



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias del Agua

OCURRENCIA DE TRIHALOMETANOS EN LOS  
PUNTOS CRÍTICOS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN  
DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DE BENITO JUÁREZ,  
QUINTANA ROO, MÉXICO.

**Tesis que presenta**

Rodrigo Díaz Cruz

En opción al título de

**MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA**

**Cancún, Quintana Roo**

**(Enero del 2014)**





CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN A.C.

POSGRADO EN CIENCIAS DEL AGUA



## RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis titulado

OCURRENCIA DE TRIHALOMETANOS EN LOS  
PUNTOS CRÍTICOS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN  
DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DE BENITO JUÁREZ,  
QUINTANA ROO, MÉXICO.

perteneciente al Programa de Maestría en Ciencias del Agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua por Rodrigo Díaz Cruz bajo la dirección de la Dra. Rosa María Leal Bautista.

Atentamente

---

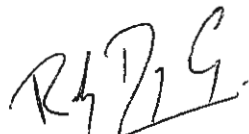
Dr. Felipe A. Vázquez Flota

Coordinador de Docencia  
Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Este trabajo se llevó a cabo en la Unidad de Ciencias del Agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección de la Dra. Rosa María Leal Bautista.

## DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos Experimentales, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.



Rodrigo Díaz Cruz

## Agradecimientos

El presente trabajo de investigación fue realizado bajo la dirección de la Dra. Rosa María Leal Bautista, a quien quiero agradecer por los consejos y tiempo extra dedicado al trabajo y a mi persona.

Agradezco a mi comité revisor por sus sugerencias y perspectivas que enriquecieron este estudio. Dra. Rosa María Leal Bautista, Dra. Laura Margarita Hernández Terrones, Dra. Melissa Lenczewski y Dr. Luis Ernesto Marín Stillman.

Doy las gracias a todos los profesores de la UCIA-CICY que dentro y fuera de sus clases me compartieron parte de su experiencia: Dr. Antonio Almazán Becerril, Dr. José Adán Caballero Vázquez, Dr. Mario Rebolledo Vieyra, Dra. Cecilia Hernández Zepeda y Dr. Francisco Valadéz Cruz.

Agradezco a la M. en C. Cinthya Grimaldo Hernández por su apoyo en campo y en laboratorio y al personal técnico de la UCIA- CICY, Q. Daniela Ortega Camacho, M. en C. Gabriela Rosiles González, M. en C. Sergio Escobar, B. Viridiana M. Nava Ruiz por su apoyo en laboratorio.

Gracias a CONACYT el otorgamiento de la Beca Nacional, Becario No. 284623.

Agradezco al Ing. David Chel y al Ing. José Ventura Díaz por su apertura a las instalaciones de AGUAKAN, S. A. de C. V.

Agradezco a Alex y Nax por su amistad y buenos momentos.

Un agradecimiento muy especial a la M. en C. Maria Fernanda Lasas Hernández por sus consejos, su ayuda y por su sola presencia.

Finalmente quiero agradecer a mis padres y a mis hermanos por guiarme y apoyarme en mis decisiones y por su valentía.

Dedicatoria

A mi Madre y a mi Padre.

## CONTENIDO

### RESUMEN

### ABSTRACT

<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
Hipótesis .....	3
Objetivos específicos .....	4
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>5</b>
<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>5</b>
1.1 El agua y la calidad bacteriológica .....	5
1.1.1 Coliformes totales.....	6
1.1.2 <i>Escherichia coli</i> ( <i>E. coli</i> ).....	6
1.1.3 Procesos de cloración. ....	8
1.1.4 Características químicas de los Trihalometanos.....	9
1.2 Estudios previos.....	11
1.3 Elementos físicos de una red de distribución de agua potable .....	13
1.3.1 Tuberías .....	13
1.3.2 Piezas especiales.....	13
1.3.3 Válvulas.....	14
1.3.4 Tanque de distribución .....	14
1.3.5 Tomas domiciliarias.....	14
1.3.6 Bombas .....	14
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>15</b>
2.1.1 Zona de estudio.....	15
2.1.2.1 Geología general de la Península de Yucatán .....	15
2.1.2.2 Rasgos estructurales de la Península de Yucatán .....	16
2.1.2.2 Hidrogeología de la Península de Yucatán .....	18



2.1.2.3 Características fisiográficas y climatológicas del acuífero noreste de la Península de Yucatán.....	18
2.1.2.3.1 Características hidrogeológicas del acuífero noreste de la península de Yucatán .....	19
2.1.2.4 Sistema de distribución de agua potable del municipio de Benito Juárez, Q. Roo .....	19
2.1.3 Parámetros físicos, químicos y bacteriológicos .....	20
2.1.4 Importancia de los parámetros .....	21
2.1.4.1 Temperatura .....	21
2.1.4.2 Potencial de Hidrógeno (pH).....	22
2.1.4.3 Conductividad .....	22
2.1.4.4 Nitritos y Nitratos.....	22
2.1.4.5 Cloro residual.....	23
2.1.4.6 Alcalinidad .....	23
2.1.4.7 Trihalometanos .....	23
2.1.4.8 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).....	24
2.1.4.9 Coliformes Totales .....	24
2.1.4.10 Escherichia coli .....	24
2.1.5 Estrategia de muestreo.....	24
2.1.6 Origen de las muestras.....	27
3.1 Resultados de los parámetros obtenidos en campo.....	29
3.1.1 Temperatura.....	30
3.1.2 Sólidos Disueltos Totales (SDT).....	31
3.1.3 Potencial de Hidrógeno (pH) .....	32
3.1.4 Cloro Residual.....	32
3.2 Resultados de los parámetros obtenidos en laboratorio.....	33
3.2.1 Nitratos.....	33
3.2.2 Nitritos .....	35
3.2.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno al 5to día (DBO <sub>5</sub> ).....	37
3.2.4 Alcalinidad .....	40
3.2.5 Bacteriología .....	42
3.2.6 Trihalometanos (THMs).....	46



3.2.7 Meteorología (precipitación pluvial) .....	48
<b>CAPITULO 4.....</b>	<b>50</b>
4.1 Discusión .....	50
<b>CAPITULO 5.....</b>	<b>56</b>
5.1 Conclusiones .....	56
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>64</b>

## Índice de tablas

Tabla 1.1 Límite de organismos resultante del examen de una muestra de agua.	Pag. 7
Tabla 1. 2 Propiedades físicas y químicas de los THMs.	9
Tabla 2.1 Parámetros de campo.	20
Tabla 2.2 Parámetros medidos en Laboratorio.	21
Tabla 2.3a Coordenadas geográficas de los sitios de muestreo de la zona Norte.	26
Tabla 2.3b Coordenadas geográficas de los sitios de muestreo de la zona Sur.	27
Tabla 3.1 Resultados de los parámetros obtenidos en campo zona Norte.	29
Tabla 3.2 Resultados de los parámetros obtenidos en campo zona Sur.	30
Tabla 3.3 Resultados de marzo bacteriología de zona Norte.	43
Tabla 3.4 Resultados de marzo bacteriología de zona Sur.	44
Tabla 3.5 Resultados de junio bacteriología de Zona Norte.	45
Tabla 3.6 Resultados de junio bacteriología de Zona Sur.	46
Tabla 3.7 Resultados de Trihalometanos de Zona Norte marzo y junio.	47
Tabla 3.8 Resultados de Trihalometanos de Zona Sur marzo y junio.	48

## Índice de figuras

Figura 1.1	Recopilación de Límites Máximos permisibles de THMs en algunos países	Pag. 10
Figura 2.1	Mapa a escala regional de la Península de Yucatán	17
Figura 2.2	Prospección del crecimiento de Cancún	19
Figura 2.3	Localización de Pozos, Tanques y Domicilios muestreados	25
Figura 2.4	Diagrama del sistema de distribución	28
Figura 3.1	Concentración de Nitratos en pozos, tanques y domicilios de marzo y junio en la zona Norte	34
Figura 3.2	Concentración de Nitratos en pozos, tanques y domicilios de marzo y junio en la zona Sur	35
Figura 3.3	Concentración de Nitritos en pozos, tanques y domicilios de marzo y junio en la zona Norte	36
Figura 3.4	Concentración de Nitritos en pozos, tanques y domicilios en muestras de marzo y junio en la zona Sur	37
Figura 3.5	DBO <sub>5</sub> en pozos, tanques y domicilios en muestras de marzo y junio en la zona Norte	38
Figura 3.6	DBO <sub>5</sub> en pozos, tanques y domicilios en muestras de marzo y junio en la zona Sur	39
Figura 3.7	Clasificación de calidad de agua de la CONAGUA de acuerdo a la DBO <sub>5</sub>	40
Figura 3.8	Alcalinidad en pozos, tanques y domicilios en muestras de marzo y junio en la zona Norte	41
Figura 3.9	Alcalinidad en pozos, tanques y domicilios en muestras de marzo y junio en la zona Sur	41
Figura 3.10	Precipitación pluvial histórica (1991-2012) y precipitación en 2013	48

## Índice de anexos

Anexo 1	Pag. 59
Anexo 2	61
Anexo 3	62
Anexo 4	67

## Resumen

El agua es uno de los recursos básicos para el desarrollo económico y social de cualquier civilización. Debido a la disponibilidad limitada de este recurso y al impacto que la actividad humana tiene sobre su composición existe un gran interés a nivel social y sanitario sobre todos los aspectos relacionados con la calidad del agua. Su estructura química presenta propiedades especiales que determinan que el agua sea un excelente disolvente de sustancias polares (orgánicas e inorgánicas), por lo que no es frecuente encontrarla en la naturaleza como sustancia pura. Los compuestos presentes en el agua se originan debido a la interacción agua-roca y a la disolución e infiltración de sustancias naturales o de origen antropogénico dando atributos físicos, químicos y microbiológicos que para uso y consumo humano deben ser regulados mediante tratamientos de potabilización.

Este estudio se enfocó en verificar la existencia de Trihalometanos (THMs) en el sistema de distribución de agua para uso y consumo humano y si la ocurrencia de los mismos es como subproducto del se relaciona al proceso de la desinfección o bien son parte de las características de la fuente de origen del agua subterránea en el sistema de distribución de los distintos pozos de la región del municipio de Benito Juárez, Quintana Roo. Así mismo, la evaluación de los cambios que se presentan en las características físico-químicas (temperatura, pH, conductividad y cloro residual en campo y en laboratorio alcalinidad, nitritos, nitratos, trihalometanos y demanda bioquímica de oxígeno) y bacteriológicas (coliformes y *Escherichia coli*) del agua a lo largo del sistema, permitió determinar la ocurrencia espacial de THMs ya sea como subproductos de desinfección (SPDs) o contaminantes. Para lo cual se tomaron muestras en los puntos críticos del sistema, a) de los pozos de extracción (antes de la cloración, b) en los tanques de rebombeo donde se mezcla el agua de diferentes pozos y se efectúa el proceso de cloración y c) en los domicilios a la llegada del sistema distribuidor y d) en los depósitos domiciliarios.

La zona de estudio está delimitada por la zona de distribución dentro del Municipio de Benito Juárez, Quintana Roo. Los resultados se compararon en el final de la época de estiaje y al inicio de la época de lluvias.

Este estudio presenta un diagnóstico integral de calidad de agua del municipio de Benito Juárez, Quintana Roo de 33 muestras (15 pozos para evaluar los puntos de extracción, cuatro tanques de mezcla, dos estaciones de cloración y 12 domicilios), con análisis en campo (cloro residual, conductividad, pH y temperatura); y en laboratorio los parámetros de bacteriología (organismos coliformes totales y *E. coli*). Los resultados indican que los coliformes totales y *E. coli* están presentes en puntos de extracción, así como en tanques de mezcla (pozos máximo 8.5 NMP/100ml y 1 NMP/100ml; en tanques de mezcla máximo 162.5 NMP/100ml y 5.2NMP/100ml para coliformes totales y *E. coli* respectivamente) sin embargo el proceso de cloración reporto 0 NMP/100ml en ambos parámetros. En marzo sólo se detectó una muestra de pozo con Bromoformo, sin embargo, en ocho muestras de depósitos domiciliarios se detectaron Bromodiclorometano, Dibromoclorometano y Bromoformo. En junio se detectó la presencia de la mayoría de THMs en muestras de pozo y depósitos domiciliarios. De acuerdo con estos resultados de cromatografía de gases los THMs (Bromodiclorometano, Dibromoclorometano y Bromoformo pero el Clorofomo no tuvo presencia). Este hecho confirma la hipótesis sobre la presencia de THMs como contaminante en el acuífero. En conclusión, un incremento en la demanda bioquímica de oxígeno (indicando un mayor contenido de materia orgánica disuelta); así como la presencia coliformes y de *E. coli* en domicilios es un indicador de la importancia del proceso de cloración que permite satisfacer la normatividad mexicana respecto a calidad bacteriológica, así mismo, repercute el mantenimiento e higiene de los contenedores domiciliarios (responsabilidad del consumidor) que juega un papel importante en el cambio de la calidad del agua en los domicilios. Y que contrario a lo esperado los compuestos químicos orgánicos pueden tener un origen antropogénico en los pozos de extracción y que los depósitos domiciliarios permiten la retención de estos compuestos.

## Abstract

Water is one of the basic resources for economic and social development of any civilization. Due to the limited availability of this resource and the impact human activity has on its composition there is a great interest to health and social level on all aspects related to the quality of the water. Its chemical structure has special properties that determine water as an excellent solvent for polar substances (organic and inorganic), so it is not often found in nature as a pure substance. Compounds present in water arise due to the interaction of water-rock and infiltration of natural substances of anthropogenic origin giving physical, chemical and microbiological attributes that should be regulated for human consumption by means of purification treatments. This study focused on verifying if there are trihalomethanes (THMs) in the public system water distribution for human consumption, as a byproduct of the disinfection process or its occurrence is part of the characteristics of the ground water source of the distribution system of the municipality of Benito Juárez, Quintana Roo. Assessment of the changes that occur in the physico-chemical characteristics of water throughout the system, allowed knowing the variations of water quality in the distribution from the well to the household. The methodology was set to evaluate water samples from the critical points of the distribution system: a) supply wells (without chlorination), b) mixing tanks where water from different wells get mixed and the chlorination process are applied, c) at the entrance of the household and d) at household storage containers. At all these points bacteriological water quality was verified through total coliforms and *Escherichia coli*: physicochemical characteristics (temperature, pH, conductivity and residual chloride) were measured at the moment of the sample collection (where alkalinity, nitrite and nitrates, biochemical oxygen demand and trihalometanes were developed at the laboratory).

Samples were taken at critical system points during dry (march, 2013) and rainy season; 15 supply wells to evaluate impact of contaminants in extraction point, four mixing tanks, two chlorination stations and 12 households (arrival an storage tanks). Residual chlorine, conductivity, pH and temperature were measured at the field. Chemicals parameters such as: Nitrates Nitrites by photometric method, Biochemical Oxygen Demand (BOD<sub>5</sub>) by the Five-day test for biochemical oxygen demand and Alkalinity by titration method and bacteriological parameters such as total coliforms and *E.coli* by chromogenic method



(IDEXX Colilert). The Trihalomethanes by a modified EPA Gas Chromatography GC-FID method were performed at the Laboratory.

Total coliforms and *E.coli* are present in well (maximum 8.5 wells NMP / 100 ml and 1 NMP / 100 ml) and mixing tanks (maximum 162.5 NMP / 100 ml as total coliforms and 5.2 NMP/100 ml as *E.coli*). In rainy season (maximum concentrations total coliforms were 1299.7 NMP/100ml, in mixing tanks 709.45 NMP/100ml and *E.coli* were detected in wells and mixing tanks 1.5 NMP / 100ml) after chlorination process total coliforms were 0 NMP/100ml except one sample with 2419.6 NMP/100ml related with deficit in the hygiene valve, *E. coli* were 0 NMP/100ml.

However the chlorination process reported 0 NMP / 100 ml in both parameters, which indicates that the disinfection process fulfill the bacteriological quality requirements of the Mexican regulations. However, an increase in biochemical demand of oxygen (indicating a higher content of dissolved organic matter); as well as the presence of coliforms and *E.coli* in households that could be related to the importance of maintenance and hygiene of home-based containers (responsibility of the consumer) which plays an important role in the water quality change at the households.

In summary the distribution system complies with national regulations. However, an increase in the biochemical oxygen demand (indicating a higher content of dissolved organic matter) and the presence of coliforms and *E. coli* in addresses is indicative of the importance of maintaining hygiene and household containers (consumer responsibility), which plays an important role in changing the water quality in homes.

The results of the Gas chromatographic showed presence of bromophorm in wells, bromodichloromethane, dibromodichloromethane and bromophorm in eight household samples during dry season. At the rainy season the presence of these compounds is confirmed in wells and households as THMs group.

The occurrence of these compounds in well indicates their relation with anthropogenic activity by infiltration to the aquifer, its confirmation at household containers could be related to its persistence and accumulation through the distribution system related to an increase of organic matter and total dissolved solids. And that contrary to expectations the

organic chemical compounds can have an anthropogenic origin in the extraction wells and household deposits allow the retention of these compounds.

## Introducción

La mayoría de los procesos de distribución de agua potable en México (gobierno o privados) se basan en la extracción de cuerpos de agua subterránea. La red debe proporcionar este servicio de manera continua, en cantidad suficiente, con la calidad requerida y a una presión adecuada. La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 vigente, establece los límites de calidad del agua en 0 NMP\_100 mL, para que pueda ser considerada como potable.

Un sistema de distribución de agua se compone de instalaciones para la captación, almacenamiento, conducción, bombeo, tratamiento y distribución del recurso hídrico. En general, las obras de captación y almacenamiento permiten reunir las aguas aprovechables de ríos, manantiales y agua subterránea.

Los tratamientos físicos como la filtración, la exposición a radiación Ultra Violeta o la desinfección térmica permiten exterminar directamente a los microorganismos y no afectan la calidad química del agua, sin embargo, la eficiencia de estos se da solo durante el tratamiento y nuevas generaciones de organismos pueden proliferar después de la aplicación del mismo, a diferencia de los tratamientos químicos que utilizan compuestos halogenados (Cloro, Yodo, Bromo y Flúor) que por su característica oxidante eliminan tanto a micro como macroorganismos y tienen un efecto remanente que permite mantener el recurso desinfectado por más tiempo.

El área de estudio se localiza sobre un sistema cárstico (Península de Yucatán), donde la precipitación se infiltra rápidamente hasta el nivel freático, lo que propicia alta vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, no hay escurrimiento superficial significativo, por lo que el agua subterránea es la principal de agua de consumo humano (CONAGUA, 2011). El municipio de Benito Juárez, Quintana Roo se encuentra en el Noreste de la Península de Yucatán, con una superficie de 1,644 km<sup>2</sup> y 661,176 habitantes. El sistema de distribución cuenta con 160 pozos de abastecimiento y 49 tanques de rebombeo con sistemas de inyección de dióxido de cloro. El proceso de cloración es aplicado para garantizar la calidad bacteriológica, misma que es monitoreada mensualmente por la empresa distribuidora y la secretaria de salud mexicana, sin embargo, al agregar un agente desinfectante químico al recurso es necesario regular su

concentración así como los posibles subproductos de desinfección que se generan y cuya concentración está regulada por la misma normatividad.. Para el caso específico de la ciudad de Cancún, la problemática del abastecimiento de agua potable, tiene que ver con el aumento desmedido de la población y sus asentamientos irregulares. Este estudio presenta un diagnóstico integral de calidad de agua del municipio de Benito Juárez, Quintana Roo a partir de un total de 33 estaciones de muestreo (15 pozos para evaluar desde el punto de extracción, cuatro tanques de mezcla, dos estaciones de cloración y 15 domicilios) en dos temporadas marzo (estiaje) y junio (lluvias).

La importancia de este diagnóstico, así como la relevancia de esta evaluación quedan plasmadas en el capítulo uno, donde se presentan la importancia de limitar la presencia de los THMs generados en los procesos de desinfección dada la naturaleza cancerígena con la que históricamente se ha asociado y su impacto en la salud pública. Así como los estudios previos que evaluaron la presencia de THMs a nivel nacional, así como la hipótesis del presente estudio.

El capítulo dos describe la metodología iniciando con la descripción geológica e hidrogeológica de la zona de estudio, se describe la metodología efectuada en campo y en el laboratorio resaltando la importancia de cada parámetro utilizado.

En campo se determinó la concentración de cloro residual, conductividad, pH y temperatura. Los parámetros químicos nitritos y nitratos mediante espectrofotometría, demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), alcalinidad (expresada como bicarbonatos). Los parámetros bacteriológicos: coliformes totales y *E. coli* por el método del número más probable mediante la técnica de sustrato cromogénico (IDEXX Colilert) y la presencia de trihalometanos fue determinada mediante cromatografía de gases GC-FID.

En el capítulo tres se presentan los resultados obtenidos con su respectiva descripción por parámetro. En este apartado se incluyó el comportamiento de la precipitación pluvial durante los periodos de muestreo para su posterior correlación con los resultados.

En el capítulo cuatro se realiza la discusión de los resultados por evaluándolos respecto a la norma correspondiente así como la explicación de sus comportamientos espacial y temporalmente y repercusión de los mismos en el sistema de distribución.

El capítulo cinco integran las conclusiones, donde se señala que la presencia de nitratos y nitritos tiende a detectarse desde el origen del agua de distribución (pozos) y mantiene su presencia en la mezcla de agua al pasar al cárcamo de bombeo. Si bien, la Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) no se incluye entre los parámetros de la NOM-127 SSA-1994 dentro de la clasificación señalada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), su determinación, permite clasificar la calidad del agua con respecto a la presencia de materia orgánica en los puntos críticos del sistema en excelente, buena y aceptable. La presencia de coliformes totales y *E.coli* en muestras de pozo en ambas temporadas confirma la necesidad de la desinfección, y las muestras de domicilio confirman la eficacia del mismo al presentar ausencia de los microorganismos normados.

Los THMs que fueron detectados en las muestras de pozos son los mismos que se detectaron en las muestras de domicilio. De acuerdo a estos resultados, durante la época de estiaje los pozos de distribución mostraron presencia de bromoformo en un pozo, en la temporada de lluvias (junio) la presencia de estos compuestos orgánicos (THMs) se incrementó en los pozos (seis muestras) siendo los pozos de la zona Norte quienes presentaron mayor incidencia de estos compuestos. La presencia de THMs en el sistema de distribución y la coincidencia de los mismos en los pozos, indica que persistieron desde el acuífero y fueron distribuidos hasta los domicilios.

Las variaciones detectadas en la calidad del agua, se relacionan directamente con la temporalidad debido a la infiltración de agua de lluvia que recarga el acuífero y transporta estos y otros compuestos (Nitritos, Nitratos y materia orgánica).

### **Hipótesis**

Debido a las condiciones hidrogeológicas del acuífero Noreste de la Península de Yucatán y el método de desinfección del sistema de distribución de agua potable, la hipótesis es la siguiente: Los Trihalometanos (THMs) se encuentran presentes por actividad de polución en la zona de recarga del acuífero y no exclusivamente por la formación de subproductos de desinfección (SPD). La ocurrencia, concentración y persistencia de los mismos depende de las condiciones naturales del agua, de las condiciones del proceso de desinfección y de las características de los puntos de almacenamiento residencial.

## Objetivo General

Determinar si existen THMs en el sistema de distribución de agua para uso y consumo humano y si la ocurrencia de los mismos es como subproducto del proceso de la desinfección o bien son parte de las características de la fuente de origen del agua subterránea en el sistema de distribución de los distintos pozos de la región del municipio de Benito Juárez, Quintana Roo.

## Objetivos específicos

- Evaluar la calidad física, química y bacteriológica del agua de origen al sistema de distribución en la zona de estudio.
- Evaluar la calidad física, química y bacteriológica del agua en el sistema de distribución antes y después del proceso de cloración.
- Comparar la calidad física, química y bacteriológica del agua del sistema de distribución a la toma domiciliaria con el agua almacenada en los depósitos domiciliares.
- Determinar la procedencia de la materia orgánica que pueda reaccionar durante el proceso de desinfección del sistema de distribución.
- Determinar la ocurrencia temporal y espacial de los Trihalometanos.



## CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

### **1.1 El agua y la calidad bacteriológica**

Históricamente los asentamientos humanos han tenido lugar en ubicaciones con fácil acceso al agua como ríos y lagos debido a que es un recurso básico para todo tipo de formas de vida. Sin embargo, debido al crecimiento demográfico surgió la necesidad de buscar otras fuentes del recurso hídrico, por lo que la sociedad se vio obligada a desarrollar sistemas que les permitieran aprovechar los recursos de agua subterráneos (acuíferos). En general un acuífero queda definido como aquella formación geológica capaz de almacenar y transmitir agua susceptible de ser explotada en cantidades económicamente apreciables para atender diversas necesidades de uso.

En México, la Ley de Aguas Nacionales de 2004 define a un acuífero como cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso y aprovechamiento.

Existen registros epidemiológicos que destacan al agua como vector de transmisión reconocido para muchos tipos de microorganismos patógenos, por ejemplo la bacteria *Vibrio cholerae* causante del cólera desde el siglo XIX que ha dado pie a epidemias que han diezmando la población de algunas ciudades. El primer registro de pandemia o epidemia mundial se registró en 1817 en Asia Sudoriental, y posteriormente se propagó a otras partes del mundo (WHO, 2013).

Birrichaga 1998 menciona que durante el siglo XIX los avances de la bacteriología, la química y la ingeniería demostraron que la salubridad de la población se relacionaba, principalmente con la calidad y cantidad del agua empleada en los usos domésticos. El progreso de la higiene se consideró un sinónimo de la sociedad moderna; con ese fin las autoridades promovieron la higiene pública en los centros urbanos, tratando de evitar enfermedades y amenazas mayores como las epidemias.

Los sistemas de almacenamiento y distribución de agua potable constituyen un ambiente con características adecuadas para el desarrollo bacteriano; el flujo de agua favorece el transporte de nutrientes y bacterias, mientras que las superficies de las tuberías y las



partículas presentes en el agua pueden servir de superficie de crecimiento para las bacterias (Knobelsdorf y Mujeriego, 1997).

Dado que los brotes de enfermedades transmitidas por el agua pueden afectar poblaciones enteras, la Organización Mundial de la Salud (OMS) tiene como prioridad la evaluación de la calidad bacteriológica del agua.

Las bacterias pueden entrar en el sistema de distribución a través de una ineficaz desinfección del agua, baja presión de tuberías de agua, servicio intermitente, fugas excesivas de red, la corrosión de tuberías y disposición inadecuada de aguas residuales (Lee y Schwab, 2005).

### **1.1.1 Coliformes totales**

Los coliformes totales son indicadores utilizados a nivel mundial para evaluar la potabilidad del agua por ser fáciles de detectar y cuantificar (OMS., 1995). El término abarca bacterias de tipo bacilos, Gram negativas que crecen en presencia de sales biliares o de otros compuestos con propiedades similares de inhibición y que fermentan lactosa de 35 a 37°C produciendo ácido, gas y aldehído en un plazo de entre 24 y 48 horas. Sin embargo, si se requiere saber si existe o no contaminación fecal se debe hacer la prueba específica. Los coliformes totales son eliminados del agua mediante procesos de desinfección como la cloración, radiación UV y ozonización (OMS., 1995).

### **1.1.2 *Escherichia coli* (*E. coli*)**

Las bacterias coliformes fecales expresadas como *Escherichia coli* (*E.coli*) son específicamente de origen fecal y se encuentra siempre presentes en las heces de humanos, otros mamíferos y gran número de aves; no se encuentran en aguas y suelos que no han estado sujetos a contaminación fecal. Por ello desde el punto de vista de la salud, el grupo *E.coli* es mucho más útil que el total, pues se relaciona con la probabilidad de encontrar patógenos excretados (Yuste et al., 2006). Las ventajas de este grupo como indicador son:

- El 95 % dan una respuesta positiva a la prueba de temperatura.
- Pueden estar ausentes, si la contaminación no es de origen fecal.

- Sobreviven menos tiempo en la naturaleza que los totales por lo que permiten suponer contaminación reciente si se encuentran en altas densidades.
- Los procedimientos de laboratorio para su cuantificación son relativamente sencillos. Sin embargo, algunas cepas dan respuesta negativa a la prueba de temperatura en el laboratorio.
- Tienen la capacidad de reproducirse en aguas ricas en nutrientes, en sedimentos y aún en aguas poco contaminadas; algunas cepas de *Escherichia coli* sobreviven menos tiempo que Salmonella en aguas a bajas temperaturas.

El valor guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el de la Norma Oficial Mexicana para agua para uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994) debe ser en ambos casos de ausente por cada 100 ml.

Un tratamiento eficiente que culmine en la desinfección debe producir agua sin bacterias coliformes, sin embargo, aunque el agua reúna las condiciones de potabilidad al ingresar al sistema de distribución, puede deteriorarse antes de llegar al consumidor, ya sea por contaminación del mismo sistema de distribución o por manejo deficiente dentro de los domicilios, el cual se agrava por el almacenamiento en cisternas, tinacos u otros depósitos que pueden resultar defectuosos o manejados en forma inapropiada. La contaminación en estos casos puede ser tan peligrosa como la distribución de agua cuyo tratamiento haya sido insuficiente (Flores-Abuxapqui et al., 1995).

La NOM-127-SSA1-1994 establece, con el fin de controlar la calidad microbiana de agua para uso y consumo humano establece los siguientes parámetros bacteriológicos (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Contenido de organismos resultante del examen de una muestra simple de agua NOM-127-SSA1-1994.

Parámetro.	Cantidad de Unidades formadoras de colonias (UFC) o Numero Más Probable (NMP)
Organismos coliformes totales	0 NMP/100 ml ó 0 UFC/100 ml
Organismos coliformes fecales ( <i>E. coli</i> )	0 NMP/100 ml ó 0 UFC/100 ml

Los resultados de los análisis bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 ml (número más probable en 100 ml), si se utiliza la técnica del número más probable o

UFC/100 ml (unidades formadoras de colonias por 100 ml), si se utiliza la técnica de filtración por membrana.

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), la variación en la calidad del agua originalmente salubre en el lugar de recolección, puede ser expuesta a la contaminación fecal durante la extracción, el transporte o el uso en el hogar, principalmente a través de las manos sucias o problemas con la infraestructura de distribución (pozos expuestos al fecalismo, etc.). En la medida de lo posible, el almacenamiento seguro también debe formar parte de las intervenciones para el tratamiento del agua en el hogar (OMS., 1995). Para el año 2005, una revisión sistemática de la gestión en la distribución del agua realizada por la OMS (Bloom, 2007), permitió concluir que los episodios diarreicos se reducen un 25% al mejorar el abastecimiento de agua, un 32% al mejorar el saneamiento, un 45% por medio del lavado de manos y un 39% mediante el tratamiento y el almacenamiento seguro del agua doméstica.

### **1.1.3 Procesos de cloración.**

En 1854 durante una epidemia en Londres, Inglaterra John Snow realizó un estudio que relacionó dicha epidemia con la contaminación del agua, lo que impulsó los primeros procesos de filtrado aplicados al agua de consumo humano. En 1908 se inicia el tratamiento de agua con hipoclorito de calcio en Chicago. En 1909 en New Jersey se inicia la cloración con hipoclorito y la cloración se vuelve un proceso obligatorio en las plantas de tratamiento de aguas para consumo humano (Buck, 1988).

El cloro, ( $\text{Cl}_2$ ) gas, en solución acuosa o en sales con oxígeno como el perclorato ( $\text{ClO}_2$ ), es un potente biocida y decolorante. Debido a su potencialidad para oxidar a las sustancias orgánicas elimina micro y macroorganismos, no obstante, como cualquier desinfectante empleado en el agua potable produce Subproductos de la Desinfección (SPDs) (Ivahnenko and Zogorski, 2007). Se han identificado alrededor de 600 SPDs cuando se emplean como desinfectante algunos de los siguientes reactivos: cloro, cloraminas, dióxido de cloro, ozono entre otros (Monarca et al., 2002; Woo et al., 2002).

La presencia de Trihalometanos (THMs) en aguas de abastecimiento desinfectadas con cloro fue detectada por primera vez en 1974 en Amsterdam, Holanda (Rook, 1974) y

posteriormente en Nueva Orleans, E.U.A. (Bellar et al., 1974). Estos estudios establecieron la presencia de THMs como subproductos de la reacción del cloro como desinfectante con la materia orgánica presente en el agua. Los THMs pueden contener átomos de bromo los cuales se incorporan mediante la reacción de la materia orgánica con el bromo, formado en la de oxidación del bromuro (presente en las aguas naturales) con el cloro añadido como desinfectante.

#### **1.1.4 Características químicas de los Trihalometanos**

Como se mencionó anteriormente, el cloro es un elemento altamente reactivo con algunos compuestos orgánicos e inorgánicos y cuando un compuesto clorado es utilizado como desinfectante existe un riesgo potencial de formar THMs como subproducto no deseado.

Los THMs son compuestos con un solo átomo de carbono donde los hidrógenos son sustituidos total o parcialmente por halógenos, principalmente cloro y bromo que la mayoría de veces se presenta como impureza de cloro comercial. Generalmente, dentro del grupo de los THMs, cuatro de ellos son los que se presentan con mayor frecuencia y concentración: triclorometano (cloroformo), tribromometano (bromoformo), diclorobromometano (DCBM) y dibromoclorometano (DBCM) (Ver Tabla 1. 2) (Ivahnenko y Zogorski, 2007; Hua y Reckhow, 2007; Sarmiento et al., 2003).

Tabla 1. 2 Propiedades físicas y químicas de los THMs

Propiedades Físicas y Químicas	Cloroformo	Bromoformo	Dibromoclorometano	Bromodiclorometano
Sinónimos	Triclorometano	Tribromometano	Clorodibromometano	Diclorobromometano
Fórmula Química	CHCl <sub>3</sub>	CHBr <sub>3</sub>	CHBr <sub>2</sub> Cl	CHBrCl <sub>2</sub>
Número Cas	67-66-3	75-25-2	214-48-1	75-27-4
Peso Molecular (g/mol)	119.38	252.78	208.28	163.83
Color	Sin color	Sin color	Sin color/ Amarillo claro	Sin color
Olor	Placentero Dulce	Similar al cloroformo	-	-
Densidad a 20 °C (g/cm <sup>3</sup> )	1.4832	2.899	2.451	1.98
Solubilidad en agua a 25 °C (mg/L)	7.43x10 <sup>-3</sup> mg/L	3.10 x 10 <sup>-3</sup> mg/L	2.7 x 10 <sup>-3</sup> mg/L	4.5 x 10 <sup>-3</sup> mg/L
Punto de Fusión (°C)	-64	8	-20	-57.1
Punto de Ebullición (°C)	62	149.1	120	90

Los THMs son productos de la interacción de la materia orgánica con el cloro, los componentes de origen orgánico presentes en esta reacción son (Navalón, 2010):

Ácidos fúlvicos y húmicos (materia orgánica del suelo).

- Productos de degradación de materia orgánica como resorcinol.
- Biomasa de algas.
- Aminoácidos.

La OMS, así como las normas oficiales emitidas en diferentes países han establecido límites máximos permisibles (figura 1.1), donde se destacan países como Colombia, Guatemala y Turquía los cuales no cuentan con referencia para estos compuestos; Ecuador, Honduras y Nicaragua tienen un margen amplio (0.46 mg/L) respecto a naciones como Alemania, Dinamarca, Francia e Italia (0.01 mg/L) que están 20 veces por debajo de lo sugerido por la OMS (0.2 mg/L).



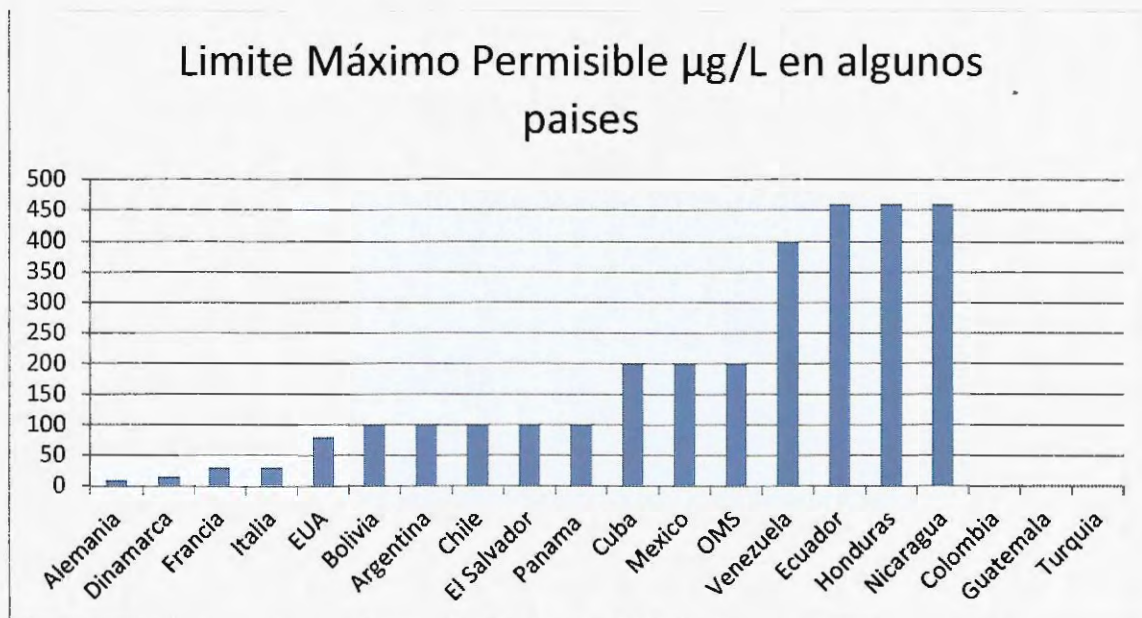


Figura 1.1 Límites máximos permisibles de Trihalometanos en las normas de 19 países en comparación con los límites máximos permisibles de la OMS.

La calidad inicial de las aguas (en el punto de extracción) es el principal determinante de la cantidad y el tipo de subproductos de la cloración generados, de modo que las aguas subterráneas con menor cantidad de precursores orgánicos, requieren menos cloro respecto a las aguas superficiales que darán niveles bajos de subproductos de la cloración que la especiación y concentración final de los THMs formados depende de diferentes factores, entre ellos (Villanueva et al., 2001; Freire et al., 2008 y Navalón et al., 2009) determinaron:

- La concentración de materia orgánica presente en el agua,
- El tipo de desinfectante utilizado y la dosis aplicada,
- El tiempo de residencia en la red de distribución,
- La temperatura y
- El pH del agua durante el tratamiento.

## 1.2 Estudios previos

Prieto et al., (1993) realizaron determinaciones de THMs en dos acueductos en Venezuela. En dicho trabajo se encontró que, los valores de THMs totales fueron menores a los límites máximos permisibles por la OMS de 0.2 mg/L. En el 2003,

Sarmiento et al., (2003) realizaron una investigación en la misma zona teniendo como resultado que los niveles de THMs son menores de 0.8 mg/L.

La formación de trihalometanos está influenciada no sólo por la concentración de cloro, sino también por los precursores de THM específicas, materia orgánica y particularmente bromuro (Liang y Singer, 2003).

Rizzo et al., (2005) presentaron un estudio comparativo de ocurrencia de THMs en dos ciudades Salerno, Italia y Estambul, Turquía. En la ciudad de Salerno, Italia, el agua suministrada es de origen subterráneo lo que implica una menor contaminación por materia orgánica y el cloro no se ocupa como desinfectante sino como remanente de desinfección como cloro residual lo que permite tener control sobre estos compuestos y las autoridades han ajustado su normatividad a una concentración de THMs a 30 µg/l, sin embargo, se han detectado valores de 75.6 a 30 µg/l. Mientras que en Estambul, Turquía, el suministro de agua es mediante agua superficial que tiene contacto directo con materia orgánica y el cloro se utiliza como desinfectante los resultados fueron de 36 a los 159.4 µg/l que es menor al establecido por la OMS .

En México se han publicado estudios de detección y cuantificación de THMs en el agua de distribución:

- Gelover et al., (2000) En Guadalajara, Tijuana, Torreón, Oaxaca y Cancún.
- Jiménez et al., (2004) En el Valle de México.
- Nuñez et al., (2005) En la zona metropolitana de Monterrey, Nuevo León.
- Garrido y Fonseca, (2010) En el área Norte de la ciudad de Toluca.

Gelover et al. (1999) realizaron una evaluación de compuestos orgánicos volátiles en cinco ciudades mexicanas, identificaron y cuantificaron triclorometano, dibromoclorometano, dibromometano y bromoformo dentro del grupo de THMs, el mismo estudio señaló la presencia del bromoformo como el compuesto más recurrente en las muestras tomadas en la Ciudad de Cancún.

Jiménez et al. (2002) realizaron una evaluación y comparación de la calidad microbiológica, física y química del agua en las fuentes naturales y el agua tratada para uso y consumo humano en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México; los THMs



fueron detectados como contaminantes con una concentración máxima de 80.92 µg/l en el agua de pozo, además se determinó una concentración máxima de 132.63 µg/l en el agua distribuida.

Núñez et al. (2005) en un estudio realizado al agua potable de la zona metropolitana de Monterrey, Nuevo León, detectaron niveles de THMs por debajo de 80 µg/l en todos los eventos de muestreo.

Garrido y Fonseca (2009) en una investigación de especiación y cinética de formación de THMs en el sistema de distribución de agua para uso y consumo humano en el Norte de la ciudad de Toluca, Estado de México tuvieron un valor máximo de THMs de 98.55 µg/l.

Actualmente está demostrado que la exposición a los THMs, también se da de manera significativa a través de la inhalación y por la absorción dérmica. Por lo que además de la ingesta, se ha demostrado que una persona puede recibir el doble de exposición a los THMs a través de una ducha debido a la inhalación y una exposición equivalente a través de adsorción dérmica (ej. un baño). Comparado con la ingesta de 2 L de agua, nadar en piscinas con cloro contribuye a la exposición total, es decir a la exposición por todos las vías posibles. (Miles et al., 2002).

### **1.3 Elementos físicos de una red de distribución de agua potable**

#### **1.3.1 Tuberías**

Se define como el conjunto formado por los tubos (conductos de sección circular) y su sistema de unión o ensamble. Para fines de análisis se denomina tubería al conducto comprendido entre dos secciones transversales del mismo. La red de distribución está formada por un conjunto de tuberías que se unen en diversos puntos denominados nudos o uniones (OMS, 1995).

#### **1.3.2 Piezas especiales**

Son todos aquellos accesorios que se emplean para llevar a cabo ramificaciones, intersecciones, cambios de dirección, modificaciones de diámetro, uniones de tuberías de diferente material o diámetro, y terminales de los conductos, entre otros (OMS, 1995).

### **1.3.3 Válvulas**

Son accesorios que se utilizan para disminuir o evitar el flujo en las tuberías. Pueden ser clasificadas de acuerdo a su función en dos categorías:

Válvulas de Aislamiento o seccionamiento: son utilizadas para separar o cortar el flujo del resto del sistema de abastecimiento en ciertos tramos de tuberías, bombas y dispositivos de control con el fin de revisarlos o repararlos.

Válvulas de Control: son usadas para regular el gasto o la presión, facilitar la entrada de aire o la salida de sedimentos o aire atrapados en el sistema.

### **1.3.4 Tanque de distribución**

Un tanque de distribución es un depósito situado generalmente entre la captación y la red de distribución que tiene por objeto almacenar el agua proveniente de la fuente. El almacenamiento permite regular la distribución o simplemente prevenir fallas en el suministro, aunque algunos tanques suelen realizar ambas funciones.

### **1.3.5 Tomas domiciliarias**

Es el conjunto de piezas y tubos que permite el abastecimiento desde una tubería de la red de distribución hasta el predio del usuario, así como la instalación de un medidor. Es la parte de la red que demuestra la eficiencia y calidad del sistema de distribución pues es la que abastece de agua directamente al consumidor.

### **1.3.6 Bombas**

Son máquinas que reciben energía mecánica proveniente de un motor a través de la flecha con el fin de elevar la presión del agua para conducirla en las tuberías. La gran mayoría de los sistemas de distribución y líneas de conducción de agua potable incorporan bombas en sus instalaciones para trasladar el agua a través del sistema o mantener presiones requeridas (OMS,1995).

## CAPÍTULO 2

### METODOLOGÍA

#### **2.1.1 Zona de estudio**

La zona de estudio está ubicada sobre un acuífero cárstico, que en general se caracteriza porque el flujo de agua circula en dirección radial de los puntos de carga hidráulica altos del interior y en dirección a la costa a través de una o varias articulaciones, fracturas, planos de estratificación y conductos interconectados, los cuales fueron originados por procesos de disolución de la roca base (generalmente caliza o dolomita), proceso conocido como carstificación (Huntoon, 1995).

Todas las rocas y los minerales pueden disolverse si se exponen a un ácido débil o fuerte en un tiempo de contacto determinado. La solubilidad de la roca caliza con agua pura es lento, imperceptible a lo largo de los años, pero es altamente soluble en ácidos débiles (Ford y Williams, 2007).

Una solución débil de ácido carbónico es formada cuando el agua entra en contacto con el dióxido de carbono del ambiente. El dióxido de carbono es un constituyente de la atmósfera, sus fuentes son los organismos vivos (respiración) y también está contenido en diversas rocas y minerales, por lo cual el ácido más abundante en agua natural es el carbónico (White, 1988).

#### **2.1.2.1 Geología general de la Península de Yucatán**

La Península de Yucatán se localiza al Sureste de México y divide el Golfo de México del Mar Caribe en el extremo sur de América del Norte y la parte norte de América Central, se localiza entre las latitudes 18° y 22° Norte y entre las longitudes 86° y 91° Oeste. La integran tres estados: Yucatán, Quintana Roo y Campeche con un territorio de aproximadamente 139,897 Km<sup>2</sup> (INEGI, 2010).

La península ha tenido una evolución geológica compleja caracterizada por un basamento metamórfico de edad paleozoica sobre el cual ha evolucionado una secuencia sedimentaria con un espesor mayor a 3000 metros depositada desde el Jurásico de origen continental con intercalaciones volcánicas; al parecer la fuente de suministro de

los materiales tienen su origen en un basamento paleozoico. Durante el Cretácico se formaron cuencas de circulación restringida generando las condiciones propicias para el desarrollo de sedimentación evaporítica que se ha clasificado en tres zonas (Lesser y Weidie, 1988).

### **2.1.2.2 Rasgos estructurales de la Península de Yucatán**

La península de Yucatán (figura 2.1) es una plataforma calcárea característica por ser una superficie plana, con la presencia de colinas en la parte norte y sur oriental. Sus principales rasgos fisiográficos son: la Falla de Ticul delineada por la Sierrita de Ticul, el Anillo de Cenotes que rodea la Cuenca Sedimentaria del Chicxulub, la Zona de fracturas de Holbox al noreste de Quintana Roo y la falla del Río Hondo (Jiménez y Morán, 2004).

La Sierrita de Ticul localizada al occidente de la península de Yucatán orientada de noroeste a sureste está formada por crestas paralelas con una extensión de 110 km y altitud máxima de 275 m.s.n.m. Este relieve es un parte aguas de la península ya que al sur de la Sierrita existen algunos valles y lomeríos con altura máxima de 150 m.s.n.m. y hacia la parte norte una planicie con pendiente de hasta 50 m hasta el nivel del mar (Marín et al., 2004).

La Zona de fracturas de Holbox es un rasgo tectónico que se extiende aproximadamente 100 Km con 50 Km de ancho, la formación de esta zona se dio durante los movimientos de placas tectónicas en el Eoceno (Rosencrantz, 1990).

La falla del Río Hondo se sitúa al sur de la Zona de fracturas de Holbox, consiste en una serie de fallas orientadas de noreste a suroeste las cuales dieron origen a la costa del Caribe y a la Isla Cozumel (Ward et al., 1985).

El Anillo de Cenotes se encuentra sobre el borde de la cavidad de excavación del cráter del Chicxulub (Sharpton et al., 1993). Este Anillo es una alineación de dolinas cársticas (conocidas como cenotes), el área circunscrita por el Anillo tiene mayor densidad de cenotes y permeabilidad que las áreas fuera de este, esto se atribuye a un cambio de facies causado por la exposición subaérea y la erosión (Perry et al., 2002).



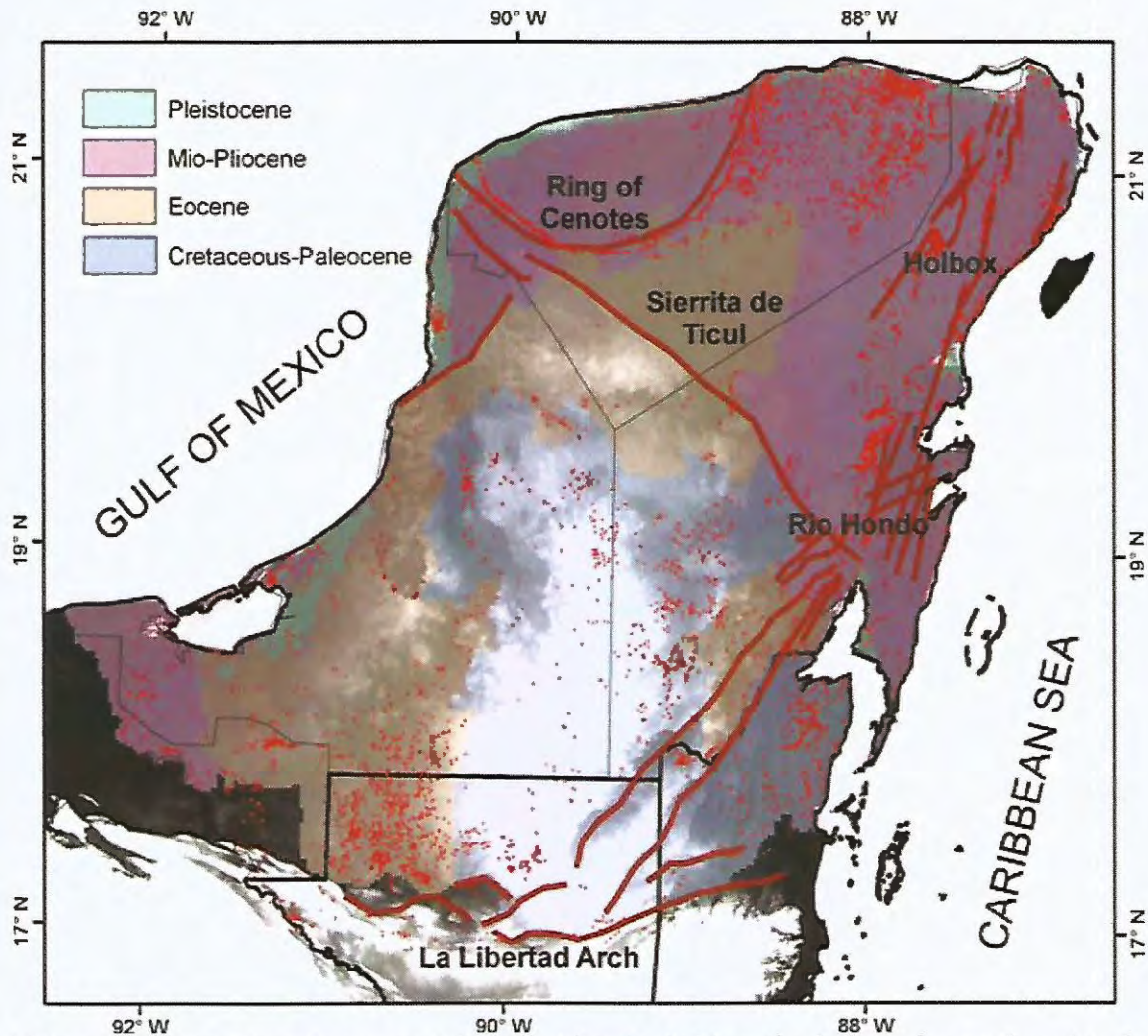


Figura 2.1 Mapa a escala regional de la Península de Yucatán de las vías preferentes de flujo (líneas rojo) y cenotes (puntos rojos). Los colores de fondo indican la edad de la superficie geológica (Bauer-Gottwein et al., 2011).

En un medio cárstico se distinguen tres porosidades, la primaria debida a las características de la matriz rocosa, la secundaria perteneciente a las fracturas y la terciaria que está dada por una red de conductos interconectados. La diferencia entre fracturas y conductos está basada en el tamaño de las aberturas, que es de 0.1 mm a 10 mm para las fisuras y de 10 mm o más para los conductos (White, 2002). Dentro de estos conductos que pueden llegar a convertirse en cavernas el flujo del agua puede cambiar de laminar a turbulento (White, 1988; Ford y Williams, 2007).

### **2.1.2.2 Hidrogeología de la Península de Yucatán**

Las principales expresiones cársticas de la región corresponden a los denominados cenotes y dolinas. El origen de los cenotes se debe al proceso geomorfológico denominado carstificación, que consiste en la combinación de los mecanismos de disolución, colapso y construcción de la roca caliza. Estos procesos están dados por factores intrínsecos y extrínsecos, los cuales actúan en diferentes escalas de tiempo y espacio, generando una amplia gama de formas y grados de carstificación. Los factores intrínsecos incluyen la litología, el grado de porosidad de la matriz y la fractura de la roca y los extrínsecos incluyen al clima, la temperatura, la vegetación, la mezcla de agua dulce y salada. El resultado es la disolución de rocas solubles (yeso, caliza, dolomía y halita) por erosión química con base en las condiciones hidrológicas imperantes, que resultan en un incremento de la permeabilidad debido al desarrollo de grandes sistemas de drenaje subterráneo (Beddows et al., 2007).

### **2.1.2.3 Características fisiográficas y climatológicas del acuífero noreste de la Península de Yucatán**

El Estado de Quintana Roo se localiza geográficamente en la parte oriental de la Península de Yucatán, entre los paralelos 17° 49' y 21° 35' de latitud norte y meridianos 86° 42' y 89° 25' de longitud oeste limita al norte con el Golfo de México, al sur con el Belice, al este con el mar caribe, al noroeste con el estado de Yucatán y al suroeste con Guatemala. Por su extensión territorial de 50,350 km<sup>2</sup>, Quintana Roo ocupa el decimonoveno lugar del País. Se encuentra dividido políticamente en ocho municipios: Othón P. Blanco, Felipe Carrillo Puerto, José María Morelos, Cozumel, Benito Juárez, Isla Mujeres, Lázaro Cárdenas y Solidaridad. Dentro de las principales ciudades están: Cancún, Chetumal, Cozumel, Isla Mujeres, Playa del Carmen, Felipe Carrillo Puerto y Kantunilkín.

Quintana Roo presenta climas cálidos en la totalidad de su territorio, el relieve es plano con ligeras ondulaciones. Con base en la humedad y el régimen de precipitación, predomina el subhúmedo con lluvias en verano, que abarca cerca de 99% de la entidad, en tanto que el húmedo con abundantes lluvias en verano sólo comprende poco más de 1%. El clima cálido subhúmedo con lluvias en verano se distribuye en toda la zona continental de Quintana Roo y en las islas Contoy y Mujeres; su temperatura media anual

varía entre 24° y 28°C y la precipitación total anual, entre 700 y más de 1 500 mm (SMN, 2012).

El estado de Quintana Roo tuvo en últimos años un incremento notable en su población y en sus actividades económicas principalmente el turismo, lo que implica una mayor demanda de agua para abastecimiento de la población y de los desarrollos turísticos, lo que implica un riesgo de contaminación de los cuerpos de agua por la descarga de aguas residuales y los desechos sólidos.

#### **2.1.2.3.1 Características hidrogeológicas del acuífero noreste de la península de Yucatán**

La zona en estudio se localiza en una región de topografía de bajo gradiente hidráulico, mostrando solo corrientes superficiales de poco desarrollo, asociadas a formas cársticas, que incluyen una gran variedad de dolinas, cenotes y llanuras de inundación. Desde el punto de vista hidrogeológico, esta característica cárstica implica una alta vulnerabilidad del sistema acuífero a la contaminación por descargas de aguas residuales y por la lixiviación de desechos sólidos.

El acuífero es libre excepto por una banda paralela a la costa (Perry et al., 1989). Por la naturaleza libre del acuífero, la zona de recarga se da a lo largo de todo el acuífero. Esto hace que el acuífero sea sumamente vulnerable a la contaminación (Marín et al., 2000). Más del 65% del agua subterránea es utilizada para uso agrícola. Aproximadamente 23% es destinado para el uso público-urbano (CNA, 1990).

#### **2.1.2.4 Sistema de distribución de agua potable del municipio de Benito Juárez, Q. Roo**

En 1993, los gobiernos del Estado de Quintana Roo y de los municipios de Benito Juárez e Isla Mujeres otorgó a Desarrollos Hidráulicos de Cancún (DHC) la concesión integral de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento de ambos municipios. DHC usa como marca operadora AGUAKAN, cuya infraestructura es de 160 pozos de extracción, más de 2,000 km de tuberías de distribución y 49 estaciones de rebombeo y almacenamiento para llevar el agua potable a los usuarios (figura 2.2), así mismo para el agua residual existe una capacidad instalada de más de 1,000 km de tuberías para recolección, 46 estaciones para enviar las aguas negras a las plantas de tratamiento y 8 plantas de tratamiento de aguas residuales con capacidades de tratamiento desde 30



hasta 350 litros por segundo el efluente es inyectado a 100m de profundidad en el manto salino (DHC AGUAKAN, 2010).

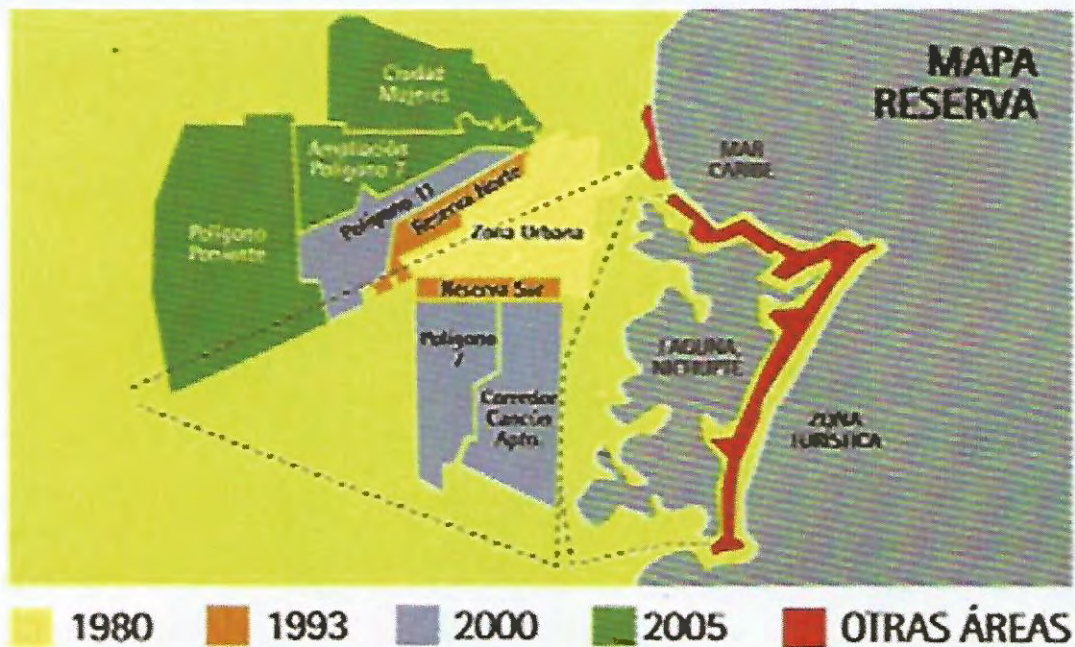


Figura 2.2 Prospección del crecimiento de Cancún (Fuente: DHC-Aguakán, 2010).

### 2.1.3 Parámetros físicos, químicos y bacteriológicos

Para el desarrollo del presente estudio se utilizaron los siguientes parámetros físicos, químicos y bacteriológicos que permitieron alcanzar los objetivos planteados (Tabla 2.1 y Tabla 2.2).

Tabla 2.1 Parámetros de campo

Determinación	Método
Cloro residual	Método de fotometría 4500-Cl D (Apha, 1998).
Conductividad	Método de conductividad eléctrica 2520 B (Apha, 1998).
pH	Método electrométrico 4500-H B (Apha, 1998).
Temperatura	Método de campo 2550 A (Apha, 1998)

Tabla 2.2 Parámetros determinados en Laboratorio

Determinación	Material de envase	Volumen mínimo (ml)	Vida útil de la muestra	Método
Alcalinidad ( $\text{HCO}_3^-$ )	Plástico o vidrio	200	48 horas	Titulación potenciométrica por método de Gran (Gran, 1952).
Nitritos	Plástico o vidrio	200	48 horas	Método de fotometría.
Nitratos	Plástico o vidrio	200	48 horas	Método de fotometría.
Trihalometanos	Vidrio	25	14 días	Cromatografía de gases con detector de ionización de flama (GC/FID) Modificación al método (Eichelberger et al., 1989).
$\text{DBO}_5$	Plástico o vidrio	1000	48 horas	Prueba de DBO del 5 quinto día método 5210 B (Apha, 1998).
Coliformes Totales	Fascos de plástico o vidrio estériles	100	8 horas	Método del Numero Más Probable (IDEXX Colilert Quanti-Tray System).
<i>E. coli</i>	Fascos de plástico o vidrio estériles	100	8 horas	Método del Numero Más Probable (IDEXX Colilert Quanti-Tray System).

## 2.1.4 Importancia de los parámetros

### 2.1.4.1 Temperatura

La temperatura del agua repercute en la cinética de las reacciones físicas, químicas y bacteriológicas que suceden en el agua bruta o durante el tratamiento, la aceptabilidad de algunos otros componentes inorgánicos y contaminantes químicos que pueden afectar al sabor y potenciar la proliferación de microorganismos y puede aumentar los problemas de sabor, olor, color y corrosión (tabla 2.3) (APHA. 1998).

#### **2.1.4.2 Potencial de Hidrógeno (pH)**

El pH es una variable importante en el manejo de la calidad del agua pues influye en los procesos químicos y biológicos. Mide el balance de acidez de una solución y se define como el logaritmo negativo en base 10 de la concentración del ión  $H_3O^+$ . La escala de pH va del 0 al 14 (ácido a alcalino), el valor de 7 representa la neutralidad. En una agua no contaminada el pH es el controlador principal del balance entre el  $CO_2$ ,  $CO_3^{2-}$  y el  $HCO_3^-$ , así como de otros compuestos naturales como los ácidos fúlvicos y húmicos. En sistemas de abastecimiento uno de los principales propósitos para controlar el pH es reducir al mínimo la corrosión (Ver tabla 2.2).

#### **2.1.4.3 Conductividad**

La conductividad varía directamente con la cantidad de sólidos disueltos totales (SDT), principalmente por las sales minerales, por lo que se considera una medida indirecta de éstas, la medición de este parámetro a través de un conductivímetro es una técnica muy útil en campo por su sencillez y rapidez para identificar el origen de un cuerpo de agua o bien las variaciones de los SDT.

#### **2.1.4.4 Nitritos y Nitratos**

La importancia de la determinación de la concentración de nitritos y nitratos, radica en que un exceso de Nitrógeno, pueden causar problemas de eutrofización en cuerpos de agua dado que favorecen el crecimiento excesivo de algas y malezas acuáticas, además de que la zona tiene dos fuentes principales de estos compuestos y las dos son antropogénicas (descargas clandestinas humanas y/o pecuarias y el uso de fertilizantes nitrogenados) (Pacheco et al., 2001).

Los nitratos son contaminantes móviles en el agua subterránea que no son adsorbidos por los materiales del acuífero y no precipitan. Estos dos factores, permiten que grandes cantidades de nitrato disuelto permanezcan en el agua subterránea. Debido a su naturaleza soluble, los nitratos tienden a viajar grandes distancias en la subsuperficie, específicamente en sedimentos altamente permeables o rocas fracturadas (Freeze y Cherry, 1979).



#### **2.1.4.5 Cloro residual**

Es fundamental mantener en las redes de distribución concentraciones adecuadas de cloro residual, desde las potabilizadoras hasta las tomas y almacenes de los consumidores, para asegurar que el agua ha sido convenientemente desinfectada, por lo cual las concentraciones de cloro como desinfectante y como residual son una variable a controlar en la formación de subproductos de la cloración.

#### **2.1.4.6 Alcalinidad**

La alcalinidad es la capacidad del agua para neutralizar ácidos. Esta representa la suma de las bases que pueden ser tituladas en una muestra de agua. Está determinada generalmente por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, ésta se toma como un indicador de dichas especies iónicas.

Cuando se distribuyen o almacenan aguas en tuberías o depósitos se da una de estas dos interacciones entre el agua y la tubería: o bien el agua deposita una capa de carbonato cálcico sobre la superficie de la tubería en contacto con ella, o bien disuelve carbonato cálcico ya existente en la tubería (Mora et al., 2005). Las características fisico-químicas de un agua permiten clasificarla según su interacción sobre los materiales del sistema de distribución, tuberías, para ello la alcalinidad expresada como concentración de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), el pH, la conductividad, el  $\text{Ca}^+$  y la temperatura de la muestra se utiliza el índice de Ryznar y el índice modificado de Carrier en (Ryznar, 1944).

**Aguas corrosivas:** La corrosividad de un agua es su capacidad de disolver los metales. La superficie del metal será atacada por una acción electroquímica.

**Aguas agresivas:** La agresividad de un agua es la capacidad de disolver la cal. En presencia de gas carbónico el agua tendrá una mayor o menor tendencia a disolverla.

**Aguas incrustantes:** Hay deposición sobre las paredes de las tuberías.

#### **2.1.4.7 Trihalometanos**

Los THMs son compuestos orgánicos que han sido encontrados en la mayoría de sistemas de distribución de agua, típicamente son producidos como resultado indeseable de la cloración, la formación de dichos compuestos está en función de los precursores que propician condiciones adecuadas para su formación; algunos de estos compuestos

han sido detectados en aguas naturales como resultado de vertidos contaminantes antropogénicos (Association, 1998). El método cromatográfico fue modificado de la EPA utilizando un cromatógrafo de gases con detector de flama (GC/FID) para verificar las condiciones cromatográficas así como los cromatogramas del estándar (ver el anexo 1).

#### **2.1.4.8 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)**

Este parámetro se emplea para medir materia orgánica biodegradable en el agua. Se define como la cantidad de oxígeno necesaria para la descomposición biológica aeróbica (mediante microorganismos) de la materia orgánica biodegradable de un agua. Se realizó mediante la prueba del quinto día (Apha, 1998).

#### **2.1.4.9 Coliformes Totales**

El grupo de los coliformes totales incluye microorganismos que pueden sobrevivir y proliferar en el agua, por consiguiente, no son útiles como índice de agentes patógenos fecales, pero pueden utilizarse como indicador de la eficacia de tratamientos y para evaluar la limpieza e integridad de sistemas de distribución y la posible presencia de biopelículas.

#### **2.1.4.10 *Escherichia coli***

Se considera que es el índice de contaminación fecal más adecuado. En la mayoría de las circunstancias, las poblaciones de coliformes termotolerantes se componen predominantemente de *E. coli*; por lo tanto, es el microorganismo de elección para los programas de monitoreo para la verificación, incluidos los de vigilancia de la calidad del agua de consumo humano.

#### **2.1.5 Estrategia de muestreo**

Dado que este estudio incluye puntos de extracción de agua subterránea (pozos), las instalaciones del sistema de abastecimiento del municipio y los contenedores de recepción residencial que tienen diferentes materiales de construcción, es necesario aplicar criterios particulares que permitan muestrear y procesar las muestras tanto en campo como en laboratorio.

Se tomaran muestras de los puntos críticos del sistema de distribución (figura 2.5); en las tabla 2.3a y 2.3b se muestran las coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo.

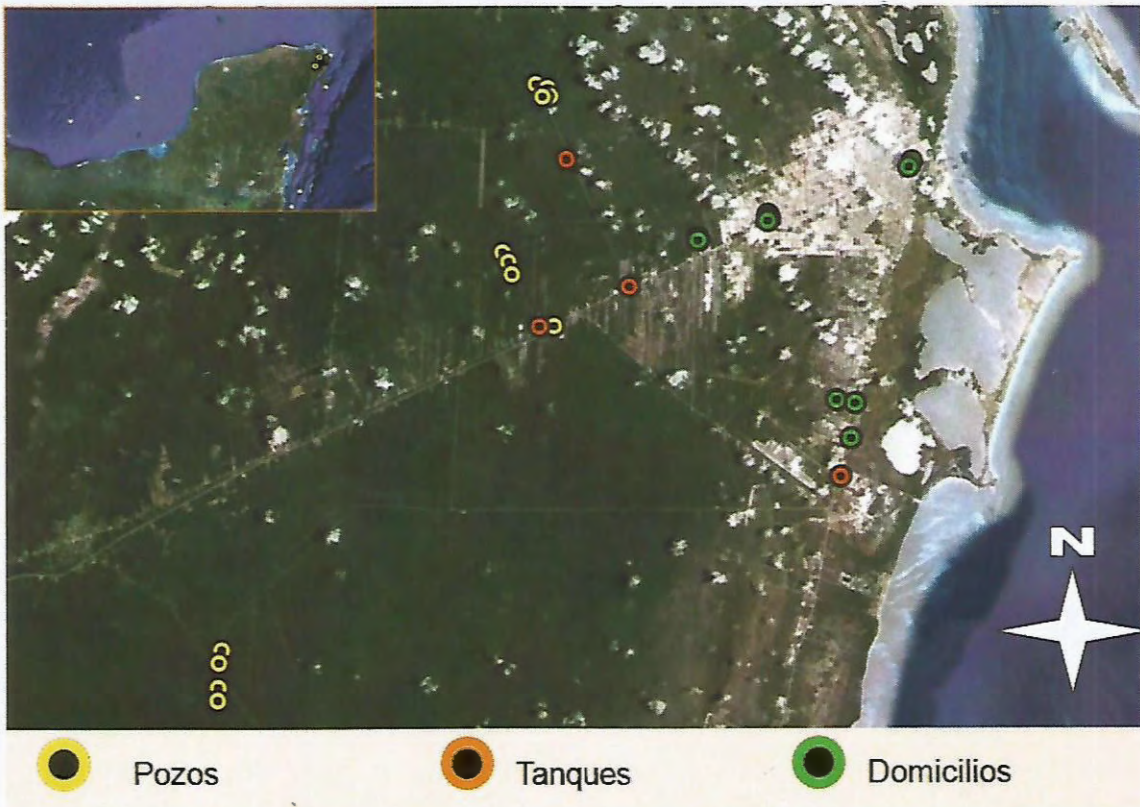


Figura 2.3 Localización de Pozos, Taques y Domicilios muestreados.



Tabla 2.3a Coordenadas geográficas y claves de los sitios de muestreo de la zona Norte.

Zona Norte		
Origen de muestra	Coordenadas	Clave de muestra
Pozos	N 21.19377, O 86.99699	1PP-7
	N 21.20080, O 87.00066	1P-11A
	N 21.20080, O 87.00066	1P-11
	N 21.19634, O 86.99461	1P-2
	N 21.12321, O 86.01221	2P-11
	N 21.11925, O 86.01004	2P-6
	N 21.19221, O 86.99603	2P-1
	N 21.09571, O 86.98453	2P-8
Tanques	N 21.11212, O 86.95199	2T-7
	N 21.15813, O 86.98318	1T-6
	N 21.09132, O 86.99396	1T-5
Domicilios	N 21.14408, O 86.88863	103-1
	N 21.14408, O 86.88863	103-2
	N 21.14551, O 86.88963	103-3
	N 21.14551, O 86.88963	103-4
	N 21.13442, O 86.92068	PM-1
	N 21.13442, O 86.92068	PM-2
	N 21.13442, O 86.92068	PM-3
	N 21.13442, O 86.92068	PM-4

Tabla 2.3b Coordenadas geográficas y claves de los sitios de muestreo de la zona Sur.

Zona Sur		
Origen de Muestra	Coordenadas	Clave de la muestra
Pozos	N 20.94883, O 87.13158	RC-48A
	N 20.94883, O 87.13158	RC-50
	N 20.92985, O 87.13147	RC-51
	N 20.92985, O 87.13147	RC-52
	N 20.92985, O 87.13147	RC-53
Tanque	N 21.036761, O 86.84970	C-10 E
	N 21.036761, O 86.84970	C-10 S
Domicilios	N 21.044222, O 86.85063	BG
	N 21.047986, O 86.84725	UTC
	N 21.081994, O 86.8466	BV
	N 21.081994, O 86.8466	CE-64
	N 21.174139, O 86.82039	UTe
	N 21.174139, O 86.82039	UTs

### 2.1.6 Origen de las muestras

Las muestras fueron recolectadas en los pozos de extracción para identificar la calidad original del agua en el acuífero, y determinar la existencia de filtraciones de contaminantes y precursores naturales de contaminación por THMs. En estas muestras se determinaron todos los parámetros físicos, químicos y microbiológicos citados anteriormente excepto el cloro residual que aún no ha sido añadido en esta fase de la distribución del recurso (ver figura 2.4).

La siguiente etapa de la distribución del agua corresponde a la homogeneización de las extraídas de los pozos, previa a la inyección del cloro como desinfectante, se tomaron muestras en estos sitios para saber la calidad del agua justo antes del tratamiento de potabilización: en estas muestras se determinaron todos los parámetros excepto cloro residual (ver figura 2.4).

Asimismo se tomaron muestras en la salida del tratamiento con la finalidad de saber si la cantidad de desinfectante es adecuada y verificar si la calidad se mantiene una vez concluido el proceso de desinfección (ver figura 2.4).

Además se tomaron muestras en las la tomas domiciliarias (en los sitios donde exista válvula) para evaluar la calidad del agua en la fase donde concluye la responsabilidad de la empresa distribuidora y también se tomaron muestras en los depósitos domiciliarios (ver figura 2.4). En estas muestras fueron determinados todos los parámetros físicos, químicos y microbiológicos.

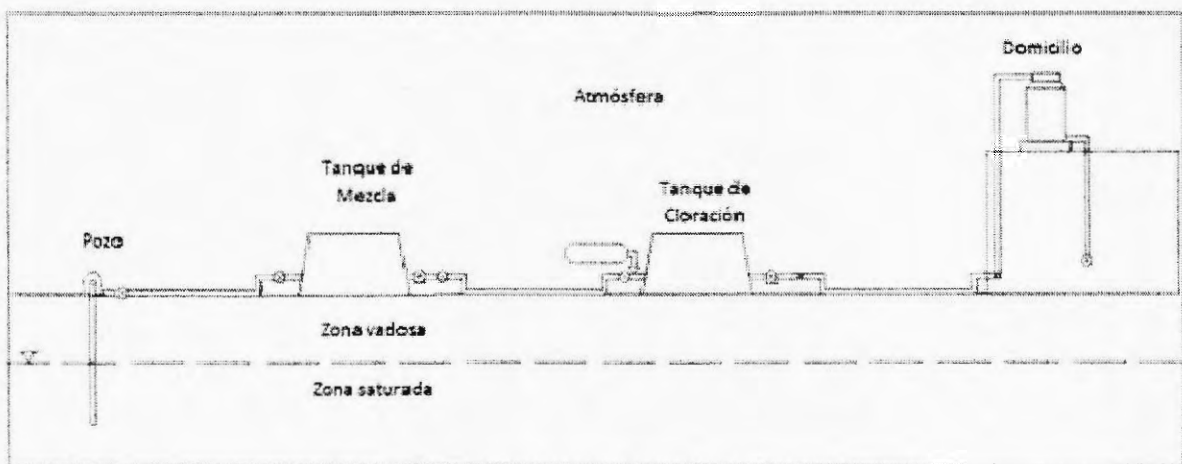


Figura 2.4 Diagrama del sistema de distribución.

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS

#### 3.1 Resultados de los parámetros obtenidos en campo

En las tablas 3.1 y 3.2 se presentan los resultados correspondientes a los parámetros de pH, temperatura, conductividad y cloro residual obtenidos en campo de la zona Norte y Sur respectivamente, de las muestras colectadas en marzo y junio de 2013.

Tabla 3.1 Resultados de los parámetros obtenidos en campo zona Norte.

Tipo de muestra	Clave de muestra	Temperatura (°C)		Sólidos Disueltos Totales (ppm)		pH		Cloro Residual (ppm)	
		Marzo	Junio	Marzo	Junio	Marzo	Junio	Marzo(*)	Junio
Pozos	1PP-7	28.1	34.6	807	626	7.17	7.22	*	0.09
	1P-11A	26	25.2	825	798	7.49	7.43	*	0.03
	1P-11	26.3	26.3	715	670	7.48	7.45	*	0.02
	1P-2	25.5	25.9	697	725	7.27	7.33	*	0.02
	2P-11	25.5	26.4	756	779	7.19	7.34	*	0.02
	2P-6	25.4	25.3	760	766	7.22	7.15	*	0.02
	2P-1	25.6	25.3	701	673	7.43	7.35	*	0.07
	2P-8	23.5	25.9	848	768	7.34	7.39	*	0.02
Tanques	1T-5	26.5	26.6	787	678	7.21	7.08	1.7	1.42
	1T-5	26.4	29.3	774	706	7.15	7.21	*	0.03
	2T-7	26	26	813	745	7.66	7.14	*	0.03
Domicilios	103-1	24	28.8	852	799	7.81	7.6	0.36	0.05
	103-2	23.5	29.1	859	769	9.86	7.82	0.05	0.04
	103-3	24.1	31.4	839	774	7.61	7.7	0.2	0.04
	103-4	27.2	31	799	756	7.58	7.2	0.79	0.82
	PM-1a	26	28.3	811	731	7.26	7.11	1.19	0.68
	PM-1b	26.6	32	782	715	7.7	7.8	0.51	0.05
	PM-2	25.2	29.7	786	752	7.69	7.54	0.22	0.11
	PM-3	25.5	30.3	797	724	7.58	7.24	0.53	0.29
	PM-4	24.7	31	753	758	7.72	7.42	0.54	0.08

(\*) No se tomaron en pozo en este periodo, solo tanques y domicilio.

Tabla 3.2 Resultados de los parámetros obtenidos en campo zona Sur.

Tipo de muestra	Clave de la muestra	Temperatura (°C)		Sólidos Disueltos Totales (ppm)		pH		Cloro Residual (ppm)	
		Marzo	Junio	Marzo	Junio	Marzo	Junio	Marzo	Junio
Pozos	RC-48A	23.4	25.7	861	848	7.61	7.16	*	0.01
	RC-50	23.5	25.8	765	787	7.66	7.22	*	0.02
	RC-51	23.8	25.6	713	755	7.62	7.31	*	0.02
	RC-52	23.4	25.5	802	764	7.73	7.51	*	0.03
	RC-53	23.3	26	828	766	7.72	7.3	*	0.08
Tanque	C-10 E	28.7	26	836	792	7.63	6.99	*	1.31
	C-10 S	29.1	26.1	812	852	7.56	7.46	1.14	1.22
Domicilios	BG	29.5	34	752	741	7.76	7.68	0.16	0.45
	UTC	27.8	32.6	796	849	7.62	7.28	0.8	0.8
	BV	31.5	30.1	777	840	7.21	7.4	0.21	0.21
	CE-64	26.8	26.6	833	921	7.43	7.11	1.15	1.03
	UTe	27.8	27.9	922	884	7.41	7.16	0.93	1.02
	UTs	30.5	31.1	964	1040	7.75	7.75	0.09	0.1

(\*) No se tomaron en pozo en este periodo, solo tanques y domicilio.

### 3.1.1 Temperatura

Para la zona Norte, la temperatura de las muestras de pozos tomadas en marzo presentó valores con un rango de 23.5 a 28.1 °C. En las muestras de pozos tomadas en junio el rango fue de 25.3 a 34.6 °C lo cual indica un incremento respecto al periodo anterior. En marzo, los tanques presentaron un rango de 26 a 26.5 °C; las tomadas en junio con un rango de 26.6 a 29.3 °C muestran un incremento respecto a las tomadas en marzo. Respecto a los domicilios, en las muestras tomadas en marzo el rango fue de 23.5 a 27.2 °C; las tomadas en junio mostraron un rango de 27.8 a 31.4 °C. En general las muestras de la zona Norte muestran un incremento de Temperatura de un periodo a otro, en especial las muestras de domicilio son las que presentaron valores más altos en su medición para ambos periodos.

Los pozos de la zona Sur en marzo presentaron un rango de 23.3 a 23.8 °C; las tomadas en junio con rango de 25.5 a 36 °C muestran un incremento respecto al periodo anterior. En los tanques se encontró un rango de 28.7 a 29.1 °C en marzo, para detectar un

decremento en las muestras tomadas en junio con un rango de 26.0 a 26.1 °C, en los domicilios el rango fue de 27.8 a 30.5 °C para el periodo de marzo; en junio el rango fue de 32.6 a 26.6 °C. En ambos periodos, las muestras de domicilio son las que presentaron valores más altos.

### **3.1.2 Sólidos Disueltos Totales (SDT)**

Como se muestra en las tablas 3.1 y 3.2, los SDT en las muestras tomadas en marzo de pozos de la zona Norte presentaron valores entre el rango de 697 a 848 ppm, mientras que las tomadas en junio mantuvieron un rango de 626 a 798 ppm lo que representa un decremento en la concentración respecto al periodo anterior. En marzo, los tanques presentaron un rango de 774 a 813 ppm, mientras las tomadas en junio mantuvieron rango de 678 a 745 ppm también muestran un decremento respecto a las tomadas en marzo incluso respecto a los pozos, en las muestras tomadas en marzo de domicilios el rango fue de 753 a 859 ppm, mientras que las tomadas en junio con un rango de 715 a 799 ppm. Las muestras de domicilio de las dos temporadas son las que presentaron valores más altos en su medición. Ninguna muestra rebasó el límite máximo establecido por la NOM-127-SSA1-1994 de 1000ppm. En general hay un decremento en las lecturas de SDT entre periodos (marzo a junio) para la zona Norte.

Los SDT de pozos de la zona Sur presentaron valores en el rango de 713 a 861 ppm; las tomadas en junio con rango de 764 a 848 ppm no muestran cambio significativo respecto al periodo anterior. Para los periodos de marzo y junio en los tanques no presentan un cambio significativo, ya que los resultados reportados en marzo presentaron un rango de 812 a 836 ppm; las tomadas en junio con un rango de 792 a 856. En las muestras tomadas en marzo de domicilios el rango fue de 752 a 964 ppm; las tomadas en junio con un rango de 741 a 1040 ppm. Por lo que son las muestras de domicilio las que presentaron valores más altos en su medición para ambos periodos. Una muestra de domicilio rebasó el límite máximo establecido por la NOM-127-SSA1-1994 de 1000ppm, con un valor de en el periodo de 1000 ppm.

En general los SDT presentan mayor concentración en las muestras tomadas en marzo respecto a las de junio, las muestras que presentaron menor concentración de SDT fueron las de pozos de la zona Norte y las que presentaron la mayor concentración de SDT fueron las de domicilios de la zona Sur.



### **3.1.3 Potencial de Hidrógeno (pH)**

Para la zona Norte el pH muestra que en las muestras tomadas en marzo los pozos presentaron valores en el rango de 7.17 a 7.49, las tomadas en junio con rango de 7.15 a 7.45, el pH permaneció semejante entre ambos periodos. En marzo, los tanques presentaron un rango de 7.15 a 7.66, las tomadas en junio con un rango de 7.08 a 7.21. En los domicilios el rango fue de 7.26 a 9.86 en marzo; las tomadas en junio con un rango de 7.11 a 7.82 (Ver tabla 3.1). En general la variación de pH entre periodos de tiempo ni entre zona, sin embargo, se detectó una muestra (103-2 en marzo) con 9.86 unidades está fuera del rango establecido por la NOM-127-SSA1-1994 de 6.5 a 8.5 unidades de pH.

Los pozos de la zona Sur presentaron valores entre el rango de 7.61 a 7.73, las tomadas en junio con rango de 7.16 a 7.51. En marzo, los tanques presentaron un rango de 7.56 a 7.63, mientras que las tomadas en junio presentaron un rango de 6.99 a 7.46. Para los domicilios el rango fue de 7.21 a 7.76 en marzo, las tomadas en junio presentaron un rango de 7.11 a 7.75 (Ver tabla 3.2). Ninguna muestra estuvo fuera del rango establecido por la NOM-127-SSA1-1994 de 6.5 a 8.5 unidades de pH.

### **3.1.4 Cloro Residual**

El cloro residual en la zona Norte fue determinado en los puntos de las estaciones de cloración después del proceso de cloración; a la salida del tanque de cloración la concentración fue de 1.7 ppm en junio (rebasa el límite superior de 1.5 ppm establecido por la NOM-127-SSA1-1994), mientras que en marzo fue de 1.42 ppm (Los resultados de todas las determinaciones aparecen en la tabla 3.1). Los domicilios presentaron concentraciones con un rango de 0.05 a 1.19 ppm, las concentraciones mínimas son menores al límite inferior de 0.2 ppm establecido por la NOM-127-SSA1-1994. En las muestras de junio se presentaron concentraciones en un rango de 0.04 a 1.42 ppm (Tabla 3.1).

En la zona Sur en marzo el valor más alto se encontró en el lugar más cercano a la estación de inyección de cloro (cárcamo) con una concentración de 1.14 ppm y en junio fue de 1.31 ppm y en los domicilios el rango fue de 0.09 (menor al límite inferior de 0.2 ppm establecido por la NOM-127-SSA1-1994) a 1.15 ppm (Tabla 3,2).

En general la concentración de Cloro residual más alta se presentó en los tanques de cloración, en particular la muestra 1T-5 de marzo rebasó el límite superior del rango establecido por la NOM-127-SSA1-1994. En los domicilios de la zona Norte en junio, seis de nueve muestras estuvieron por debajo del límite inferior establecido en la normatividad (0.2 ppm) contrastado con la zona Sur donde cinco de seis muestras presentaron valores dentro del rango permisible.

### **3.2 Resultados de los parámetros obtenidos en laboratorio**

#### **3.2.1 Nitratos**

La figura 3.1 muestra los resultados de Nitratos para la zona Norte. En marzo los pozos presentaron un rango de 0.2 a 0.7 ppm, en junio con rango de 0 a 1.6 ppm lo cual indica un incremento en la concentración respecto al periodo anterior. En marzo los tanques presentaron un rango de 0 a .08 ppm, las muestras tomadas en junio presentaron un rango de 0.2 a 0.7 ppm, todas las muestras tomadas en marzo de domicilios 0 ppm; las tomadas en junio un rango de 0 a 0.8 ppm (Ver anexo 2). El límite máximo establecido por la NOM-127-SSA1-1994 es de 10 ppm, como se indica en la figura 3.1, ningún resultado del análisis fue superior al límite máximo establecido por la norma.

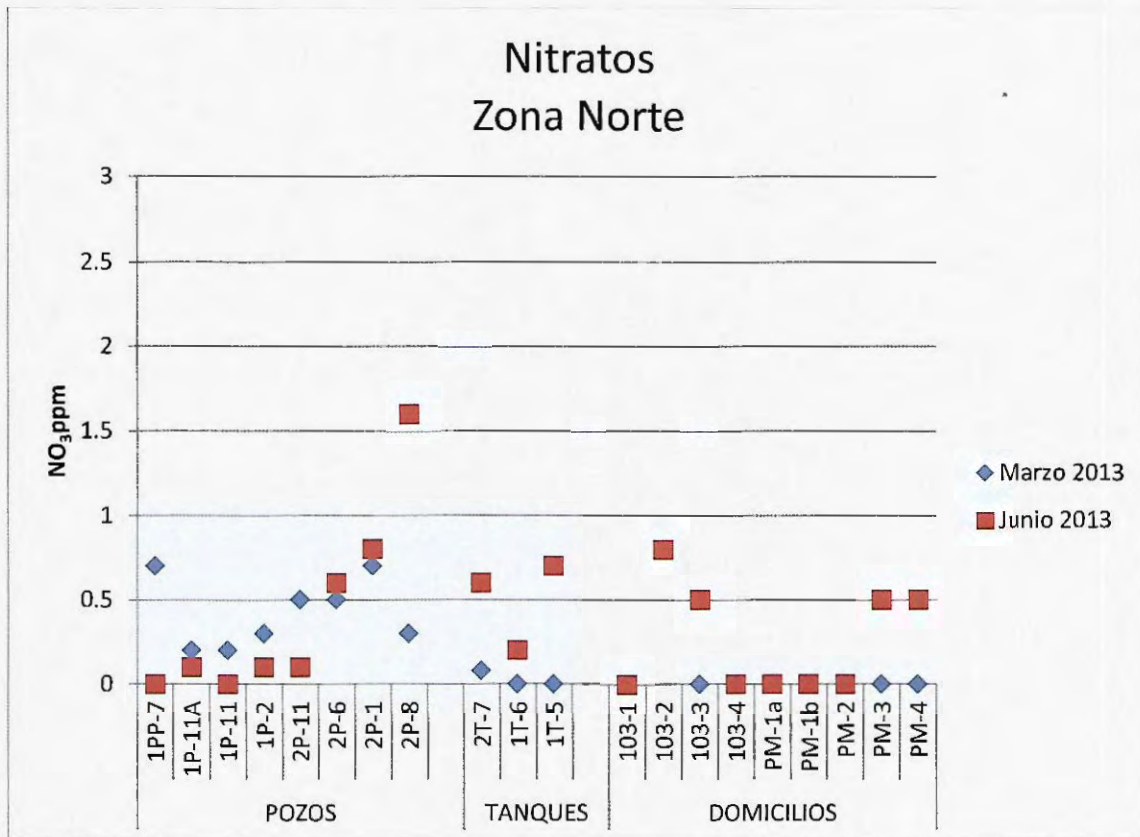


Figura 3.1 Concentración de Nitratos en pozos, tanques y domicilios en muestras de marzo y junio en la zona Norte.

La figura 3.2 muestra los resultados de Nitratos para la zona Sur. En marzo los pozos presentaron 0 ppm, y en junio el rango fue de 1.8 a 2.6 ppm, lo cual indica un incremento en la concentración en junio con respecto a marzo. En marzo los tanques presentaron 0 ppm, las muestras tomadas en junio presentaron un rango de 1.2 a 1.5 ppm. En las muestras de domicilios tomadas en marzo se encontró una concentración de 0 ppm, las tomadas en junio presentaron un rango de 1 a 2.3 ppm (Ver figura 3.2 , resultados de todas las estaciones en Anexo 2). Ninguna muestra rebasó el límite máximo establecido por la NOM-127-SSA1-1994 de 10 ppm. Fue evidente el incremento en la concentración de Nitratos en junio con respecto a marzo.



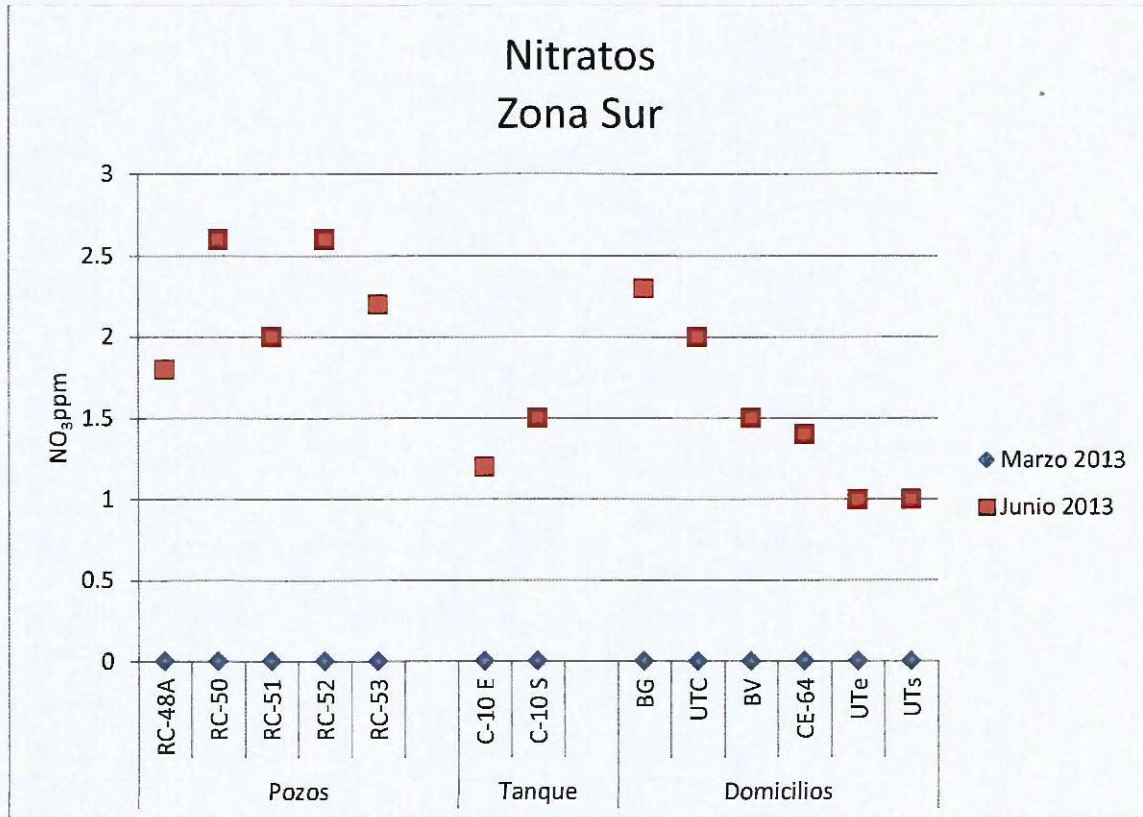


Figura 3.2 Concentración de Nitratos en pozos, tanques y domicilios en muestras de marzo y junio en la zona Sur.

### 3.2.2 Nitritos

Los nitritos de la zona Norte en marzo en las muestras de pozos presentaron 0 ppm, las tomadas en junio un rango de 0 a 0.05 ppm. En marzo las muestras de tanques presentaron 0 ppm, las tomadas en junio un rango de 0.01 a 0.07 ppm. Las muestras de domicilios tomadas en marzo presentaron 0 ppm, mientras las tomadas en junio un rango de 0.01 a 0.05 ppm (Ver Anexo 2). Ninguna muestra rebasó el límite máximo establecido por la NOM-127-SSA1-1994 de 0.05ppm. Todos los resultados de junio muestran un incremento en la concentración respecto al periodo anterior (Ver figura 3.3).



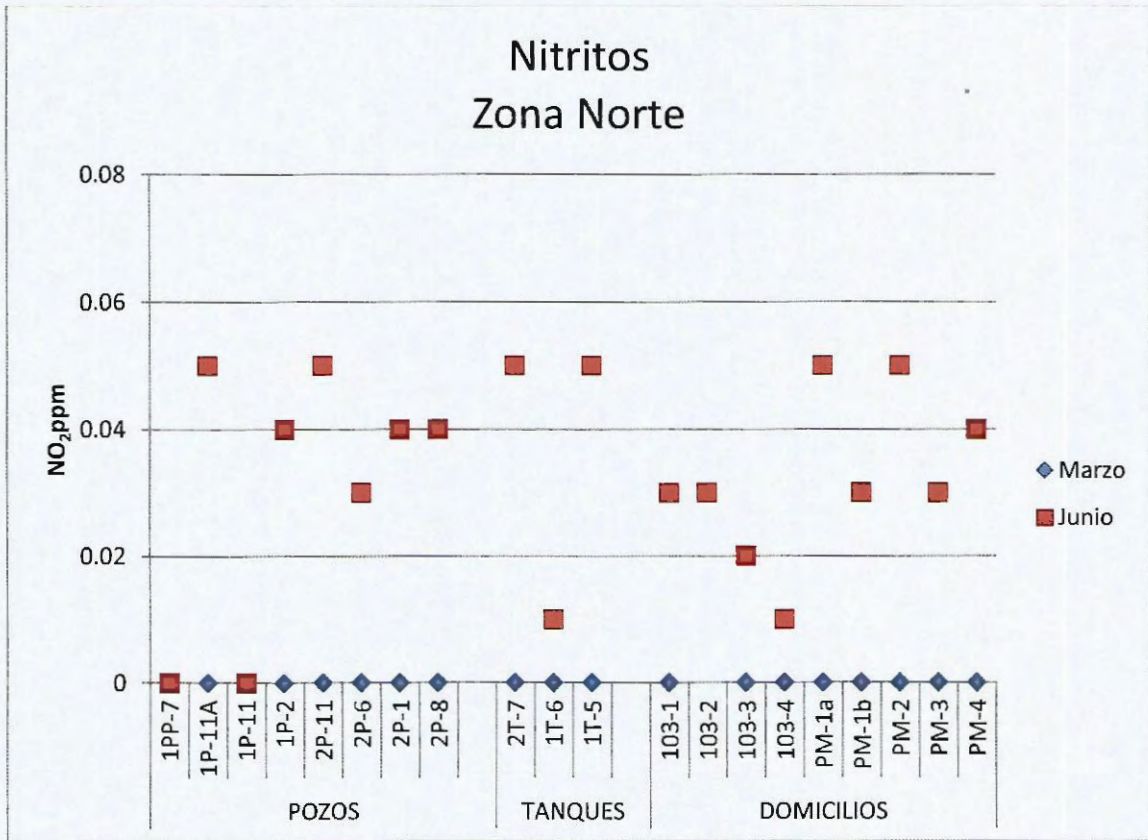


Figura 3.3 Concentración de Nitritos para pozos, tanques y domicilios en muestras de marzo y junio en la zona Sur.

La figura 3.4 muestra el comportamiento en la concentración de Nitritos, en la zona Sur, en marzo los pozos presentaron 0 ppm, las tomadas en junio con rango de 0 a 0.02 ppm. En marzo los tanques presentaron 0 ppm las tomadas en junio con un rango de 0 a 0.02 ppm, en los muestras tomadas en marzo de domicilios 0 ppm; las tomadas en junio con un rango de 0.01 a 0.05 ppm (Ver Anexo 2). Una muestra de pozo (RC-50) rebasó el límite máximo establecido por la NOM-127-SSA1-1994 de 0.05ppm.



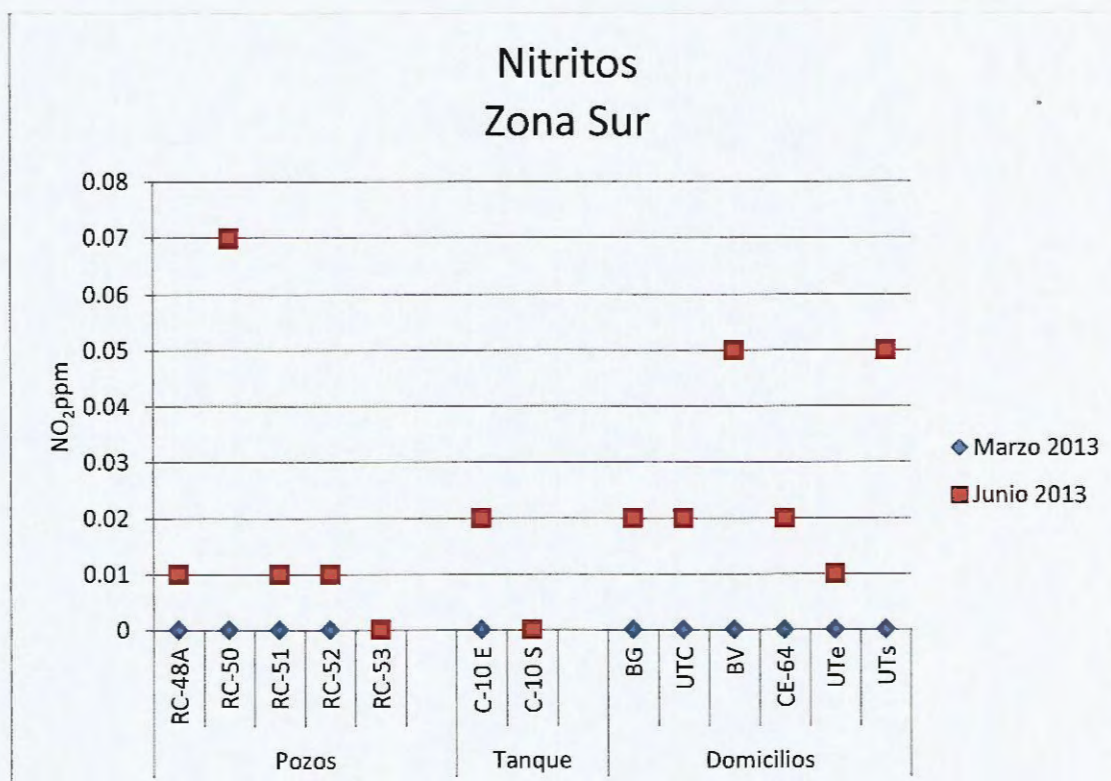


Figura 3.4 Concentración de Nitritos en pozos, tanques y domicilios en muestras de marzo y junio.

En general tanto los nitritos como los nitratos presentaron un incremento de las muestras tomadas en marzo respecto a las tomadas en junio, sin embargo, no hubo una variación significativa entre las muestras de pozo, tanque y domicilio en las muestras de junio (Ver Anexo 2).

### 3.2.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno al 5to día (DBO<sub>5</sub>)

La DBO<sub>5</sub> en las muestras tomadas en la zona Norte en marzo los pozos presentaron un rango de 0.01 a 0.79 ppm, mientras que las tomadas en junio con rango de 2.04 a 5.63 ppm. En marzo los tanques presentaron un rango de 0.76 a 2.30 ppm, mientras que las tomadas en junio con un rango de 2.36 a 8.13 ppm, en los muestras tomadas en marzo de domicilios presentaron un rango de 1.72 a 2.51 ppm, mientras que las tomadas en junio con un rango de 3.66 a 5.74 ppm como se muestra en la figura 3.5.



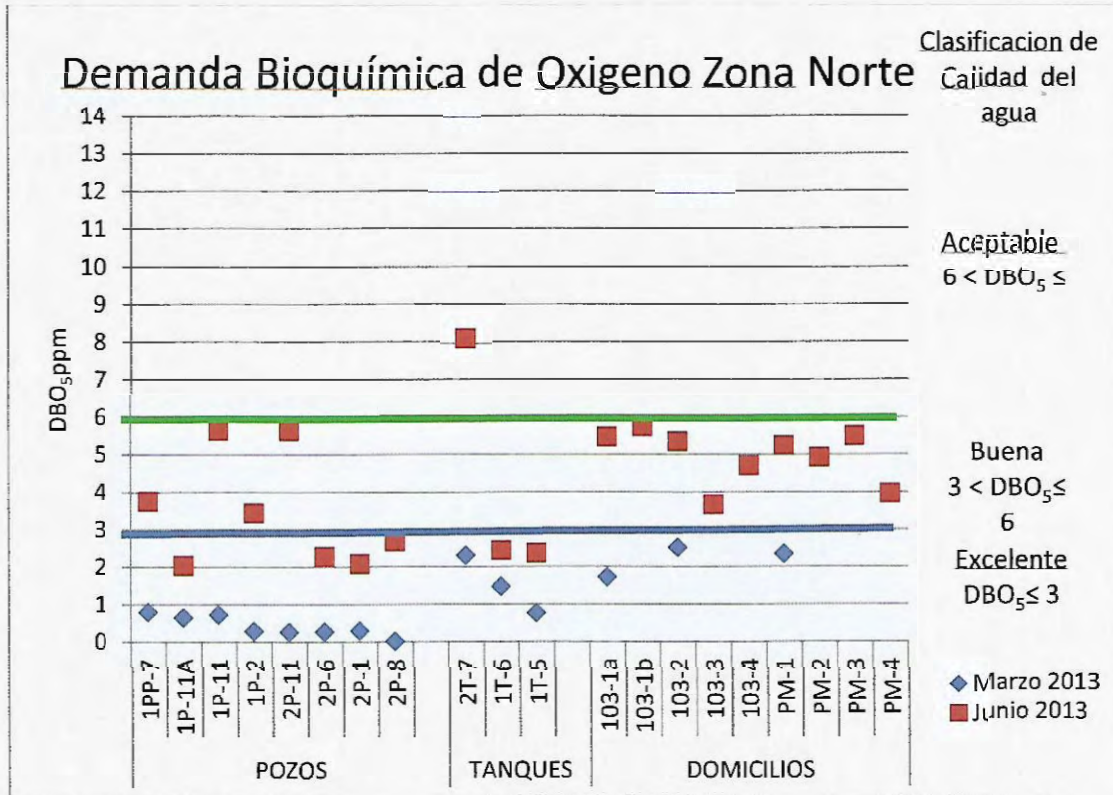


Figura 3.5 Concentración de  $DBO_5$  en pozos, tanques y domicilios en muestras de marzo y junio.

La  $DBO_5$  en las muestras tomadas en la zona Sur en marzo, los pozos presentaron un rango de 0.65 a 2.06 ppm, las tomadas en junio con rango de 3.84 a 10.47 ppm. En marzo los tanques presentaron un rango de 0.28 a 1.19 ppm, mientras las tomadas en junio con un rango de 2.36 a 8.13 ppm, en los muestras tomadas en marzo de domicilios presentaron un rango de 2.26 a 2.51 ppm, mientras las tomadas en junio con un rango de 9.54 a 10.95 ppm (Ver Anexo 2) como se puede ver en la figura 3.6.

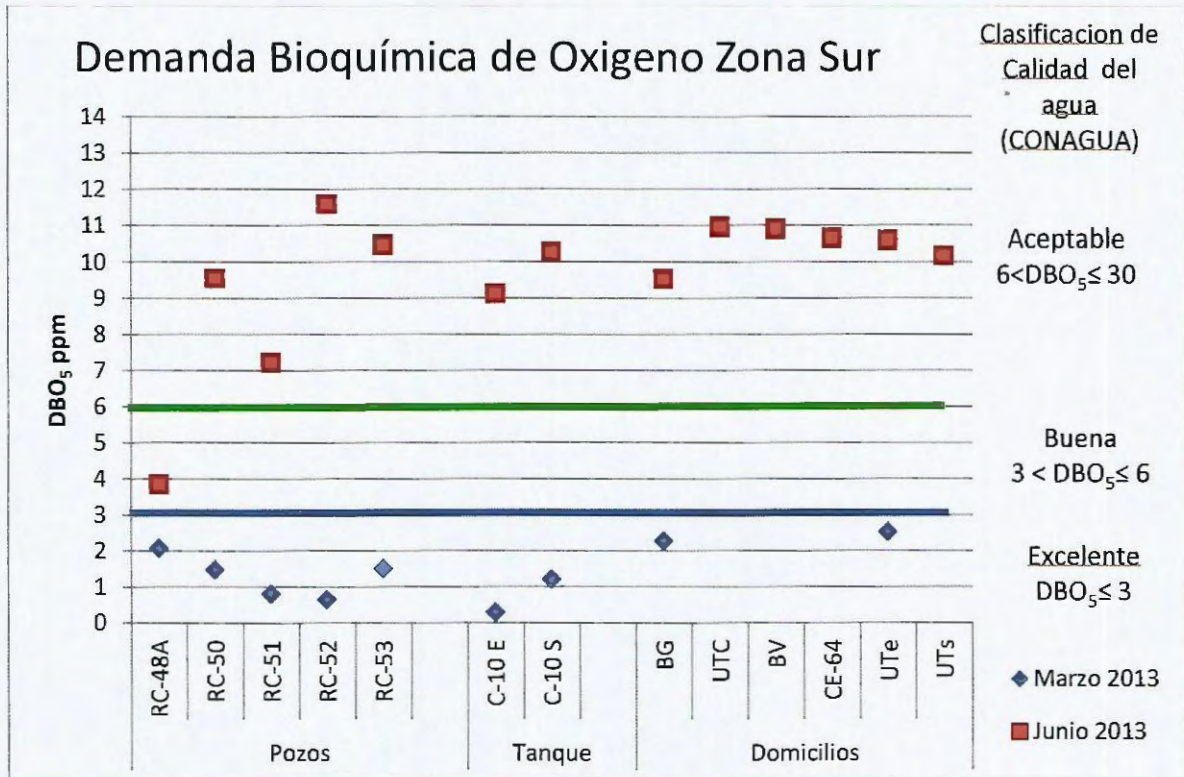


Figura 3.6 Concentración de DBO<sub>5</sub> en pozos, tanques y domicilios en muestras de marzo y junio.

La DBO<sub>5</sub> en todas las muestras de marzo se pueden clasificar como calidad excelente, en junio, la mitad de los pozos de la zona Norte presenta calidad excelente y la otra mitad buena calidad, en los tanques dos tercios fue excelente calidad y un tercio fue calidad aceptable y en los domicilios todas las muestras presentaron buena calidad. En junio, un quinto de los pozos de la zona Sur presenta buena calidad y cuatro quintos calidad aceptable, en todos los tanques fue calidad aceptable y en los domicilios todas las muestras presentaron calidad aceptable como se puede ver en la figura 3.7.



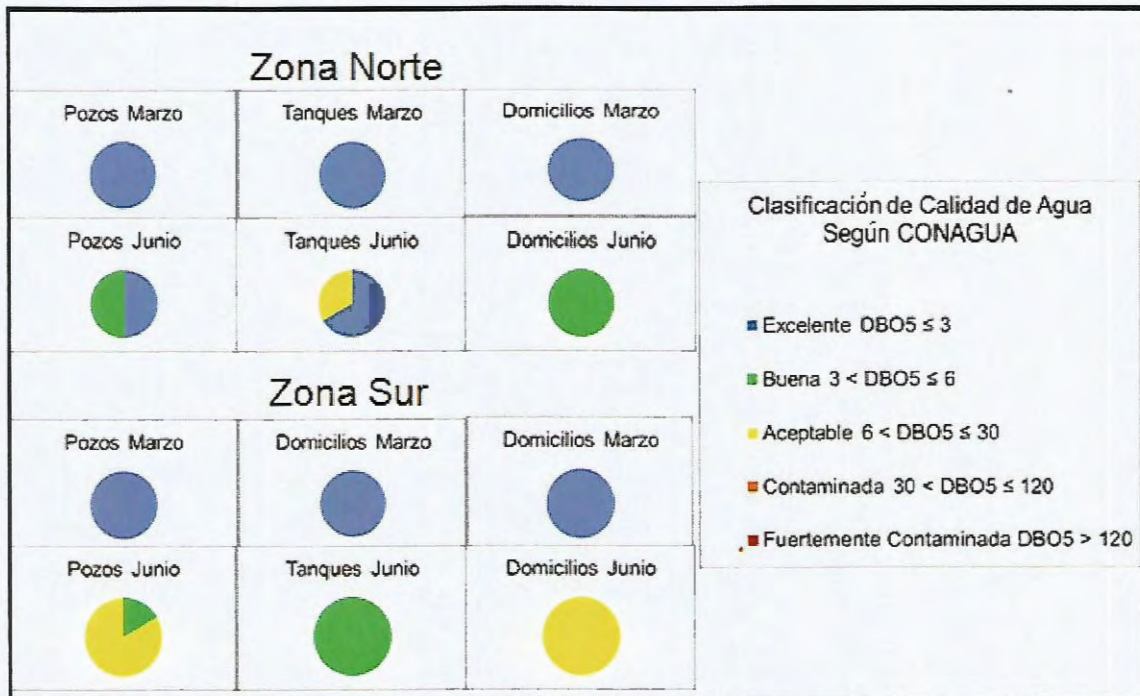


Figura 3.7 En general y de acuerdo a la clasificación de agua de la CONAGUA la calidad de agua que se distribuye en ambas zonas en marzo mantiene con calidad Excelente, las muestras tomadas en junio fueron clasificadas de excelente a aceptable respecto a los contenidos de materia orgánica.

### 3.2.4 Alcalinidad

La alcalinidad en todas las muestras fue expresada en ppm de  $HCO_3^-$ . En la zona Norte, los pozos presentaron concentraciones con un rango de 503.95 a 559.66 ppm, en los tanques de 537.72 y 560.40 ppm y en domicilios se encontró la concentración más alta con un rango de 478.31 a 552.09 ppm para el periodo de marzo. En junio los pozos presentaron concentraciones con un rango de 300.98 a 348.02 ppm, en los tanques de 283.08 a 349.59 ppm y en domicilios la concentración tuvo un rango de 293.27 a 342.34 ppm (Ver figura 3.8 y Anexo 2).

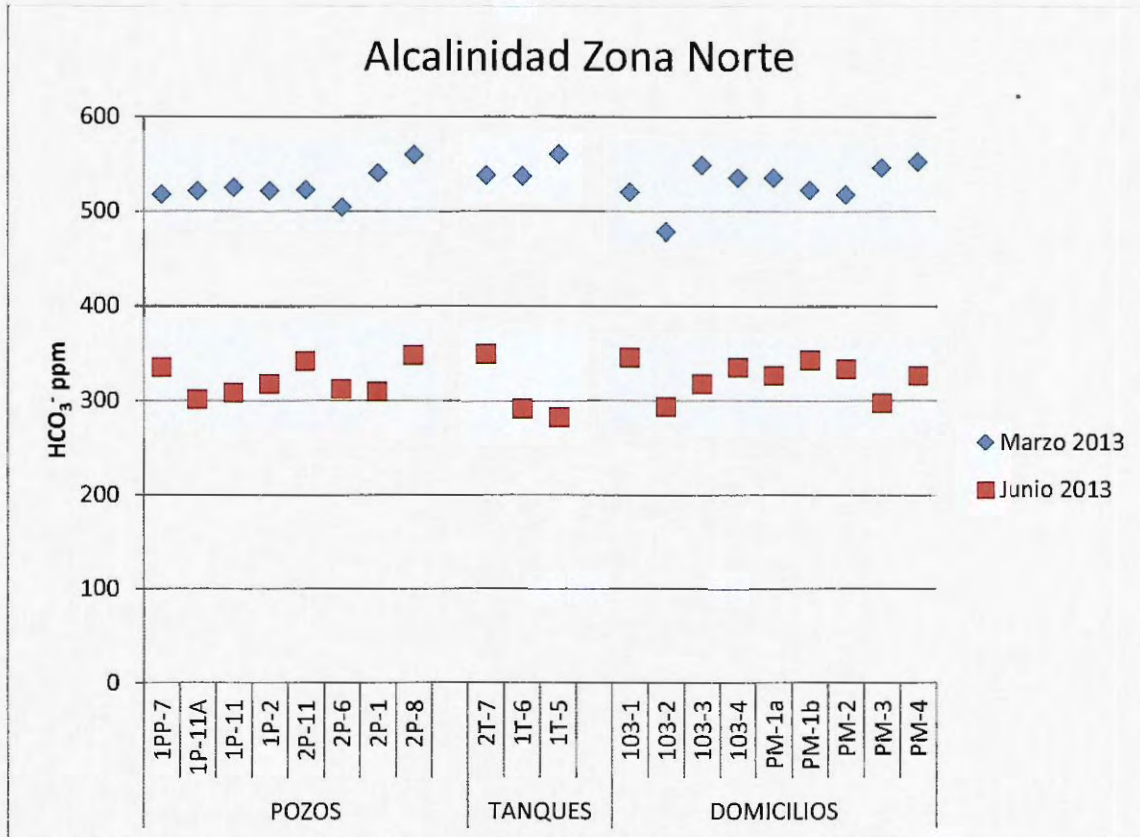


Figura 3.8 Alcalinidad en pozos, tanques y domicilios en muestras de marzo y junio.

La alcalinidad en la zona Sur presento los siguientes resultados: en marzo, los pozos presentaron un rango de 503.95 a 559.66 ppm, las tomadas en junio con rango de 300.98 a 348.02 ppm. En marzo los tanques presentaron un rango de 537.72 y 560.40 ppm, las tomadas en junio con un rango de 283.08 a 349.59 ppm, en los muestras tomadas en marzo de domicilios presentaron un rango de 478.31 a 552.09 ppm, las tomadas en junio con un rango de 293.27 a 342.34 ppm (Ver figura 3.9 y Anexo 2).



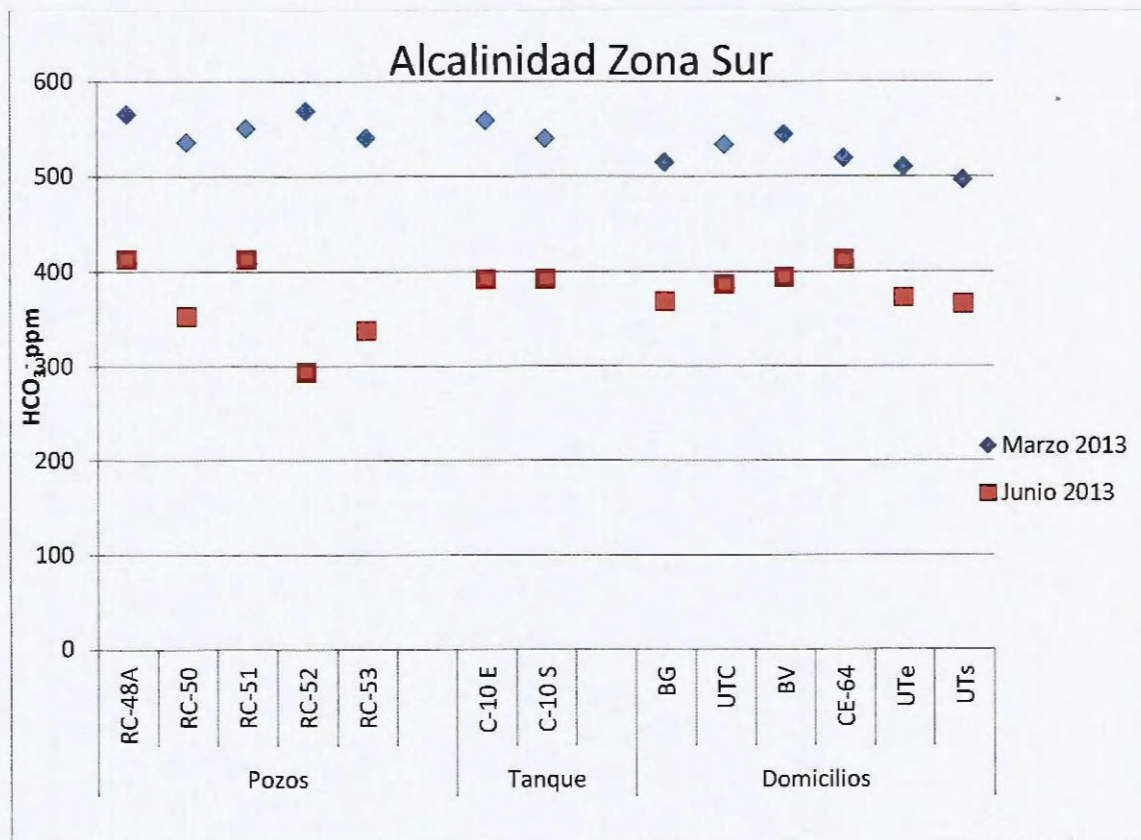


Figura 3.9 Alcalinidad en pozos, tanques y domicilios en muestras de marzo y junio.

En general para alcalinidad se detecta una mayor concentración de  $\text{HCO}_3^-$  en todas las muestras de marzo respecto a las de junio sin observarse cambios de rangos entre pozos, tanques y domicilios. Lo cual es indicador de las aguas bicarbonatadas que corresponden al sistema y esta relacionando las condiciones de infiltración.

### 3.2.5 Bacteriología

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para Coliformes totales y *E. coli*, que relacionan la presencia de los indicadores fecales. Para observar la tabla de resultados con intervalo de confianza ver el anexo 3.

#### Coliformes Totales en marzo en la zona Norte

Los coliformes totales estuvieron presentes en muestras tomadas en los pozos con un rango de 0 a 4.05 NMP/100ml, los tanques variaron de 0.5 a 5.05 NMP/100ml, y de las



muestras de domicilio siete presentaron 0 NMP/100ml una presento 1 NMP/100ml y otra 117.95 NMP/100ml (Ver tabla 3.3).

*E. coli* en marzo en la zona Norte

La presencia de *E. coli* no fue detectada en ninguna muestra de la zona Norte en marzo (Ver tabla 3.3).

Tabla 3.3 Resultados de marzo bacteriología de zona Norte.

Tipo de muestra	Clave de muestra	Coliformes Totales (NMP/100ml)	<i>E. Coli</i> (NMP/100ml)
POZOS	1PP-7	2.55	0
	1P-11A	0	0
	1P-11	0	0
	1P-2	4.05	0
	2P-11	0	0
	2P-6	3.6	0
	2P-1	1.6	0
	2P-8	0	0
TANQUES	1T-5	0.5	0
	1T-6	3.6	0
	2T-7	5.05	0
DOMICILIOS	103-1	117.95	0
	103-2	1	0
	103-3	0	0
	103-4	0	0
	PM-1a	0	0
	PM-1b	0	0
	PM-2	0	0
	PM-3	0	0
	PM-4	0	0

### Coliformes Totales en marzo en la zona Sur

Los coliformes totales estuvieron presentes en muestras tomadas en los pozos con un rango de 0.5 a 10.9 NMP/100ml. Los tanques así como los domicilios presentaron 0 NMP/100ml (Tabla 3.4).

### *E. coli* en marzo en la zona Sur

La presencia de *E. coli* no fue detectada en ninguna muestra de la zona Norte en marzo (Ver tabla 3.4).

Tabla 3.4 Resultados de marzo bacteriología de zona Sur

Tipo de muestra	Clave de muestra	Coliformes Totales (NMP/100ml)	E. Coli (NMP/100ml)
POZOS	RC-48A	0.5	0
	RC-50	3.6	0
	RC-51	5.75	0
	RC-52	9.1	0
	RC-53	10.9	0
TANQUES	C-10 E	0	0
	C-10 S	0	0
DOMICILIOS	BG	0	0
	UTC	0	0
	BV	0	0
	CE-64	0	0
	UTe	0	0
	UTs	0	0

### Coliformes totales en junio en la zona Norte

Los coliformes totales estuvieron presentes en muestras tomadas en la zona Sur en junio los pozos con un rango de 2.5 a 1299.7 NMP/100ml. Los tanques presentaron un rango de 0 a 709.45 NMP/100ml y una muestra de domicilio presentó 2419.6 NMP/100ml y las otras ocho presentaron 0 NMP/100ml (Tabla 3.5).

*E. coli* en junio en la zona Norte

La presencia de *E. coli* en la zona Norte fue detectada dos muestras de pozos con 1 NMP/100ml en cada una en los tanques fue de 0 a 1.5 NMP/100ml y en los domicilios estuvo ausente (Tabla 3.5).

Tabla 3.5 Resultados de junio Bacteriología de Zona Norte.

Tipo de muestra	Clave de muestra	Coliformes Totales (NMP/100ml)	<i>E. Coli</i> (NMP/100ml)
POZOS	1PP-7	2.5	0
	1P-11A	19.1	0
	1P-11	20.9	0
	1P-1	93.45	0
	2P-11	1299.7	0
	2P-1	53.45	0
	2P-6	511.85	1
	2P-8	102.05	1
TANQUES	1T-5	0	0
	1T-6	356.6	1.5
	2T-7	709.45	1
DOMICILIOS	103-1	2419.6	0
	103-2	0	0
	103-3	0	0
	103-5	0	0
	PM-1a	0	0
	PM-1b	0	0
	PM-2	0	0
	PM-3	0	0
	PM-5	0	0

Coliformes totales en junio en la zona Sur

Los coliformes totales estuvieron presentes en muestras tomadas en los pozos con un rango de 2 a .162.55 NMP/100ml. Los tanques presentaron 0 NMP/100ml, en marzo una

muestra de domicilio presento 1 NMP/100ml y las otras cinco presentaron 0 NMP/100ml (Tabla 2.9).

*E. coli* en marzo en la zona Sur

En tres de las muestras de pozo hubo presencia de *E. coli* dos con 1 NMP/100ml y otra con 5.2 NMP/100ml (Ver tabla 3.6).

Tabla 3.6 Resultados de junio Bacteriología de Zona Sur.

Tipo de muestra	Clave de muestra	Coliformes Totales (NMP/100ml)	<i>E. Coli</i> (NMP/100ml)
POZOS	RC-48A	8	0
	RC-50	2	1
	RC-51	11.5	1
	RC-52	162.55	5.2
	RC-53	25.9	0
TANQUES	C-10 E	0	0
	C-10 S	0	0
DOMICILIOS	BG	0	0
	UTC	0	0
	BV	1	0
	CE-64	0	0
	UTe	0	0
	UTs	0	0

### 3.2.6 Trihalometanos (THMs)

De los resultados obtenido y de acuerdo al identificación contra el estándar evaluado, la presencia de THMs está representada por: Triclorometano (Cloroformo), Bromodiclorometano (BDCM), Dibromoclorometano (DBCM) y Tribromometano (Bromoformo).

En la zona Norte, en marzo se detectó la presencia de BDCM en la muestra de domicilio PM-1a y bromoformo en dos muestras de domicilio (103-1 y 103-4) (Tabla 3.7).

En la zona Norte, en junio se detectó la presencia de DBCM en las muestras de pozo 1PP-7, 1P-11A 2P-6, 2P-8 y 1P-11; el DBCM también se presentó en las muestras 103-2, PM-4 y el BDCM estuvo presente en las muestras 2P-6 y 1P-11 y bromoformo en la muestra de domicilio 103-1.

En la zona Sur, en marzo se detectó la presencia de bromoformo en una muestra de pozo (RC-51); la muestra de domicilio BV presentó bromoformo; también las muestras de domicilio BG y CE- 64 presentaron BDCM. Las muestras UTe y UTs presentaron DBCM y en junio se detectó presencia de DBCM en la muestra de pozo RC-53 (Tabla 3.8).

En general se detectó mayor presencia de THMs en los domicilios respecto a los pozos para la temporada de marzo, no obstante en junio, los pozos presentaron mayor ocurrencia de THMs con respecto a marzo, notablemente el cloroformo fue el único compuesto no presente en las muestras.

Tabla 3.7 Resultados de Trihalometanos de Zona Norte marzo y junio.

Compuesto		Cloroformo		Bromodiodorometano		Dibromoclorometano		Bromoformo	
Tipo de muestra	Clave de muestra	Marzo	Junio	Marzo	Junio	Marzo	Junio	Marzo	Junio
Pozos	1PP-7								
	1P-11A								
	1P-11								
	1P-2								
	2P-11								
	2P-6								
	2P-1								
	2P-8								
Tanques	1T-5								
	1T-6								
	2T-7								
Domicilios	103-1								
	103-2								
	103-3								
	103-4								
	PM-1a								
	PM-1b								
	PM-2								
	PM-3								
PM-4									



Tabla 3.8 Resultados de Trihalometanos de Zona Sur marzo y junio.

Compuesto		Cloroformo		Bromodiclorometano		Dibromoclorometano		Bromoformo	
Tipo de muestra	Clave de la muestra	Marzo	Junio	Marzo	Junio	Marzo	Junio	Marzo	Junio
Pozos	RC-48A								
	RC-50								
	RC-51								
	RC-52								
	RC-53								
Tanque	C-10 E								
	C-10 S								
Domicilios	BG								
	UTC								
	BV								
	CE-64								
	UTe								
	UTs								

### 3.2.7 Meteorología (precipitación pluvial)

La figura 3.10 muestra el promedio de precipitación pluvial para el periodo 1991 a 2012 en Cancún. En el mes de marzo se observan las precipitaciones más bajas, así mismo, en junio se observan las precipitaciones más altas (mayores a 150 mm). En el año 2013 los meses de enero, febrero y marzo tuvieron precipitaciones de 23.6 y 26.1 mm respectivamente razón por la cual se consideró como parte de la temporada de estiaje para el muestreo que se llevó a cabo entre el 13 y el 22 de marzo; para junio el promedio histórico es de 167.5 mm y en particular en junio del 2013 ocurrió una lluvia de 500mm durante el 1 al 7 de junio y el muestreo de este estudio se realizó del 11 al 21 de junio del 2013. Ver anexo 4 para observar los datos de precipitación graficados.

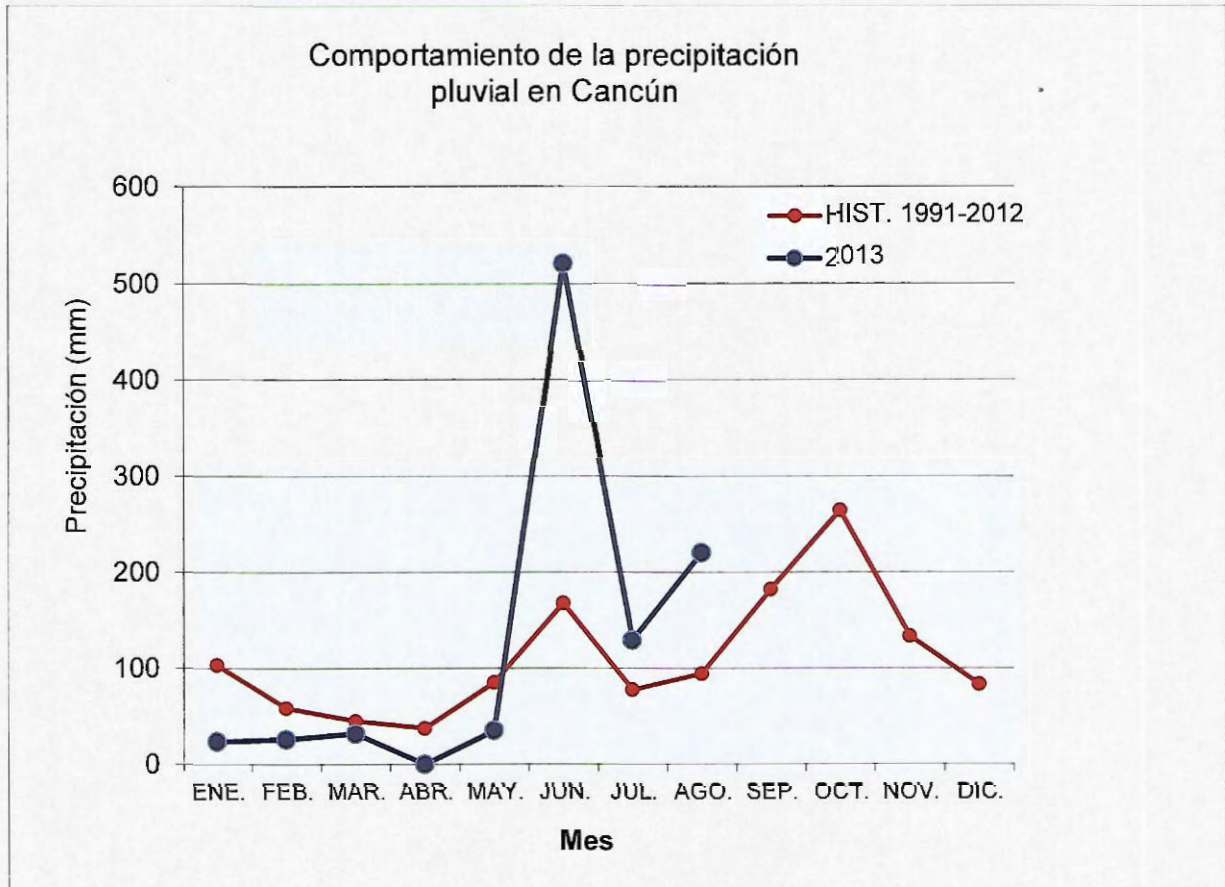


Figura 3.10 Comparación entre la precipitación pluvial promedio histórica (1991-2012) y la de 2013.

## CAPITULO 4 DISCUSIÓN

### 4.1 Discusión

La discusión de los resultados se realizó con base en el tipo de muestra (pozos, tanques de rebombeo y domicilios), en la zona (zona Norte y zona Sur) y por la temporalidad (marzo y junio de 2013).

La temporalidad tiene un marcado efecto en el procesos de infiltración ya que parámetros como los Sólidos Disueltos Totales (SDT) presentaron incremento en la concentración desde los pozos hasta los domicilios en ambas zonas. La zona Sur presentó mayor concentración de SDT que la Norte. En marzo la concentración de SDT fue mayor que en junio donde el incremento de lluvias que se recargaron el acuífero con promoviendo una menor concentración de SDT. El potencial de Hidrogeno no presentó tendencia entre los tipos de en general la temporada de marzo fue la que presentó valores ligeramente alcalinos en general, sin embargo al inicio de temporada de lluvias la recarga reflejó una recuperación del valor neutro. Manteniendo los resultados de junio con valores más cercanos a 7 unidades de pH. El pH controla muchas reacciones químicas y la actividad biológica normalmente se restringe a una escala de pH entre 6 y 8. Las aguas muy ácidas o muy alcalinas son indeseables debido a que son corrosivas (Moeller, et al., 2006).

Para el cloro residual, del proceso de cloración, este mostro una disminución en su concentración a lo largo del recorrido del recurso hídrico en el sistema; ya que la concentración disminuyó desde los pozos hasta los domicilios en las ambas temporadas y en las dos zonas. Esto puede deberse a que la temperatura aumenta a lo largo del día y de la temporada de estiaje a la de verano, que acelera la volatilidad del compuesto. Así mismo, esta situación se refleja en los domicilios cuyos valores estuvieron fuera de la norma respecto al cloro residual, debido a las bajas concentraciones que presentaron.

El efecto de temporalidad es evidente tanto para los nitritos como los nitratos ya que estos compuestos presentaron un incremento de las muestras tomadas en marzo respecto a las tomadas en junio.

En cuanto al parámetro de nitratos, muestra una preponderancia a estar por debajo de la norma mexicana; demostrando que la mayor variación fue en los pozos de distribución zonas en las cuales se detectó el incremento de estos valores lo cual está relacionado a la mayor infiltración de la zona Norte a la zona Sur. La presencia de estas variaciones puede estar relacionada a la presencia de desechos en los alrededores de los pozos, así como también la concentración se incrementó de la temporada de estiaje a la de lluvias lo cual indica que la fuente de este compuesto en el acuífero y en el sistema de distribución esta explicada por la infiltración durante la dicha temporada. Un exceso de nitrógeno puede causar problemas de eutrofización en cuerpos de agua, ya que favorecen el crecimiento excesivo de algas y malezas acuáticas (Moeller, et al., 2006). La presencia de nitratos en el agua subterránea puede tener diversos orígenes relacionados con actividades humanas como la agricultura y la disposición de los desechos de humanos y de animales (Pacheco et al., 2001) : Siendo con ello un claro indicador del arrastre de contaminantes por la infiltración de desechos orgánicos de origen humano, de aguas residuales o fugas de fosas sépticas .

De acuerdo a la clasificación de agua de la CONAGUA, la calidad de agua para la Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) que se distribuye en ambas zonas en marzo se mantuvo con calidad Excelente. Sin embargo, la  $DBO_5$  fue mayor en las muestras de tanque y domicilio que en las muestras de pozos. En las muestras tomadas en junio se observó un incremento de  $DBO_5$  respecto a marzo y se clasificaron como de excelente, buena y aceptable calidad. En la zona Sur se presentó la mayor  $DBO_5$ , las muestras de domicilio fueron las que tuvieron la mayor  $DBO_5$  de todas las muestras.

De manera cuantitativa las muestras de junio presentaron mayor  $DBO_5$  que las de marzo lo que implica un arrastre de materia orgánica gracias al incremento de velocidad de escurrimiento de las distintas posibles fuentes de la misma (residuos vegetales de la superficie como ácidos húmicos o alguna descarga o fuga de lixiviados), sin embargo, las muestras de agua de pozo presentaron menores valores de  $DBO_5$  respecto a las de tanques y domicilios lo que indica que la carga de materia orgánica proviene del sistema de distribución (desprendimiento de incrustaciones y biopelículas) más que del acuífero como tal. Los resultados de la  $DBO_5$  indican que la distribución del agua mantiene una buena calidad y que la actividad microbiana detectada como coliformes no altera la



calidad del sistema de distribución. La Demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) Es el principal indicador de la salud de un cuerpo de agua natural. A mayor demanda de oxígeno, mayor actividad microbiana para degradar la materia orgánica.

De manera cuantitativa las muestras de junio presentaron mayor  $DBO_5$  que las de marzo lo que implica un arrastre de materia orgánica gracias al incremento de velocidad de escurrimiento de las distintas posibles fuentes de la misma (residuos vegetales de la superficie como ácidos húmicos o alguna descarga o fuga de lixiviados), sin embargo, las muestras de agua de pozo presentaron menores valores de  $DBO_5$  respecto a las de tanques y domicilios lo que indica que la carga de materia orgánica proviene del sistema de distribución que puede estar relacionado a incrustaciones y acumulaciones de desprendimiento de biopelículas más que del acuífero como tal. Los resultados de la  $DBO_5$  indican que la distribución del agua mantiene una buena calidad y que la actividad microbiana detectada como coliformes no altera la calidad del sistema de distribución. La

Demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) Es el principal indicador de la salud de un cuerpo de agua natural. A mayor demanda de oxígeno, mayor actividad microbiana para degradar la materia orgánica.

La alcalinidad expresada como  $HCO_3^-$ , en los distintos tipos de muestras no presentaron cambios significativos, incluso entre zonas los rangos son semejantes, no obstante existe diferencia significativa entre las temporadas, en marzo las concentraciones están alrededor de las 530 ppm, sin embargo, en junio las concentraciones estuvieron alrededor de 350 ppm, esto es debido a que la alcalinidad es un parámetro dependiente de la relación agua- roca y las lluvias que se presentaron en junio recargaron el acuífero con agua de menor alcalinidad lo que explica este comportamiento. Si bien estos valores nos confirman las condiciones de rápida infiltración hacia el agua subterránea, así como la interacción por disolución de la matriz cálcica, también tiene sus repercusiones en el sistema de distribución ya que de acuerdo al índice Reyznar (Reyznar, 1944). Se trata de un agua agresiva (Ver anexo 4) lo cual implica presencia de sales carbonatadas en precipitación. El índice modificado de Reyznar (interpretación de Carrier) señala que a partir de un valor 7.0 el agua presenta una corrosión significativa. Esto confirma la presencia de incrustaciones y acumulaciones a lo largo del sistema, en especial en los puntos finales donde el agua reduce su velocidad y la acumulación de sales permite la



formación sedimentos confirmado por el incremento de SDT en los depósitos residenciales.

Los coliformes totales en las muestras de marzo tuvieron presencia en cuatro de ocho pozos de la zona Norte así como en los tres tanques y en las seis muestras de pozo de la zona Sur. En los tanques de la zona Sur que contenían agua clorada no hubo presencia de organismos coliformes, sin embargo, en dos almacenes domiciliarios de la zona Norte se detectó la presencia de los mismos. No todos los coliformes totales son de origen fecal por lo que se estimó la concentración de *E. coli* en las mismas muestras y el resultado fue que un tanque de la zona Norte confirmó la presencia de *E. coli* indicando contaminación fecal reciente.

En junio todas las muestras de pozo presentaron densidades desde algunas decenas hasta algunas con densidades del orden de 100 hasta 1000 NMP/100ml de coliformes totales lo que confirma que las lluvias influyen directamente en la calidad del agua desde los pozos debido a que incrementa la velocidad de flujo desde la superficie alcanzando el acuífero el pudiera haber alguna descarga de agua residual ya que también se identificaron y cuantificaron organismos *E. coli*. Lo cual indica que la fuente de distribución en la zona norte presenta problemas de calidad bacteriológica, lo cual se confirma en presencia de coliformes fecales en uno de los contenedores domiciliarios muestreados en la zona Norte. Sin embargo ningún otro contenedor residencial en la zona Norte o Sur presentó conteo arriba de la normatividad mexicana.

Los Coliformes totales y *Escherichia coli* son indicadores importantes relacionados a la salud poblacional, ya que los microorganismos son los causantes de problemas gastrointestinales. Estos parámetros son considerados en gran parte de las políticas públicas de calidad del agua como Indicadores Bacteriológicos Fecales ya que su presencia sirve de indicador a los patógenos que pueden causar problemas de salud en la población (Keswick et al., 1982).

Por lo anterior el proceso de cloración se mantiene como la alternativa para mantener la calidad bacteriológica en la distribución del agua dentro de la normatividad mexicana.

Con respecto a la presencia de subproductos de cloración se ha señalado que en un estudio realizado en la zona metropolitana de Cancún, (Gelover et al., 2000)

determinaron la presencia de cloroformo, dibromoclorometano y bromoformo, mismos que fueron clasificados como subproductos de desinfección en muestras de agua potable del sistema de distribución (ver antecedentes). De acuerdo a estos resultados, durante la época de estiaje los pozos de distribución mostraron presencia de bromoformo en un pozo (ver tabla 3.7) para la temporada de lluvias (junio) la presencia de estos compuestos orgánicos (THMs) se incrementó en los pozos (seis muestras) siendo los pozos de la zona Norte quienes presentaron mayor incidencia de estos compuestos. Así mismo y como se señaló anteriormente la detección de estos compuestos fue posible en algunos domicilios (ver tabla 3.7). Para definir la fuente de origen de estos compuestos (THMs) se toma en cuenta que la presencia del cloroformo como primer subproducto de desinfección es nula aunado a que no se presentan condiciones físico-químicas (pH o materia orgánica) que promuevan la formación de estos compuestos; por lo que su presencia como subproductos del proceso de cloración queda descartada. En cambio la detección positiva de bromodichlorometano y bromoformo fue confirmada en la fuente de distribución (pozos) y persisten en los domicilios por lo que se sugiere que estos compuestos permanecen en el sistema en incluso pueden ser acumulados en los depósitos domiciliarios. Por lo cual, en contraste, en este estudio los resultados presentados señalan la presencia de cloroformo nula como, sin embargo, hubo presencia de bromodichlorometano y bromoformo desde los pozos hasta los domicilios, lo que los descarta como subproductos de desinfección y los clasifica como contaminantes que se conservan hasta los domicilios.

Es notable que en la zona Norte los pozos no mostraran presencia de THMs, pero su presencia fue detectada en junio, lo cual se vuelve indicador nuevamente de la importancia de la infiltración y recarga al acuífero que transporta contaminantes desde la superficie. Tomando en cuenta que la presencia de nitratos y nitritos confirman este comportamiento, la presencia de ambos compuestos puede deberse al incremento de actividades antropogénicas que han acompañado el incremento de desarrollos y lotificación en la zona Norte donde se detectó un incremento poblacional semi-rural (acompañado de la presencia de animales de granja) "ranchitos" donde el uso de cloro para la limpieza es frecuente.

La deposición de sedimentos en los tanques de distribución, en las tuberías y en los almacenes domiciliarios afecta no solo como elemento corrosivo como ya se señalaba, sino como precursor de puntos o áreas de acumulación para bacterias debido al cambio de rugosidad en las tuberías, así como para la sorción de partículas de origen orgánico o inorgánico, aun esta por evaluarse, sin embargo su presencia si es un potencial a los procesos de retención y sorción de contaminantes, tanto bacteriológico como orgánico.

## CAPITULO 5 CONCLUSIONES

### 5.1 Conclusiones

Los cambios más importantes en la calidad del agua en todos los puntos muestreados que se detectaron se relacionan principalmente con la temporalidad, lo cual tiene su razón en los cambios de temporada de estiaje y de lluvias, lo cual afecta el proceso de infiltración de agua que recarga el acuífero y transporta otros compuestos tanto nutrientes y materia orgánica como aquellos que pueden ser considerados como contaminantes. En el punto inicial del estudio (extracción de agua subterránea), se destaca que el agua que se extrae de los pozos no es apta para uso y consumo humano directamente, debido a la calidad bacteriológica reportada.

El tratamiento de desinfección utilizado (cloración) es adecuado y por el momento es el necesario para cumplir con la calidad bacteriológica indicada por la norma.

La calidad bacteriológica del agua distribuida cumple con la normatividad nacional correspondiente, la higiene en los domicilios es también un factor limitante en la calidad de agua que consume la población, ya que la cloración es un proceso que decae en el tiempo hasta que su concentración no es suficiente para mantener la calidad bacteriológica dentro de los sistemas de almacenamiento de uso residencial. Lo cual coincide con estudios señalados por la OMS.

Con respecto a los compuestos THMs, la fuente de estos compuestos no parecen estar relacionada al proceso de cloración en el sistema, ya que la calidad de agua se encuentra en condiciones de excelente a muy buena respecto a los contenidos de materia orgánica. Por el contrario la detección de compuestos como el bromodiclorometano y bromoformo fue confirmada en la fuente de distribución (pozos) y persisten en los domicilios por lo que se sugiere que estos compuestos permanecen en el sistema en incluso pueden ser acumulados en los depósitos domiciliarios.

Aunado a esta condición el agua del sistema de distribución presentó un índice de Ryznar mayor que 7, que indica que el agua es agresiva a la temperatura detectada en campo.

Si bien en este sistema acuoso existe un delicado equilibrio que rige su composición fisicoquímica, en función esencialmente del equilibrio carbónico (disolución de CO<sub>2</sub>) en el

agua y comportamiento que las especies carbonatadas puede haber en ella como lo expresan los resultados de alcalinidad. La temperatura juega un rol importante ya que las altas temperaturas detectadas en los depósitos incrementan la capacidad incrustante. La temperatura promedio en la red fue de 25°C, por lo que las líneas de agua caliente de las casas que sean de acero galvanizado tendrán incrustaciones que promueven;

- a) Retención de microorganismos
- b) Retención de materia orgánica
- c) Sorción de compuestos disueltos (químicos)

Es claro que el incremento asentamientos humanos cercanos a las zonas de extracción de agua potable impacta fuertemente la calidad de un sistema de distribución para una población, dadas las características hidrogeológicas donde se localizan las zonas de pozos se permiten una infiltración muy rápida, confirmado no solo la detección de Nitratos y Nitritos sino por compuestos halogenados que Para este sistema están fuertemente relacionados con fuente contaminante antropogénica y no como subproducto de un proceso potabilizador.

Con esto se confirma la determinar de THMs en el sistema de distribución de agua para uso y consumo humano donde su ocurrencia no es un subproducto del proceso de la desinfección sino por el contrario son parte de las características de la fuente de origen del agua subterránea en especial en la zona Norte donde los pozos del sistema de distribución se ven cada vez más afectados por el incremento poblacional del municipio de Benito Juárez, Quintana Roo.



## REFERENCIAS

- APHA. 1998: Standard Methods for the examination of Water and Wastewater, v. 20.
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., and Merediz-Alonso, G., 2011, Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico: Hydrogeology Journal, v. 19, no. 3, p. 507-524.
- Beddows, P. A., Smart, P. L., Whitaker, F. F., and Smith, S. L., 2007, Decoupled fresh-saline groundwater circulation of a coastal carbonate aquifer: spatial patterns of temperature and specific electrical conductivity: Journal of Hydrology, v. 346, no. 1, p. 18-32.
- Bellar, T. A., Lichtenberg, J. J., and Kroner, R. C., 1974, The occurrence of organohalides in chlorinated drinking waters.
- Marín, L. E., Pacheco, J. G., and Méndez, R., 2004, Hidrogeología de la Península de Yucatán *in* Jimenez, B., and Marín, L. E., eds., El agua en México vista desde la Academia: México, D.F., Academia Mexicana de Ciencias, p. 381.
- Bloom, D. E., 2007, Gestión internacional de la salud: cómo promover la salud mundial y aprovechar mejor los recursos monetarios mediante una mejor coordinación: Finanzas y desarrollo: publicación trimestral del Fondo Monetario Internacional y del Banco Mundial, v. 44, no. 4, p. 31-35.
- Buck, C., 1988, El desafío de la epidemiología: problemas y lecturas seleccionadas, Pan American Health Org, v. 505.
- CNA, 1990, Sinopsis geohidrológica del estado de Quintana Roo, Aguas Subterráneas, G. d. A., ed.: México, D.F., México.
- CONAGUA, 2011, Situación de los recursos hídricos, Estadísticas del Agua en México, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, p. 33.
- CONAGUA, 2012. Normales Climatológicas, Servicio Meteorológico Nacional. Comisión Nacional del Agua. Disponible en < <http://smn.cna.gob.mx/>> Consultado: el día martes 2 de octubre de 2012.

CONAGUA, 2013, Programas: Agua potable, alcantarillado y saneamiento. Disponible en < <http://www.cna.gob.mx/Contenido.aspx?n1=4&n2=24&n3=24>> Consultado el día viernes 9 de agosto de 2013.

DHC AGUAKAN, 2010. Informe anual más de 16 años al servicio de Benito Juárez-Cancún- e Isla Mujeres 40 p.

DHC AGUAKAN, 2012, Infraestructura para distribuir el agua potable. Disponible en: <http://www.aguakan.com/nav/empresa/infraestructura.html> > Consultado el día: martes 04 septiembre 2012.

Eichelberger, J., Budde-Revision, W., Munch, J., and Bellar-Revision, T., 1989, METHOD 524.2 MEASUREMENT OF PURGEABLE ORGANIC COMPOUNDS IN WATER BY CAPILLARY COLUMN GAS CHROMATOGRAPHY/MASS SPECTROMETRY: Environmental monitoring systems laboratory office of research and development, US EPA, Cincinnati, Ohio, v. 45268.

Flores-Abuxapqui, J. J., Suárez-Hoil, G. d. J., Puc-Franco, M. A., Heredia-Navarrete, M., Vivas-Rosel, M., and Franco-Monsreal, J., 1995, Calidad bacteriológica del agua potable en la ciudad de Mérida, Yucatán: Rev Biomed, v. 6, p. 127-134.

Ford, D. C., and Williams, P., 2007, Karst hydrogeology and geomorphology, John Wiley and Sons.

Freeze, R., y Cherry. J.A., 1979. Groundwater: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, v. 7632, p. 604.

Freire, C., Soler, R., Fernández, M. F., Villanueva, C. M., Grimait, J. O., and Olea, N., 2008, Valores de trihalometanos en agua de consumo de la provincia de Granada, España: Gaceta Sanitaria, v. 22, no. 6, p. 520-526.

Garrido, S. E., and Fonseca, M. G., 2010, Speciation and Kinetics of trihalomethane formation in drinking water in Mexico: Ground Water Monitoring & Remediation, v. 30, no. 1, p. 79-86.

Gelover, S., Bandala, E. R., Leal-Ascencio, T., Perez, S., and Martinez, E., 2000, GC-MS determination of volatile organic compounds in drinking water supplies in Mexico: *Environmental toxicology*, v. 15, no. 2, p. 131-139.

Gran, G., 1952, Determination of the equivalence point in potentiometric titrations. Part II: *Analyst*, v. 77, no. 920, p. 661-671.

Hua, G., and Reckhow, D. A., 2007, Comparison of disinfection byproduct formation from chlorine and alternative disinfectants: *Water Research*, v. 41, no. 8, p. 1667-1678.

Huntoon, P. W., 1995, Is it appropriate to apply porous media groundwater circulation models to karstic aquifers?, in El-Kadi, A. I., ed., *Groundwater Models for Resources Analysis and Management*: Boca Raton, Florida, Lewis Publishers, p. 339-358.

INEGI, 2010, Censo de población y vivienda., en Instituto Nacional de Estadística, G. e. I., Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/> consultado Septiembre 2012, Enero 2013 y Agosto 2013.

Ivahnenko, T., and Zogorski, J. S., 2007, Sources and Occurrence of Chloroform and Other Trihalomethanes in Drinking-Water Supply Wells in the United States, 1986-2001. -

Jiménez, B., Mazari, M., Domínguez, R., and Cifuentes, E., 2004, El agua en el Valle de México: El agua en México vista desde la academia. Science Academy, Mexico.

Keswick, B. H., Gerba, C. P., Secor, S. L., and Cech, I., 1982, Survival of enteric viruses and indicator bacteria in groundwater: *Journal of Environmental Science and Health Part A*, v. 17, no. 6, p. 903-912.

Knobelsdorf, J., and Mujeriego, R., 1997, Crecimiento Bacteriano en las Redes de Distribución de Agua Potable: Una Revisión Bibliográfica: *Ingeniería del Agua*, v. 4, p. 17-28.

Lee, E., and Schwab, K., 2005, Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries: *J water health*, v. 3, p. 109-127.

Lesser, J., and Weidie, A., 1988, *Region 25, Yucatan Peninsula: Hydrogeology* the Geological Society of North America, Boulder Colorado. 1988. p 237-241.

Liang, L., and Singer, P. C., 2003, Factors influencing the formation and relative distribution of haloacetic acids and trihalomethanes in drinking water: *Environmental science & technology*, v. 37, no. 13, p. 2920-2928.

Marín, L. E., Pacheco, J. G., and Méndez, R., 2004, Hidrogeología de la Península de Yucatán in Jimenez, B., and Marín, L. E., eds., *El agua en México vista desde la Academia: México, D.F., Academia Mexicana de Ciencias*, p. 381.

Miles, A. M., Singer, P. C., Ashley, D. L., Lynberg, M. C., Mendola, P., Langlois, P. H., and Nuckols, J., 2002, Comparison of trihalomethanes in tap water and blood: *Environmental science & technology*, v. 36, no. 8, p. 1692-1698.

Moeller, Gabriela 2006 Operación de plantas de tratamiento de lodos activados. Material tecnológico. Curso del 4 al 9 de septiembre del 2006. Instituto mexicano de tecnología del agua (IMTA). Tercera edición. México.

Monarca, S., Richardso, S. D., Feretti, D., Grottolo, M., Thruston, A. D., Zani, C., Navazio, G., Ragazzo, P., Zerbini, I., and Alberti, A., 2002, Mutagenicity and disinfection by-products in surface drinking water disinfected with peracetic acid: *Environmental toxicology and chemistry*, v. 21, no. 2, p. 309-318.

Navalón, S., Alvaro M & Garcia H, 2008 Carbohydrates as trihalomethanes precursors. Influence of pH and the presence of Cl<sup>-</sup> and Br<sup>-</sup> on trihalomethane formation potential, *Water Res.* 42 3990-4000.

Navalón, S., Alvaro, M., Garcia, H., and Monforte, L., 2009, Photochemical treatment for water potabilization. Influence of wavelength and hydrogen peroxide concentration on the reduction of trihalomethanes: *Desalination and Water Treatment*, v. 3, no. 1-3, p. 21-28.

Núñez, M. A., Gamino, R., García, G., Hernández, J. L., Cárdenas, M. L., Martínez, S. J., & Moreno, S. 2005. Análisis de trihalometanos totales en agua potable del área metropolitana de Monterrey, NL. *Ciencia UANL*, (003), 358-361.

OMS 1998. Guías para la calidad del agua potable. Segunda edición. Vigilancia y control de los abastecimientos de agua de la comunidad. 3:65-66.



Pacheco, J., Marín, L., Cabrera, A., Steinich, B., and Escolero, O., 2001, Nitrate temporal and spatial patterns in 12 water-supply wells, Yucatan, Mexico: *Environmental Geology*, v. 40, no. 6, p. 708-715.

Perry, E., Swift, J., Gamboa, J., Reeve, A., Sanborn, R., Marín, L., and Villasuso, M., 1989, Geologic and environmental aspects of surface cementation, north coast, Yucatan, Mexico: *Geology*, v. 17, no. 9, p. 818.

Perry, E., Velazquez-Oliman, G., and Marín, L., 2002, The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico: *International Geology Review*, v. 44, no. 3, p. 191-221.

Prieto, A., Herrera, L., and de Ingenieros, C., Trihalometanos en el agua potable de Maracaibo, Venezuela, in *Proceedings Congreso Venezolano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 71993, AIDIS, p. 1.

Rizzo, L., Selcuk, H., Nikolaou, A., Belgiorno, V., Bekbolet, M., and Meric, S., 2005, Formation of chlorinated organics in drinking water of Istanbul (Turkey) and Salerno (Italy): *Global NEST Journal*, v. 1, no. 3, p. 143-156.

Rook J.J. (1974), Formation of haloforms during chlorination of natural waters. *Water Treat. Exam.*, **23** (2), 234-243.

Rosencrantz, E., 1990, Structure and tectonics of the Yucatan Basin, Caribbean Sea, as determined from seismic reflection studies: *Tectonics*, v. 9, no. 5, p. 1037-1059.

Ryznar, J. W., 1944, Preparation and Purification of Hydrous Oxide Sols by Ion Exchangers: *Industrial & Engineering Chemistry*, v. 36, no. 9, p. 821-823.

Sarmiento, A., Rojas, M., Medina, E., Olivet, C., and Casanova, J., 2003, Investigación de trihalometanos en agua potable del Estado Carabobo, Venezuela: *Gaceta Sanitaria*, v. 17, no. 2, p. 137-143.

Sharpton, V. L., Burke K., Camargo, A., Hall, S. A., Marín, L. E., Suárez, G., Quezada, J. M., Spudis P.D., and J., U., 1993, The gravity expression of the Chicxulub multiring impact basin: size, morphology, and basement characteristics: *Science*, no. 261, p. 1564-1567.

Villanueva, C. M., Kogevinas, M., and Grimalt, J. O., 2001, Cloración del agua potable en España y cáncer de vejiga: *Gaceta Sanitaria*, v. 15, no. 1, p. 48-53.

Ward, W. C., A. E. Weidie, and Back, W., 1985, *Geology and hydrogeology of the Yucatan, and Quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula*: New Orleans, New Orleans geol. Soc.

White, W. B., 1988, *Geomorphology and hydrology of karst terrains*, Oxford University Press New York.

White, W. B., 2002, Karst hydrology: recent developments and open questions: *Engineering geology*, v. 65, no. 2, p. 85-105.

WHO, 2013, Health Topics. Global epidemics and impact of cholera, World Health Organization. Disponible en <<http://www.who.int/topics/cholera/impact/es/>> Consultado el día: lunes 03 de septiembre de 2012.

Woo, Y.-T., Lai, D., McLain, J. L., Manibusan, M. K., and Dellarco, V., 2002, Use of mechanism-based structure-activity relationships analysis in carcinogenic potential ranking for drinking water disinfection by-products: *Environmental Health Perspectives*, v. 110, no. Suppl 1, p. 75.

Yuste, L., Hervás, A. B., Canosa, I., Tobes, R., Jiménez, J. I., Nogales, J., Pérez-Pérez, M. M., Santero, E., Díaz, E., and Ramos, J. L., 2006, Growth phase-dependent expression of the *Pseudomonas putida* KT2440 transcriptional machinery analysed with a genome-wide DNA microarray: *Environmental Microbiology*, v. 8, no. 1, p. 165-177.

# ANEXOS

## Anexo 1

### Condiciones cromatográficas

Cromatógrafo de Gases:	THERMO ELECTRON CORPORATION Modelo TRACE GC ULTRA
Detector:	Detector de ionización de flama (FID)
Columna:	TG 17 MS 30m x0.32mm x 0.25µm
Gas acarreador/ flujo:	Nitrógeno/ 1ml/min
Temperatura de inyección:	280 °C
Temperatura del detector:	360 °C
Temperatura del horno:	40 °C sostenidos por 1 min, primera rampa de temperatura de 4 °C/min hasta 100 °C sostenido por 1 min, segunda rampa 20 °C/min hasta 200 °C sostenidos por 1 minuto
Flama del detector:	Aire 450 ml/min; hidrógeno 45 ml/min

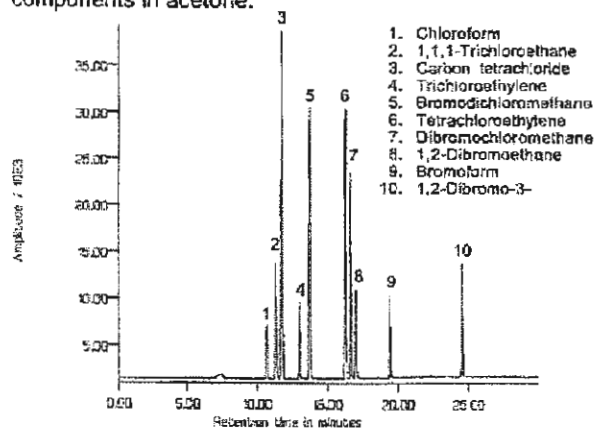
### Cromatogramas del estándar

**SAVE THIS DATA SHEET!**  
It Contains Important Information About This Product.

#### Halogenated Volatiles Mix 551A

Catalog No. 48045

This mixture contains 2000µg/ml of each of the following components in acetone:



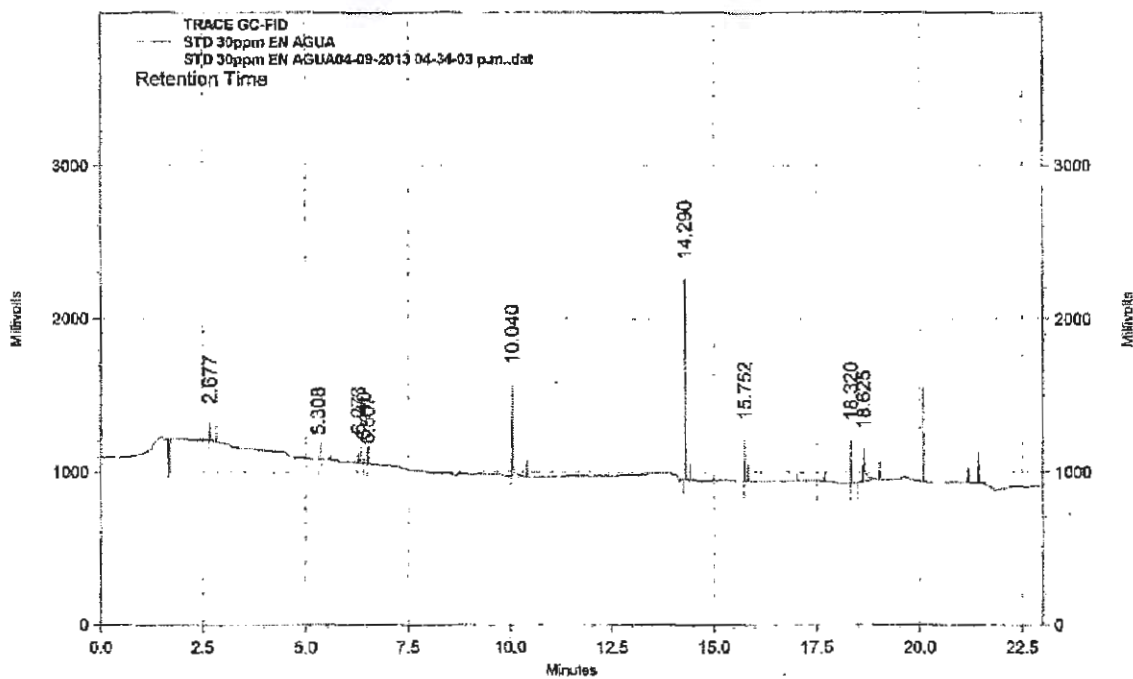
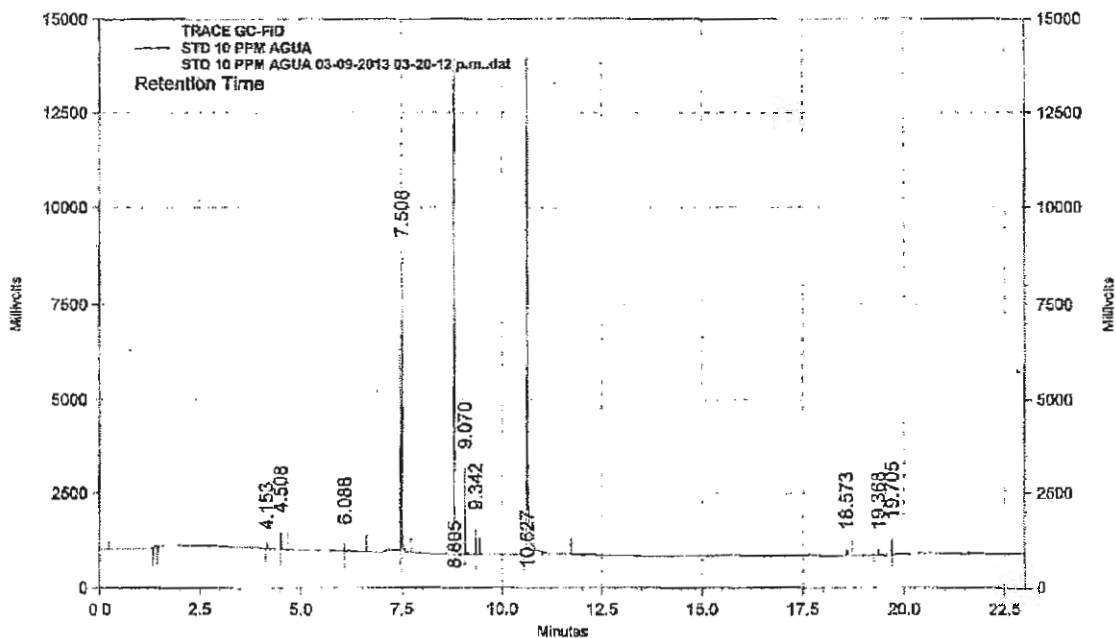
chloropropane

712-0530

VOCOL™ fused silica capillary column, 105m x 0.53mm ID, 3.0µm film, Col. Temp.: 40°C for 4 min., then to 200°C at 8°C/min., Flow Rate: Carrier Gas — 10ml/min., He, Make-Up Gas — 30ml/min., N<sub>2</sub>, Det.: ECD. Sample: 1µl Cat. No. 48045 diluted to 1.0µg/

T712059  
©1998 Sigma-Aldrich Co.

**SUPELCO**  
Belleville, PA





Anexo 2

Tabla de resultados de DBO<sub>5</sub>, Nitratos, Nitritos y alcalinidad de zona Norte en marzo y junio.

Tipo de muestra	Clave de muestra	DBO <sub>5</sub> (ppm)		Nitratos NO <sub>3</sub> (ppm)		Nitritos NO <sub>2</sub> (ppm)		Alcalinidad HCO <sub>3</sub> (ppm)	
		Marzo	Junio	Marzo	Junio	Marzo	Junio	Marzo	Junio
POZOS	1PP-7	0.7975	3.7575	0.7	0	0	0	517.44578	334.7358
	1P-11A	0.645	2.04	0.2	0.1	0	0.13	521.25346	300.9848
	1P-11	0.7175	5.6325	0.2	0	0	0	524.80851	308.0824
	1P-2	0.284	3.44	0.3	0.1	0	0.04	521.58923	317.57265
	2P-11	0.262	5.6325	0.5	0.1	0	0.05	522.48855	341.8731
	2P-6	0.266	2.28	0.5	0.6	0	0.03	503.95652	312.1271
	2P-1	0.29	2.085	0.7	0.8	0	0.04	540.27869	308.9401
	2P-8	0.012	2.6775	0.3	1.6	0	0.04	559.66234	348.0298
TANQUES	2T-7	2.305	8.13	0.08	0.6	0	0.05	538.73239	349.5904
	1T-6	1.47	2.4375	0	0.2	0	0.01	537.72385	291.8382
	1T-5	0.762	2.3625	0	0.7	0	0.05	560.4	283.0889
DOMICILIOS	103-1	1.723	5.475	0	0	0	0.03	520.03478	345.9123
	103-2	2.515	5.745	0	0.8	0	0.03	478.31193	293.2778
	103-3		5.3475	0	0.5	0	0.02	548.62979	317.5726
	103-4		3.6675	0	0	0	0.01	535.30375	335.2954
	PM-1	2.348	4.7025	0	0	0	0.05	535.30375	326.5974
	PM-2		5.235	0	0	0	0.03	517.32743	342.3499
	PM-3		4.9275	0	0	0	0.05	545.9451	333.2219
	PM-4		5.4975	0	0.5	0	0.03	552.09929	297.3038

Tabla de resultados de DBO<sub>5</sub>, Nitratos, Nitritos y alcalinidad de zona Sur en marzo y junio.

Tipo de Muestra	Clave de la muestra	DBO <sub>5</sub> (ppm)		Nitratos NO <sub>3</sub> (ppm)		Nitritos NO <sub>2</sub> (ppm)		Alcalinidad HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)	
		Marzo	Junio	Marzo	Junio	Marzo	Junio	Marzo	Junio
Pozos	RC-48A	2.0625	3.8475	0	1.8	0	0.01	565.3992395	413.1375
	RC-50	1.47	9.5475	0	2.6	0	0.07	535.5820896	351.9244
	RC-51	0.7975	7.2225	0	2	0	0.01	550.4264706	412.6634
	RC-52	0.645	11.58	0	2.6	0	0.01	568.5	293.2778
	RC-53	1.495	10.47	0	2.2	0	0	540.277551	337.5501
Tanque	C-10 E	0.284	9.12	0	1.2	0	0.02	558.6142857	391.7963
	C-10 S	1.1975	10.275	0	1.5	0	0	539.3381295	392
Domicilios	BG	2.267	9.54	0	2.3	0	0.02	514.2158273	368.2556
	UTC		10.9575	0	2	0	0.02	533.1496063	386.4359
	BV		10.9125	0	1.5	0	0.05	544.34375	394.0007
	CE-64		10.6575	0	1.4	0	0.02	519.0603175	412.5422
	UTe	2.515	10.59	0	1	0	0.01	509.9935275	372.4359
	UTs		10.17	0	1	0	0.05	496.0754717	365.9244

Anexo 3

Resultados de bacteriología con intervalo de confianza de la zona Norte en marzo.

Clave de muestra	Coliformes Totales			<i>E. Coli</i>		
	NMP/100ml	Intervalo de confianza		NMP/100ml	Intervalo de confianza	
		Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo
1PP-7	2.55	0.9	7.5	<1	0	3.7
1P-11A	<1	0	3.7	<1	0	3.7
1P-11	<1	0	3.7	<1	0	3.7
1P-2	4.05	0.4	7.2	<1	0	3.7
2P-11	<1	0	3.7	<1	0	3.7
2P-6	3.6	0.95	9	<1	0	3.7
2P-1	1.6	0.4	7.2	<1	0	3.7
2P-8	<1	0	3.7	<1	0	3.7
1T-5	0.5	0.05	2.75	<1	0	3.7
1T-6	3.6	0.95	9	<1	0	3.7
2T-7	5.05	0.9	7.5	<2	0	3.7
103-1	117.95	76.55	177.3	<1	0	3.7
103-2	1	0.15	3.5	<1	0	3.7
103-3	<1	0	3.7	<1	0	3.7
103-4	<1	0	3.7	<1	0	3.7
PM-1	<1	0	3.7	<1	0	3.7
PM-2	<1	0	3.7	<1	0	3.7
PM-3	<1	0	3.7	<1	0	3.7
PM-4	<1	0	3.7	<1	0	3.7

Resultados de bacteriología con intervalo de confianza de la zona Sur en marzo.

Clave de muestra	Coliformes Totales			<i>E. Coli</i>		
	NMP/100ml	Intervalo de confianza		NMP/100ml	Intervalo de confianza	
		Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo
RC-48A	0.5	0.5	2.75	<1	0	3.7
RC-50	3.6	1.3	8.9	<1	0	3.7
RC-51	5.75	2.4	12.3	<1	0	3.7
RC-52	9.1	4.2	16.4	<1	0	3.7
RC-53	10.9	5.5	19.15	<1	0	3.7
C-10E	<1	0	3.7	<1	0	3.7
C-10S	<1	0	3.7	<1	0	3.7
BG	<1	0	3.7	<1	0	3.7
UTC	<1	0	3.7	<1	0	3.7
BV	<1	0	3.7	<1	0	3.7
CE-64	<1	0	3.7	<1	0	3.7
UTe	<1	0	3.7	<1	0	3.7
UTs	<1	0	3.7	<1	0	3.7

Resultados de bacteriología con intervalo de confianza de la zona Norte en junio.

Clave de muestra	Coliformes Totales			<i>E. Coli</i>		
	NMP/100ml	Intervalo de confianza		NMP/100ml	Intervalo de confianza	
		Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo
1PP-7	2.5	0.5	6.65	<1	0	3.7
1P-11A	19.1	11.35	30.25	<1	0	3.7
1P-11	20.9	12.75	32.85	<1	0	3.7
1P-1	93.45	66.55	129.2	<1	0	3.7
2P-11	1299.7	850.4	1896.6	<1	0	3.7
2P-1	53.45	37.05	73.8	<1	0	3.7
2P-6	511.85	330.9	749.05	1	0.05	4.6
2P-8	102.05	72.7	139.45	1	0.05	4.6
1T-5	<1	0	3.7	<1	0	3.7
1T-6	356.6	234.55	515.05	1.5	0.2	6.3
2T-7	709.45	486.75	1017.75	1	0.15	5.4
103-1	2419.6	1439.5	-	<1	0	3.7
103-2	<1	0	3.7	<1	0	3.7
103-3	<1	0	3.7	<1	0	3.7
103-5	<1	0	3.7	<1	0	3.7
PM-1	<1	0	3.7	<1	0	3.7
PM-2	<1	0	3.7	<1	0	3.7
PM-3	<1	0	3.7	<1	0	3.7
PM-5	<1	0	3.7	<1	0	3.7

Resultados de bacteriología con intervalo de confianza de la zona Sur en junio.

Clave de muestra	Coliformes Totales			<i>E. Coli</i>		
	NMP/100ml	Intervalo de confianza		NMP/100ml	Intervalo de confianza	
		Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo
RC-48A	8	3.5	14.95	<1	0	3.7
RC-50	2	0.4	6.45	1	0.05	4.6
RC-51	11.5	6.05	20.3	1	0.1	5.5
RC-52	162.55	113.45	225.4	5.2	1.8	10.8
RC-53	25.9	16.2	38.8	<1	0	3.7
C-10 E	<1	0	3.7	<1	0	3.7
C-10 S	<1	0	3.7	<1	0	3.7
BG	<1	0	3.7	<1	0	3.7
UTC	<1	0	3.7	<1	0	3.7
BV	1	0.15	4.8	<1	0	3.7
CE-64	<1	0	3.7	<1	0	3.7
UTe	<1	0	3.7	<1	0	3.7
UTs	<1	0	3.7	<1	0	3.7



RYZNAR STABILITY INDEX															
DATOS							RESULTADOS								
Zona	Lugar	pH	Conductividad µS/cm	Dureza Ca <sup>+</sup>	Alcalinidad ppm de HCO <sub>3</sub> /100 mL	Temperatura °C Campo	Temperatura °C Lab	Según temperatura de Campo				Según temperatura de Laboratorio			
								pH <sub>i</sub>	RI	Interpretación Ryznar	Interpretación Carrier	pH <sub>i</sub>	RI	Interpretación Ryznar	Interpretación Carrier
Norte	FI NHI I	7.27	656	148	292.09	25.30	23.00	7.10	7.00	Agua agresiva	Corrosión significativa	7.20	7.20	Agua agresiva	Corrosión significativa
Norte	F6 NHI I	7.22	829	131	297.76	25.70	23.90	7.20	7.30	Agua agresiva	Corrosión significativa	7.30	7.30	Agua agresiva	Corrosión significativa
Norte	FII	7.43	1032	120	317.81	26.90	22.40	7.30	7.10	Agua agresiva	Corrosión significativa	7.40	7.30	Agua agresiva	Corrosión significativa
Norte	FP <sup>n</sup> NHI	7.19	1033	163	324.51	28.70	22.40	7.10	7.00	Agua agresiva	Pequeña escala o corrosión	7.20	7.30	Agua agresiva	Corrosión significativa
Norte	FII NHI I	7.14	827	173	335.41	25.20	22.10	7.10	7.00	Agua agresiva	Corrosión significativa	7.10	7.10	Agua agresiva	Corrosión significativa
Norte	FII A	7.32	1064	134	335.86	25.40	23.10	7.20	7.10	Agua agresiva	Corrosión significativa	7.30	7.20	Agua agresiva	Corrosión significativa
Sur	Ute	6.84	1031	202	329.67	29.30	21.10	7.00	7.10	Agua agresiva	Corrosión significativa	7.10	7.50	Agua agresiva	Corrosión significativa
Sur	Uts	7.35	1051	96	336.43	32.50	21.60	7.20	7.10	Agua agresiva	Corrosión significativa	7.50	7.60	Agua agresiva	Fuerte corrosión
Sur	CE-54	7.05	1186	151	340.68	26.60	22.10	7.20	7.30	Agua agresiva	Corrosión significativa	7.30	7.50	Agua agresiva	Corrosión significativa
Sur	UTEC	7.28	1168	94	360.17	28.00	25.00	7.30	7.40	Agua agresiva	Corrosión significativa	7.40	7.50	Agua agresiva	Corrosión significativa
Sur	VB	7.20	980	167	369.81	25.40	22.90	7.00	6.90	Agua agresiva	Pequeña escala o corrosión	7.10	7.00	Agua agresiva	Pequeña escala o corrosión
Sur	GBK	7.25	1090	170	375.42	26.00	21.70	7.10	6.90	Agua agresiva	Pequeña escala o corrosión	7.20	7.10	Agua agresiva	Corrosión significativa
Sur	C-10e	6.83	1093		376.04	24.90	21.70								
Sur	C-10e	7.43	1101		376.15	25.50	22.40								
Sur	RC-53	7.25	1207		387.49	23.10	22.50								
Sur	RC-52	7.38	1003		392.55	25.00	23.20								
Sur	RC-51	7.27	945		393.20	26.10	23.60								
Sur	RC-48A	7.10	926		411.27	25.40	23.30								