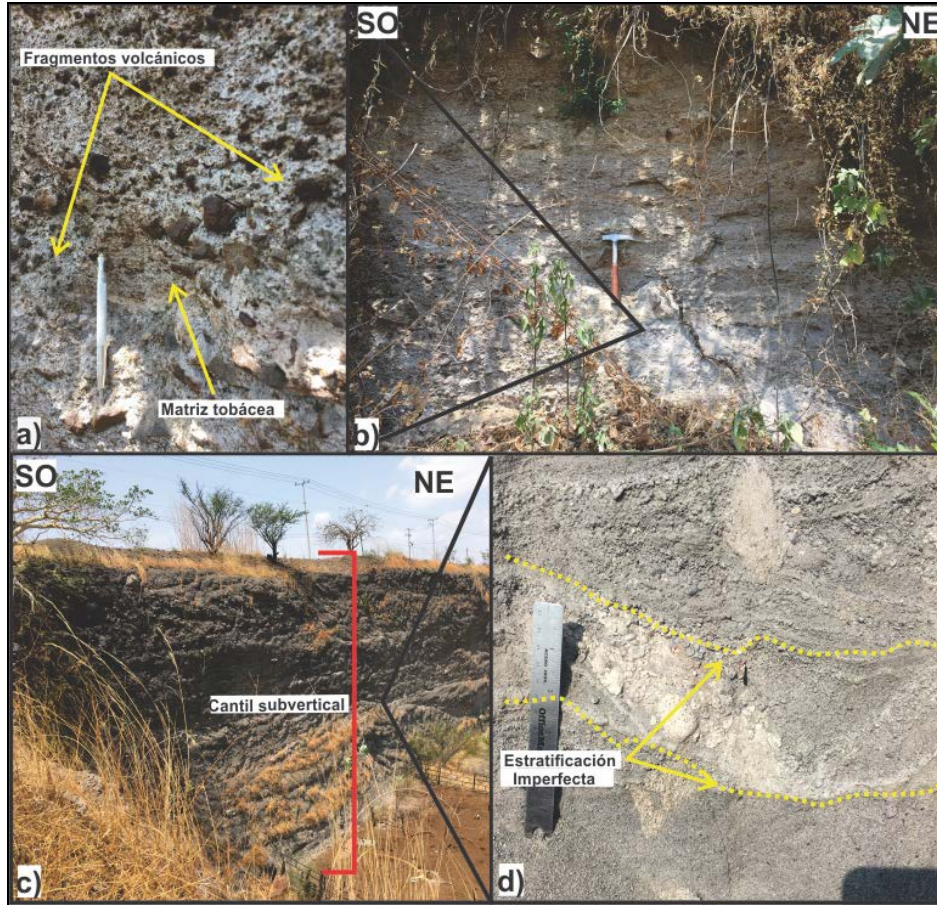
Descrita inicialmente por Fries, (1960), como depósitos clásticos transportados por agua, bien expuestos y con un aspecto de depósito lahárico. Iniciando como un amplio abanico aluvial de aproximadamente de 100 a 400 metros de espesor, desde el sur de la Sierra de Las Cruces y se distribuye ampliamente sobre el estado de Morelos. Estos depósitos fueron originados principalmente por los residuos de los flujos resultantes del colapso de del flanco SE del volcán Zempoala (Capra *et al.* 2002). Los sedimentos constituyentes están soportados por una matriz de clastos que van desde guijarros a bloques con un notable grado de redondez (Figura 7.5c y 7.5d). En general esta unidad es constituida de por depósitos fluviales, flujos de escombros y avalanchas de escombros, intercalados con horizontes netamente tobáceos (Arce *et al.* 2008). Es cubierta por aluvión del Holoceno y por basaltos del CVC, por otro lado, mantiene una discordancia con la Formación Tepoztlán, Formación Balsas y la andesita Zempoala, por lo que se considera que corresponde al Plioceno superior al Pleistoceno inferior (De Cserna y Fries, 1981). Esta idea es corroborada por la datación (Ar-Ar) en un bloque de andesita correspondiente de las lavas de los volcanes Zempoala y La Corona, encontrado dentro de un flujo de escombros de esta unidad. Los resultados arrojaron una edad de 1 Ma (Arce *et al.* 2008).

#### ***Formación Tlayecac (Pleistoceno medio).***

Inicialmente descrita por Fries, (1966), como depósitos de lodo provenientes del volcán Popocatepetl, de tono gris claro a amarillentos (Figura 7.5a y 7.5b). Constituido por material mal clasificado, esta secuencia de terrígenos es conformada por tobas híbridas mezcladas con material piroclástico, con tamaños desde arcillas hasta un metro de diámetro. Interestratificado con derrames de rocas volcánicas. El material no se observa bien cementado, sin embargo, presenta un alto grado de compactación en una matriz tobácea, mostrado en una estratificación imperfecta. Es común observarle formando cantiles verticales en los flancos de las barrancas, en general muestra un espesor de 30 a



600m, pero comúnmente se encuentra de 100m. Se le asigna una edad del Pleistoceno medio (Ordaz A., 1977) hasta el Holoceno (Fries, 1966) de acuerdo a sus relaciones estratigráficas.

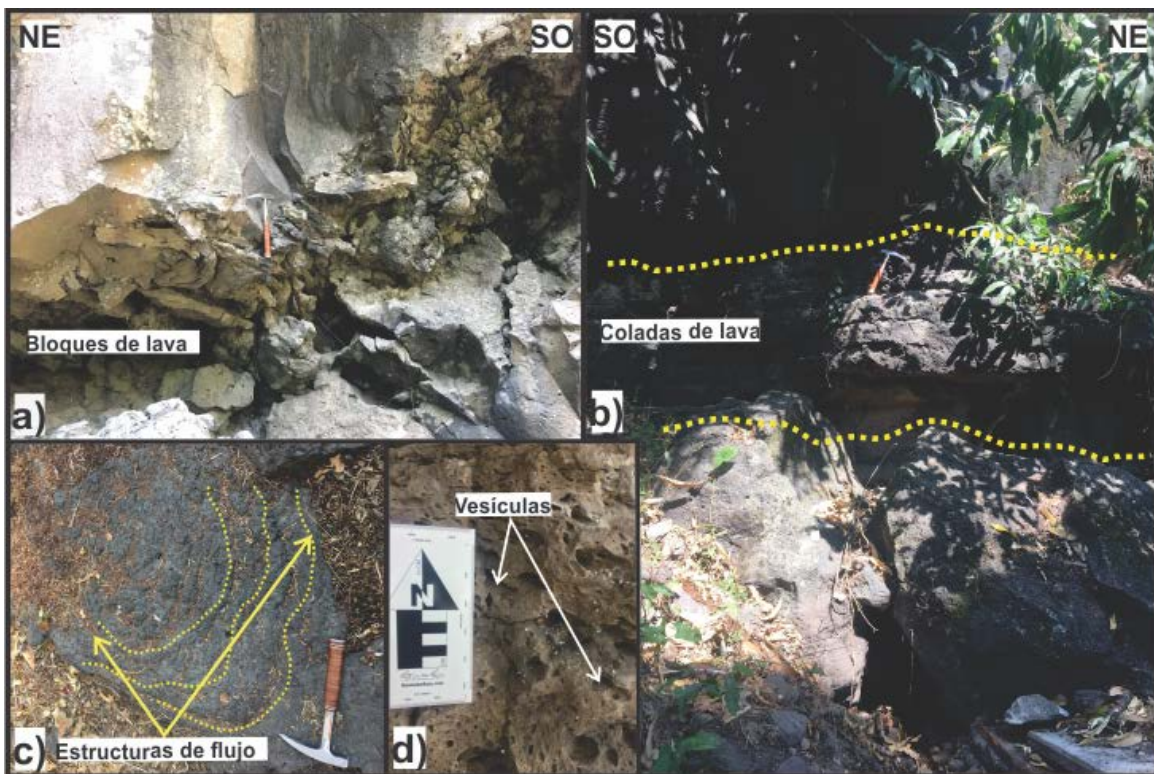


**Figura 7.5 Afloramientos de la Formación Tlayecac.**

### ***Campo Volcánico Chichinautzin***

Inicialmente se propuso el nombre formacional de Chichinautzin por Fries (1960) y posteriormente llamada como Grupo Chichinautzin por Bloomfield (1975) y Martin del Pozzo (1982). Limita al norte con el valle de México y al sur con el valle de Cuernavaca, está caracterizada por tener una forma irregular, pero con una dirección general este-oeste, se extiende desde el límite del valle de Toluca hasta los flancos del volcán Popocatepetl (Mooser et al., 1975), algunos derrames se extienden de manera irregular hasta el sur de Cuernavaca. Esta unidad es típica del vulcanismo monogenético en el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano, tiene alrededor de 220 conos de escoria traslapados,

asociados a flujos de lava y secuencias de tefra los cuales se distribuyen en el Distrito Federal, Morelos y el Estado de México (Bloomfield, 1975; Martin del Pozzo, 1982; Márquez et al., 1999). Las lavas de esta unidad en general varían ampliamente en composición, desde basalto, andesítico-basáltica y andesítica principalmente de grano fino y medio, aunque también se han descrito dacitas de grano grueso (Siebe et al., 2004). En cuanto a su edad, existen varios fechamientos de radiocarbono que lo han ubicado en el Pleistoceno tardío, desde 38,000 años antes del presente (Bloomfield, 1975) hasta 1600 años AP (Siebe, 2000). Sin embargo, estudios recientes, han demostrado que existen volcanes monogenéticos dentro de este campo tan antiguos como de 1.2, 0.8, 0.2, 0.08 Ma (Arce et al. 2013b).



**Figura 7.6 Afloramientos de los basaltos del CVC**

#### 7.4 Unidades hidroestratigráficas.

De acuerdo a las características físicas anteriormente descritas de cada unidad litológica, ahora se procede a describir sus aspectos hidrogeológicos, en base a la permeabilidad que estas presentan. Para que finalmente sean agrupadas en unidades hidrogeológicas, de este modo se reconocen tres horizontes (Figura 7.7), representados por un acuífero libre, un acuífero y un acuífero semiconfinado.



### ***Acuífero del tipo libre superior.***

Esta constituido principalmente por las formaciones volcaniclásticas (Formaciones Cuernavaca y Tlayecac) del terciario y por basaltos del Campo Volcánico Chichinautzin (CVC), estas manifiestan su permeabilidad por medio de poros interconectados y fracturas.

**La Formación Cuernavaca** se considera un acuífero por sus características litológicas mencionadas, especialmente en las zonas donde mantiene contacto con las unidades impermeables inferiores. También es de esperarse la presencia de múltiples acuíferos colgados emplazados en los estratos tobáceos y arcillosos presentes; **La Formación Tlayecac** de acuerdo a su composición litológica, corresponde a una unidad permeable, aunque también contiene algunos horizontes que fungen como una barrera al flujo lateral del agua subterránea, haciéndola fluir sobre los sedimentos granulares suprayacentes permeables hasta surgir a la superficie; **Los basaltos del CVC** presentan una permeabilidad alta debido a su alto contenido de vesículas, fracturas y piroclastos. A través de esta unidad se encuentran aflorando muchas descargas de agua subterránea como los manantiales La Malinche, Santa Rosa y San Ramón (antes de desaparecer). En otras áreas también funcionan como zona de recarga que probablemente dan origen a flujos intermedios y regionales, debido a que alcanza profundidades donde se encuentra la Formación Morelos siendo un aporte principal para este.

En la zona correspondiente a Cuauchichinola, la cima de rocas correspondientes a la Formación Balsas está constituida por un conglomerado calizo que tiene en menor proporción fragmentos volcánicos y su matriz es deleznable de tonos rojizos, estas características dan condiciones acuíferas a esta unidad.

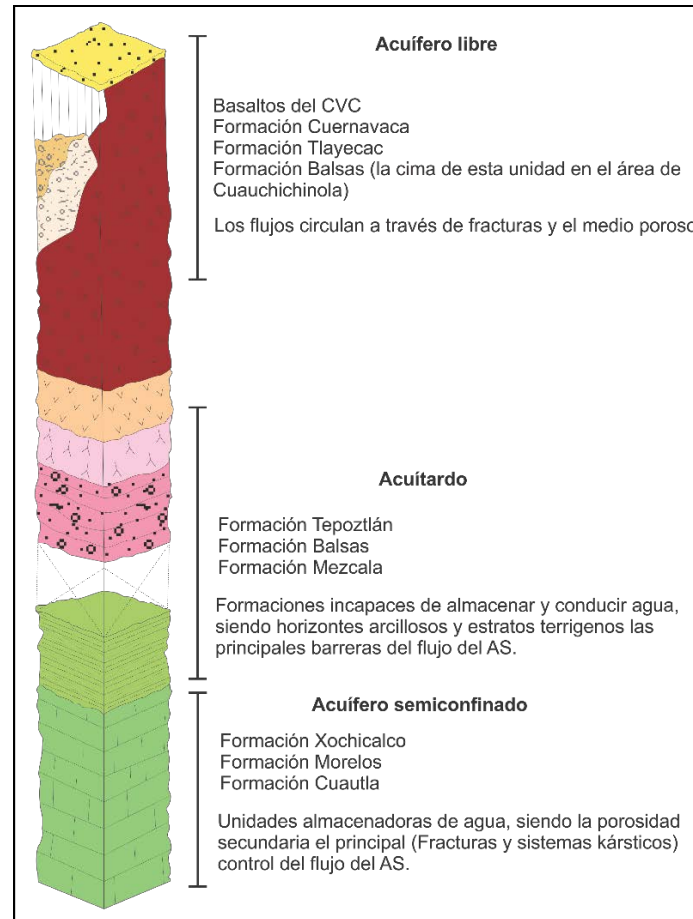
### ***Acuífero.***

Las unidades litológicas que constituyen esta unidad corresponden a rocas de la Formación Mezcala y de la Formación Balsas. La primera actúa como una barrera impermeable para los acuíferos libres (Formación Cuernavaca, Grupo Balsas y basaltos del CVC) en ciertas zonas.

Este contacto con las unidades suprayacentes consideradas como acuíferos de tipo libre, también originan las descargas de agua subterránea (manantiales), como podría ser el caso del surgimiento Las Fuentes y San Ramón; La Formación Balsas presenta características hidrogeológicas variables, debido a la heterogeneidad litológica de la cual está constituida. En la porción oriental del área de estudio muestra horizontes arcillosos, esta característica impermeable ocasiona confinamiento para las unidades suprayacente, de este modo, incitando la surgencia de los manantiales como Agua Hedionda y Agua Azul, por ejemplo. Al sur del área de estudio, esta unidad presenta características que semiconfinan a las Formaciones Morelos y Cuautla, que en conjunto se pueden considerar como una sola unidad hidrogeológica. Por otra parte, en el área de Cuauchichinola la base de la Formación Balsas se muestra arcillosa e impermeable,



representado por un conglomerado estratificado y compuesto por fragmentos calcáreos, de areniscas, lutitas y en menor cantidad fragmentos de rocas silíceas, cementado por una matriz rojiza calcárea que varía de bien compactada a medianamente compactada. Esta estratificación se observa de gruesa a masiva y también se observa intercalada con capas de limolitas y lutitas impermeables. El contacto entre la base y la cima de esta unidad en esta zona en conjunto con ciertos planos de falla, originan las zonas de descarga de manantiales como son los Ojos de agua de Cuauchichinola; Por otra parte, la Formación Tepoztlán por su distribución caótica, sus horizontes arcillosos y de tobas finas hacen que sea incapaz de almacenar y conducir agua.



**Figura 7.7 Unidades hidrogeológicas propuestas**

**Acuífero semiconfinado.**

Está constituido por la secuencia calcárea del Cretácico, presenta permeabilidad primaria y secundaria, siendo esta última de mayor eficacia (fracturas y disolución). Esta unidad es

la menos explotada en el estado de Morelos. La Formación Xochicalco de acuerdo a su litología y al estilo estructural que muestra (pliegues y fracturas), esta unidad puede considerarse roca almacenadora de agua, sin embargo, también puede mostrarse como una base impermeable en ciertas zonas debido al intenso fracturamiento, ya que estas fracturas son rellenas de material impermeable. Por otra parte, la Formación Morelos y Cuautla pueden ser consideradas como acuíferos semiconfinados, este es originado debido a la carga y características de las unidades litológicas suprayacentes; es decir, el carácter arcilloso de la Formación Mezcala y la unidad arcillosa del Grupo Balsas condicionan este semiconfinamiento, esto posiblemente provoca la descarga del manantial Las Estacas y Palo Bolero, por ejemplo.

Cabe mencionar que las unidades correspondientes a la Formación Morelos, Cuautla y Mezcala en el sector central del área de estudio, en el denominado “Cañón de lobos”, estas presentan un arreglo estructural complejo representado por una serie de pliegues, fallas y cabalgaduras. Estas estructuras en conjunto forman una barrera impermeable que impide el flujo entre el valle de Cuernavaca y el valle de Cuautla-Yautepec. Además, los componentes de dilución presentes en el agua subterránea en ambos valles muestran diferentes características particulares y en este sector central no se observa una mezcla de estos tipos de agua, por lo tanto, esto confirma la idea de la existencia de una barrera hidrogeológica (Prol, 2003).

### **7.5 Condiciones climatológicas e hidrografía en la cuenca de Cuautla-Yautepec.**

De acuerdo a la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, en el acuífero predominan los climas: cálido subhúmedo (Awo) con una temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C. Los valores de precipitación, temperatura media anual y la evaporación potencial son de **961.0 mm, 21.0 °C y 786.8 mm** (CONAGUA, 2013).

La red hidrográfica del área Cuautla-Yautepec define un acomodo muy particular, en la porción norte no existe un arreglo hidrográfico definido, es hasta la ladera de la Sierra Chichinautzin donde se define una red de tipo dendrítica. En la ladera del Volcán Popocatepetl se presenta una red de drenaje tipo radial, que cambia a dendrítica en la parte baja; ambas confluyen a los colectores de la zona, el río Yautepec y el río Cuautla, afluentes del río Amacuzac (CONAGUA, 2013).

### **7.6 Características hidrogeológicas de los manantiales en estudio en el Acuífero Cuautla-Yautepec.**

De acuerdo con la descripción de las unidades hidroestratigráficas del subcapítulo 7.4, se tiene la hipótesis sobre la existencia de tres acuíferos: i) El primero del tipo libre y superior, constituido de sedimentos fluviales poco consolidados, estos afloran al oeste de la Ciudad de Cuautla; y son cubiertos por las arenas gruesas del Cuaternario, intercaladas con los basaltos fracturados y cavernosos (Ramos Leal et al, 2003). Al Sur de la Sierra Chichinautzin, se intercala con brechas volcánicas; En la zona de captura de los manantiales Agua hedionda y Agua Azul, la cual se ubica hacia el noreste de la cuenca,

estos sedimentos fluviales se intercalan con lahares de la Sierra Nevada; iii) un acuítardo y ii) el segundo, un acuífero confinado inferior, constituido por rocas calizas.

Para determinar las características de los manantiales sujetos a estudio se consideró llevar a cabo actividades como la conceptualización de las condiciones hidrogeológicas que controlan el ascenso a la superficie de las descargas de agua subterránea mediante secciones hidrogeológicas y el régimen de los manantiales mediante la determinación de sus caudales, su variación, la temperatura y la composición química e isotópica. A continuación se describen algunos conceptos y las características enunciadas para cada manantial:

### Magnitud de manantiales

Para determinar la magnitud de un manantial, Meinzer (1923), propuso una clasificación por descarga. En la Tabla 7.1, se muestra la magnitud de acuerdo con sus intervalos de descarga de agua subterránea, los caudales determinados durante el primer trimestre de 2018 y los manantiales en estudio:

**Tabla 7.1 Clasificación de los manantiales en estudio.**

Magnitud	Descarga (l/seg)	Caudal medido (l/seg)	Manantial
Primera	> 2,832	6,923.00	Las Estacas
Segunda	283.2 - 2,832	293.00	Agua Azul
		434.00	Las Fuentes
Tercera	28.32 - 283.2	78.30	Agua Hedionda (principal)
		111.00	Ojos de agua*
		276.00	Santa Rosa
Cuarta	6.23 - 28.32	22.57	Las Tortugas
		20.80	Agua Hedionda (albercas)
		9.30	Palo Bolero
Quinta	0.631 - 6.31		La Malinche
Sexta	0.0631 - 0.631		
Séptima	0.008 - 0.0631		
Octava	< 0.008		

- A partir de mayo desapareció

### **7.6.1 Manantial Las Tortugas.**

#### **Localización de las descargas del agua subterránea**

La descarga de agua subterránea conocida como Las Tortugas, se localiza en la porción norte de Itzamatitlán, dentro de la colonia Santa Lucia.

#### **Función del manantial**

La principal función del manantial es el abastecimiento de agua para la agricultura y también se constituye como un lugar de recreo, ocio y esparcimiento en su entorno.

#### **Breve descripción del afloramiento**

En la porción noreste del poblado de Itzamatitlán, sobre sedimentos semiconsolidados, emerge la descarga de agua subterránea de manera ascendente mediante fracturas verticales, formando una forma de una piscina superficial y lenticular.

Cabe señalar, que aproximadamente a 600 m hacia el este, brota otra importante descarga de agua subterránea conocida como Itzamatitlán de cuya agua se abastece el Balneario El Recreo e Itzamatitlan (fuera de servicio).

#### **Geología superficial local**

En la zona del manantial Las Tortugas, solo afloran rocas correspondientes a la Formación Cuernavaca (Figura 7.1) y hacia el oriente cubriendo a esta afloran basaltos del CVC, a profundidad se infieren la presencia de las unidades litológicas mostradas en la columna estratigráfica propuesta para el área de estudio (Figura 7.2).

#### **Orientación de la sección**

La orientación de la sección es acorde con la dirección del flujo subterráneo, tiene una orientación NO-SE (azimut:  $N77.86^\circ$ ), con aproximadamente 8 km de longitud, inicia desde el norte del poblado de Oaxtepec hasta el noroeste del poblado de Itzamatitlán.

#### **Descripción hidrogeológica de la sección**

En los alrededores del manantial, solo afloran rocas de la Formación Cuernavaca y a profundidad se infieren la presencia de la Formaciones Tepoztlán, Mezcala y Morelos.

En la Figura 7.8, se representan a los basaltos y la Formación Cuernavaca que constituyen el acuífero libre, así como una continuidad lateral con una conductividad hidráulica alta, esta continuidad puede verse obstruida al norte por la Formación Tepoztlán. Los sistemas de flujo predominantes son de carácter local e intermedio.

Subyaciendo al acuífero libre, es de esperarse la presencia del acuitardo (Formaciones Mezcala y Balsas), estos sedimentos de baja conductividad hidráulica se pueden encontrar cubriendo imparcialmente al acuífero confinado y/o semiconfinado profundo. Este último con un alto grado de deformación y es constituido principalmente por calizas interdigitadas con horizontes de anhidrita.

### **Régimen del manantial**

El régimen de un manantial se compone del caudal, de las propiedades físicas del agua, específicamente de la temperatura, de la química del agua (Nielzielski, 1993). A continuación, se describen y analizan estos conceptos:

La determinación de la magnitud de la descarga de agua subterránea fue realizada durante el primer trimestre de 2018, el caudal promedio es de 22.57 l/s. El manantial es permanente, su clasificación corresponde a la cuarta magnitud y no se tienen antecedentes sobre la medición de su caudal.

La temperatura del agua medida en el mes de enero y febrero corresponde a 24.9 y 24.5°C, respectivamente. Considerando la temperatura media anual en la cuenca Cuautla-Yautepec de 22°C y la temperatura promedio para el primer bimestre del 2018 de 24.7°C, tenemos una diferencia de 2.7°C. Considerando que la temperatura en las aguas subterráneas es aproximadamente la temperatura media anual más el gradiente geotérmico regional, ya que normalmente la temperatura del subsuelo aumenta 3°C cada 100 m de profundidad (Sánchez San Roman, 2018). Considerando lo anterior, se puede argumentar que estas aguas subterráneas ascienden desde los 100 m de profundidad y probablemente provienen de un sistema de flujo local e intermedio.

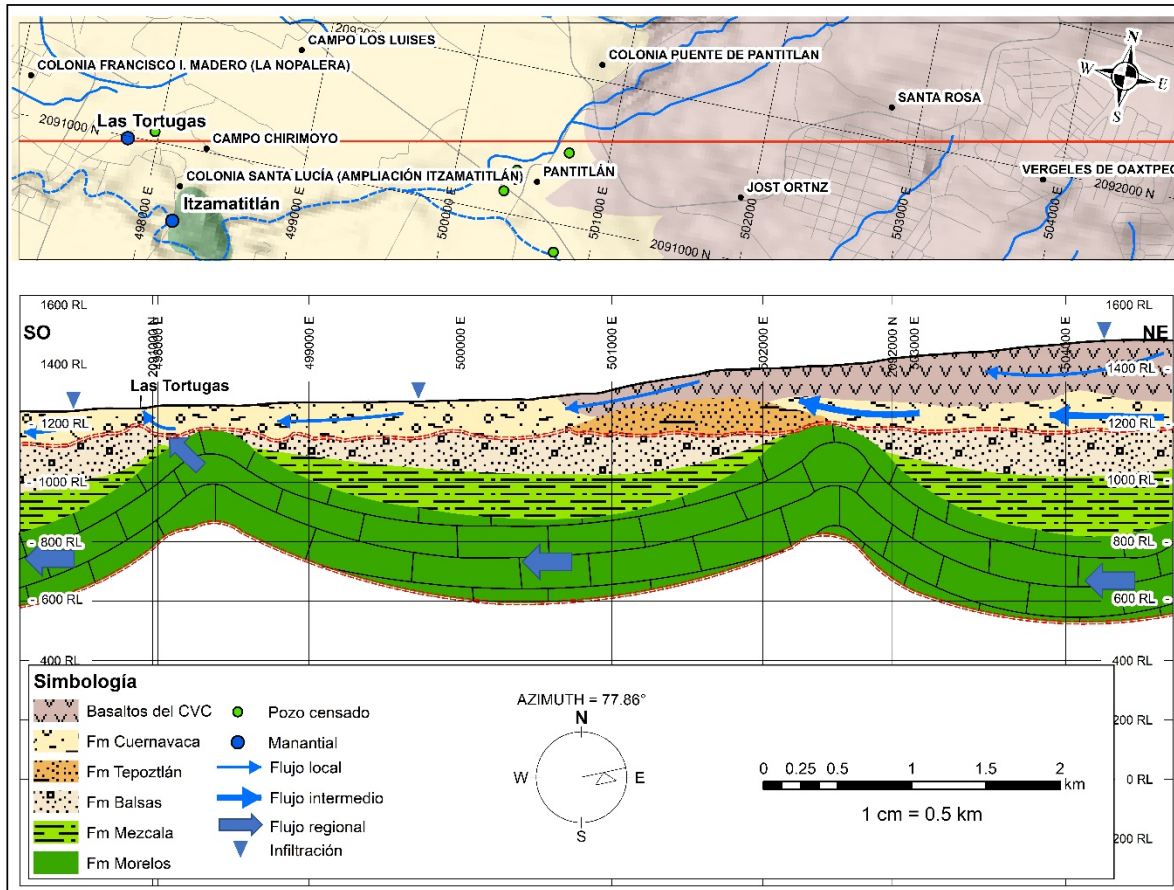
El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 6.28, menor que 7 (valor neutro), que podría clasificarse como ligeramente ácido. La conductividad eléctrica para el primer bimestre de 2018 es de 2,518  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor alto que indica que no es subterránea potable, ya que el agua subterránea potable se clasifica con 1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Cabe señalar que la cantidad de sales disueltas es del orden 1,888.5 mg/L, valor alto que no es adecuado para la irrigación, ya que favorece su impermeabilización.

De acuerdo con el diagrama de Piper, las aguas del manantial Las Tortugas, alimentado con flujos alojados en rocas volcánicas y sedimentarias presentan agua de tipo Sulfatada-Cálcica. Los diagramas de Stiff presentan la misma forma para los manantial Las Tortugas cuyos flujos están en contacto con roca caliza, con altas concentraciones predominantes de  $\text{SO}_4=$  y  $\text{Ca}+$  y también muestra es tipo de agua Sulfatada-Cálcica.

De acuerdo con la determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica, la zona de recarga efectiva del manantial Las Tortugas es entre las cotas 1600-2011 m.s.n.m.



En el manantial Las Tortugas, los tiempos de residencia aparente con ausencia total de tritio son de 5,520 hasta 26,910 años. El tiempo de residencia pudiera confirmar que el sistema de flujo que alimenta esta descarga es del tipo intermedio y/o regional y procede de un acuífero semiconfinado/confinado.



**Figura 7.8 Sección hidrogeológica A (Manantial Las Tortugas).**

### 7.6.2 Manantial La Malinche.

#### Localización de las descargas del agua subterránea

La descarga de agua subterránea conocida como La Malinche, se localiza al sur de Oaxtepec, dentro del Centro Vacacional Oaxtepec, mantiene una relativa cercanía con el río Yautepec.

## **Función del manantial**

La principal función del manantial es el Abastecimiento a núcleos de población en la Colonia Alejandra de Cocoyoc.

## **Breve descripción de los afloramientos**

La descarga perenne del manantial La Malinche ocurre en fracturas verticales que acaban escurriendo sobre las paredes de un pequeño cantil, constituido de una serie de coladas de lava basáltica intercaladas con piroclastos de la misma composición.

## **Geología superficial local**

Las descargas de agua subterránea se ubican hacia la margen derecha del río Yautepec, donde se observan depósitos de aspecto lahárico, cubiertos indistintamente por coladas de lava basáltica del CVC y donde a través de fracturas ocurren las descargas de agua subterráneas captadas y almacenadas en un depósito, de donde se conducen a través de tubería de acero hacia la Colonia Alejandra en Cocoyoc.

## **Orientación de la sección**

La sección se construyó de manera paralela con la dirección preferencial del flujo subterráneo, con una orientación NE-SO (azimut: N52.99°), desde el noreste del Centro Vacacional Oaxtepec, hasta el noroeste del Poblado de Cocoyoc.

## **Descripción hidrogeológica de la sección**

En la porción superior de la sección afloran depósitos de aspecto lahárico, cubiertos indistintamente por coladas de lava basáltica del CVC (Figura 7.9). En la sección estas unidades se muestran con una continuidad lateral, con una conductividad hidráulica alta, debido a las vesículas, el medio fracturado de los basaltos del CVC y el medio granular poroso de las formaciones volcánicas del Terciario, que constituyen un acuífero libre superior, donde probablemente se tengan sistemas de flujos local e intermedio. Subyaciendo se infiere la presencia de La Formación Balsas y subsecuentemente la Formación Mezcala ambas fungen como una barrera impermeable para el acuífero libre y además confinan a la Formación Morelos que constituye al acuífero Confinado y/o semiconfinado inferior, donde se tiene la hipótesis de la existencia de un sistema de flujo de carácter regional.

## **Régimen del manantial**

La medición de las descargas de agua subterránea se efectuó durante el primer trimestre de 2018, el caudal promedio reportado es de 3.5 l/s. El manantial es permanente, su clasificación corresponde a la quinta magnitud y los antecedentes proporcionados por el encargado de operar y suministrar agua a la colonia Alejandra en Cocoyoc, son que proporcionaba un caudal aproximado de 18 l/s antes del sismo de septiembre de 2017.

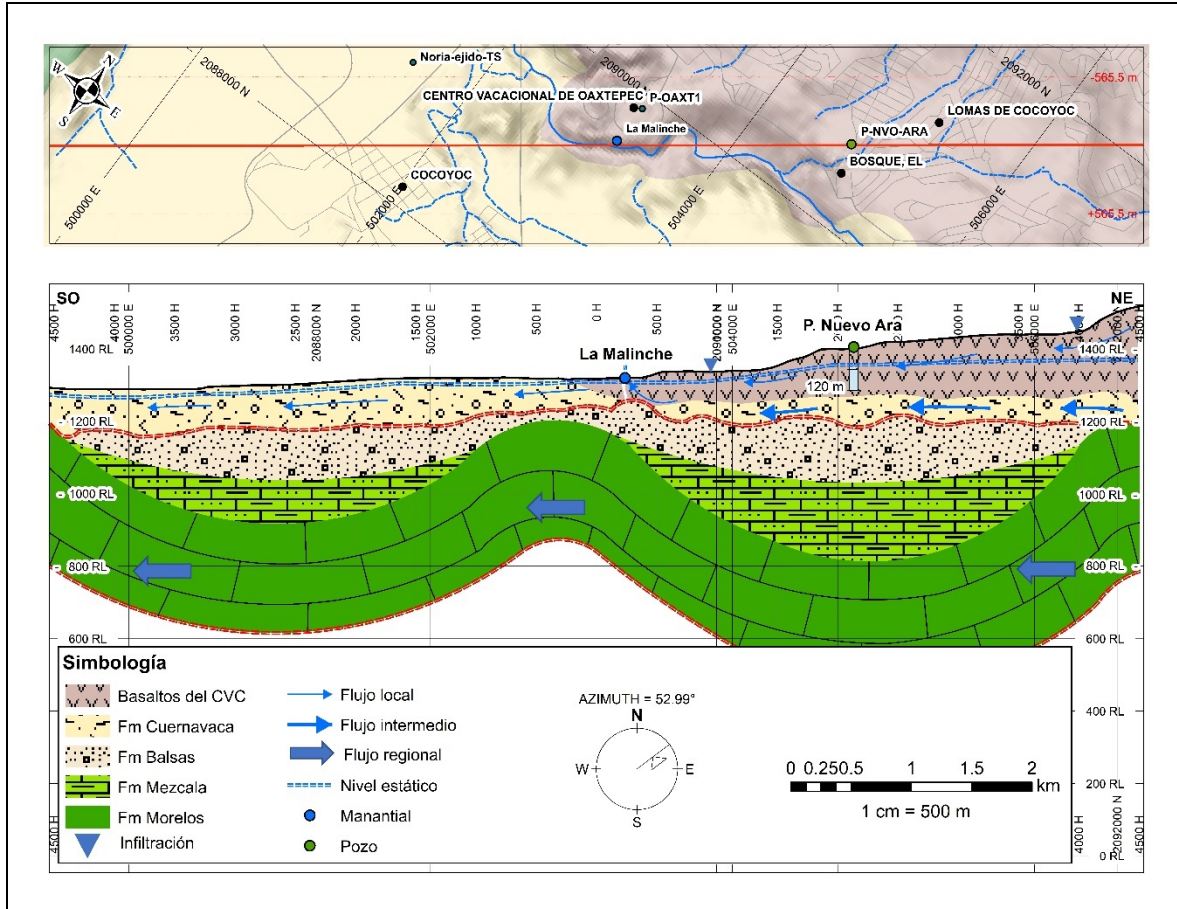
La temperatura del agua medida en el mes de febrero corresponde a 21.6°C, que es menor a la temperatura media anual en la cuenca-Yautepec de 22°C. La temperatura del agua del manantial sugiere una circulación relativamente somera, lo que puede corroborarse con el contenido del análisis bacteriológico, que demuestra estar siendo impactado por la contaminación.

El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 6.20, menor que 7 (valor neutro), que podría clasificarse como ácido e indicar que el agua es de reciente infiltración. La conductividad eléctrica para el primer bimestre de 2018 es de 371  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor que indica que es subterránea potable, ya que el agua subterránea potable se clasifica con 1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

De acuerdo con el diagrama de Piper, las aguas subterráneas que ocurren en el manantial La Malinche son alimentados por flujos que transitan en rocas volcánicas y presenta una familia de aguas de tipo Bicarbonatada-Cálcica. De acuerdo con los diagramas de Stiff, el manantial La Malinche, indica que son del tipo de agua Bicarbonatada-mixta o Bicarbonatada-Cálcica. Los flujos locales en este manantial presenta concentraciones de iones mayoritarios relativamente menores a las concentraciones de los manantiales de la familia Sulfatada-Cálcica.

La determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica, indica que la zona de recarga efectiva del manantial La Malinche es en cotas arriba de los 2,260 m.s.n.m. de altitud.

En el manantial La Malinche, los tiempos de residencia de los flujos de agua subterránea que ocurren son de tres a 30 años. Lo anterior confirma que el sistema de flujo que alimenta esta descarga de agua subterránea es del tipo local.



**Figura 7.9 Sección hidrogeológica B (Manantial La Malinche).**

### 7.6.3 Manantiales Agua Hedionda y Agua Azul.

#### Localización de las descargas del agua subterránea

Las descargas de agua subterránea conocidas como Agua Hedionda y Agua Azul, se localizan en Cuautla, hacia el oriente de la zona urbana.

El balneario Agua Hedionda tiene por lo menos dos descargas de agua subterránea: la primera descarga, considerada como la principal que descargaba 350 l/s antes del sismo y actualmente 80 l/s suministra agua a la alberca Grande y los remanentes son conducidos a través de un canal hacia las zonas de cultivo. La segunda descarga se ubica a 100 m hacia el noroeste de la primera, esta abastece a las 8 albercas particulares, los remanentes son tirados al desagüe.

La descarga de agua subterránea conocida como Agua Azul, se ubica aproximadamente a 3 km al suroeste de Agua Hedionda, descarga hacia la margen izquierda del río Cuautla, a unos 100 del eje del cauce, en varios puntos dentro de una pequeña propiedad privada que forma una alberca rustica de 30 cm de altura.

### **Función del manantial**

La principal función del manantial Agua Hedionda es el abastecimiento de agua para la agricultura y también se constituye como un lugar de recreo, ocio y esparcimiento en su entorno. La principal función del manantial Agua Azul es el abastecimiento de agua para la agricultura y también se constituye como un lugar de recreo, ocio y esparcimiento en su entorno, con un carácter rustico.

### **Breve descripción de los afloramientos**

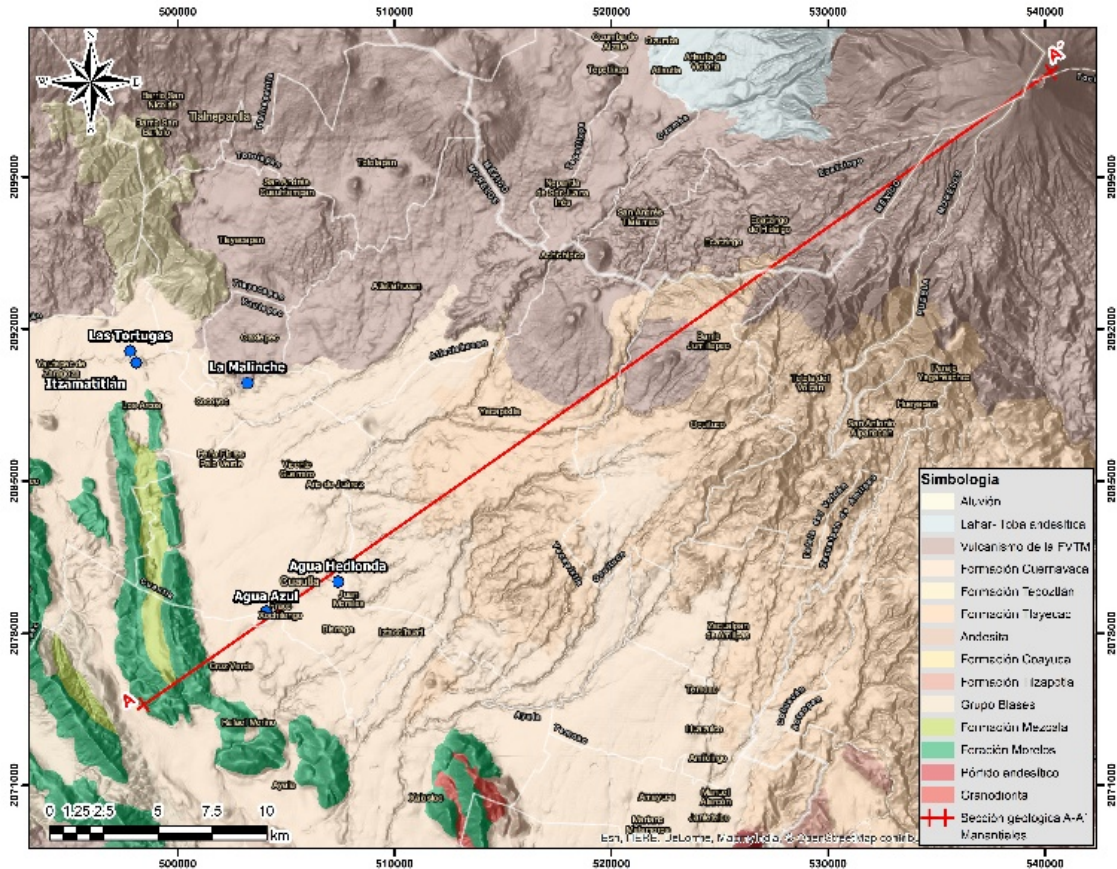
Las descargas de agua subterránea en Agua Hedionda emergen a través de la Formación Tlayecac y es expuesta a lo largo de fracturas verticales.

Las descargas de agua subterránea en el sitio denominado Agua Azul emergen de manera ascendente a través de la Formación Tlayecac. Las descargas son difusas, presenta una forma de Ciénega. Estas descargas fluyen incorporándose a los escurrimientos del río Yautepec.

### **Geología superficial local**

La geología superficial (Figura 7.10) del acuífero Cuautla-Yautepec está representada principalmente por rocas volcánicas de la FVTM (basaltos del CVC y productos del volcán Popocatépetl), estas son subyacidas por rocas volcaniclásticas de las Formaciones Cuernavaca y Tlayecac que se distribuyen principalmente al centro. Las unidades litológicas mencionadas tienen como base a La Formación Morelos, sin embargo su arreglo estructural le permite aflorar al suroeste de la sección.





**Figura 7.10 Geología superficial (Agua Hedionda-Agua Azul).**

### Orientación de la sección

Sección regional orientada NE-SO (azimut:  $N58.15^\circ$ ), elaborada a partir del flanco NE del volcán Popocatepetl, pasando sobre los poblados Ocixaltepec, Cuautla y culmina hasta las estructuras sedimentarias en el poblado de Anenecuilco (Figura 7.11).

### Descripción hidrogeológica de la sección

De acuerdo con la conceptualización (Figura 7.11), la sección esquematiza los flujos provenientes de la Sierra Nevada, la cual se considerada como la principal zona de recarga para la porción noreste del acuífero de Cuautla-Yautepec. El agua infiltrada en la sierra circula por el medio fracturado de los materiales volcánicos hasta alcanzar lateralmente al medio granular de las secuencias volcanoclásticas y/o también se profundiza hasta incorporarse al acuífero confinado inferior. El acuífero libre es probablemente subyacente por la Formación Balsas, la cual actúa como barrera confinante y siendo esta la responsable de la descarga de los manantiales Agua Hedionda y Agua

Azul. Como base de estas unidades se encuentra subyaciendo la Formación Morelos actuando como un acuífero semiconfinado.

De acuerdo con la verificación de aprovechamientos (IMTA, 2018), existen norias de 40-60 m de profundidad y los pozos productores tiene profundidades entre 100 m (pozo CBETIS-Cuautla) y 200 m en pozos de la SOAPS (pozo ampliación Reforma, Tepetates, etc). Por lo que podemos decir que el acuífero libre superior puede tener un espesor de hasta 200 m (Figura 7.11).

## Régimen del manantial

### Agua Hedionda

La medición de las descargas de agua subterránea se efectuó durante el primer trimestre de 2018, el caudal promedio reportado es de 76.25 l/s y 20.80 l/s en el sitio de las albercas particulares. Los manantiales son permanentes, su clasificación corresponde a la tercera y cuarta magnitud, respectivamente. Existen antecedentes, antes del sismo del 2017 descargaba aproximadamente 350 l/s. El manantial de las albercas particulares aparentemente no sufrió cambios, esta descarga no tiene antecedentes.

La temperatura del agua medida en el mes de febrero corresponde a 26.4°C. Considerando la temperatura media anual en la cuenca Cuautla-Yautepec de 22°C, tenemos una diferencia de 4.4°C y considerando que la temperatura en las aguas subterráneas es aproximadamente la temperatura media anual más el gradiente geotérmico regional, ya que normalmente la temperatura del subsuelo aumenta 3°C cada 100 m de profundidad (Sánchez San Roman, 2018), por lo que se puede argumentar que estas aguas subterráneas ascienden desde una profundidad mayor que los 100 m y probablemente provienen de un sistema confinado.

El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 6.26, menor que 7 (valor neutro), que podría clasificarse como ligeramente ácido. La conductividad eléctrica para el primer bimestre de 2018 es de 2,310  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el cual es un valor alto que indica que no es agua subterránea potable, ya que el agua subterránea potable se clasifica con 1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Cabe señalar que la cantidad de sales disueltas es del orden 1,732.5 mg/L, valor alto que no es adecuado para la irrigación.

De acuerdo con el diagrama de Piper, las aguas del manantial Agua Hedionda, presentan agua de tipo Sulfatada-Cálcica. Los diagramas de Stiff presentan la misma forma para el manantial Agua Hedionda cuyos flujos están en contacto con roca caliza, con altas concentraciones predominantes de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  y también muestra que el tipo de agua corresponde a la familia Sulfatada-Cálcica.

La determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica, muestra que la zona de recarga efectiva del manantial Agua Hedionda se ubica entre las cotas 1600-2011 m.s.n.m.

En el manantial Agua Hedionda, los tiempos de residencia aparente con ausencia total de tritio es de 5,520 hasta 26,910 años. Lo cual pudiera sugerir que esta descarga de agua subterránea proviene de un acuífero confinado y el sistema de flujo que lo alimenta pudiera ser del tipo intermedio y/o regional.

### **Agua Azul**

La medición de las descargas de agua subterránea fue realizada durante el primer trimestre de 2018, determinándose un caudal promedio de 316.7 l/s. El manantial es permanente y la clasificación de su descarga corresponde a la segunda magnitud. No existen antecedentes sobre mediciones del caudal.

La temperatura del agua medida en el mes de febrero corresponde a 21.1°C, que es casi equivalente a la temperatura media anual en la cuenca Cuautla-Yautepec (22°C). La temperatura del agua descargada en este sitio podría sugerir que su circulación es relativamente somera, lo que podría corroborarse con el contenido de coliformes fecales, que demuestra estar siendo impactado por la contaminación, aunque también esta contaminación puede atribuirse a las actividades antropogénicas.

El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 6.77, menor que 7 (valor neutro), que podría clasificarse como ácido y/o ligeramente ácido e indicar que el agua es de reciente infiltración y/o con aportaciones de aguas subterráneas provenientes del acuífero libre (aguas del río Cuautla y/o apantle). La conductividad eléctrica para el primer bimestre de 2018 es de 1,019 µS/cm, valor que es prácticamente el indicado en la clasificación para subterránea potable (1,000 µS/cm).

De acuerdo con el diagrama de Piper, las aguas subterráneas que ocurren en el sitio denominado como Agua Azul presentan agua de tipo Bicarbonatada-Cálcica. Los diagramas de Stiff para el manantial Agua Azul, indican que son del tipo de agua Bicarbonatada-mixta o Bicarbonatada-Cálcica.

De acuerdo con la determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica, la zona de recarga efectiva del manantial Agua Azul es entre las cotas 1600-2011 m.s.n.m.

En el manantial Agua Azul, los tiempos de residencia aparente con ausencia total de tritio son de 5,520 hasta 26,910 años. Con la información anterior, podemos concluir que el sistema de flujo que ocurre en este sitio probablemente corresponda a uno del tipo intermedio.



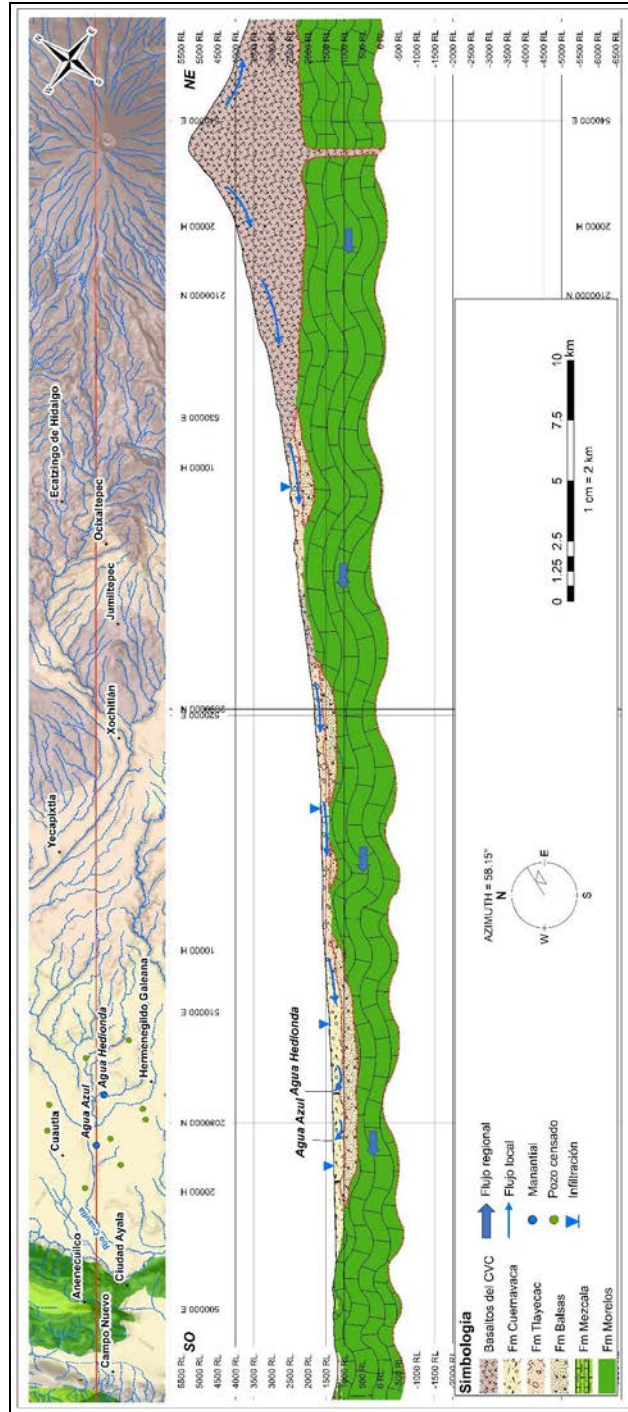


Figura 7.11 Sección hidrogeológica C (Agua Hedionda-Agua Azul).

#### **7.6.4 Manantial Las Estacas.**

##### **Localización de las descargas del agua subterránea**

Estas descargas de agua subterránea se ubican hacia el sur del acuífero Cuautla-Yautepec, en el valle del río Yautepec, a aproximadamente 3 km al sur del poblado de Ticumán y dentro de las instalaciones del Centro Vacacional Las Estacas. La principal descarga de agua subterránea se conoce como el borbollón y da origen a una corriente que forma parte del Centro Vacacional y que transita hacia la zona de cultivos.

##### **Función del manantial**

La principal función del manantial es el abastecimiento de agua para la agricultura y también se constituye como un lugar de recreo, ocio y esparcimiento en su entorno.

##### **Orientación de la sección**

Esta sección se realizó con una orientación NE-SO (azimut: N29.74°), iniciando al noreste del poblado de Ticumán, cruzando por el centro del manantial Las Estacas y terminando al suroeste en el anticlinal de la sierra Ticumán.

##### **Geología superficial local**

Alrededor del manantial Las Estacas afloran tres unidades litológicas: depósitos aluviales, depósitos continentales de la Formación Balsas y las rocas sedimentarias de la Formación Morelos, siendo esta última la que controla el área de descarga del manantial.

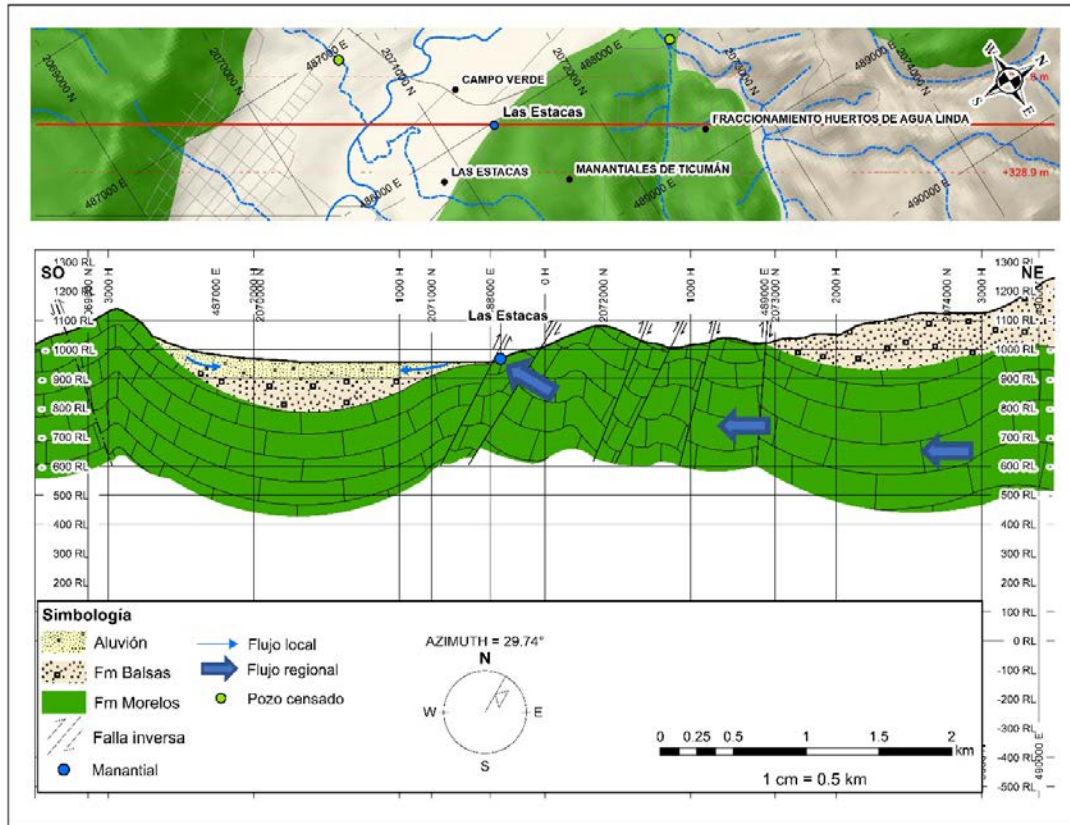
##### **Descripción hidrogeológica de la sección**

La sección (Figura 7.12) muestra tres unidades litológicas que afloran superficialmente, al norte se observa la Formación Balsas cubriendo discordantemente a la Formación Morelos, se infiere su presencia de esta unidad en el Valle de Ticumán subyaciendo a depósitos aluviales del Cuaternario. La Formación Morelos aflora al centro y sur de la sección. Esta unidad se muestra intensamente deformada, representada por una serie de pliegues muy fracturados y afectados por un sistema de fallas inversas y/o cabalgaduras con echados principalmente al noroeste. Esta serie de fallas inversas muestran una orientación muy similar entre ellas, con planos casi verticales y la mayoría con planos inclinados (69-82°), posiblemente conectadas a través de un mismo plano de bajo ángulo. Y la tercera unidad se observa en el sector suroeste, un horizonte de depósitos aluviales rellenando el valle, el cual presenta buenas características acuíferas y además de ser la unidad más explotada en este sector.



## Breve descripción de los afloramientos

Las Estacas es un manantial kárstico localizado en una parte topográficamente baja, al noreste en los inicios del valle de Ticumán. El flujo ocurre en un karst maduro o extremo. La red de los conductos kársticos o el dren por el cual emerge la descarga de agua subterránea es una fractura abierta, con oquedades que se intercalan en la matriz de la roca, producto de la disolución a través de sus fisuras. Este dren presenta una elevada permeabilidad y parece ser la vía preferencial del flujo de agua subterránea en este sector, esto se corrobora debido a que mantiene su descarga de manera continua incluso en periodos de estiaje, dando origen a un río de caudal considerable.



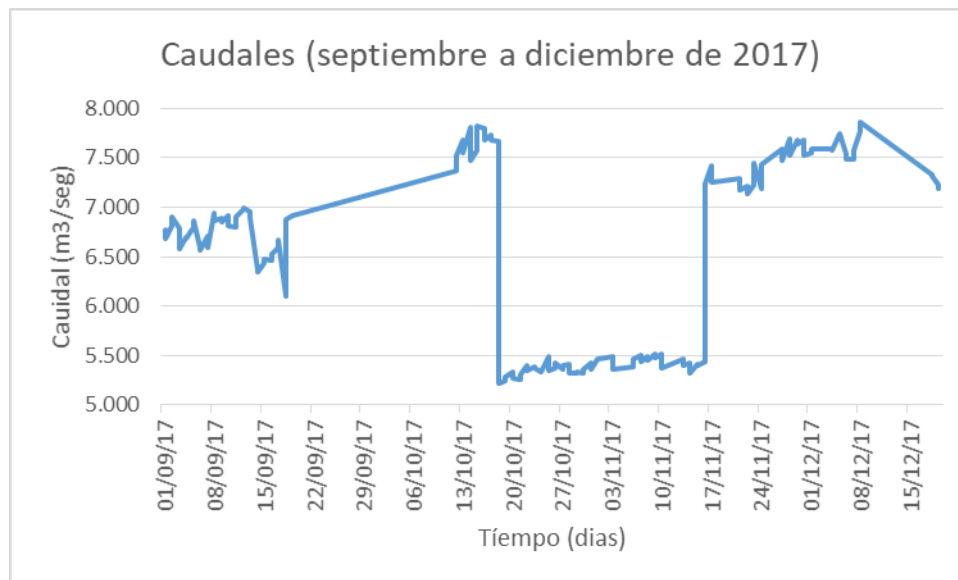
**Figura 7.12 Sección hidrogeológica D (Las Estacas)**

## Régimen del manantial

El IMTA realizó la medición de las descargas de agua subterránea durante el primer trimestre de 2018, utilizando el método de aforo Área-velocidad, el caudal promedio es de

6,757.6 l/s. El manantial es permanente, su clasificación corresponde a la primera magnitud.

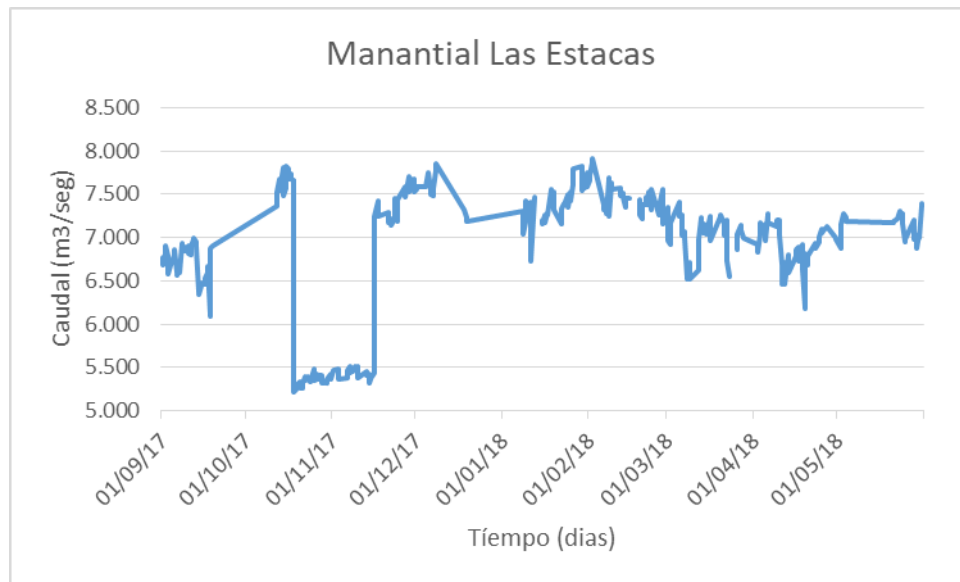
La dirección técnica del Organismo de Cuenca Balsas a través de la Subdirección de Redes de Medición y Sistemas de la CONAGUA, Dirección Local Morelos, realiza mediciones diariamente. Datos de aforos realizados en la estación hidrométrica Las estacas, proporcionados por esta dependencia muestran que el día 19 de septiembre de 2017 a las 6:15 hrs. se realizó el aforo con un caudal de 6,912 l/s, reanudando mediciones el día 12 de octubre de 2017 a las 6:10 hrs. Reportando un caudal de 7,369 l/s. Considerando los aforos de la CONAGUA, se tiene un aumento de 457 l/s en un lapso de 24 días posterior al sismo. En la Figura 7.13 se muestra la evolución de caudales del primero de septiembre al 15 de diciembre de 2017. Se observa un aumento lineal después del sismo del 19 de septiembre, aunque realmente esta linealidad se debe a la falta de mediciones en ese intervalo. Cabe resaltar que a partir del 18 de octubre de 2017 se afora un caudal de 5,216 l/s, el que se mantiene hasta el 16 de noviembre de 2017 con 5,439 l/s. El día siguiente 17 de noviembre de 2017 el caudal aforado se “normaliza” con la tendencia actual reportando un caudal de 7,242 l/s (se desconoce la causa y probablemente se deba a efectos posteriores al sismo).



**Figura 7.13 Evolución del caudal de septiembre a diciembre de 2017 (CONAGUA, 2018 sismo)**

En la Figura 7.14 se muestra la evolución de los caudales aforados (CONAGUA, 2018), del primero de septiembre de 2017 al 31 de mayo de 2018. En el grafico podemos observar un aumento a partir del 19 de septiembre hasta el 16 de noviembre de 2017, el descenso de octubre-noviembre, el ascenso siguiendo la tendencia posterior al sismo,

para después mostrar una tendencia a la baja hasta el 31 de mayo del 2018, probablemente atribuible a la temporada de estiaje.



**Figura 7.14 Evolución del caudal de septiembre 2017 a mayo 2018 (CONAGUA, 2018).**

Con respecto a los parámetros físicos, la temperatura del agua subterránea que emerge en el “borbollón” medida en el mes de febrero corresponde a 22.6°C, que es superior a la temperatura media anual en la cuenca Cuautla-Yautepec (22°C) por 0.6°C. La temperatura del agua del manantial pudiera indicar una circulación relativamente somera (a 20 m de profundidad, de acuerdo con el gradiente geotérmico promedio), lo que pudiera ser susceptible de contaminación en su tránsito, aunque los resultados del análisis bacteriológico muestran un valor menor que las 10 NMP/100 ml, que probablemente pudieran relacionarse con la actividad recreativa.

El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 6.91, menor que 7 (valor neutro), que puede clasificarse como ligeramente ácido e indicar que el agua es de reciente infiltración, con aportaciones de flujos locales del acuífero libre. La conductividad eléctrica para el primer bimestre de 2018 fue de 1,250 µS/cm, valor que rebasa ligeramente el valor indicado para subterránea potable (1,000 µS/cm).

De acuerdo con el diagrama de Piper, las aguas del manantial Las Estacas presentan aguas que pertenecen a la familia Sulfatada-Cálcica.

Los diagramas de Stiff presentan la misma forma para los manantiales cuyos flujos están en contacto con roca caliza, con altas concentraciones predominantes de  $SO_4^-$  y  $Ca^+$ : Palo Bolero, Agua Hedionda e Las Tortugas. El manantial Las Estacas muestra la misma

forma, sin embargo contienen concentraciones relativamente mucho menores que los manantiales anteriormente mencionados. Todos ellos son del tipo de agua Sulfatada-Cálcica.

De acuerdo con la determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ ), la zona de recarga efectiva del manantial Las Estacas es entre las cotas 1600-2011 m.s.n.m.

En el manantial Las Estacas, los tiempos de residencia aparente con ausencia total de tritio son de 5,520 hasta 26,910 años. Lo anterior pudiera indicar que los flujos de agua que alimentan a la descarga de agua subterránea en el Borbollón de las Estacas son los del tipo intermedio y/o regional.

## **7.7 Condiciones climatológicas e hidrografía en la cuenca de Cuernavaca.**

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, en la porción centro-sur del acuífero predomina el clima (A)C(w1) y (A)C(w2) semicálido subhúmedo del grupo C, con temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor de 18°C y temperatura del mes más caliente mayor de 22 °C. En la región norte se presentan los climas: C(w2) templado, subhúmedo, con temperatura media anual entre 12 y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C y temperatura media del mes más cálido de 22 °C, y Cb'(w2) semifrío, subhúmedo con verano fresco y prolongado, con temperatura media anual entre 5 y 12 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18 °C, temperatura de mes más cálido menos de 22°C. Una pequeña porción en la parte sur del acuífero presenta el clima Awo cálido subhúmedo, con temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de 1278 mm y 19.4°C respectivamente. De igual manera, con respecto a la evapotranspiración, se obtuvo un valor de 874.7 mm anuales.

El régimen pluvial presenta en términos generales dos períodos de ocurrencia, uno de julio a septiembre que correspondiente a la temporada de verano que es cuando se registran los valores más altos y otro de lluvias invernales que abarca de octubre a enero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan la región.

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 18 “Río Balsas”, Subregión Hidrológica “Medio Balsas”, cuenca del Río Amacuzac. En la cuenca del río Amacuzac se encuentran las subcuencas hidrográficas de los ríos Apatlaco y Tembembe. El río Apatlaco tiene una dirección general de noroeste a suroeste, nace en las inmediaciones de la ciudad de Cuernavaca, en las estribaciones de la Sierra Chichinautzin. La región

hidrológica comprende el 6% de la masa continental del territorio mexicano, entre los paralelos 17 00' y 20 00' de latitud norte y los meridianos 97°30' y 103°15' de longitud oeste, abarca porciones de varias regiones económicamente importantes del centro-occidente y centro-sur de México, a través de ocho estados de la república. Sobre el cauce del río Apatlaco existen 4 presas derivadoras que abastecen a 921 hectáreas de superficie agrícola pertenecientes al Módulo de Riego “Alto Apatlaco”, también existe el módulo de riego “Las Fuentes” la cual cuenta con una superficie agrícola de riego igual a 4,265 hectáreas regadas principalmente por el agua descargada por 6 manantiales. En ambos módulos se cuenta con una amplia red de canales, con diversos sistemas de distribución y aplicación. Los tipos de drenaje varían de paralelos a dendríticos; en la porción norte no se define un patrón de drenaje debido a la alta permeabilidad de las rocas de la Formación Chichinautzin.

## **7.8 Características hidrogeológicas de los manantiales en estudio en el Acuífero Cuernavaca.**

De acuerdo con la descripción de las unidades hidroestratigráficas del subcapítulo 7.4, en el valle de Cuernavaca, se mantiene la hipótesis sobre la existencia de dos acuíferos, separados por un acuífero: i) El primero del tipo libre y superior, constituido por rocas volcánicas del Oligoceno (Riolita Tilzapotla), Mioceno (andesitas, Dacitas, Tobas y lahares), del Plioceno (Basaltos, piroclastos, tobas y brechas de la Formación Zempoala, las Cruces y depósitos clásticos de la Formación Cuernavaca; ii) El acuífero, constituido por lutitas y depósitos areno-arcillosos; y iii) el segundo acuífero Confinado e inferior, constituido por rocas calizas. En este sistema acuífero, se tienen sistemas de flujo del tipo “local”, que dan origen a las descargas de agua subterránea en los sitios como el manantial Chapultepec, Las Fuentes y El Salto. Y desde el punto de vista geológico ocurren en el contacto del Grupo Chichinautzin con las Formaciones subyacentes.

Para determinar las características de los manantiales sujetos a estudio en este acuífero, de la misma manera que en acuífero Cuautla-yautepec se consideró llevar a cabo la conceptualización de las condiciones hidrogeológicas que controlan el ascenso a la superficie de las descargas de agua subterránea mediante secciones hidrogeológicas y el régimen de los manantiales mediante la determinación de sus caudales, su variación, la temperatura y la composición química e isotópica. A continuación en los siguientes apartados se describen las características enunciadas para cada manantial:

### **7.8.1 Manantial Las Fuentes.**

#### **Localización de las descargas del agua subterránea**

La descarga de agua subterránea conocida como Las Fuentes, se localiza al noroeste de Jiutepec, dentro del Balneario del mismo nombre.



## **Función del manantial**

La principal función del manantial es el Abastecimiento a núcleos de población del municipio de Jiutepec, así como del uso recreativo ya que es un balneario rustico.

## **Orientación de la sección**

La sección se elaboró con una orientación NO-SE (azimut: N174.3°). Desde la porción norte de Jiutepec, pasando al centro por el balneario La Fuentes y culmina en las estructuras sedimentarias al sur del Ejido Chapultepec.

## **Geología superficial local**

En la zona del manantial Las Fuentes afloran: escasos depósitos aluviales que cubren indistintamente a basaltos del Campo Volcánico Chichinautzin, es el medio fracturado de estos el que condicionan la surgencia del agua subterránea.

## **Descripción hidrogeológica de la sección**

La sección (Figura 7.15) muestra que superficialmente, al centro y noroeste esta mayormente cubierta por derrames basálticos del CVC, estos en la porción sureste se observan cubiertos por depósitos aluviales o pie de monte. En el extremo sureste se observan rocas pertenecientes a la secuencia sedimentaria del Cretácico, muestran un complejo arreglo estructural, representado por un cabalgamiento, se observa como la Formación Morelos se sobrepone a la Formación Mezcala, siendo esta una de las estructuras iniciales de la barrera hidrogeológica “Cañón de Lobos”.

Los derrames basálticos deben ser subyacidos por rocas de la Formación Cuernavaca y en conjunto con el aluvión representan el acuífero libre, además entre ellas mantienen un flujo lateral continuo con una alta conductividad hidráulica. Subyaciendo al acuífero libre se encuentran rocas de la Formación Morelos y Mezcala, el contacto entre estas es por medio de un fallamiento, este se infiere como la continuación norte de las estructuras observadas al sureste en el área correspondiente a la Calera Chica.

En la porción superior de la sección, se muestra el flujo del agua subterránea en el acuífero libre superior constituido por los depósitos aluviales y las rocas del CVC que podrían ser de un sistema de flujo local e intermedio. En las rocas calizas de la Formación Morelos se esquematiza el flujo del agua subterránea de un sistema de flujo de carácter regional.

## **Breve descripción de los afloramientos**

El flujo que sustenta la descarga del agua subterránea en el sitio conocido como Las Fuentes, proviene del acuífero libre constituido por los basaltos y las rocas de la Formación Cuernavaca y probablemente se encuentra con alguna barrera o estrato de rocas impermeables pertenecientes a la Formación Mezcala, la cual condiciona al flujo subterráneo a tomar una dirección ascendente y a conducirse por medio el medio fracturado contenido en los basaltos hasta ser expuesta de manera difusa en la superficie.

Otra causa podría ser que emerge por la influencia de flujos ascendentes provenientes del acuífero confinado profundo.

### **Régimen del manantial**

Las descargas de agua subterránea en las Fuentes, son de carácter perenne. La medición de las descargas de agua subterránea se efectuó durante el primer trimestre de 2018, el caudal promedio reportado es de 590.25 l/s y se clasifica como de segunda magnitud.

La temperatura del agua subterránea medida en el mes de febrero corresponde a 15.6°C, que es 3.8°C menor que la temperatura media anual en la cuenca de Cuernavaca (de 19.4°C). La temperatura del agua del manantial se clasifica como “aguas frías” y pudiera estar indicando una circulación relativamente somera, aunque los resultados del análisis bacteriológico muestran un valor menor que las 10 NMP/100 ml, que probablemente esté relacionado con la actividad recreativa del Balneario.

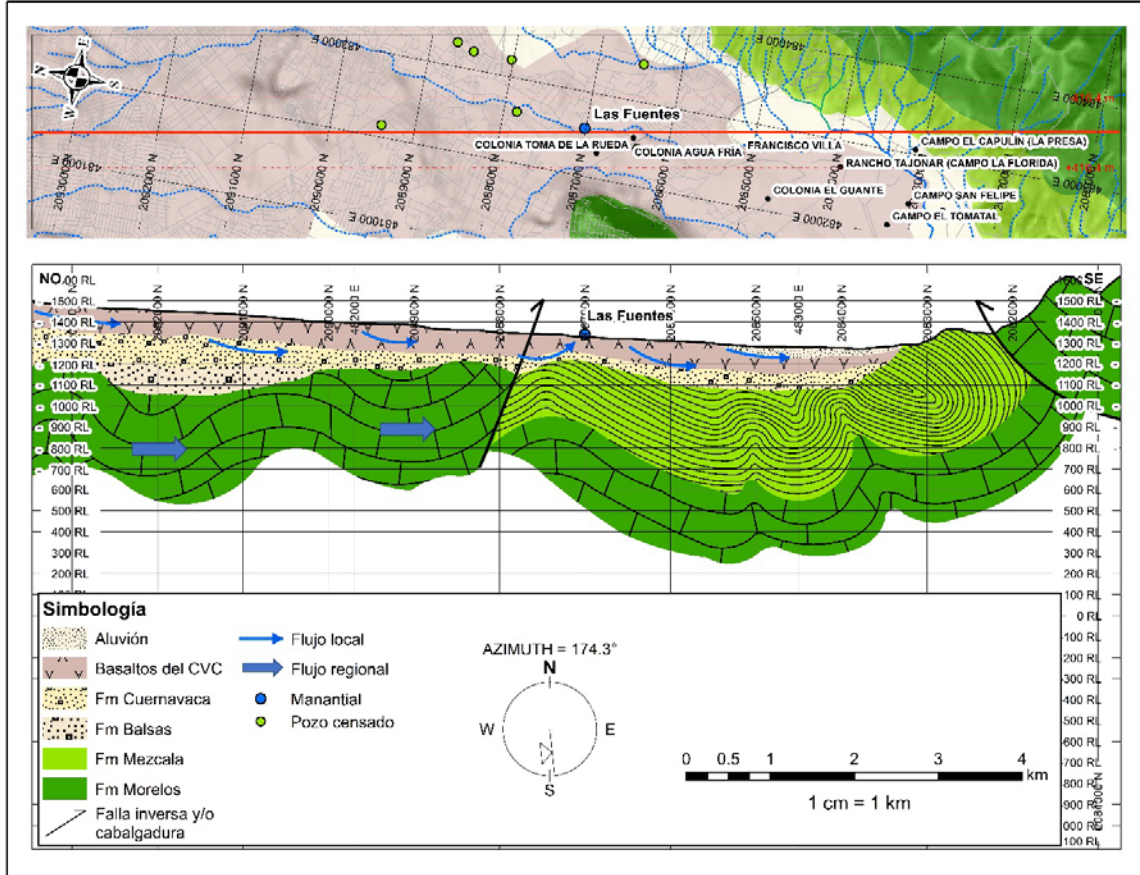
El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 7.38, valor relativamente mayor que 7 (valor neutro), que podría sugerir ha tenido tiempo para favorecer la interacción roca-agua y asimilar los diferentes minerales y sales que caracterizan el acuífero en estudio, lo que le da un pH ligeramente alcalino. La conductividad eléctrica para el primer trimestre de 2018 fue de 135  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor indicado para subterránea potable, ya que la clasificación para subterránea potable esta entre 30-1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

De acuerdo con el diagrama de Piper, las aguas de los manantiales alimentados con flujos alojados en rocas volcánicas presentan agua de tipo Bicarbonatada-Cálcica, como el manantial La Malinche; el manantial Las Fuentes pertenece a la familia bicarbonatada-mixta.

Los diagramas de Stiff presentan formas diferentes, indicando que el manantial Las fuentes es del tipo de familias de agua Bicarbonatada-mixta o Bicarbonatada-Cálcica. Los flujos de estos manantiales presentan concentraciones de iones mayoritarios relativamente menores a las concentraciones de los manantiales de la familia Sulfatada-Cálcica.

De acuerdo con la determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ ), la zona de recarga efectiva del manantial Las Fuentes es en cotas arriba de los 2,260 m.s.n.m. de altitud.

En el manantial Las Fuentes, los tiempos de residencia de los flujos de agua subterránea que ocurren son de tres a 30 años. Lo anterior nos indica que los flujos de agua que alimentan a la descarga de agua subterránea en Las Fuentes son los del tipo local.



**Figura 7.15 Sección hidrogeológica E (Las Fuentes).**

## 7.8.2 Manantiales Santa Rosa-San Ramón.

### Localización de las descargas del agua subterránea

Las descargas de agua subterránea conocidas como San Ramón (después del sismo sin agua) y Santa Rosa, se localizan al este de Xochitepec. El manantial San Ramón, descargaba hasta antes del sismo dentro de las instalaciones del Balneario del mismo nombre y el manantial Santa Rosa descarga dentro de una propiedad privada a aproximadamente 1000 m al sur de San Ramón.

### Función del manantial

La principal función del manantial San ramón consistía en el uso recreativo (balneario) y agrícola. El manantial Santa Rosa se encuentra dentro de una propiedad privada que hace suponer es utilizado para servicios y el uso agrícola.

## Orientación de la sección

La sección regional se ubica en la porción occidental del área de estudio, orientada NO-SE (azimut: N167.3°) y trazada al noroeste de la Sierra Chichinautzin, pasando por Cuernavaca, Tezoyuca y finaliza al sureste de Xochitepec (Figura 7.18).

## Geología superficial local

Afloran tres unidades litológicas: los basaltos del Campo Volcánico Chichinautzin (CVC) son los de mayor cobertura sobreyaciendo a rocas de la Formación Cuernavaca, constituida principalmente por depósitos fluviales, flujos de escombros y avalanchas de escombros, intercalados con horizontes netamente tobáceos y depósitos aluviales.

## Descripción hidrogeológica de la sección

En la sección hidrogeológica se ilustran los flujos provenientes de la Sierra Chichinautzin, debido a que se estima que es la principal zona de recarga del acuífero Cuernavaca.

En la porción superior de la sección se esquematizan tres unidades litológicas: los basaltos del Campo Volcánico Chichinautzin (CVC), la Formación Cuernavaca y el aluvión que constituyen al acuífero libre, con espesores de 250 m, 100 m y 150 m, en la porción izquierda, central y derecha de la sección, respectivamente. Iniciando al noroeste con un considerable espesor de flujos de lava y secuencias de piroclastos que adelgazan hacia el sur, principalmente de composición basáltica correspondientes al CVC, su porosidad es debido al alto fracturamiento y a las abundantes vesículas presentes. Se estima que el movimiento del agua subterránea en este acuífero libre corresponde a sistemas de flujo local e intermedio.

Subyaciendo al acuífero libre se infiere la presencia de las unidades que constituyen al acuífero confinado, funcionando como barreras impermeables para el acuífero libre y además de confinar a la secuencia del cretácico inferior. La base de esta sección es la Formación Morelos, representa el acuífero confinado y/o semiconfinado, además de ser la unidad hidrogeológica menos explotada en la región.

## Breve descripción de los afloramientos

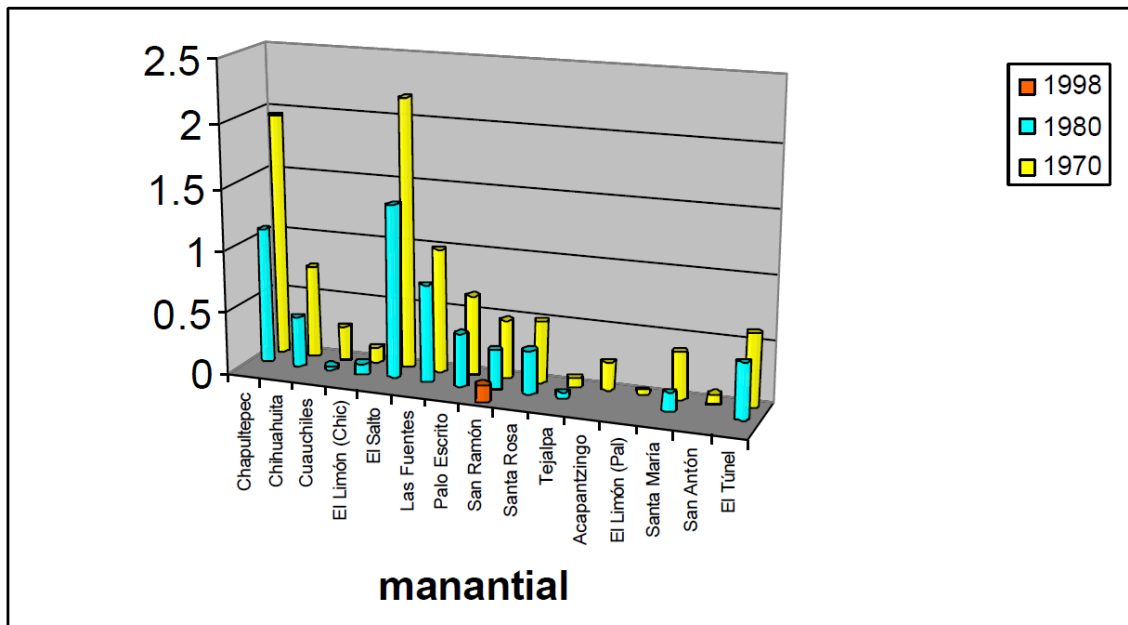
El área donde descargaba el manantial San Ramón, emergía de manera difusa sobre fracturas en basaltos casi verticales, se observan en un sistema irregular rellenas de arenas las de mayor grosor y otras son rellenas de arcillas compactadas. Se estima que su principal aporte ocurría del acuífero libre, los cuales viajan de manera lateral y a profundidad deben toparse con estructuras de la Formación Mezcala, este cambio de permeabilidad obliga a que el flujo lateral ascienda hasta encontrar y habituarse con las fracturas de los basaltos, de este modo, emergiendo hasta la superficie.

Un esquema similar a este debe esperarse para el área de descarga del manantial Santa Rosa, debido a la relativa cercanía con la zona de San Ramón y debido a factores antrópicos no fue posible describir en campo la manera en que emerge hacia la superficie. Sin embargo, es posible que también descargue en un ambiente fracturado de los basaltos del CVC.

### Régimen del manantial

#### San Ramón

La descarga del agua subterránea en San Ramón desapareció durante el sismo ocurrido en septiembre del 2017, motivo por el cual no fue posible determinar sus parámetros de campo y la composición del agua. De la información recabada en el documento de la determinación de la disponibilidad del agua subterránea para el acuífero Cuernavaca (CONAGUA, 2002), se menciona que el caudal del manantial San Ramón había disminuido por las nuevas perforaciones, mostrando la evolución de las descargas en los manantiales del acuífero Cuernavaca del 1970 a 1980 y en el caso del manantial San Ramón se presenta la evolución de 1970, 1980 y 1998 (Figura 7.16).



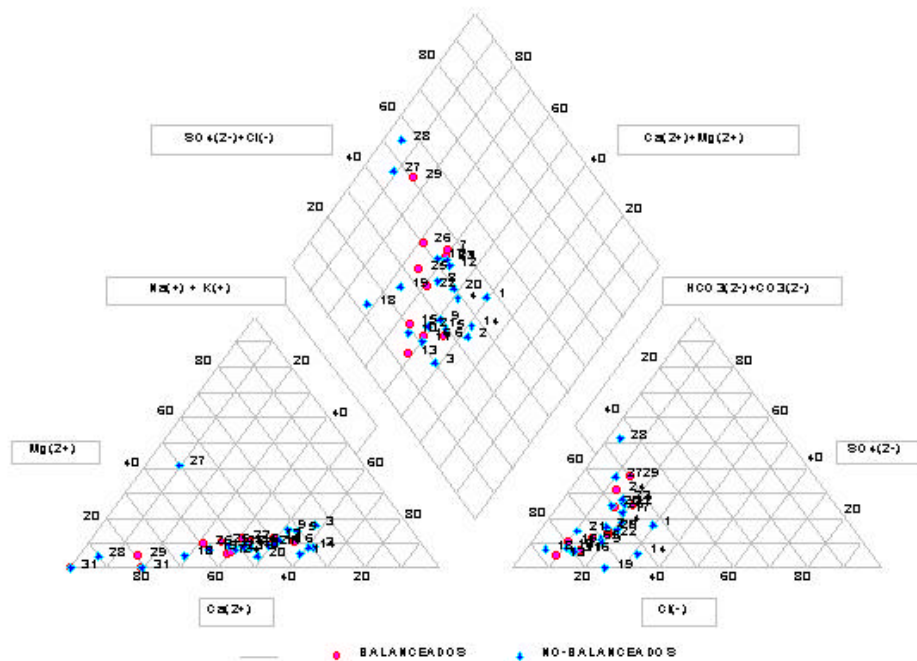
**Figura 7.16 Evolución de la descarga de manantiales (m<sup>3</sup>/s) localizados en el acuífero Cuernavaca, durante el periodo de 1970 a 1980 (Fuente: Servicios Geológicos, 1970 y TACSA, 1981).**

De la figura se estimar aproximadamente que el caudal en San Ramón ha disminuido de 500 l/s (1970) a 250 l/s (1980) y 150 l/s en 1998.





Con respecto a la hidrogeoquímica, la CONAGUA (2002), menciona lo siguiente: Utilizando las concentraciones relativas de los iones mayores se pueden identificar las familias de agua que se definen para la zona acuífera del valle de Cuernavaca, dicha distribución se presenta en la Figura 7.17. En general, se identifican tres familias de agua para el valle de Cuernavaca, todas ellas pertenecientes al tipo bicarbonatada, observando para la porción Norte del acuífero, en área más cercana a la zona de recarga de la sierra de Chichinautzin, una familia de agua del tipo bicarbonatada sódica-potásica. Esta familia evoluciona hacia una del tipo bicarbonatada mixta en la porción media del acuífero. Finalmente para la zona de salida, en la porción Sur del acuífero, se presenta una familia de agua del tipo bicarbonatada cálcica. La evolución hidrogeoquímica contrasta con la muestra del manantial San Ramón, ya que es la única muestra de agua que no se asocia con las familias de agua bicarbonatadas. La descarga natural del manantial San Ramón se asocia a una familia de agua del tipo sulfatada cálcica.



**Figura 7.17 Diagrama de Piper para clasificar las familias de agua (CONAGUA, 2002).**

### Manantial Santa Rosa

Las descargas de agua subterránea en el sitio denominado como Santa Rosa, son de carácter perenne. La medición de las descargas de agua subterránea se efectuaron

durante el primer trimestre de 2018, el caudal promedio es de 285 l/s y se clasifican como de tercera magnitud.

La temperatura del agua subterránea medida en el mes de febrero corresponde a 20°C, que es ligeramente superior que la temperatura media anual en la cuenca Cuernavaca de 19.4°C (CONAGUA, 2013). Considerando el gradiente geotérmico regional (3°C/100 m), el agua subterránea circula y emerge de aproximadamente 20 m de profundidad, esta circulación es relativamente somera y por lo tanto vulnerable a la contaminación. Lo anterior se corrobora con los resultados del análisis bacteriológico que muestran un valor menor que las 10 NMP/100 ml, que probablemente esté relacionado con las infiltraciones de agua residual gradiente arriba y/o producto de las actividades de la propiedad privada.

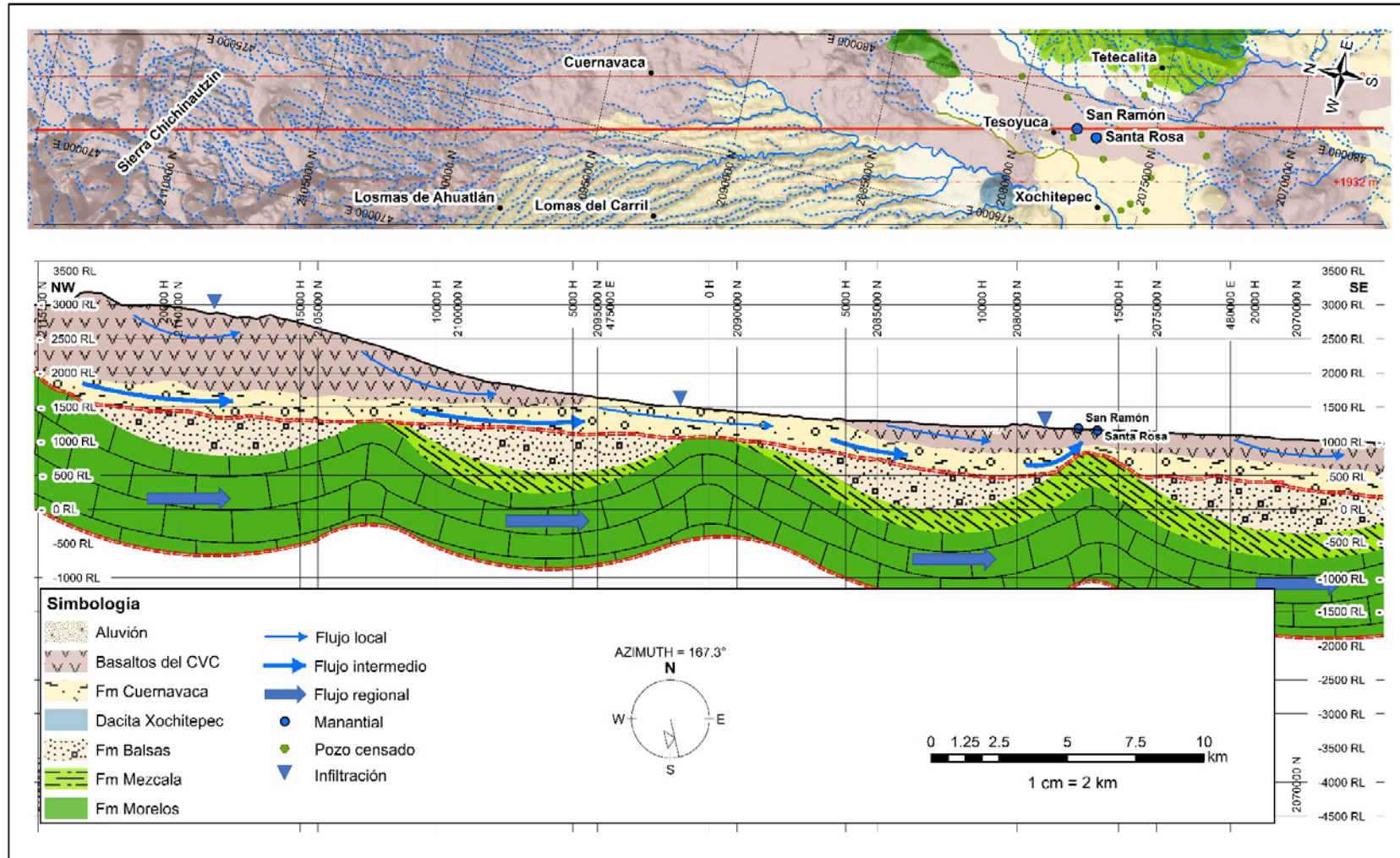
El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 7.00, valor neutro. La conductividad eléctrica medida durante el primer trimestre de 2018 fue de 1,160  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor ligeramente superior al indicado en la clasificación para subterránea potable (30-1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

De acuerdo con el diagrama de Piper, el agua subterránea que ocurre en el sitio denominado como Santa Rosa presenta agua de tipo Sulfatada-Cálcica.

El diagrama de Stiff muestra que el manantial Santa Rosa es del tipo de familias de agua Sulfatada-Cálcica, sin embargo contienen concentraciones mucho menores que los demás manantiales estudiados. Estas diferencias en la composición química se atribuye a que los sistemas de flujo involucrados es a través de rocas de origen volcánico fracturados, donde su movimiento es muy dinámico.

De acuerdo con la determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ ), la zona de recarga efectiva del manantial santa Rosa es en cotas arriba de los 2,260 m.s.n.m. de altitud.

En el manantial Santa Rosa, los tiempos de residencia de los flujos de agua subterránea que ocurren son de 5,520 a 26,910 años. Lo anterior nos indica que los flujos de agua que alimentan a la descarga de agua subterránea en Santa Rosa son los del tipo intermedio y/o regional.



**Figura 7.18 Sección hidrogeológica F (San Ramón-Santa Rosa)**

### **7.8.3 Manantial Palo Bolero.**

#### **Localización de las descargas de agua subterránea**

Las descargas de agua subterránea conocidas como Palo Bolero, se localizan al oeste de Xochitepec, dentro de las instalaciones del Balneario del mismo nombre. Cabe señalar que la principal descarga de agua subterránea que abastecía a las albercas desapareció totalmente. Existe otra descarga de agua subterránea cercana al que desapareció y es el actualmente abastece a las albercas, manteniendo en operación al balneario.

#### **Función del manantial**

La principal función del manantial es el recreativo.

#### **Orientación de la sección**

Sección elaborada al noroeste del poblado San Miguel de la Unión, en el centro atraviesa el fraccionamiento Xochitepec y culmina al sureste del balneario Palo Bolero, presenta una orientación NO-SE con un azimut N160.3° (Figura 7.19).

#### **Geología superficial local**

Alrededor del manantial afloran tres unidades litológicas: en los límites noroeste y sureste se observan rocas de la Formación Cuernavaca, representan la cima de la secuencia de esta sección. Cubren discordantemente a la Formación Balsas y a las calizas de la Formación Xochicalco (considerada base de la Formación Morelos). Las rocas de la Formación Balsas se encuentran en el centro de esta secuencia, muestran una estratificación imperfecta y puede observarse que sobreyacen discordantemente a las rocas sedimentarias del Cretácico, las cuales son la base de esta secuencia.

#### **Descripción hidrogeológica de la sección**

La unidad en la cima de la columna de esta sección corresponde a rocas de la Formación Cuernavaca, funge como un acuífero libre superior, el cual debido a sus características granulares mantiene una continuidad lateral, con una conductividad hidráulica alta. Subyaciendo al acuífero libre, se observa a la Formación Balsas (acuitardo), estos sedimentos de baja conductividad hidráulica cubren imparcialmente al acuífero confinado y/o semiconfinado profundo correspondiente a las deformadas rocas de la Formación Morelos, esta es deformada por una serie de pliegues que se observan intensamente fracturados y son afectadas por múltiples fallas inversas que muestran similitud en echados, con buzamientos principalmente al noreste y con planos inclinados (57 a 76°).

#### **Breve descripción de los afloramientos**

Este manantial es de carácter perenne y de origen kárstico, el dren por el cual emerge son fracturas contenidas en las laminaciones de los depósitos orgánicos que posiblemente están



conectados con los flujos provenientes de los canales de disolución del acuífero kárstico. Se encuentra a niveles topográficamente bajos y emerge de manera difusa cerca del cauce del río Cuentepec.

En la zona del manantial Palo Bolero, el cauce del río Cuentepec es controlado por una brecha de fricción, que corresponde a una falla generada durante el plegamiento de la Formación Morelos. Se infiere que sobre el mismo plano se desarrolló un sistema kárstico, el cual presenta un estado maduro, se observa una galería colapsada dejando a la vista los depósitos de travertino intercalados con laminaciones de depósitos de materia orgánica, reemplazada por carbonato de calcio y arcillas.

### **Régimen del manantial**

Las descargas de agua subterránea en Palo Bolero, son de carácter perenne. La medición de la descarga de agua subterránea se efectuó durante el primer trimestre de 2018, el caudal promedio obtenido es de 5.4 l/s y su clasificación corresponde a la cuarta magnitud.

La temperatura del agua subterránea medida en el mes de febrero corresponde a 22.1°C, que es mayor que la temperatura media anual en la cuenca del valle de Cuernavaca de 19.4°C, teniendo una diferencia de 0.7°C y que considerando el gradiente térmico regional de 3°C/100 m, esta agua subterránea descargada pudiera emerger desde una profundidad mayor que los 20 m. Del análisis bacteriológico, esta descarga de agua subterránea no presenta coliformes totales por lo que cumple con la NOM-245-SSA1-2010, requisitos sanitarios y calidad del agua establecido para albercas.

El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 6.57, muy aproximado al valor neutro, que podría sugerir que el sistema de flujo subterráneo que alimenta esta descarga es muy dinámico y que tuvo lugar una corta interacción agua-roca al transitar en un medio constituido por rocas fracturadas. La conductividad eléctrica medida durante el primer trimestre de 2018 fue de 2,160  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor superior al indicado en la clasificación para subterránea potable (30-1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

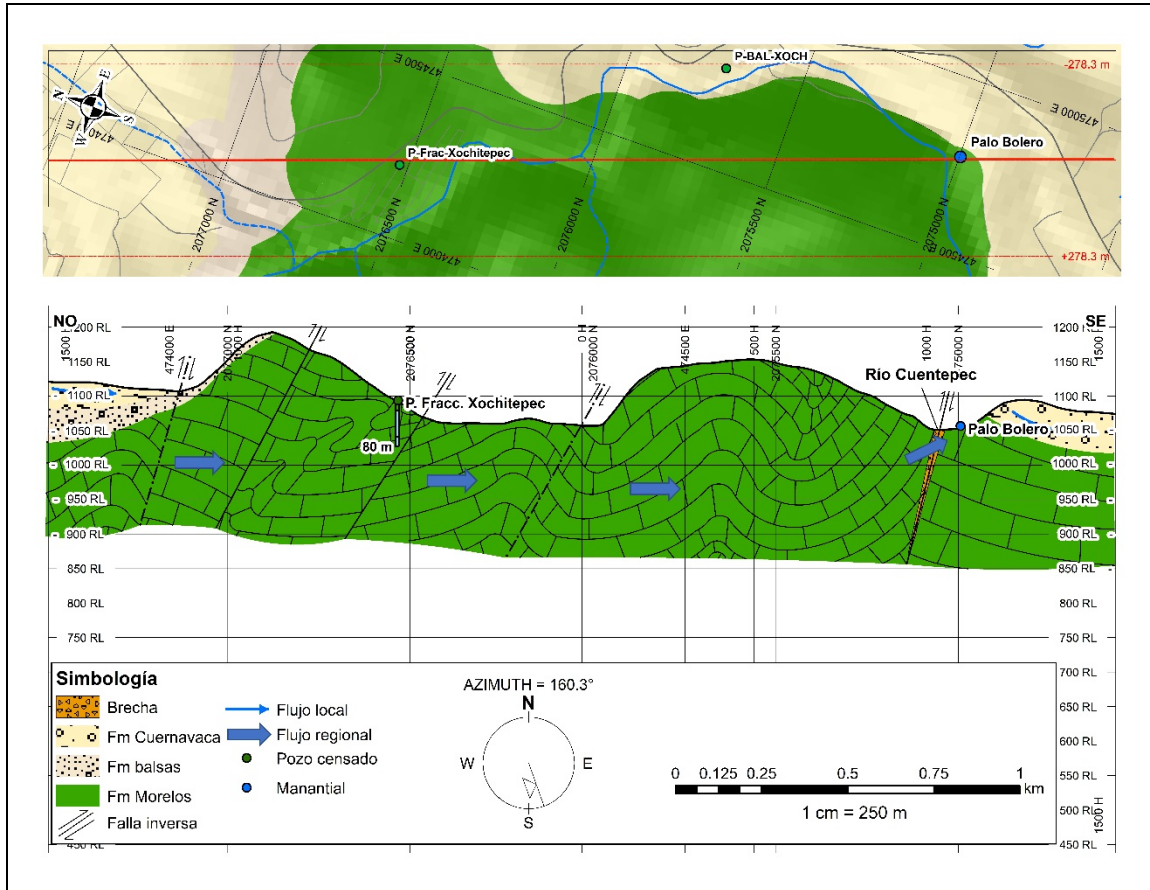
De acuerdo con el diagrama de Piper, el agua subterránea que ocurre en el sitio denominado como Palo Bolero presenta agua de tipo Sulfatada-Cálcica.

Los diagramas de Stiff presentan la misma forma para los manantiales cuyos flujos están en contacto con roca caliza, con altas concentraciones predominantes de  $\text{SO}_4^{=}$  y  $\text{Ca}^{+}$ : La descarga de agua subterránea que prevalece en Palo Bolero es del tipo de agua Sulfatada-Cálcica.

De acuerdo con la determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ ), la zona de recarga efectiva del manantial Palo Bolero es en cotas arriba de los 2,260 m.s.n.m. de altitud.



En el manantial Palo Bolero, los tiempos de residencia de los flujos de agua subterránea que ocurren son de 5,520 a 26,910 años. Lo anterior nos indica que los flujos de agua que alimentan a la descarga de agua subterránea son los del tipo intermedio y/o regional.



**Figura 7.19 Sección hidrogeológica G, Palo Bolero.**

## 7.9 Condiciones climatológicas e hidrografía en la cuenca de Zacatepec.

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, el clima predominante en la zona del acuífero Zacatepec es el cálido subhúmedo (Awo), con temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C, precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm, lluvias de verano con índice precipitación/temperatura menor de 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero. Con estos datos y

utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de 890 mm y 23.7 °C respectivamente. De igual manera, con respecto a la evapotranspiración, se obtuvo un valor de 803.7 mm anuales.

El régimen pluvial presenta en términos generales dos períodos de ocurrencia, uno de julio a septiembre que correspondiente a la temporada de verano que es cuando se registran los valores más altos y otro de lluvias invernales que abarca de octubre a enero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan la región.

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 18 “Río Balsas”, Subregión Hidrológica “Medio Balsas”, cuenca del Río Amacuzac. Comprende las subcuencas hidrográficas de los ríos Tembembe, Apatlaco, Yautepec y Cuautla. La región hidrológica comprende el 6% de la masa continental del territorio mexicano, entre los paralelos 17 00' y 20 00' de latitud norte y los meridianos 97°30' y 103°15' de longitud oeste, abarca porciones de varias regiones económicamente importantes del centro-occidente y centro-sur de México, a través de ocho estados de la república.

La infraestructura hidráulica incluye 29 presas derivadoras que abastecen parcialmente a 14,400 ha de tres módulos de riego, más una tercera parte del módulo Alto Apatlaco, pertenecientes al Distrito de Riego No. 16. El patrón de drenaje que se define en todo el valle es de tipo dendrítico, principalmente en las zonas donde afloran depósitos clásticos continentales de la Formación Cuernavaca. Además, en esta área también se encuentra el único lago morelense del sistema de drenaje del Alto Amacuzac, el lago de Tequesquitengo; el mayor cuerpo de agua de la entidad.

#### **7.10 Características hidrogeológicas del manantial en estudio en el Acuífero Zacatepec.**

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero tipo libre, heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido vertical como horizontal, constituido en su porción superior por los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, así como areniscas y conglomerados intercalados con basaltos y andesitas. El espesor de los sedimentos puede alcanzar algunas centenas de metros hacia el centro de los valles. La porción inferior se aloja en una secuencia de calizas marinas de las formaciones Morelos y Cuautla que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y/o disolución. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas calcáreas al desaparecer el fracturamiento a profundidad. Esta unidad puede presentar condiciones de semiconfinamiento o confinamiento debido a que se encuentra sobreyacida por las lutitas y limolitas de la Formación Mexcala.

Para determinar las características del manantial los Ojos de agua en Cuauchichinola se consideró realizar la conceptualización hidrogeológica del área que controlan la ocurrencia de las descargas de agua subterránea mediante una sección hidrogeológica y la descripción

del régimen del manantial mediante la determinación de sus caudales, su variación, la temperatura y la composición química e isotópica. A continuación se describen las características enunciadas:

### **7.10.1 Manantial los Ojos de agua.**

#### **Localización de las descargas de agua subterránea**

Las descargas de agua subterránea conocidas como los Ojos de agua, se localizan aproximadamente a 3 km al sureste del poblado de Cuauchichinola.

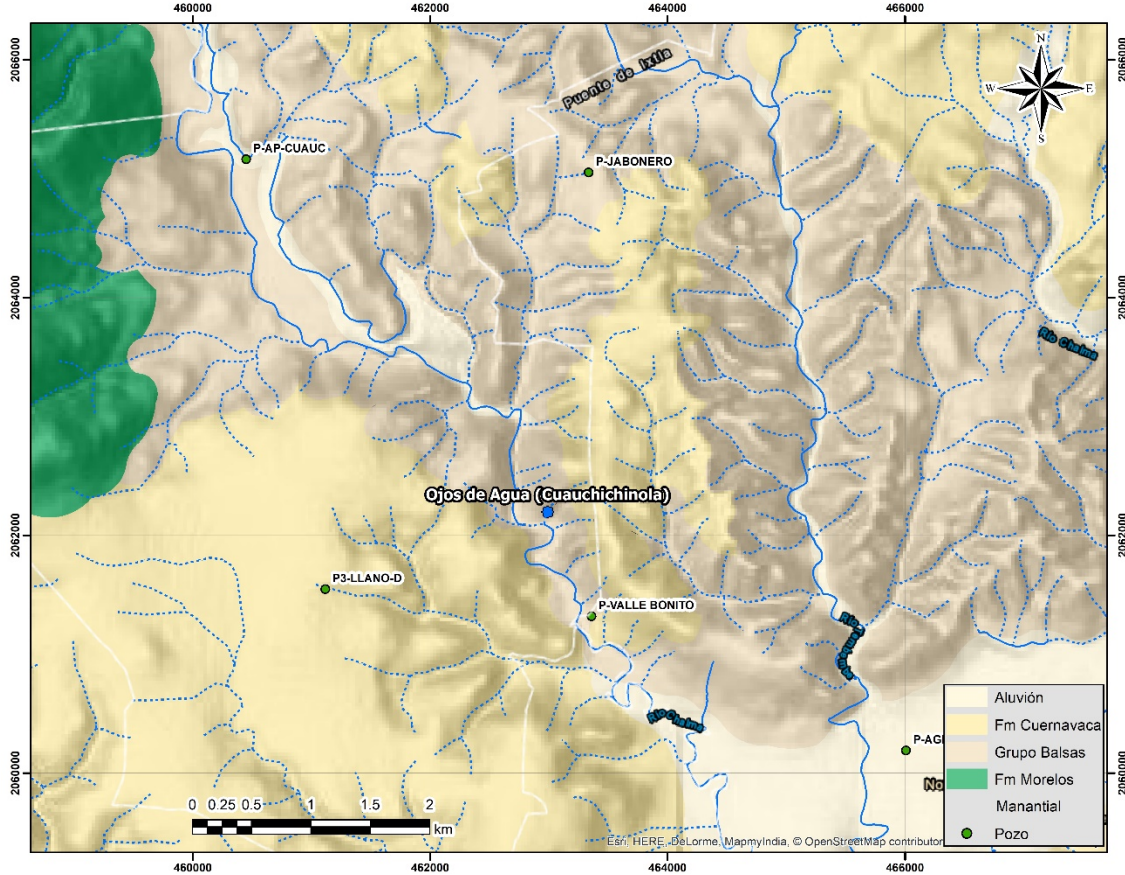
#### **Función del manantial**

La principal función del manantial es el de abastecimiento a agricultura en Puente de Ixtla.

#### **Geología superficial local**

La geología superficial (Figura 7.20) en la zona del manantial los Ojos de agua de Cuauchichinola, está representada principalmente por sedimentos continentales denominados como Formación Balsas y Formación Cuernavaca cubiertos indistintamente por depósitos aluviales.

Aquí la Formación Balsas se observa constituida por clastos calcáreos sostenidos por una matriz deleznable, con menor presencia de arcillas a diferencia del resto de las otras zonas donde este grupo es impermeable (SARH, 1980).



**Figura 7.20 Mapa geológico en la zona del manantial los Ojos de agua.**

### Orientación de la sección

La sección hidrogeológica H, se ubica en el extremo sur occidental del área de estudio (Figura 7.1), es una sección compuesta con una orientación NE-SO, que inicia al noreste del poblado de Cuauichichinola, en el pozo El jabonero, cruzando por la zona de los manantiales denominados como “los Ojos de agua”, finalizando al sureste en el pozo del poblado Valle Bonito (Figura 7.20).

### Descripción hidrogeológica de la sección

En la zona de los ojos de agua de Cuauichichinola se tiene la hipótesis sobre la existencia de dos unidades acuíferas; la primera representada por la Formación Balsas, la Formación Cuernavaca y los depósitos aluviales, que constituyen un acuífero superior del tipo libre, considerado de gran espesor (no se cuenta con información); la segunda a mayor



profundidad está constituido por la secuencia de calizas de la Formación Morelos que es el principal constituyente del acuífero semiconfinado profundo (Figura 7.21).

En la sección, superficialmente corta a tres unidades litológicas consideradas constituyentes del acuífero libre, representadas por un depósito aluvial que cubre indistintamente a las demás unidades, también corta pequeños horizontes correspondientes a la Formación Cuernavaca. Subyaciendo a ambas unidades mencionadas se encuentran discordantemente rocas de la Formación Balsas, en esta zona esta unidad presenta características peculiarmente diferentes.

Localmente se observa conformada por dos unidades, la cima permeable corresponde a un conglomerado calizo que tiene en menor proporción fragmentos volcánicos y su matriz es deleznable de tonos rojizos. Por otra parte, la base es impermeable y también es un conglomerado estratificado, compuesto por múltiples fragmentos líticos, cementado por una matriz rojiza calcárea que varía de bien compactada a medianamente compactada, esta capa es intercalada con estratos de limos y areniscas. Otro rasgo que ayuda a diferenciar estas unidades son la presencia de vetillas rellenas de calcita que solo afectan a la unidad inferior. La deformación y erosión que muestra la Formación Balsas tiene un grado considerablemente mayor respecto a las otras unidades, la característica estructural más importante es una serie de fallas normales con echados al noreste y sureste principalmente. Este fallamiento posiblemente crea zonas lineares de porosidad secundaria más alta que las que presentan las unidades litológicas, por lo tanto, estos planos pueden actuar como los canales favoritos del flujo subterráneo causando descargas.

### **Breve descripción de los afloramientos**

Antes del sismo de septiembre de 2017, ocurrían tres descargas: dos en el área del balneario “Paraíso escondido”, que desaparecieron y la tercera que descargaba dentro de una cavidad rocosa y de donde era bombeada hacia un canal donde se conducía el agua hasta la zona de cultivos de los ejidatarios de Puente de Ixtla. Cabe señalar que esta descarga de agua subterránea desapareció totalmente a partir del 12-14 de mayo de 2018.

La tercera descarga que prevaleció hasta mediados del mes de mayo de 2018, ocurría a través de un plano de falla, en materiales de la Formación Balsas. Suponemos que es la descarga principal y que pudiera ascender a través de materiales vulcano sedimentarios que constituyen el acuífero libre superior.

El acuífero libre es el principal aporte del flujo de los Ojos de agua de Cuauchichinola, probablemente fluye a lo largo del contacto estratigráfico de las unidades de la Formación Balsas, fluye de manera lateral hasta toparse con una zona de fallas, este cambio de porosidad provoca que el agua subterránea tenga movimiento a través de ellas, hasta exponerse a la superficie como descargas difusas a lo largo de los mismo planos de falla.



## Régimen del manantial

La descarga de agua subterránea “principal” en los Ojos de agua, era de carácter perenne. La descarga de agua subterránea siempre se ha almacenado en la cavidad rocosa y antes del sismo del 2017 se extraía por medio de tres bombas verticales, a través de sus tuberías de succión de aproximadamente 3 metros de longitud. Antes del sismo era posible extraer agua mediante las 3 bombas con un caudal de más de 300 l/s, posteriormente solo era posible extraer agua mediante dos bombas (manteniendo un nivel del agua arriba de las pichanchas. En este escenario, el IMTA realizó mediciones del caudal en abril de 2018, a través del método de aforo Área-velocidad (medidor ultrasónico-tiempo de travesía), con un caudal reportado de 111 l/s. Como se mencionó anteriormente, esta descarga desapareció totalmente.

La temperatura del agua subterránea medida en el mes de febrero corresponde a 26.2°C, que es 2.5°C mayor que la temperatura media anual en la cuenca del acuífero Zacatepec (23.7°C) y que de manera preliminar nos pudiera estar indicando una circulación a través de los estratos geológicos de hasta aproximadamente 100 m. Los resultados del análisis bacteriológico muestran un valor menor que las 10 NMP/100 ml, que probablemente esté relacionado con la presencia de actividades humanas y/o animales domésticos.

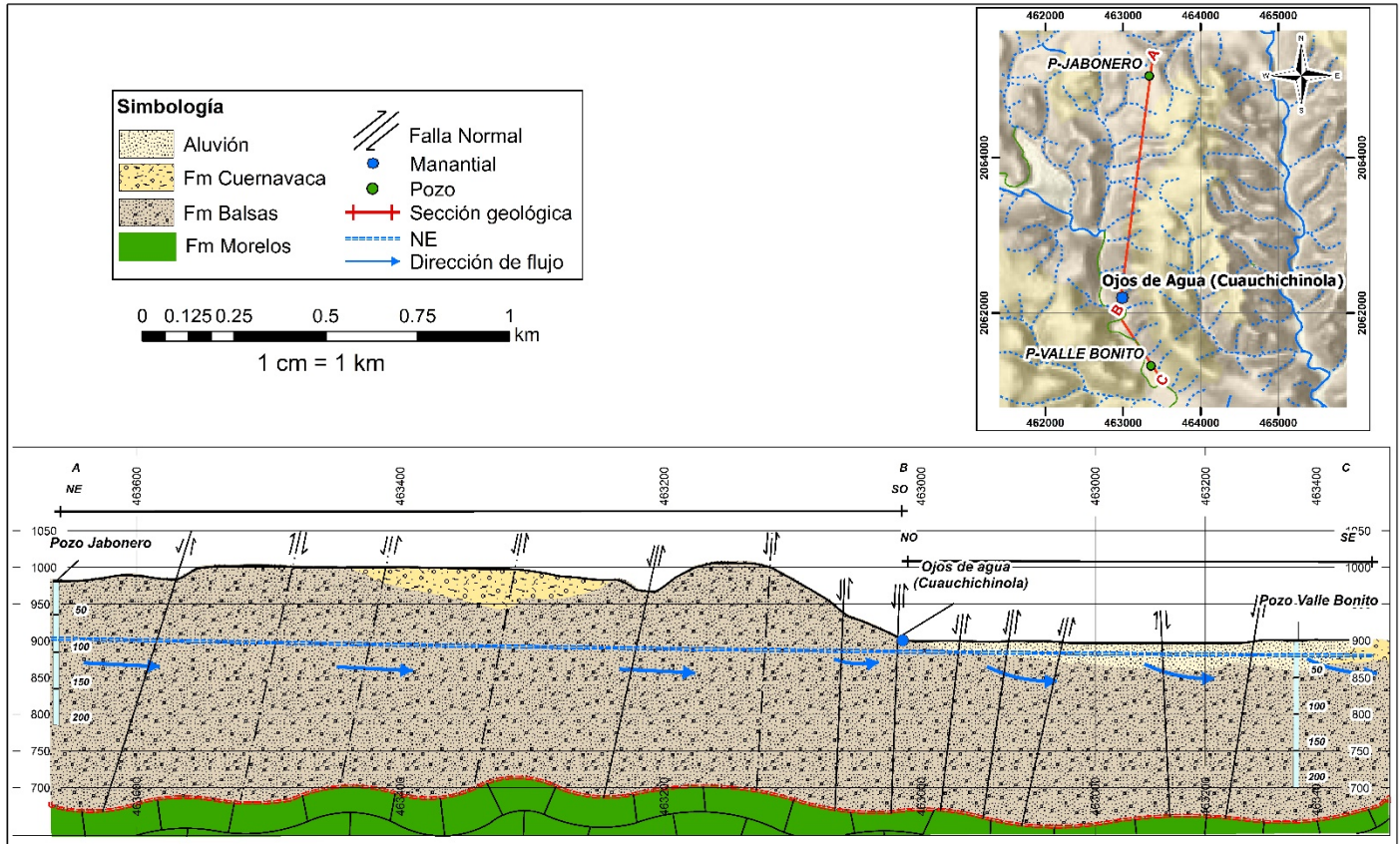
El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 7.08, valor ligeramente alcalino, sugiere algún grado de interacción agua-roca. La conductividad eléctrica medida durante el primer trimestre de 2018 fue de 811  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor que clasifica como agua subterránea potable (30-1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

De acuerdo con el diagrama de Piper, el agua del manantial los Ojos de agua en Cuauchichinola presenta agua de tipo Bicarbonatada-Cálcica.

El diagrama de Stiff para el manantial los Ojos de agua en Cuauchichinola indican que son del tipo de agua Bicarbonatada-mixta o Bicarbonatada-Cálcica. El flujo subterráneo que ocurre en este manantial presenta concentraciones de iones mayoritarios relativamente menores a las concentraciones de los manantiales de la familia Sulfatada-Cálcica.

De acuerdo con la determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ ), la zona de recarga efectiva del manantial Los ojos de agua es en cotas arriba de los 1,300 m.s.n.m. de altitud.

En el manantial los Ojos de agua, los tiempos de residencia de los flujos de agua subterránea que ocurren son de tres a 30 años. Lo anterior nos indica que los flujos de agua que alimentan a esta descarga de agua subterránea son los del tipo local y/o intermedio.

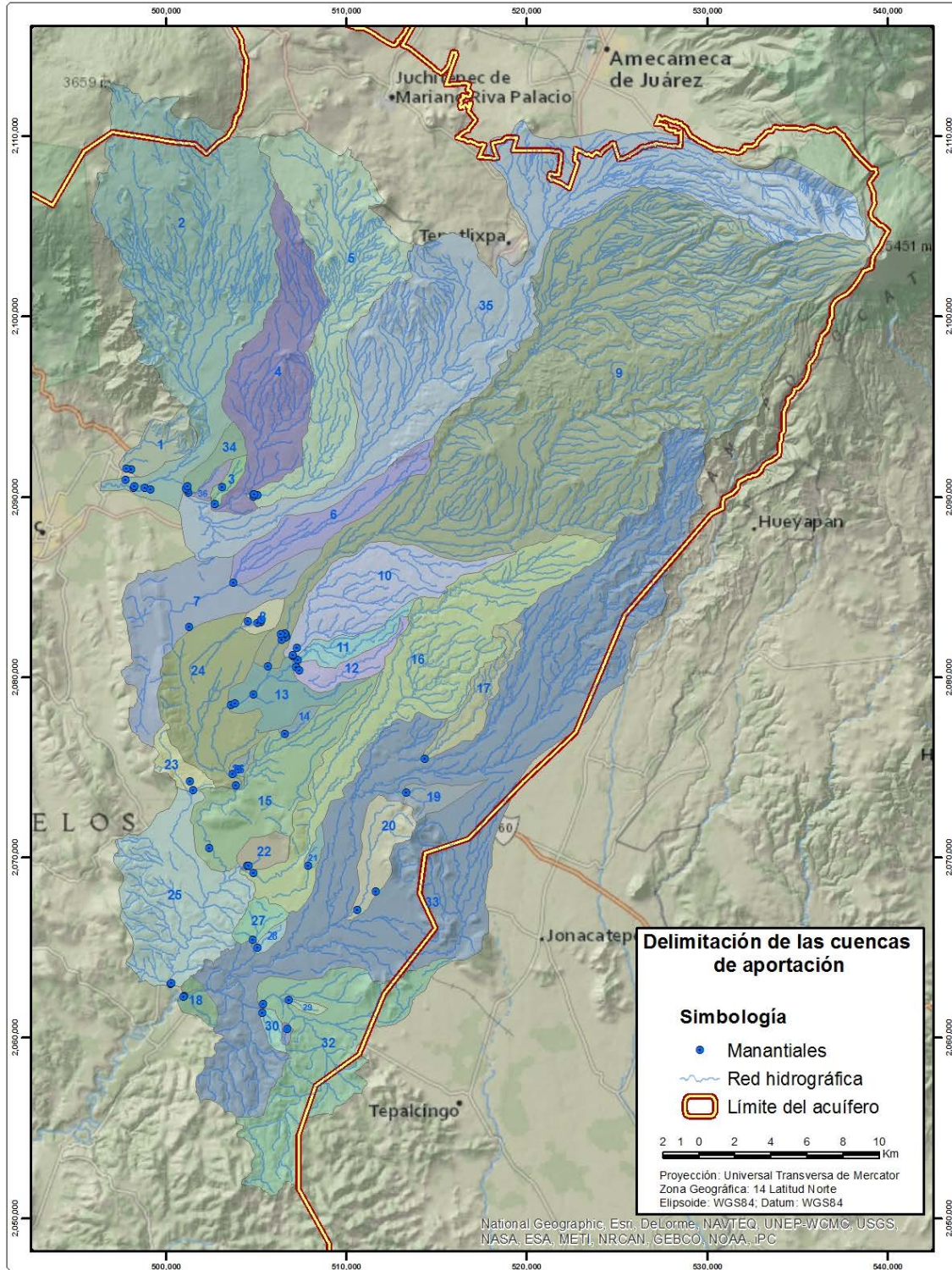


### 7.11 Zonas de protección de los manantiales.

Como un resultado de la recopilación y análisis de la información de estudios previos, se recopiló el estudio denominado “Estudio geohidrológico de la zona de manantiales en los municipios de Cuautla, Ayala y Yauatepec, en el estado de Morelos” realizado por la CONAGUA (2013), en donde se definen las zonas de protección de manantiales tanto de calidad como de cantidad, utilizando la velocidad de Darcy, velocidad real, parámetros hidráulicos del acuífero en función del tiempo de tránsito. Los resultados de la metodología definieron tres zonas de protección: i) La “Zona A” que es la zona inmediata de restricciones absolutas, se delimita con un tiempo de tránsito de 1 a 25 días, para efectos prácticos es una zona que hay que resguardar mediante una cerca perimetral y puede tener entre 5 y 20 m de diámetro aunque puede ser mayor dependiendo del tamaño del manantial; ii) La “Zona B” o Zona Intermedia de restricciones máximas, la cual viene hacer una superficie en donde se requiere restringir actividades peligrosas para la protección de las aguas frente a una contaminación antropogénica de cualquier tipo. Se delimita para prevenir la contaminación bacteriológica, imponiendo que el tiempo de tránsito hasta el punto de captación sea mayor

de 50 días, la distancia se calcula teniendo en cuenta los parámetros hidrogeológicos y el régimen de flujo del manantial. Estas dos primeras zonas tienen como objetivo proteger a los manantiales en cuanto a su calidad y La "Zona C" o zona de protección de la cantidad del agua, tiene como objetivo proteger a los manantiales para que no se vean afectados en sus caudales, restringiendo el aprovechamiento de aguas subterráneas mediante pozos o norias aguas arriba del manantial. Se define con un tiempo de tránsito de varios años, su geometría se determina mediante la zona de aportación subterránea; su límite puede coincidir con la cuenca vertiente (Figura 7.22), si coinciden los límites de las cuencas de las aguas superficiales y de las subterráneas. Las restricciones en esta zona no son tan severas como en la zona intermedia, en cuanto a la preservación de la calidad del agua.





**Figura 7.22 Delimitación de cuencas de aportación a manantiales (CONAGUA, 2013)**

**Tabla 7.2 Cuenca de aportación a los manantiales.**

Cuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km <sup>2</sup> )	Manantiales
Cuenca 1	8.93	13.08	Manantial Michate
Cuenca 2	136.18	72.80	Balneario Itzamatlán 1 y 2, Ejido Itzamatlán, Poza Las Tortugas y s/nombre M24007
Cuenca 2bis	4.69	11.42	Balneario El Edén, Manantial Ahuilcan, El Paraíso (Fraccionamiento), Los Manguitos
Cuenca 3	2.19	7.64	La Cúpula Oaxtepec, Sistema Operador Oaxtepec
Cuenca 5	71.58	60.85	Manantiales: El Bosque 1, 2, 3 y La Poza Azul
Cuenca 6	20.51	30.14	El Ojito del Polvorín
Cuenca 7	39.14	41.91	Manantial Santa Cruz (Hacienda del Hospital)
Cuenca 8	3.09	7.02	Manantial La Huancha, Taza Grande, Taza Chica y La Caja
Cuenca 9	290.88	106.22	Manantial El Almeal, Los Sabinos, Santa Rosa, Los Amates, San Cristóbal, Agua Dulce y La Mora
Cuenca 10	33.08	32.23	Manantial Tierra y Libertad, Manantial Paraíso II, Campo San Pablo I y Campo San Pablo 2
Cuenca 11	7.12	17.52	Manantial Paraíso I
Cuenca 12	7.62	17.73	Manantiales Agua Hedionda 1 y 2
Cuenca 13	13.65	23.27	Manantial Agua Azul, Manantial M24078 y M24078b
Cuenca 14	1.63	6.29	Manantial Las Arboledas
Cuenca 15	36.65	37.15	Manantial Tenextepango
Cuenca 16	77.96	72.56	Manantial Col. Loma Bonita 1
Cuenca 17	11.15	22.79	Manantial Tlayecac
Cuenca 18	234.31	157.43	Manantial Tecomalco 1 y Manantial Palo Blanco
Cuenca 19	4.70	11.79	Manantial Colorines
Cuenca 20	12.15	18.03	Manantial Huitzililla y Manantial M24169
Cuenca 21	1.32	5.87	Manantial San Juan
Cuenca 22	4.60	8.44	Manantiales Loma Bonita 2 y 3
Cuenca 23	5.30	12.38	Manantial Axocoche y Manantial El Colibrí
Cuenca 24	37.36	33.78	Manantial Balneario Agua Limpia
Cuenca 25	50.44	35.64	Manantiales Tecomalco 2 y 3
Cuenca 26	1.30	5.52	Manantiales Col. Niños Héroe y Villa de Ayala
Cuenca 27	4.65	9.34	Manantial El Salitre 1
Cuenca 28	1.52	5.68	Manantial El Salitre 2
Cuenca 29	1.00	5.36	Manantial Huichila 2
Cuenca 30	2.10	6.85	Manantial Palo Blanco 1
Cuenca 31	0.59	3.32	Manantial Huichila 1
Cuenca 32	54.75	57.16	Manantial Palo Blanco Chinameca



### **7.11.1 Elaboración de mapas digitales de los perímetros de protección para cada manantial**

En base a los análisis descritos en la actividad anterior se presentan a continuación los mapas digitales que delimitan las zonas de protección “A”, “B” y “C” para cada manantial. La actividad se realizó utilizando los software siguientes: Autocad Map y Arc Gis 9.3, obteniendo como producto final un archivos shape de polígonos, en donde en la tabla de atributos se encuentren diferenciadas las zona A, B y C para cada manantial (Figura 7.23), así como su área en m<sup>2</sup> y perímetro en metros. En la Figura 7.24 se presenta en detalle las zona de protección “A” y “B” y parte de la “C” para los manantiales El Michate, Poza de las Tortugas, Balneario Itzamatitlán 1, El Recreo, Ejido Itzamatitlán, y el manantial M24007. Adicionalmente se proporcionan los archivos de las zonas de protección en el formato kmz para que puedan ser visualizados en el Google Earth y también en formato shp para que puedan ser desplegadas con el software ArcGis.

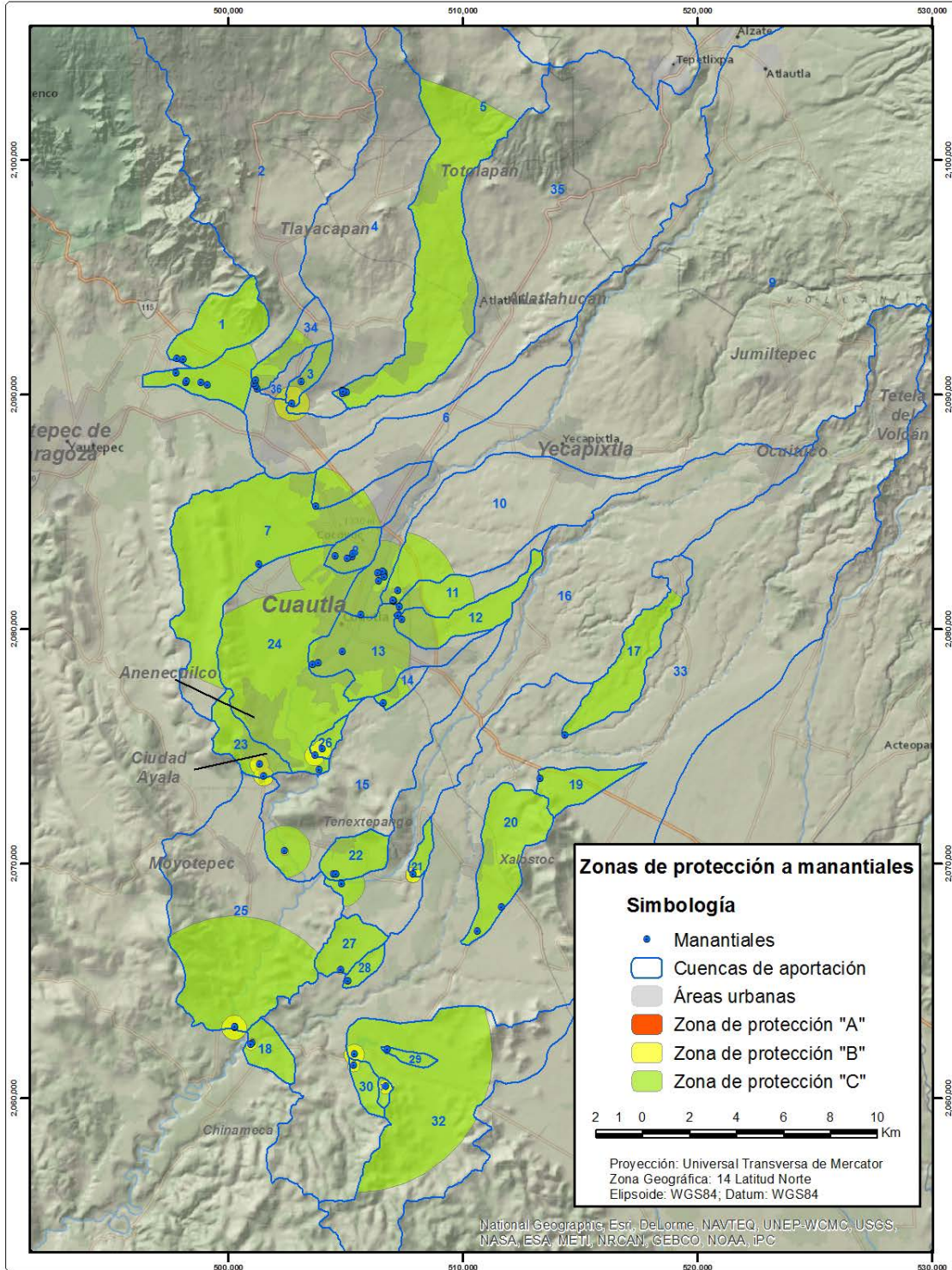


Figura 7.23 Zonas de protección a manantiales (CONAGUA, 2013).



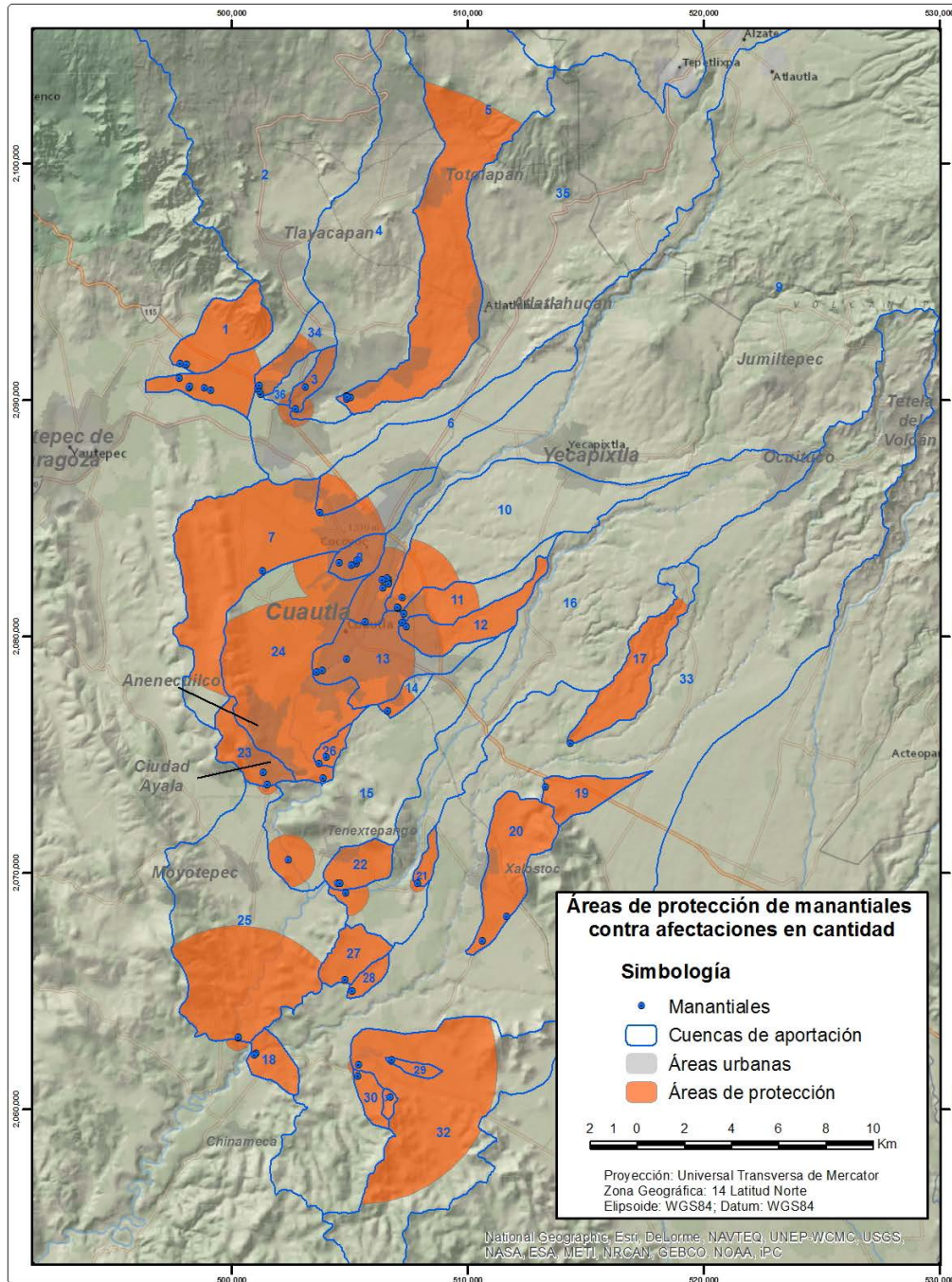


**Figura 7.24** Ejemplo de zonas de protección “A”, “B” y “C” desplegadas en el Google Earth (CONAGUA, 2013).

Al unir las zonas de protección “C” de los manantiales donde éstas se tocan o se traslapan, en un solo polígono, se obtuvieron 11 zonas de protección “C” (Figura 7.24). En estas zonas no se podrán otorgar nuevas concesiones de agua subterránea en los siguientes casos:

1. Cuando la ubicación del pozo a perforar se localice en la zona “C” y tiene contemplado extraer agua subterránea de la misma porción o porciones del acuífero de donde se está alimentando el o los manantiales ubicados dentro de esa zona “C”.
2. Cuando la ubicación del pozo a perforar se localice en una subcuenca vertiente donde el volumen concesionado es mayor al volumen infiltrado, aun cuando no vaya a extraer agua subterránea que pudiera afectar a algún manantial (Figura 3.4).





**Figura 7.25** Áreas de protección contra afectaciones en cantidad (Zona C)

## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se recopiló toda la información disponible para definir la situación actual de conocimiento hidrogeológico del área de estudio en las principales dependencias: Organismo de Cuenca Balsas en Morelos, Gerencia de Aguas Subterráneas (CONAGUA), CEAGUA Morelos, UNAM, UAM, INEGI, Servicio Geológico Mexicano, etc. Como un resultado de esta actividad con respecto a las descargas de agua subterránea convenidas para estudio, se encontró información hidrogeológica en artículos de la UAM publicados en revistas y congresos de los manantiales Agua Hedionda y Las Estacas. En estudios de la SARH, CONAGUA y artículos de la UNAM para revistas información sobre la composición química, catálogo de pozos en los acuíferos Cuautla-Yautepec y Cuernavaca y datos de caudales para los manantiales en Agua hedionda, Las Estacas, Las Fuentes, San Ramón, Palo Bolero y los Ojos de agua de Cuauchichinola.

Destacan artículos y estudios como: **i) “Características de los manantiales de Agua Hedionda y el Almeal en Cuautla, Morelos”** (Niedzielski, 1988), donde se argumenta que la descarga de agua subterránea en Agua Hedionda, ocurre a través de las fracturas de la Formación Tlayecac, que el agua infiltrada en la zona de recarga es calentada por el gradiente geotérmico y mineralizada por el yeso contenido en el Grupo Balsas; **ii) en el artículo “Characteristic manner of groundwater discharge in the Cuautla river sub-basin, Mexico”** (Niedzielski, 1990), se muestra la caracterización del régimen del manantial, mediante la determinación del: 1) Caudal, mediante 14 aforos mensuales entre Junio del 1986 a julio de 1987; 2) La temperatura, concluyendo que la temperatura del agua subterránea descargada en Agua Hedionda es de 27 °C durante todo el año, esta es 7.8 grados más alta que la temperatura media anual del aire en la cuenca (19.2 °C; 1988); por lo que asciende de 212.8 m y se calienta debido al gradiente geotérmico y 3) La composición química, con lo cual clasifica como sulfatada bicarbonatada cálcica y contiene gas sulfhídrico y que su composición química es muy característica para aguas asociadas con los yacimientos de yeso; **iii) “Características del manantial las Estacas en Morelos, México”** (Niedzielski, 1993), se describe al manantial las Estacas como de primer orden, con un caudal constante, caracterizado con un índice de variación de 1.52, en la cuenca del río Yautepec brota a lo largo de calizas con un principal surgimiento ascendente de una gruta kárstica (borbollón), con base en las condiciones hidrogeológicas se supone que el manantial constituye un desagüe de los acuíferos de la subcuenca del río Cuautla a través de un conducto kárstico subterráneo; **iv) Estudio geohidrológico de la zona de manantiales en los municipios de Cuautla, Ayala y Yautepec, en el estado de Morelos** (CONAGUA, 2013), en donde se delimitan tres zonas de protección para los manantiales estudiados mediante la velocidad de darcy y velocidad real considerando una distancia (radio fijo) y tiempos de tránsito, según la zona a delimitar: i) La zona de protección A, es la zona de protección inmediata, definida en base a un tiempo de tránsito de 1 a 25 días y donde los radios de protección para los manantiales van de 10 a 25 m; ii) La zona de protección B, es la zona intermedia de restricciones máximas. Su objetivo es proteger a los manantiales de la contaminación bacteriológica. Los tiempos de tránsito considerados son menores que los 50 días y los radios obtenidos son de 20 a 748 m; y iii) La zona de protección C, es la zona de protección contra afectaciones en cantidad. La zona C, en la que están englobadas las dos



anteriores, tiene por objetivo garantizar que no disminuyan los caudales de agua de los manantiales frente a todo riesgo de afectación cuantitativa. Por lo general se emplea un tiempo de tránsito de 3500 días, pero pudiera ser mayor o incluso menor si la cuenca vertiente es muy reducida. Los radios obtenidos para esta zona en los manantiales analizados **van de 974 m hasta incluso proteger toda la cuenca vertiente**. Se concluye que en estas **zonas de protección no se podrán dar concesiones de agua subterránea**, cuando el diseño de los pozos indique que se extraerá la misma agua que está alimentando a los manantiales.

La verificación de aprovechamientos existentes, levantamiento piezométrico, nivelación de brocales y determinación de la dirección del flujo subterráneo, considero el catálogo de pozos que la CONAGUA (2018) tiene para los aprovechamientos registrados en los acuíferos Cuautla-Yautepec, Cuernavaca y Zacatepec, a partir del cual fueron ubicados y verificados los pozos alrededor de cada uno de los manantiales en estudio (entre 1 a 2 km), donde se midió la profundidad al nivel estático y/o dinámico. Para cada manantial en estudio se realizó una selección de los pozos verificados, considerando su ubicación espacial para utilizar el método de triangulación y con ello implementar una red de observación. A los pozos seleccionados se les determinó la elevación de los brocales, con lo cual fue posible realizar las configuraciones de la elevación del nivel estático y con ello delinear las líneas de flujo. En el acuífero Cuautla-Yautepec, en las zonas de los manantiales Las Tortugas, La Malinche, Agua Hedionda y Agua Azul, la dirección del flujo subterráneo resultante es de noreste al suroeste y en la zona de las Estacas del noreste al sureste. En el acuífero Cuernavaca, en la zona de los manantiales Palo Bolero, San Ramón, Santa Rosa la dirección del flujo subterráneo resultante resulto ser de noreste a suroeste, en la zona de Las Fuentes de noreste a suroeste y en la zona de los Ojos de agua en Cuauchichinola del acuífero Zacatepec, de noroeste a sureste.

El muestreo puntual con determinación de parámetros de campo fue realizado en 11 sitios: Las Tortugas, Itzamatitlán, La Malinche, Agua Hedionda, Agua Azul, Las Estacas, Santa Rosa, Chihuahuita, Palo Bolero, Las Fuentes y los Ojos de agua en Cuauchichinola.

La determinación de los parámetros de campo muestra que el agua subterránea descargada en los manantiales estudiados fluctúa entre 21°C y 35°C clasificándose como hipotermales, excepto Las Fuentes y Santa Rosa con 15.5 y 16.9°C, respectivamente y clasificados como "Aguas frías". De acuerdo a la información de campo y laboratorio, los manantiales Agua Hedionda, Palo Bolero, Las Tortugas e Itzamatitlán tienen características de tipo hipotermal y de agua sulfurosa, principalmente del grupo de aguas sulfatadas cálcicas. Los manantiales Agua Azul, Las Estacas, Las Fuentes, Ojos de Agua, Santa Rosa, Chihuahuita y La Malinche, presentan concentraciones menores de ion sulfato y calcio, así como temperaturas de 20°C o menores, característica de aguas frías.

El pH mide la acidez del agua, en las aguas subterráneas generalmente varía entre 6.5 y 8.5. En los manantiales estudiados fluctúa entre 5.8 (Las Tortugas) a 8 (Las fuentes). La conductividad eléctrica medida en los manantiales Las Fuentes, La Malinche, los ojos de agua, Chihuahuita y santa Rosa fluctúa entre 247 y 1160  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , clasificándose como

subterránea potable. En los manantiales Agua hedionda, Agua Azul, Las Estacas, Palo Bolero, Las tortugas e Itzamatitlan la conductividad eléctrica varia de 1982 a 6322  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mostrando una mayor salinidad asociada a un mayor tiempo de recorrido e interacción agua roca.

El muestreo puntual fue realizado para el análisis de las siguientes especies químicas: bicarbonatos, carbonatos, cloruros, color verdadero, DQO total, dureza de calcio, dureza de magnesio, dureza total, fluoruros, fosfato total, hidróxidos, materia orgánica, nitrógeno de nitratos, nitrógeno de nitritos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, SDF, SDT, SDV, S sedimentados, SSF, SSV, SST, ST, STF, STV, sulfatos, sulfuros, fosfato orto, Sb, As, Ba, Be, Ca, Cu, Cr, Sn, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, K, Se, Si, Na, Zn. En los manantiales Agua Hedionda, Palo Bolero y Agua Azul, la concentración de sulfuros está por arriba de los que se considera umbral de olor y sabor para la mayoría de la población, en este marco, se trata de aguas sulfurosas.

Los manantiales Chihuahuita, Agua Azul, Itzamatitlán, Sta. Rosa y la Malinche, cumplen con lo indicado en los Criterios Ecológicos, con respecto a los coliformes fecales.

Los manantiales Agua Azul, Itzamatitlán y Sta. Rosa, presentan niveles de dureza superiores al límite máximo permisible de 500 mg/L. En Itzamatitlán el contenido de sólidos es mayor al límite de 1000 mg/L y los fluoruros son muy cercanos (1.4 mg/L) al límite máximo permisible de 1.5 mg/L.

En Sta. Rosa, el arsénico se encuentra fuera de norma, al duplicar el límite máximo permisible de 0.025 mg/L establecido en la misma NOM-127-SSA1-1994, modificación del año 2000.

El análisis comparativo de resultados de calidad del agua del manantial de Agua Hedionda, no indica una variación significativa después de los sismos registrados en el mes de septiembre de 2017.

Del análisis conjunto de la información bibliográfica consultada, así como de la generada en campo y laboratorio, se derivan las conclusiones y recomendaciones que se enlista a continuación:

La recarga efectiva de los flujos subterráneos que alimentan los manantiales, proviene de la lluvia que se precipita en la zona durante los meses de verano a diferentes altitudes sobre el terreno, desde los 1514 hasta por arriba de los 2260 msnm.

La interacción del agua subterránea con rocas de origen marino, en condiciones anaeróbicas de los flujos que recargan a los manantiales Agua Hedionda, produce la disolución de especies carbonatadas y yesos, así como la reducción de sulfatos por acción bacteriana para biodegradar materia orgánica, generando ácido sulfhídrico.

Los manantiales que presentan mayor vulnerabilidad al tectonismo y movimientos telúricos son los manantiales cuyos flujos circulan a través de rocas calizas de origen marino. Los

manantiales más afectados fueron: Agua Hedionda, Cuauchichinola, Palo Bolero y San Ramón.

Los tiempos de residencia de los flujos que recargan a los manantiales Las Fuentes, La Malinche, Cuauchichinola e Itzamatitlán van de tres hasta 30 años, son considerados de reciente infiltración, es decir de lluvias producidas en los últimos treinta años. Los flujos subterráneos que alimentan son muy dinámicos por circular en rocas fracturadas tanto de origen volcánico como marino. Los tiempos de residencia aparente en los manantiales con ausencia total de tritio van de 5,520 hasta 26,910 años (Manantiales: Las Estacas, Agua Azul, Palo Bolero, Santa Rosa, Agua Hedionda y Las Tortugas).

Por la rápida circulación y tiempos de residencia muy cortos de los flujos subterráneos que alimenta a los aprovechamientos: Las Fuentes, Chapultepec, Chihuahuita, La Malinche y pozos, emplazados en rocas volcánicas y materiales detríticos, son altamente vulnerables a la contaminación y al cambio climático. Las zonas de recarga efectiva localizadas en las sierras Chichinautzin, Zempoala y Nevada deben ser protegidas, y evitar la deforestación, aplicación de agroquímicos, y acumulación de materiales contaminantes; tales como, desperdicios y residuos de materiales de comunicación, acumulados en las partes elevadas donde hay antenas e instalaciones de telecomunicaciones.

Los caudales determinados por el IMTA se resumen en la siguiente tabla:

Manantial	Caudal Promedio (l/s)	Método
Las Tortugas	26.44	Área-Velocidad
La malinche	3.51	Área-Velocidad
Agua Hedionda* (principal)	76.25	Área-Velocidad
Agua Hedionda (albercas)	19.28	Volumen-Tiempo
Agua Azul	316.67	Área-Velocidad
Las Estacas	6,757.60	Área-Velocidad
Las Fuentes	590.25	Área-Velocidad
Santa Rosa	284.97	Área-Velocidad
Palo Bolero	5.37	Área-Velocidad
Ojos de agua	111.00	Área-Velocidad

**En el acuífero Cuautla-Yautepec** se tiene la hipótesis sobre la existencia de dos acuíferos separados por un acuífardo: i) El primero del tipo libre y superior, Esta constituido principalmente por las formaciones volcaniclásticas (Formaciones Cuernavaca y Tlayecac) y por basaltos del Campo Volcánico Chichinautzin (CVC), y ii) el segundo, un acuífero confinado inferior, constituido por rocas calizas. A continuación se resumen las principales características de los manantiales estudiados:

En la zona del manantial **Las Tortugas** y alrededores afloran rocas de la Formación Cuernavaca. El caudal promedio medido durante el primer trimestre de 2018 es de 22.57 l/s. El manantial es permanente, su clasificación corresponde a la cuarta magnitud. La temperatura del agua medida en el primer bimestre de 2018 es de 24.7°C y considerando la temperatura media anual en la cuenca Cuautla-Yautepec de 22°C, se tiene una diferencia de 2.7°C. Considerando el gradiente geotérmico regional (3°C/100 m), se argumenta que estas aguas subterráneas ascienden desde los 100 m de profundidad.

La conductividad eléctrica para el primer bimestre de 2018 es de 2,518  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor alto que indica que no es subterránea potable, ya que el agua subterránea potable se clasifica con 1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Cabe señalar que la cantidad de sales disueltas es del orden 1,888.5 mg/L, valor alto que no es adecuado para la irrigación, ya que favorece su impermeabilización.

De acuerdo con el diagrama de Piper, las aguas del manantial Las Tortugas, presentan agua de tipo Sulfatada-Cálcica. Los diagramas de Stiff presentan altas concentraciones predominantes de  $\text{SO}_4=$  y  $\text{Ca}+$  y también muestra es tipo de agua Sulfatada-Cálcica.

De acuerdo con la determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica, la zona de recarga efectiva del manantial Las Tortugas es entre las cotas 1600-2011 m.s.n.m. Los tiempos de residencia aparente con ausencia total de tritio son de 5,520 hasta 26,910 años. El sistema de flujo que alimenta esta descarga es del tipo intermedio y/o regional y procede de un acuífero semiconfinado/confinado.

Las descargas de agua subterránea en el sitio denominado como **La Malinche**, se ubican hacia la margen derecha del río Yautepec, donde se observan depósitos de aspecto lahárico, cubiertos indistintamente por coladas de lava basáltica del CVC y donde a través de fracturas ocurren las descargas de agua subterráneas, las cuales son captadas en un depósito, de donde se conducen a través de tubería de acero hacia la Colonia Alejandra en Cocoyoc, por lo cual la principal función del manantial es el Abastecimiento a la población en la Colonia Alejandra de Cocoyoc.

El manantial es perenne, el caudal promedio reportado es de 3.5 l/s (antes del sismo 18 l/s). Su clasificación corresponde a la quinta magnitud. En marzo 2018, se reportó por los usuarios del manantial algunas descargas aguas debajo de las principales, el caudal estimado de estas filtraciones asciende a 0.5 lps;).

La temperatura del agua medida en el mes de febrero corresponde a 21.6°C, que es prácticamente equivalente a la temperatura media anual en la cuenca-Yautepec de 22°C. La temperatura del agua del manantial sugiere una circulación relativamente somera, lo que

puede corroborarse con el contenido del análisis bacteriológico, que demuestra estar siendo impactado por la contaminación.

El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 6.20, menor que 7 (valor neutro), que podría clasificarse como ácido e indicar que el agua es de reciente infiltración. La conductividad eléctrica para el primer bimestre de 2018 es de 371  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor que indica que es subterránea potable, ya que el agua subterránea potable se clasifica con 1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

De acuerdo con el diagrama de Piper, las aguas subterráneas que ocurren en el manantial La Malinche son alimentados por flujos que transitan en rocas volcánicas y presenta una familia de aguas de tipo Bicarbonatada-Cálcica. De acuerdo con los diagramas de Stiff, el manantial La Malinche, indica que son del tipo de agua Bicarbonatada-mixta o Bicarbonatada-Cálcica.

La determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica, indica que la zona de recarga efectiva del manantial La Malinche es en cotas arriba de los 2,260 m.s.n.m. de altitud.

En el manantial La Malinche, los tiempos de residencia del flujo de agua subterránea que ocurren son de tres a 30 años. Lo anterior confirma que el sistema de flujo que alimenta esta descarga de agua subterránea es del tipo local.

Las descargas de agua subterránea en **Agua Hedionda** emergen a través de la Formación Tlayecac. El principal uso del agua subterránea es el abastecimiento para la agricultura y recreativo. Los usuarios agrícolas se han visto severamente afectados. El caudal medido durante el primer trimestre de 2018 fue de 76.25 l/s en la descarga principal y 20.80 l/s en el afloramiento de las albercas particulares. Los manantiales son permanentes, su clasificación corresponde a la tercera y cuarta magnitud, respectivamente. Los antecedentes muestran que antes del sismo del 2017, la descarga principal descargaba de manera surgente aproximadamente 350 l/s. El manantial de las albercas particulares aparentemente no sufrió cambios, debido a que no se tienen antecedentes.

La temperatura del agua medida en el mes de febrero corresponde a 26.4°C. Considerando la temperatura media anual en la cuenca Cuautla-Yautepec de 22°C, tenemos una diferencia de 4.4°C y considerando que la temperatura en las aguas subterráneas es aproximadamente la temperatura media anual más el gradiente geotérmico regional, ya que normalmente la temperatura del subsuelo aumenta 3°C cada 100 m de profundidad (Sánchez San Roman, 2018), por lo que se puede argumentar que estas aguas subterráneas ascienden desde una profundidad mayor que los 100 m y probablemente provienen de un sistema confinado.

El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 6.26, menor que 7 (valor neutro), que podría clasificarse como ligeramente ácida e indicar que el agua es de reciente infiltración y/o con aportaciones de aguas subterráneas provenientes del acuífero libre. La conductividad eléctrica para el primer bimestre de 2018 es de 2,310  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el cual es un valor alto que indica que no es agua subterránea potable, ya que el agua subterránea



potable se clasifica con  $1,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Cabe señalar que la cantidad de sales disueltas es del orden  $1,732.5 \text{ mg}/\text{L}$ , valor alto que no es adecuado para la irrigación.

De acuerdo con el diagrama de Piper, las aguas del manantial Agua Hedionda, presentan agua de tipo Sulfatada-Cálcica. Los diagramas de Stiff presentan la misma forma para el manantial Agua Hedionda cuyos flujos están en contacto con roca caliza, con altas concentraciones predominantes de  $\text{SO}_4^{=}$  y  $\text{Ca}^+$  y también muestra que el tipo de agua corresponde a la familia Sulfatada-Cálcica. La calidad del agua se mantiene.

La determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica, muestra que la zona de recarga efectiva del manantial Agua Hedionda se ubica entre las cotas 1600-2011 m.s.n.m. En el manantial Agua Hedionda, los tiempos de residencia aparente con ausencia total de tritio es de 5,520 hasta 26,910 años. Lo cual pudiera sugerir que esta descarga de agua subterránea proviene de un acuífero confinado y el sistema de flujo que lo alimenta pudiera ser del tipo intermedio y/o regional.

Las descargas de agua subterránea en el sitio denominado **Agua Azul** emergen de manera ascendente a través de la Formación Tlayecac, son difusas y presenta una forma de Ciénega. Estas descargas fluyen incorporándose a los escurrimientos del río Yautepec. La principal función del manantial Agua Azul es el abastecimiento de agua para la agricultura y también se constituye como balneario rustico (uso recreativo).

La medición de las descargas de agua subterránea fue realizada durante el primer trimestre de 2018, determinándose un caudal promedio de 317 l/s. El manantial es perenne y la clasificación de su descarga corresponde a la segunda magnitud. No existen antecedentes sobre mediciones del caudal.

La temperatura del agua medida en el mes de febrero corresponde a  $21.1^\circ\text{C}$ , que es menor a la temperatura media anual en la cuenca Cuautla-Yautepec ( $22^\circ\text{C}$ ). La temperatura del agua descargada en este sitio podría sugerir que su circulación es relativamente somera, lo que podría corroborarse con el contenido de coliformes fecales, que demuestra estar siendo impactado por la contaminación, aunque también esta contaminación puede atribuirse a las actividades antropogénicas.

El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 6.77, menor que 7 (valor neutro), que podría clasificarse como ligeramente ácido e indicar que el agua es de reciente infiltración y/o con aportaciones de aguas subterráneas provenientes del acuífero libre (aguas del río Cuautla y/o apante). La conductividad eléctrica para el primer bimestre de 2018 es de  $1,019 \mu\text{S}/\text{cm}$ , valor que es prácticamente el indicado en la clasificación para subterránea potable ( $1,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ).

De acuerdo con el diagrama de Piper, las aguas subterráneas que ocurren en el sitio denominado como Agua Azul presentan agua de tipo Bicarbonatada-Cálcica. Los diagramas de Stiff para el manantial Agua Azul, indican que son del tipo de agua Bicarbonatada-mixta o Bicarbonatada-Cálcica. De acuerdo con la determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica, la zona de recarga efectiva del manantial Agua Azul es entre las cotas 1600-2011 m.s.n.m. En el manantial Agua Azul, los tiempos de residencia aparente

con ausencia total de tritio son de 5,520 hasta 26,910 años. Con la información anterior, podemos concluir que el sistema de flujo que ocurre en este sitio probablemente corresponda a uno del tipo intermedio.

Las descargas de agua subterránea **Las Estacas** se ubican hacia el sur del acuífero Cuautla-Yautepec, en el valle del río Yautepec, a aproximadamente 3 km al sur del poblado de Ticumán y dentro de las instalaciones del Centro Vacacional Las Estacas. La principal descarga de agua subterránea se conoce como el borbollón y da origen a una corriente que forma parte del Centro Vacacional y que transita hacia la zona de cultivos. El principal uso lo constituye el agrícola y el recreativo. El flujo en Las Estacas ocurre en un karst maduro o extremo, a través una fractura abierta, con oquedades que se intercalan en la matriz de la roca, producto de la disolución. El IMTA realizó la medición de las descargas de agua subterránea durante el primer trimestre de 2018, el caudal promedio es de 6,757.6 l/s. El manantial es permanente, su clasificación corresponde a la primera magnitud. La Subdirección de Redes de Medición y Sistemas de la CONAGUA, Dirección Local Morelos, realiza mediciones diariamente. Datos de aforos realizados por esta dependencia muestran que el día 19 de septiembre de 2017 a las 6:15 hrs. se realizó el aforo con un caudal de 6,912 l/s, reanudando mediciones el día 12 de octubre de 2017 a las 6:10 hrs. Reportando un caudal de 7,369 l/s. Por lo cual considerando estos datos de la CONAGUA, se tiene un aumento de 457 l/s en un lapso de 24 días posterior al sismo.

Con respecto a los parámetros físicos, la temperatura del agua subterránea que emerge en el “borbollón” medida en el mes de febrero corresponde a 22.6°C, que es superior a la temperatura media anual en la cuenca Cuautla-Yautepec (22°C) por 0.6°C. La temperatura del agua del manantial pudiera indicar una circulación relativamente somera (a 20 m de profundidad, de acuerdo con el gradiente geotérmico promedio), lo que pudiera ser susceptible de contaminación en su tránsito, aunque los resultados del análisis bacteriológico muestran un valor menor que las 10 NMP/100 ml, que probablemente pudieran relacionarse con la actividad recreativa.

El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 6.91, menor que 7 (valor neutro), que puede clasificarse como ligeramente ácido e indicar que el agua es de reciente infiltración, con aportaciones de flujos locales del acuífero libre. La conductividad eléctrica para el primer bimestre de 2018 fue de 1,250 µS/cm, valor que rebasa ligeramente el valor indicado para subterránea potable (1,000 µS/cm).

De acuerdo con el diagrama de Piper, las aguas del manantial Las Estacas presentan aguas que pertenecen a la familia Sulfatada-Cálcica. Los diagramas de Stiff presentan la misma forma para los manantiales cuyos flujos están en contacto con roca caliza, con altas concentraciones predominantes de  $SO_4^-$  y  $Ca^+$ : El manantial Las Estacas presenta agua Sulfatada-Cálcica.

De acuerdo con la determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica ( $\delta^{18}O$ ), la zona de recarga efectiva del manantial Las Estacas es entre las cotas 1600-2011 m.s.n.m. En el manantial Las Estacas, los tiempos de residencia aparente con ausencia total

de tritio son de 5,520 hasta 26,910 años. Lo anterior pudiera indicar que los flujos de agua que alimentan a la descarga de agua subterránea en el Borbollón de las Estacas son los del tipo intermedio y/o regional.

En el **acuífero Cuernavaca** se mantiene la hipótesis sobre la existencia de dos acuíferos, separados por un acuitado: i) El primero del tipo libre y superior, constituido por rocas volcánicas del Oligoceno (Riolita Tilzapotla), Mioceno (andesitas, Dacitas, Tobas y lahares), del Plioceno (Basaltos, piroclastos, tobas y brechas de la Formación Zempoala, las Cruces y depósitos clásticos de la Formación Cuernavaca; ii) El acuífardo, constituido por lutitas y depósitos areno-arcillosos; y iii) el segundo acuifero Confinado e inferior, constituido por rocas calizas. En este sistema acuifero, se tienen sistemas de flujo del tipo “local”, que dan origen a las descargas de agua subterránea en los sitios como el manantial Chapultepec, Las Fuentes y El Salto. Y desde el punto de vista geológico ocurren en el contacto del Grupo Chichinautzin con las Formaciones subyacentes. A continuación se emiten las principales conclusiones de los manantiales que se localizan en este acuífero:

La descarga de agua subterránea conocida como **Las Fuentes**, se localiza al noroeste de Jiutepec, dentro del Balneario del mismo nombre. El principal uso es el abastecimiento a núcleos de población del municipio de Jiutepec y el recreativo. En la zona del manantial Las Fuentes afloran: escasos depósitos aluviales que cubren indistintamente a basaltos del Campo Volcánico Chichinautzin, es el medio fracturado de estos el que condicionan la ocurrencia del agua subterránea. La medición de las descargas de agua subterránea se efectuó durante el primer trimestre de 2018, el caudal promedio reportado es de 590.25 l/s y se clasifica como de segunda magnitud y es perenne.

La temperatura del agua subterránea medida en el mes de febrero corresponde a 15.6°C, que es 3.8°C menor que la temperatura media anual en la cuenca de Cuernavaca (de 19.4°C). La temperatura del agua del manantial se clasifica como “aguas frías” y pudiera estar indicando una circulación relativamente somera, aunque los resultados del análisis bacteriológico muestran un valor menor que las 10 NMP/100 ml, que probablemente esté relacionado con la actividad recreativa del balneario.

El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 7.38, valor relativamente mayor que 7 (valor neutro), que podría sugerir ha tenido tiempo para favorecer la interacción roca-agua y asimilar los diferentes minerales y sales que caracterizan el acuífero en estudio, lo que le da un pH ligeramente alcalino. La conductividad eléctrica para el primer trimestre de 2018 fue de 135  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor indicado para subterránea potable, ya que la clasificación para subterránea potable esta entre 30-1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

De acuerdo con el diagrama de Piper, las aguas de los manantiales alimentados con flujos alojados en rocas volcánicas presentan agua de tipo Bicarbonatada-Cálcica, el manantial Las Fuentes pertenece a la familia bicarbonatada-mixta. Los diagramas de Stiff indican que el manantial Las Fuentes es del tipo de familias de agua Bicarbonatada-mixta o Bicarbonatada-Cálcica.

De acuerdo con la determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica ( $\delta^{18}O$ ), la zona de recarga efectiva del manantial Las Fuentes es en cotas arriba de los 2,260 m.s.n.m. de altitud. En el manantial Las Fuentes, los tiempos de residencia de los flujos de agua subterránea que ocurren son de tres a 30 años. Lo anterior nos indica que los flujos de agua que alimentan a la descarga de agua subterránea en Las Fuentes son los del tipo local.

Las descargas de agua subterránea conocidas como **San Ramón** se localizan al este de Xochitepec. El manantial San Ramón desapareció después del sismo, este descargaba dentro de las instalaciones del Balneario del mismo nombre, actualmente se suministra agua para las albercas por medio de pipas.

El uso de las aguas subterráneas, consistía en el recreativo (balneario) y agrícola. El área donde descargaba el manantial San Ramón, emergía de manera difusa sobre fracturas en basaltos casi verticales, se observan en un sistema irregular rellenas de arenas las de mayor grosor y otras son rellenas de arcillas compactadas. Con respecto al régimen de los manantiales, en San Ramon la descarga del agua subterránea desapareció durante el sismo ocurrido en septiembre del 2017, motivo por el cual no fue posible determinar sus parámetros de campo y la composición del agua. De la información recopilada, en el documento de la determinación de la disponibilidad del agua subterránea para el acuífero Cuernavaca (CONAGUA, 2002), se menciona que el caudal del manantial San Ramón había disminuido por las nuevas perforaciones, mostrando que el caudal en San Ramón había disminuido de 500 l/s (1970) a 250 l/s (1980) y 150 l/s en 1998.

Con respecto a la hidrogeoquímica, la CONAGUA (2002), menciona que utilizando las concentraciones relativas de los iones mayores se pueden identificar las familias de agua que se definen para la zona acuífera del valle de Cuernavaca, donde se determinó que la descarga natural del manantial San Ramón se asocia a una familia de agua del tipo sulfatada cálcica contrastando con las tres familias de agua determinadas para el valle de Cuernavaca, todas ellas pertenecientes al tipo bicarbonatada.

Las descargas de agua subterránea conocidas como **Santa Rosa**, se localizan hacia el este de Xochitepec. Descarga dentro de una propiedad privada a aproximadamente 1,000 m al sur de San Ramón. El uso de las aguas descargadas en Santa Rosa es el de servicios y el agrícola. No se realizó la inspección de la descarga debido a que no se obtuvo permiso.

Las descargas de agua subterránea en Santa Rosa, son de carácter perenne. La medición de las descargas de agua subterránea se efectuaron durante el primer trimestre de 2018, el caudal promedio es de 285 l/s y se clasifican como de tercera magnitud.

La temperatura del agua subterránea medida en el mes de febrero corresponde a 20°C, que es ligeramente superior que la temperatura media anual en la cuenca Cuernavaca de 19.4°C (CONAGUA, 2013). Considerando el gradiente geotérmico regional (3°C/100 m), el agua subterránea circula y emerge de aproximadamente 20 m de profundidad, esta circulación es relativamente somera y por lo tanto vulnerable a la contaminación. Lo anterior se corrobora con los resultados del análisis bacteriológico que muestran un valor menor que las 10

NMP/100 ml, que probablemente esté relacionado con las infiltraciones de agua residual gradiente arriba y/o producto de las actividades de la propiedad privada.

El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 7.00, valor neutro, que podría sugerir que el sistema de flujo subterráneo que alimenta esta descarga es muy dinámico al transitar en un medio constituido por rocas fracturadas de origen volcánico. La conductividad eléctrica medida durante el primer trimestre de 2018 fue de 1,160  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor ligeramente superior al indicado en la clasificación para subterránea potable (30-1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

De acuerdo con el diagrama de Piper, el agua subterránea que ocurre en el sitio denominado como Santa Rosa presenta agua de tipo Sulfatada-Cálcica. El diagrama de Stiff muestra que el manantial Santa Rosa es del tipo de familias de agua Sulfatada-Cálcica.

De acuerdo con la determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ ), la zona de recarga efectiva del manantial Santa Rosa es en cotas arriba de los 2,260 m.s.n.m. de altitud. En el manantial Santa Rosa, los tiempos de residencia de los flujos de agua subterránea que ocurren son de 5,520 a 26,910 años. Lo anterior nos indica que los flujos de agua que alimentan a la descarga de agua subterránea en Santa Rosa son los del tipo intermedio y/o regional.

Las descargas de agua subterránea conocidas como **Palo Bolero**, se localizan al oeste de Xochitepec, dentro de las instalaciones del Balneario del mismo nombre. Cabe señalar que la principal descarga de agua subterránea que abastecía a las albercas desapareció totalmente. Existe otra descarga de agua subterránea cercana al que desapareció y es la que actualmente abastece a las albercas, manteniendo en operación al balneario. La principal función del manantial es el recreativo. Este manantial es de origen kárstico, el dren por el cual emerge son fracturas contenidas en las laminaciones de los depósitos orgánicos que posiblemente están conectados con los flujos provenientes de los canales de disolución del acuífero kárstico. Se encuentra a niveles topográficamente bajos y emerge de manera difusa cerca del cauce del río Cuentepec. Las descargas de agua subterránea en Palo Bolero, son de carácter perenne. La medición de la descarga de agua subterránea se efectuó durante el primer trimestre de 2018, el caudal promedio obtenido es de 5.4 l/s y su clasificación corresponde a la cuarta magnitud. En mayo del 2018, se observó agua emergiendo en la ladera y margen izquierda del río Cuentepec, probablemente correspondan a las aguas subterráneas del manantial que desapareció.

La temperatura del agua subterránea medida en el mes de febrero corresponde a 22.1°C, que es mayor que la temperatura media anual en la cuenca del valle de Cuernavaca de 19.4°C, teniendo una diferencia de 0.7°C y que considerando el gradiente térmico regional de 3°C/100 m, esta agua subterránea descargada pudiera emerger desde una profundidad mayor que los 20 m. Del análisis bacteriológico, esta descarga de agua subterránea no presenta coliformes totales por lo que cumple con la NOM-245-SSA1-2010, requisitos sanitarios y calidad del agua establecido para albercas.

El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 6.57, muy aproximado al valor neutro, que podría sugerir que el sistema de flujo subterráneo que alimenta esta descarga es



muy dinámico y que tuvo lugar una corta interacción agua-roca al transitar en un medio constituido por rocas fracturadas. La conductividad eléctrica medida durante el primer trimestre de 2018 fue de 2,160  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor superior al indicado en la clasificación para subterránea potable (30-1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

De acuerdo con el diagrama de Piper, el agua subterránea que ocurre en el sitio denominado como Palo Bolero presenta agua de tipo Sulfatada-Cálcica. Los diagramas de Stiff presentan la misma forma para los manantiales cuyos flujos están en contacto con roca caliza, con altas concentraciones predominantes de  $\text{SO}_4=$  y  $\text{Ca}+$ : La descarga de agua subterránea que prevalece en Palo Bolero es del tipo de agua Sulfatada-Cálcica.

De acuerdo con la determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ ), la zona de recarga efectiva del manantial Palo Bolero es en cotas arriba de los 2,260 m.s.n.m. de altitud. En el manantial Palo Bolero, los tiempos de residencia de los flujos de agua subterránea que ocurren son de 5,520 a 26,910 años. Lo anterior nos indica que los flujos de agua que alimentan a la descarga de agua subterránea son los del tipo intermedio y/o regional.

En el **acuífero Zacatepec**, donde al extremo poniente se ubica la zona de los manantiales los Ojos de agua de Cuauchichinola, las evidencias hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero tipo libre, heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido vertical como horizontal, constituido en su porción superior por los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, así como areniscas y conglomerados intercalados con basaltos y andesitas. El espesor de los sedimentos puede alcanzar algunas centenas de metros hacia el centro de los valles. La porción inferior se aloja en una secuencia de calizas marinas de las formaciones Morelos y Cuautla que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y/o disolución. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas calcáreas al desaparecer el fracturamiento a profundidad. Esta unidad puede presentar condiciones de semiconfinamiento o confinamiento debido a que se encuentra sobreyacida por las lutitas y limolitas de la Formación Mexcala.

Las descargas de agua subterránea conocidas como los Ojos de agua, se localizan aproximadamente a 3 km al sureste del poblado de Cuauchichinola. Antes del sismo de septiembre de 2017, ocurrían tres descargas: dos en el área del balneario “Paraíso escondido”, que desaparecieron y la tercera que descargaba dentro de una cavidad rocosa y de donde era bombeada hacia un canal donde se conducía el agua hasta la zona de cultivos de los ejidatarios de Puente de Ixtla. Cabe señalar que esta descarga de agua subterránea desapareció totalmente a partir de mayo de 2018. El principal uso del manantial era el agrícola y el recreativo.

La geología superficial en la zona de los manantiales, está representada principalmente por sedimentos continentales como la Formación Balsas y Formación Cuernavaca cubiertos indistintamente por depósitos aluviales.

Aquí la Formación Balsas se observa constituida por clastos calcáreos sostenidos por una matriz deleznable, con menor presencia de arcillas a diferencia del resto de las otras zonas donde este grupo es impermeable (SARH, 1980).

La tercera descarga que prevaleció hasta mediados del mes de mayo de 2018, ocurría a través de un plano de falla, en materiales de la Formación Balsas. Suponemos que es la descarga principal y que pudiera ascender a través de materiales vulcano sedimentarios que constituyen el acuífero libre superior.

La descarga de agua subterránea “principal” en los Ojos de agua, era de carácter perenne. La descarga de agua subterránea siempre se ha almacenado en la cavidad rocosa y antes del sismo del 2017 se extraía por medio de tres bombas verticales, a través de sus tuberías de succión de aproximadamente 3 metros de longitud. Antes del sismo era posible extraer agua mediante las 3 bombas con un caudal de más de 300 l/s, posteriormente solo era posible extraer agua mediante dos bombas (manteniendo un nivel del agua arriba de las pichanchas. En este escenario, el IMTA realizó mediciones del caudal en el primer trimestre de 2018, con un caudal de 111 l/s. Como se mencionó anteriormente, esta descarga desapareció totalmente.

La temperatura del agua subterránea medida en el mes de febrero corresponde a 26.2°C, que es 2.5°C mayor que la temperatura media anual en la cuenca del acuífero Zacatepec (23.7°C) y que de manera preliminar nos pudiera estar indicando una circulación a través de los estratos geológicos de hasta aproximadamente 100 m. Los resultados del análisis bacteriológico muestran un valor menor que las 10 NMP/100 ml, que probablemente esté relacionado con la presencia de actividades humanas y/o animales domésticos.

El pH medido durante el primer trimestre del 2018 fue de 7.08, muy aproximado al valor neutro, podría significar que el agua es de reciente infiltración o que la permanencia del agua dentro del acuífero ha sido muy corta. La conductividad eléctrica medida durante el primer trimestre de 2018 fue de 811  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor que clasifica como agua subterránea potable (30-1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

De acuerdo con el diagrama de Piper, el agua del manantial los Ojos de agua en Cuauchichinola presenta agua de tipo Bicarbonatada-Cálcica. El diagrama de Stiff indica que la familia de agua es del tipo de agua Bicarbonatada-mixta o Bicarbonatada-Cálcica.

De acuerdo con la determinación de la recarga efectiva mediante la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ ), la zona de recarga efectiva del manantial Los ojos de agua es en cotas arriba de los 1,300 m.s.n.m. de altitud. En el manantial los Ojos de agua, los tiempos de residencia de los flujos de agua subterránea que ocurren son de tres a 30 años. Lo anterior nos indica que los flujos de agua que alimentan a esta descarga de agua subterránea son los del tipo local y/o intermedio.

**Con respecto a la protección de manantiales, el estudio realizado por la CONAGUA (2013), define las zonas de protección de manantiales tanto de calidad como de cantidad, mediante la aplicación la teoría del flujo subterráneo. Los resultados definen tres zonas de**

protección: i) La “Zona A” que es la zona inmediata de restricciones absolutas, se delimita con un tiempo de tránsito de 1 a 25 días, donde se propone una cerca perimetral de diámetro acorde con el tamaño de cavidad y/o poza; ii) La “Zona B” o Zona Intermedia de restricciones máximas, la cual viene hacer una superficie en donde se requiere restringir actividades peligrosas para la protección de una contaminación antropogénica. Se delimita para prevenir la contaminación bacteriológica, imponiendo que el tiempo de tránsito hasta el punto de captación sea mayor de 50 días, la distancia se calcula teniendo en cuenta los parámetros hidrogeológicos y el régimen de flujo del manantial. Estas dos primeras zonas tienen como objetivo proteger a los manantiales en cuanto a su calidad y La “Zona C” o zona de protección de la cantidad del agua, tiene como objetivo proteger a los manantiales para que no se vean afectados en sus caudales, restringiendo el aprovechamiento de aguas subterráneas mediante pozos o norias aguas arriba del manantial. Se define con un tiempo de tránsito de varios años, su geometría se determina mediante la zona de aportación subterránea; su límite puede coincidir con la cuenca vertiente, si coinciden los límites de las cuencas de las aguas superficiales y de las subterráneas.

Cabe señalar que la delimitación de las zonas A, B y C son muy convenientes, proponiendo que se gestionen un programa de saneamiento de cuencas, ya que la mayoría de los manantiales estudiados se encuentran dentro de la mancha urbana.

## **CONCLUSIONES GENERALES DEL ESTUDIO**

La determinación del régimen de los manantiales, nos ha permitido evaluar los cambios en el volumen de descarga y calidad del agua de algunos manantiales en el estado, por el sismo M7.1 del 19 de septiembre de 2017.

Estas características no proporcionan elementos para realizar un diagnóstico preciso sobre si la afectación a los manantiales Agua hedionda, La Malinche, San Ramón, Palo Bolero y los Ojos de agua en Cuauchichinola es temporal o permanente, ya que el movimiento telúrico pudo originar cambios en la estructura del subsuelo, creando nuevas fracturas y patrones de flujo, obstruyendo los existentes.

Por lo anterior, los resultados del presente estudio no muestran evidencias de afectaciones a la geología local en la zona de descarga de los manantiales, por lo que se considera que los efectos principales de los sismos fueron de carácter profundo y a largo plazo.

## RECOMENDACIONES

**En el manantial Las Tortugas** se recomienda realizar una limpieza periódica, desazolve del sitio y del canal de conducción. Construir una cerca perimetral para la protección del sitio.

**En el manantial La Malinche:** Construir tanque e incorporar las nuevas descargas identificadas gradiente abajo; Realizar un estudio de prospección geofísica en la zona de la colonia Alejandra, con el objeto de perforar un pozo; Para dar uso y consumo humano al agua de los manantiales es necesario desinfectar el agua y asegurar en todo momento, a través del sistema de distribución, cumplir con el rango de cloro residual libre de 0.2 a 1.5 mg/L, de conformidad con la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, modificación del año 2000.

**En el manantial Agua Hedionda:** seguir utilizando el agua del manantial principal, bombear el agua del manantial de las albercas particulares a la alberca principal ya que una vez llenas se vierten a la barranca; realizar un estudio de prospección geofísica para la perforación de pozos profundos para fines agrícolas; En los manantiales utilizados con fines recreativos, es necesario cumplir con la norma oficial mexicana NOM-245-SSA1-2010, principalmente en lo referente a la calidad bacteriológica del agua. Es importante considerar que para que las albercas estén exentas de desinfección y de cumplir los parámetros fisicoquímicos de la norma, éstas deberán estar construidas por encauce de una corriente superficial o de un manantial, cuando presenten las características siguientes: que tengan renovación de agua por lo menos tres veces al día durante el horario de servicio, asegurando por lo tanto ausencia de remolino y, que el agua de estas albercas deberá muestrearse por lo menos tres veces en un mes, antes del inicio de temporada de mayor afluencia de visitantes para corroborar que se cumplen los límites permisibles de coliformes fecales y Amebas de vida libre.

**En el manantial Agua azul:** Construir cerca perimetral para la protección del sitio; En los manantiales utilizados con fines recreativos, es necesario cumplir con la norma oficial mexicana NOM-245-SSA1-2010, principalmente en lo referente a la calidad bacteriológica del agua. Es importante considerar que para que las albercas estén exentas de desinfección y de cumplir los parámetros fisicoquímicos de la norma, éstas deberán estar construidas por encauce de una corriente superficial o de un manantial, cuando presenten las características siguientes: que tengan renovación de agua por lo menos tres veces al día durante el horario de servicio, asegurando por lo tanto ausencia de remolino y, que el agua de estas albercas deberá muestrearse por lo menos tres veces en un mes, antes del inicio de temporada de mayor afluencia de visitantes para corroborar que se cumplen los límites permisibles de coliformes fecales y Amebas de vida libre.

**En el manantial Palo Bolero:** en la zona de ladera de la margen izquierda del Río Cuentepec construir un tanque de almacenamiento y bombear hacia las albercas.

**En el manantial Santa Rosa:** Es urgente un sistema de tratamiento de agua para su potabilización, que permita obtener un agua con menos de 0.025 mg/L de arsénico, previendo que en el futuro haya cambios en la normativa y, al igual que en el caso del agua

embotellada, el límite máximo permisible se fije en 0.01 mg/L; Se recomienda desinfectar el agua y asegurar en todo momento, a través del sistema de distribución, cumplir con el rango de cloro residual libre de 0.2 a 1.5 mg/L, de conformidad con la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, modificación del año 2000.

**En el manantial Los Ojos de Agua de Cuauchichinola:** Para suministrar agua al balneario Paraíso Escondido perforar un pozo hacia la margen izquierda del río y para fines agrícolas de los ejidatarios de Puente de Ixtla realizar un estudio de prospección con el objeto de perforar un pozo en zonas cercanas a sus cultivos.

**En todos los manantiales** se propone instrumentar todos los sitios y medir caudales con una frecuencia mensual, así como muestrear para análisis fisicoquímicos y determinar parámetros de campo cada 6 meses



## 9 REFERENCIAS

- Ayers, R.S. y Westcot, D. W.; 1985: La calidad del agua para la agricultura. FAO, Estudio de Riego y Drenaje No. 29, Roma.
- Barton, L. L., & Tomei, F. A. (1995). Characteristics and activities of sulfate-reducing bacteria. In L. L. Barton (Ed.), Sulfate reducing bacteria (pp. 1–32). New York:Springer.
- Betts R. and Voss R., 1970. The kinetics of oxygen exchange between the sulfite ion and water. *Can. J. Geochem.* 48, 2035-2041.
- Canfield, D. E. (2001a). Biogeochemistry of sulfur isotopes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 43(1), 607–636.
- Claassen, H.C. (1982). Guidelines and techniques for obtaining water samples that accurately represent the water chemistry of an aquifer, U.S. Geol. Surv. Open File Report, 82-1024, 49 p.
- Clark, I.D., and Fritz, P., 1997. Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers, N.Y., U.S.A., 63–108 y 287-290.
- Craig, H., 1961. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural water, *Science*, 133: 1833-1834.
- Comisión Nacional del Agua, (2015). Subdirección General Técnica. “Actualización de la disponibilidad media anual de Agua Subterránea en el acuífero (1701) Cuernavaca.
- Comisión Nacional del Agua, (2002). Subdirección General Técnica. “Actualización de la disponibilidad media anual de Agua Subterránea en el acuífero (1701) Cuernavaca.
- Comisión Nacional del Agua, (2015). Subdirección General Técnica. “Actualización de la disponibilidad media anual de Agua Subterránea en el acuífero (1702) Cuautla-Yautepec.
- Comisión Nacional del Agua, (2015). Subdirección General Técnica. “Actualización de la disponibilidad media anual de Agua Subterránea en el acuífero (1703) Zacatepec.
- Comisión Nacional del Agua, (2013). Subdirección General Técnica. “Estudio geohidrológico de la zona de manantiales en los municipios de Cuautla, Ayala y Yautepec, en el estado de Morelos”. Organismo de Cuenca Balsas. Dirección Técnica.Subdirección de Aguas Subterráneas.
- Constructora PAREYA, S. A., 1980. Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en varios sitios del estado de Morelos.
- Driscoll, G.F. (1986). “Groundwater and Wells. Johnson Division, St. Paul, Minn.
- Fritz P., Basharmal G., Drimmie R. Ibsen J. and Qureshi R., 1989. Oxygen isotope exchange between sulfate and water during bacterial reduction of sulfate. *Chem. Geol.*, 79, 99-105
- González-Hita, L. y Sánchez, L.F., 1992. Las técnicas isotópicas, una herramienta eficaz para el diagnóstico y evaluación de las aguas subterráneas. *Ingeniería Hidráulica en México.* 64-85

- Hao, O. J., Chen, J. M., Huang, L., & Buglass, R. L. (1996). Sulfate-reducing bacteria. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 26(2), 155–187.
- Horita, J., 2005. Isotopes in the Water Cycle, Past, Present and Future of a Developing Science, IAEA, Ed. By Pradeep K. Aggarwal, Joel R. Gat, and Klaus F.O. Fröhlich, Springer, pp 271-275
- Hutton, L.G., 1983. Field testing of water in developing countries. Unwin Brothers Limited. Great Britain. 125p.
- IAEA, 2005. Isotopes in the water cycle. Springer, Past, present and future of a developing science. Springer, The Netherlands. 381p.
- Mazor, E., 1991. Applied Chemicals and isotopic groundwater hydrology. Burns & Smith Ltd., Great Britain. 271p.
- MORELL EVANGELISTA, Ignacio: “Los manantiales”, en CASTILLO MARTÍN, Antonio (coord.): Manantiales de Andalucía, Agencia Andaluza del Agua, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla, pp. 28-35. 2011.
- Niedzielski, H. (1994). Características del manantial Las Estacas en Morelos, México. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. Geofísica Internacional. Vol.33, Núm. 2, pp. 283-294.
- Niedzielski, H. (1990). Characteristic manner of groundwater discharge in the Cuautla river sub-basin (Mexico). Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. Memoires of the 22nd Congress of IAH, Vol. XXII, Lousane.
- SARH, 1982. Estudio geohidrológico integral de la porción occidental del estado de Morelos. Secretaría de Salubridad y Asistencia, (2000). Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994 Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. (13 de Diciembre de 1989). Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89. Diario oficial de la Federación. México: Secretaría de Gobernación.
- Secretaría de Salud. (22 de Noviembre de 2000). MODIFICACION a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación. México: Secretaría de Gobernación.
- Secretaría de Salud. (12 de Julio de 2005). NOM-230-SSA1-2002. Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que deben cumplir en los sistemas de abastecimientos públicos y privados durante el manejo de agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo. Diario Oficial de la Federación. México, México: Secretaría de Gobernación.

- Secretaría de Salud. (26 de Junio de 2012). Norma Oficial Mexicana NOM-245-SSA1-2010, Requisitos sanitarios y calidad del agua que deben cumplir las albercas. Diario Oficial de la Federación. México, México: Secretaría de Gobernación.
- World Health Organization. (2011). Acceptability Aspects: Taste, odour and appearance. En Guidelines for Drinking-water Quality (Fourth ed., págs. 219-229). Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- TACSA, 1981. Estudio geohidrológico preliminar del valle de Zacatepec, Morelos.
- Aguilera-Franco N (2000) . High resolution stratigraphy and paleoecology of the Cenomanian- Turonian Succession southern Mexico: London, T. H. Huxley School of Environment Earth Sciences and Engineering Imperial College of Science Technology and Medicine, University of London, UK, PhD, Thesis (pág. 202).
- Aguilera-Franco N., et. al. (2004), “Eventos de una Sucesión del Cenomaniano-Turoniano del Sur de México”, Journal of Iberian Geology 31 (págs.25-50).
- Arce, J.L., Macías, R., García-Palomo, A., Capra, L., Macías, J.L., Layer, P., Rueda, H., 2008, Late Pleistocene flank collapse of Zempoala Volcano (Central Mexico) and the role of fault reactivation: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 177, 944–958.
- Arce, J.L., Layer, P.W., Lassiter, J., Benowitz, J.A., Macías, J.L., Ramírez- Espinosa, J., 2013b, 40Ar/39Ar dating, geochemistry, and isotopic analyses of the Quaternary Chichinautzin Volcanic Field, south of Mexico City: Implications for timing, effusion rate, and distribution of the volcanism: Bulletin of Volcanology, 75:774.
- Bloomfield, K., 1975, A late-Quaternary monogenetic volcano field in central Mexico: Geologische Rundschau, 64, 476–497.
- Capra L, Macías JL, Scott KM, Abrams M., Garduno-Monroy VH, 2002, Debris avalanches and debris flows transformed from collapses in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico Behavior and implications for hazard assessment. J Volcanol Geotherm Res 113:81–110.
- Campa Uranga, Ma. F. (1978), “La evolución Tectónica de Tierra Caliente, Guerrero”, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Tomo XXXIX N2 (págs 52-64).
- de Cserna, Z. (1965). Reconocimiento geológico en la Sierra Madre del Sur de Mexico, entre Chilpancingo y Acapulco, estado de Guerrero... Instituto de geología.
- De Cserna, Z., & Fries, C. (1981). Hoja Taxco 14Q-h (7) con Resumen de la geología de la Hoja Taxco, Estados de Guerrero, Mexico y Morelos. Universidad Nacional Autónoma de Mexico, Instituto de Geología.
- Ferrari, L., Pasquaré, G., Venegas, S., Romero, F., 2000a, Geology of the western Mexican Volcanic Belt and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco block, en Delgado-Granados, H., Aguirre-Díaz, G., Stock, J. (eds.), Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico: Boulder, CO, Geological Society of America, Special Paper, 334, 65-84.

- Ferrari-Pedraglio L., Morán-Zenteno D., González-Torres, E.A., 2007, Actualización y adaptación de la Carta Geológica de la República Mexicana, escala 1:2,000,000 publicada por el Instituto de Geología de la UNAM y el Consejo de Recursos Minerales (Ortega-Gutiérrez et al., 1992).
- Fries, C., 1960, Geología del estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de Mexico: Universidad Nacional Autónoma de Mexico, Instituto de Geología, Boletín, v. 60, 236 p.
- Fries, C., 1966, Hoja Cuernavaca 14Q-h(8), con Resumen de la geología de la hoja Cuernavaca, estados de Morelos, México, Guerrero y Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, serie de 1:100,000, mapa con texto explicativo en el reverso.
- García-Palomo, A., Macias, J.L., Garduño, V.H., 2000, Miocene to Recent structural evolution of Nevado de Toluca volcano region, Central México. *Tectonophysics* 318, 218–302.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., 2005. Petrogénesis Ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen conmemorativo del centenario. Temas selectos de la Geología Mexicana. Tomo LVII, Número 3, p 227-283.
- Lenhardt, N., Böhnel, H., Wemmer, K., Torres-Alvarado, I.S., Hornung, J., Hinderer, M., 2010, Petrology, magnetostratigraphy and geochronology of the Miocene volcanoclastic Tepoztlán Formation: implications for the initiation of the Transmexican Volcanic Belt (Central Mexico): *Bulletin of Volcanology*, 72, 817-832.
- Ordaz A. (1977), Estudio geológico e hidrogeológico del estado de Morelos, Tesis profesional, I.P.N.: México.
- Oswald, Ú. (2003). El recurso agua en el alto balsas. Unam.
- Márquez, A., Oyarzu, R., Doblas, M., Verma, S.P., 1999, Alkaline (ocean-island basalt type) and calc-alkaline volcanism in the Mexican Volcanic Belt: A case for plume-related magmatism and propagating rifting at an active margin?: *Geology*, 27, 51–54.
- Martín-Del Pozzo, A., 1982, Monogenetic volcanism in Sierra Chichinautzin, Mexico: *Bulletin of Volcanology*, 45, 9-24.
- Minero, S. S. G. (2008). Monografía geológicominera del Estado de Morelos. Servicio Geológico Minero. Secretaria de Economía. Gobierno Federal, México.
- Mooser, Federico, Sidney E. White, and José Luis Lorenzo. La cuenca de México: consideraciones geológicas y arqueológicas. Vol. 2. Instituto Nacional de Antropología e Historia, 1956.
- Mooser, F., 1975, Historia geológica de la Cuenca de México, en Memoria de las obras de drenaje profundo del Distrito Federal, México, D.F., Departamento del Distrito Federal, 38 p.
- Morán Zenteno D., et. al. (2007), "Stratigraphy of the Balsas Group in the Amacuzac area, southern Mexico: relationship with Eocene volcanism and deformation of the Tilzapotla-

- Taxco sector”, Revista mexicana de ciencias geológicas, ISSN 1026-8774, Vol. 24, Nº. 1 (págs. 68-80).
- Siebe C., 2000, Age and archaeological implations of Xitle volcano, southwestern Basin of Mexico City: Journal of vulcanology and geothermal research, 130, 45-64.
- Siebe, C., Macías, J.L., 2004, Volcanic hazards in the Mexico City metropolitan area from eruptions at Popocatépetl, Nevado de Toluca, and Jocotitlán stratovolcanoes and monogenetic scoria cones in the Sierra Chichinautzin Volcanic Field. Field Guide, Penrose Conference, Neogene–Quaternary Continental Margin Volcanism,
- Siebe, C., Arana-Salinas, L., Abrams, M., 2005, Geology and radiocarbon ages of Tláloc, Tlacotenco, Cuauhtzin, Hijo del Cuauhtzin, Teuhtli, and Ocusacayo monogenetic volcanoes in the central part of the Sierra Chichinautzin, México: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 141, 225–243.
- Vazquez-Sanchez, E., Jaimes-Palomera, R., 1989, Geología de la Cuenca de México: Geofísica Internacional, 28, 133–174.
- Vazquez-Sanchez, E., Jaimes-Palomera, R., 1989, Geoquímica Isotópica del Sistema Hidrogeológico del Valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México: Geofísica Internacional, 28-2, 219-244.