



## **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**

### **METALES Y NUTRIENTES EN EL AGUA DE LA ZONA COSTERA DE YUCATÁN Y SU PROBABLE RELACIÓN CON ASENTAMIENTOS URBANOS E INDUSTRIALES COSTEROS**

#### **TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS**  
(Química Acuática)

PRESENTA:

**Q. MIRIAM ELIZBETH LAMAS COSÍO**

#### **TUTORES PRINCIPALES:**

Dra. Flor Árcega Cabrera  
Unidad de Química en Sisal, Facultad de Química UNAM

Dr. Jorge Herrera Silveira  
CINVESTAV-Mérida

#### **COMITÉ TUTOR:**

Dra. María Aurora Armienta Hernández, Instituto de Geofísica UNAM

Dr. Carlos René Green Ruiz UA Mazatlán ICMYL UNAM

Dr. Joaquín Rodrigo Garza Pérez, UMDI-Sisal, F. Ciencias UNAM

**Sisal, Yucatán 2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



**METALES Y NUTRIENTES EN EL AGUA DE LA ZONA COSTERA DE YUCATÁN Y SU PROBABLE RELACIÓN  
CON ASENTAMIENTOS URBANOS E INDUSTRIALES COSTEROS**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS**  
(Química Acuática)

PRESENTA:

**Q. MIRIAM ELIZBETH LAMAS COSÍO**

**TUTORES PRINCIPALES:**

Dra. Flor Árcega Cabrera  
Unidad de Química en Sisal, Facultad de Química UNAM

Dr. Jorge Herrera Silveira  
CINVESTAV-Mérida

**COMITÉ TUTOR:**

Dra. María Aurora Armienta Hernández, Instituto de Geofísica UNAM

Dr. Carlos René Green Ruiz, UA Mazatlan, ICMYL UNAM

Dr. Joaquín Rodrigo Garza Pérez, UMDI-Sisal, F. Ciencias UNAM

**Sisal, Yucatán 2022**

## AGRADECIMIENTOS

AGRADEZCO,

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología, por permitirme realizar mis estudios de posgrado

A la Unidad Química Sisal de la Facultad de Química de la UNAM, por brindarme sus instalaciones para poder realizar este trabajo.

Al CONACYT, por brindarme la beca que me permitió realizar estos estudios de posgrado.

Al proyecto DGAPA PAPIIT 101914 por el apoyo otorgado para el análisis de las muestras de metales, así mismo al proyecto FORDECYT del laboratorio de producción primaria del CInvestav-Merida, por la toma de muestra y los análisis de nutrientes.

A mis directores de tesis la Dra. Flor Arcega Cabrera, por su apoyo, sus enseñanzas, su guía y su amistad. Y al Dr. Jorge Herrera por sus aportes a este trabajo, su conocimiento y su paciencia.

A los miembros de mi comité tutorial, Dra. Ma. Aurora Armienta, Dr. Carlos Green y Dr. Rodrigo Garza, gracias por todos sus aportes y evaluaciones semestre a semestres, con los cuales logre enriquecer el presente trabajo.

Al M. en C. Ismael Ocegüera por todo su apoyo en el laboratorio, el ayudarme a montar la técnica para la extracción de metales, y por todos los conocimientos y el apoyo brindado en el laboratorio.

Al personal del laboratorio de Producción Primaria del CINVESTAV-Merida, en especial a Ileana, Güera gracias por enseñarme las técnicas de análisis de nutrientes.

A mis padres por siempre apoyarme, aunque haya significado estar a más de 1000km de distancia.

A mis hermanos, por su apoyo, sus locuras. y el darme unos sobrinos que me hacen sonreír cuando más lo necesito.

A todos mis amigos que desde la distancia siempre me han apoyado

A todos mis nuevos amigos que han hecho que mi vida en Yucatán sea inolvidable

---

Mamímago

Te dedico el presente trabajo, fuiste el mejor ser humano que pude conocer  
Gracias por ser mi segunda madre y enseñarme a que los sueños se persiguen  
Siempre te amaré

**“Solo puedes analizar los datos que tienes.  
Sé estratégico sobre qué reunir y cómo almacenarlo.”  
-Marie Curie.**

# ÍNDICE

<b>I. ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	4
<b>II. ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	5
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	9
1.1 Zona costera.....	10
1.2 Nutrientes y producción primaria.....	11
1.2.1 Nitrógeno.....	12
1.2.2 Sílice.....	13
1.2.3 Fósforo.....	13
1.2.4 Relación de Redfield.....	13
1.2.5 Clorofila-a.....	14
1.2.6 Eutrofización.....	14
<i>Efectos de la eutrofización</i> .....	15
<i>Evaluación de la eutrofización</i> .....	16
1.3 Metales.....	17
<i>Tablas de Referencia de Consulta Rápida SQuiRTs (por sus siglas en inglés)</i> .....	19
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	20
2.1 La península de Yucatán.....	20
2.2 Elementos Potencialmente Tóxicos.....	22
2.3 Nutrientes.....	23
<b>3. HIPÓTESIS</b> .....	24
<b>4. OBJETIVO</b> .....	25
<b>5. ZONA DE ESTUDIO</b> .....	27
<b>6. METODOLOGÍA</b> .....	33
<b>7. RESULTADOS</b> .....	42
7.1 Principales actividades agropecuarias de los municipios de la ZCY.....	42
7.2 Caracterización físico-química de la zona (Estadística Descriptiva).....	48
PROFUNDIDAD.....	50
TEMPERATURA.....	51

SALINIDAD .....	52
OXIGENO DISUELTTO (OD) .....	53
7.3 Nutrientes y Clorofila-a (Estadística Descriptiva).....	54
Nitrato .....	56
Nitrito .....	57
Ion Amonio .....	58
Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID).....	59
Fósforo Reactivo Soluble (PRS).....	60
Relación Redfield NID:PRS.....	61
Sílice Reactivo Soluble (SiRS) .....	62
Clorofila a. ....	63
Calidad del agua con base en el estado trófico. ....	64
7.4 Procesos espaciales e interanuales de Nutrientes (Análisis multivariado) .....	66
Nutrientes y fisicoquímicos 2013 .....	66
Nutrientes y fisicoquímicos 2014 .....	69
7.5 Metales y Arsénico (Estadística Descriptiva) .....	73
Arsénico.....	75
Cobre .....	76
Cadmio .....	77
Cromo.....	78
Vanadio .....	80
Estroncio.....	81
7.6 Procesos espaciales e interanuales de Nutrientes (Análisis multivariado) .....	82
Metales y fisicoquimicos 2013 .....	82
Metales y fisicoquímicos 2014 .....	85
<b>8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>89</b>
8.1 Calidad de agua y cambio climático .....	106
<b>9. CONCLUSIONES .....</b>	<b>110</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>112</b>

<b>11. ANEXO ESTADÍSTICAS AGRICULTURA Y GANADERÍA.....</b>	<b>122</b>
<b>12. ANEXO ESTADÍSTICO.....</b>	<b>124</b>
<b>12.1 Pruebas de Normalidad.....</b>	<b>124</b>
<b>12.2 Pruebas de diferencia significativas .....</b>	<b>125</b>

# I. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación del índice TRIX .....	16
Tabla 1.2 Valores de referencia de elementos inorgánicos en el agua (SQuiRTs, Buchman 2008).....	19
Tabla 5.1 Municipios de la ZCY (elaborada a través de los datos de INEGI, 2015).....	32
Tabla 6.1 Porcentaje de saturación y nivel de Oxígeno disuelto (OD).....	37
Tabla 6.2 Características principales de la cuantificación para cada metal y As .....	39
Tabla 6.3 Porcentaje de error y recuperación respecto al material de referencia SLEW-3.....	39
Tabla 7.1 Estadística descriptiva de los parámetros fisicoquímicos .....	48
Tabla 7.2 Estadística descriptiva de la concentración de nutrientes. Las concentraciones de los nutrientes están definidas en $\mu\text{M}$ y la Cl-a en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ .....	54
Tabla 7.3 Análisis de factores para la ZCY 2013 de la concentración de nutrientes y parámetros fisicoquímicos (Los números en rojo representan las variables que poseen mayor peso en cada factor).67	
Tabla 7.4 Medianas de fisicoquímicos y nutrientes de la ZCY para el 2013 de los grupos encontrados por el análisis multivariado. ....	68
Tabla 7.5 Análisis de factores para la ZCY 2014 de la concentración de nutrientes y parámetros fisicoquímicos (Los números en rojo representan las variables que poseen mayor peso en cada factor).70	
Tabla 7.6 Medianas de fisicoquímicos y nutrientes de la ZCY para el 2014 de los grupos encontrados por el análisis multivariado .....	72
Tabla 7.7 Estadística descriptiva de la concentración de metales. Las concentraciones están en $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ... 73	
Tabla 7.8 Análisis de factores para la ZCY 2013 de la concentración de metales, As y parámetros fisicoquímicos (Los números en rojo representan las variables que poseen mayor peso en cada factor).83	
Tabla 7.9 Medianas de fisicoquímicos, metales y As de la ZCY para el 2013 de los grupos encontrados por el análisis multivariado .....	84
Tabla 7.10 Análisis de factores para la ZCY 2014 de la concentración de metales, As y parámetros fisicoquímicos (Los números en rojo representan las variables que poseen mayor peso en cada factor).86	
Tabla 7.12 Medianas de fisicoquímicos, metales y As de la ZCY para el 2014 de los grupos encontrados por el análisis multivariado .....	88
Tabla 8.1 Clasificación de la calidad del agua de las subzonas de la ZCY Herrera-Silveira 2009 (clasificación buena= alta+buena del TRIX) .....	99

## II. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ciclo del Nitrógeno.....	12
Figura 2.1 Modelo general de escurrimiento y drenaje subterráneo en la cuenca de la península de Yucatán. (Hipólito 2009) .....	21
Figura 5.1 Mapa regional del consenso de los flujos de aguas subterráneas (Tomado de Bauer-Gottwein et al. 2010; ASK 2003) .....	28
Figura 5.2 Esquema de las corrientes costeras y el flujo de agua subterránea en la Península de Yucatán (Modificación de Morales, Sara 2007) .....	29
Figura 5.3 Zona de estudio: ZCY con los 13 municipios costeros .....	31
Figura 6.1 Localización de las estaciones de muestreo de la zona costera de Yucatán. ....	34
Figura 6.2 Climatogramas del estado de Yucatán para los años 2013 y 2014.....	35
Figura 6.3 Sistema montado para la extracción de metales en agua con alta salinidad por intercambio con resina Chelex .....	38
Figura 6.4 Paso final de la extracción. Elución de los metales intercambiados por la resina Chelex 100. Enrince a 25.0 mL con HNO <sub>3</sub> 2M .....	38
Figura 7.1 Mapa de la densidad poblacional de los municipios de la ZCY y los municipios colindantes. INEGI 2015 .....	43
Figura 7.2 Mapa del porcentaje de área de siembra dedicado a la agricultura por municipio de la ZCY y de los municipios colindantes a estos. INEGI 2009.....	44
Figura 7.3 Mapa de la producción en toneladas de los principales cultivos por municipio de la ZCY y de los municipios colindantes a estos. INEGI 2009.....	45
Figura 7.4 Mapa de la densidad de producción de los principales cultivos por municipio de la ZCY y de los municipios colindantes a estos. INEGI 2009. ....	45
Figura 7.5 Mapa de la densidad de aves de corral de los municipios de la ZCY y los municipios colindantes. INEGI 2009 .....	46
Figura 7.6 Mapa de la densidad de ganado porcino de los municipios de la ZCY y los municipios colindantes a estos. INEGI 2009.....	47

Figura 7.7 Mapa de la densidad de ganado bovino de los municipios de la ZCY y los municipios colindantes a estos. INEGI 2009.....	47
Figura 7.8 a) Diagrama de caja y bigote para la profundidad de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la profundidad de la ZCY). .....	50
Figura 7.9 a) Diagrama de caja y bigote para la temperatura de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la temperatura de la ZCY. .....	51
Figura 7.10 ) Diagrama de caja y bigote para la salinidad de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la salinidad de la ZCY ....	52
Figura 7.11 a) Diagrama de caja y bigote para el oxígeno disuelto de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual del oxígeno disuelto de la ZCY.....	53
Figura 7.12 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de nitrato de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014.b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de nitrato de la ZCY.....	56
Figura 7.13 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración del ion amonio de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración del ion amonio de la ZCY.....	57
Figura 7.14 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de nitrito de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de nitrito de la ZCY.....	58
Figura 7.15 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de NID de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de nitrato de la ZCY.....	59
Figura 7.16 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración del fósforo reactivo soluble de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de fósforo reactivo soluble de la ZCY. ....	60
Figura 7.17 a) Diagrama de caja y bigote para la relación de Redfield de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de relación de Redfield de la ZCY.....	61
Figura 7.18 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de sílice reactivo soluble de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de sílice reactivo soluble de la ZCY .....	62
Figura 7.19 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de la clorofila-a de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de clorofila-a de la ZCY.....	63

Figura 7.20 a) Diagrama de caja y bigote para el índice TRIX de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual para el índice TRIX de la ZCY. ....	64
Figura 7.21 Representación espacial del índice de TRIX para el año 2013 y 2014 .....	65
Figura 7.22 Diagrama de análisis de componentes principales con la concentración de nutrientes y parámetros fisicoquímicos para la ZCY 2013 .....	66
Figura 7.23 Diagrama de Cluster con el método de Ward's y distancias euclidianas para la ZCY 2013 de la concentración de nutrientes y parámetros fisicoquímicos .....	68
Figura 7.24 Representación espacial de los grupos formados por el análisis de agrupamiento de nutrientes para la ZCY 2013 .....	69
Figura 7.25 Diagrama de análisis de componentes principales con la concentración de nutrientes y parámetros fisicoquímicos para la ZCY 2014 .....	70
Figura 7.26 Diagrama de Cluster con el método de Ward's y distancias euclidianas para la ZCY 2014 de la concentración de nutrientes y parámetros fisicoquímicos .....	71
Figura 7.27 Representación espacial de los grupos formados por el análisis de agrupamiento de nutrientes para la ZCY 2014 .....	72
Figura 7.28 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de Arsénico de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de Arsénico de la ZCY .....	75
Figura 7.29 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de Cobre de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de Cobre de la ZCY .....	76
Figura 7.30 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de Cadmio de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de Cadmio de la ZCY .....	77
Figura 7.31 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de Cromo de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de Cromo de la ZCY .....	79
Figura 7.32 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de Vanadio de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de Vanadio de la ZCY .....	80
Figura 7.33 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de Estroncio de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de Estroncio de la ZCY .....	81
Figura 7.34 Diagrama de análisis de componentes principales con la concentración de metales y As y parámetros fisicoquímicos para la ZCY 2013 .....	82

Figura 7.35 Diagrama de Cluster con el método de Ward's y distancias euclidianas para la ZCY 2013 de la concentración de metales, As y parámetros fisicoquímicos.....	83
Figura 7.36 Representación espacial de los grupos formados por el análisis de agrupamiento de metales y As para la ZCY 2013 .....	85
Figura 7.37 Diagrama de análisis de componentes principales con la concentración de metales y As y parámetros fisicoquímicos para la ZCY 2014 .....	86
Figura 7.38 Diagrama de Cluster con el método de Ward's y distancias euclidianas para la ZCY 2014 de la concentración de metales, As y parámetros fisicoquímicos.....	87
Figura 7.39 Representación espacial de los grupos formados por el análisis de agrupamiento de metales y As para la ZCY 2014 .....	88
Figura 8.1 Mapas de promedio de la precipitación en épocas de estiaje (mayo) y lluvias (septiembre) para Yucatán, generados con los datos disponibles de CONAGUA (2021).....	107
Figura 8.2 Anomalías con respecto al nivel medio del agua en pozos de abastecimiento de la Península de Yucatán. La línea cero se estableció utilizando el valor medio de los registros mensuales en los principales pozos de abastecimiento de la península de Yucatán de 2002 a 2018 de CONAGUA, 2021.	108
Figura 8.3 Datos base (A) utilizados en el cálculo de anomalías futuras de precipitación (b) en la península de Yucatán. Tomado de Orellana et al. (2009). .....	108

# 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enfoca en la caracterización química del agua para realizar un diagnóstico de la Zona Costera de Yucatán (ZCY), específicamente en las aguas del litoral costero (entre 50 y 250 m perpendicular a la línea de costa). La caracterización tuvo como objetivo analizar los diferentes componentes del agua costera respondiendo a tres preguntas básicas ¿Qué hay? ¿Cuánto hay? y ¿Dónde está? Por otra parte, el diagnóstico tuvo como objetivo calificar los atributos de las condiciones registradas, para así poder ser evaluadas a partir de su inclusión en una de las categorías del sistema de clasificación.

Para lo anterior se cuantificó la variación espacial e interanual de As, Cd, Cr, Cu, Sr y V en la estación de lluvias de dos años consecutivos. Esto, en conjunto con los resultados de nutrientes para las mismas épocas, permitieron determinar las áreas que rebasan los valores de norma recomendados para metales y los índices de eutrofización en el caso de los nutrientes. De esta forma se identificaron posibles aportes relacionados con descargas del acuífero o con fuentes locales mediante trazadores y el análisis de actividades humanas realizadas en la región.

## **1.1 Zona costera**

La definición básica de "zona costera" indica que es la parte de tierra afectada por su proximidad al océano y aquella parte del océano afectada por su proximidad a la tierra (US Commission Sciences 1969; EEA 2011).

La Zona Costera se considera una amplia eco-región con intensas interacciones físicas, biológicas y socioeconómicas, donde ocurre un intercambio dinámico de materia y energía entre el continente, las aguas dulces, la atmósfera y el mar adyacente. Típico de esta región son la llanura (planicie) costera, cuenca baja de los ríos, humedales, manglares, dunas, lagunas costeras, estuarios y el océano adyacente (Yáñez Arancibia et al. 2004). Las zonas costeras son diversas en dinámica, función y forma y no pueden ser definidas con facilidad por límites espaciales estrictos. A diferencia de las cuencas hidrográficas, no existen límites naturales que marquen claramente a las zonas costeras (FAO 2015).

La riqueza biológica de los ecosistemas costeros es reconocida en todo el mundo y es una de las principales razones para que estos sitios sean atractivos al establecimiento y desarrollo de las comunidades humanas; aproximadamente el 60% de la población del planeta se encuentra en las zonas costeras (Constanza et al. 1997; Herrera-Silveira et al. 2009) y en la actualidad alrededor del 40% de la población mundial vive a menos de 100 km de la costa. El promedio de la densidad de población humana en las zonas costeras es de alrededor de 80 personas por km<sup>2</sup>, el doble del promedio mundial, y la densidad demográfica en el litoral en las zonas más habitables es aún mayor (IOC/UNESCO 2011). El aumento de la densidad de población humana en las zonas costeras ejerce una enorme presión sobre la integridad de los hábitats costeros que afectan a los procesos de los que todo el ecosistema costero depende (Figuroa-Zavala et al. 2015).

Las actividades humanas impactan la calidad del agua a través del aporte de desechos y aguas residuales hacia los acuíferos, impactando así otros reservorios de agua que tienen como destino final la zona costera. Las fuentes de contaminación de la zona costera se han definido de acuerdo con la procedencia de los contaminantes, como fuentes puntuales y fuentes difusas. Las fuentes puntuales, son aquellas que se pueden identificar físicamente con precisión, por ejemplo: toda tubería, acequia, canal, túnel, conducto o pozo. Las fuentes difusas son las que no pueden identificarse con precisión, como la escorrentía de la zona agrícola o la entrada a los diversos cuerpos costeros de aguas del acuífero (US-EPA 1997).

Las descargas de aguas subterráneas (DAS) son un componente importante de los ciclos geoquímicos de los elementos marinos. La contaminación de las aguas subterráneas puede conducir al deterioro del medio ambiente de las zonas costeras y tener un gran impacto en la salud del ecosistema (Aranda-Cirerol et al. 2006, 2011; Hernández Terrones et al. 2015; Árcega-Cabrera et al. 2014; Derrién et al. 2015).

## ***1.2 Nutrientes y producción primaria***

La presencia de nutrientes determina en primera instancia la cantidad de productividad primaria del sistema, base fundamental de una parte sustancial de la trama trófica acuática. La relación es tan estrecha que otros factores como son la luz y la presencia de CO<sub>2</sub> han sido relegados como posibles limitantes de este proceso, pero lo anterior no es una regla. Los fenómenos más comunes asociados a los nutrientes son: su carencia o su exceso; ambos con severas consecuencias en la biota acuática (Contreras et al. 1996).

Dentro de los principales nutrientes de un ecosistema se encuentra el O, N, P y Si, cada nutriente existe en el sistema por diferentes fuentes ya sean naturales o antropogénicas, e incluso en diferentes especies químicas como el caso del N. Cuando la concentración de



### *1.2.2 Sílice*

El Silicio disuelto en el agua ( $\text{Si(OH)}_4$ ) tiene una concentración variable (mayor en aguas continentales) y normalmente se halla en exceso con respecto al Nitrógeno y al Fósforo, excepto en zonas de vertidos domésticos y en grandes floraciones de diatomeas. Se encuentra tanto en forma soluble como en particulado como ácido ortosilícico, mientras que en suspensión se encuentra en un amplio espectro de formas silíceas, muchas de las cuales pueden haber sido producidas por la erosión de las rocas en tierra y luego transportadas al mar (Movellán 2003).

### *1.2.3 Fósforo*

El fósforo está presente en los suelos y rocas, principalmente como apatita (fosfato de calcio) y como hidroxiapatita, las cuales son muy poco solubles. La aportación de fósforo por actividades antropogénicas puede provenir de aguas negras domésticas, áreas agrícolas que han recibido fertilizantes, por lo que el fósforo soluble puede alcanzar concentraciones altas en el agua (Glynn Henry, et. al., 1999), mientras que un aporte natural en la zona costera se encuentra relacionado a un fenómeno de surgencia.

Este nutriente acelera el crecimiento de algas que pueden saturar el curso del agua y agotar la concentración de oxígeno. Además, controla la biomasa fitoplanctónica en sistemas costeros.

### *1.2.4 Relación de Redfield*

La relación de Redfield es una relación estequiométrica que existe entre carbono, nitrógeno y fósforo, la cual es casi constante 106: 16: 1 respectivamente, en todos los océanos del mundo; tanto en biomasa de fitoplancton como en reservas de nutrientes disueltos. Esta relación

determina el nutriente limitante para el crecimiento del fitoplancton. Sin embargo, el nitrógeno es a menudo el nutriente limitante en ambientes marinos costeros, aunque la descarga de fósforo a ambientes cercanos a la costa en regiones cársticas es extremadamente baja debido a interacciones con carbonato de calcio (Fourqurean et al., 1993, Null et al., 2014)

### *1.2.5 Clorofila-a*

Es un pigmento fotosintético utilizado para tener una estimación de la concentración de fitoplancton e, indirectamente, de la actividad biológica. Los organismos que contienen clorofila-*a* se encuentran en la base de la cadena alimenticia, por lo que la determinación de concentraciones de clorofila-*a* es uno de los índices claves de monitoreo de la población de fitoplancton y de la salud del sistema. Además, puede ser utilizada como instrumento de vigilancia de los procesos de eutrofización.

### *1.2.6 Eutrofización*

El proceso de eutrofización es una forma de contaminación dada por el enriquecimiento de nutrientes, alterando la calidad del agua costera. Éste consiste en el aumento de la producción de materia orgánica como resultado del incremento en la adición de nutrientes principalmente nitrógeno y fósforo. La eutrofización es un proceso natural - *eutrofización natural*- que ha sido acelerado por las actividades humanas, nombrándosele eutrofización cultural. Se le reconoce por una mayor acumulación de la materia orgánica producida en forma de algas. Entre los síntomas del proceso de eutrofización cultural que se han utilizado como indicadores de este problema tenemos a la concentración de Clorofila-*a* en la columna de agua, la frecuencia, cobertura espacial y toxicidad de los florecimientos de algas nocivas, la reducción de la cobertura de pastos marinos y la disminución en la concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua, entre otros (Bianchi et al. 1999; Howarth et al. 2002; Herrera Silveira et al. 2005).

El estudio del proceso de eutrofización fue motivado por la evidente degradación de los ecosistemas de agua dulce iniciando su estudio en la década de los 60's, sin embargo, no era foco de atención en la investigación marina y estuarina, tanto así fue su retraso que hay una diferencia de una a dos décadas en el estudio del proceso de eutrofización costera (Cirerol 2009). Por lo complejo que es el proceso de eutrofización costera se han propuesto diferentes definiciones para describirlo hasta la propuesta por Cloern (2001), la cual dice que el proceso de eutrofización costera es la suma de innumerables respuestas ecológicas y biogeoquímicas, directas o indirectas, a la fertilización de origen humano a los ecosistemas de la interfase tierra-mar.

La concentración de nutrientes que causan la eutrofización del sistema dependerá de la topografía y la naturaleza física y química de dicha zona costera. Así mismo es difícil saber que cargas provienen de actividades humanas o fuentes naturales por lo que se deben comparar altas concentraciones con valores de fondo para un área en particular (Kitsiou et al, 2011).

#### Efectos de la eutrofización

La eutrofización ocasiona una alteración de la biota y en la diversidad biológica, provocando una proliferación de algas, cianobacterias y macrófitas. El desarrollo de estos organismos provoca opacidad, que impide que la luz penetre hasta regiones profundas de la columna de agua provocando que sea imposible de llevar a cabo la fotosíntesis en lugares cada vez menos profundos de ésta, ocasionando una disminución en la producción de oxígeno libre, lo que da lugar un medio anóxico. Simultáneamente aumenta la actividad metabólica consumidora de oxígeno de los organismos descomponedores, que empiezan a recibir excedentes de materia orgánica generados en la superficie. El fondo del ecosistema acuático se va convirtiendo de forma gradual en un ambiente anaerobio, y el consecuente aumento en la concentración de

gases como H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, hace poco factible la vida de la mayoría de las especies que forman dicho ecosistema (Delgadillo 2012).

### Evaluación de la eutrofización

Existen diferentes formas de evaluar el proceso de eutrofización como el método isotópico, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el uso de índices de eutrofización como por ejemplo IET (Índice del estado trófico), I<sub>E</sub> (índice de eutrofización por nutriente), Índice del estado trófico TRIX, el cual es un índice multivariado (Moreno et.al. 2010).

Particularmente el índice TRIX evalúa la condición trófica del sistema ya que es una combinación de cuatro variables, las cuales evalúan la productividad (Cl-a y oxígeno), y la condición nutricional (nitrógeno y fósforo inorgánico disuelto). Numéricamente, el índice está escalado de 0 a 10, cubriendo un amplio intervalo de condiciones que van desde la oligotrofia hasta la eutrofia (Vollenweiner et al. 1998), como se puede observar en la Tabla 1.1

*Tabla 1.1 Clasificación del índice TRIX*

<b>ESCALA TRIX</b>	<b>Estado de la calidad del agua</b>	<b>Características del agua</b>	<b>Nivel Trófico</b>
0-4	ALTA	Pobremente productiva	Bajo
4-5	BUENA	Moderadamente productiva	Medio
5-6	MALA	Entre moderado y alta en cuanto a productividad	Medio
6-8	POBRE	Altamente productiva	Alto

Las consecuencias de la contaminación por nutrientes están relacionadas con la pérdida del hábitat, cambios en la biodiversidad, impactos a pesquerías recreativas y comerciales, impactos a las actividades turísticas, e incluso a la salud humana y a la de los ecosistemas en general (Herrera Silveira et al. 2005).

### **1.3 Metales**

Los metales son definidos químicamente como "elementos que conducen la electricidad, tienen un brillo metálico, son maleables y dúctiles, forman cationes y tienen óxidos básicos. Son aquellos elementos de la tabla periódica con potenciales de ionización bajos y que tienen un fuerte carácter electropositivo. De los 92 elementos naturales, 70 son metales. De los diez elementos más abundantes en la corteza terrestre, siete son metales: Al, Fe, Ca, Na, K, Mg y Ti (Brown, 2004).

Los metales y metaloides se han clasificado en categorías como metales ligeros, metales pesados, metales tóxicos y oligometales, dependiendo de los diversos criterios físicos y químicos, tales como densidad, peso, número atómico, y grado de toxicidad (Páez-Ozuna 2014). Los metales pesados son aquellos elementos con pesos atómicos altos, que comprenden desde 63.5g/mol (Cu) y 200.59g/mol (Hg), presentan un peso específico superior a 5 g/cm<sup>3</sup>, es decir, tienen una densidad por lo menos 5 veces mayor a la del agua, se encuentran dentro de los conocidos como elementos potencialmente tóxicos (EPT) ya que pueden ser nocivos a los seres vivientes en pequeñas concentraciones y tienden a acumularse en la cadena alimenticia (EPA 2015). Los EPT principalmente son Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estaño (Sn) y Zinc (Zn). Ciertos metales y metaloides que son esenciales para el crecimiento de plantas, son denominados micronutrientes y entre ellos tenemos al Cu, Fe, Zn, Mn y Mo; o en nutrición animal tenemos al As, Co, Cr, Ni, Se, Sn y V. Sin embargo. En exceso pueden llegar a ser tóxicos para las plantas, microbios, animales y humanos (Spark 2005; Páez-Ozuna 2014; Árcega-Cabrera et al. 2009 y 2014; Árcega-Cabrera y Fargher 2016).

En los ambientes acuáticos, los metales pesados se derivan de una variedad de fuentes naturales y antropogénicas, como la deposición atmosférica, meteorización y erosión de la roca, las actividades agrícolas, residenciales e industriales (Soriano 2012; Zhang et al. 2015).

Los impactos en los ecosistemas acuáticos generados por la introducción de metales a través del tiempo han aumentado exponencialmente, debido al incremento de las industrias, ciudades, actividades humanas en los márgenes de la zona costera, que a través de las escorrentías ocasionadas por las lluvias, viento o erosión llegan a las lagunas y al mar, depositándose en la columna de agua y en los sedimentos (Árcega-Cabrera et al. 2009 y 2014), quedando a disposición de los organismos que habitan dichos ambientes (Villanueva 2014). Las descargas domésticas sin tratamiento aportan grandes volúmenes de lodos enriquecidos con metales pesados como Pb, Zn, Cd y Cr entre otros.

Los metales entran a la zona costera oceánica a través de diversas rutas, mayoritariamente a través del aporte fluvial y atmosférico (Velasco et al. 2016), así como por los residuos generados por numerosas actividades antropogénicas locales. La transferencia de los metales hacia la zona costera y marina involucra la transferencia física de cada metal disuelto y transportado por el agua.

Dentro de las principales consecuencias de la contaminación por metales están los procesos de bioconcentración y biomagnificación que pueden afectar de manera total o parcial los ciclos de vida de numerosas especies (Ponce 1991). Los metales son bioacumulables, pues el organismo afectado no puede mantener la velocidad de excreción, por lo que hay retención y acumulación ocasionando la biomagnificación hacia los consumidores finales, ya que aumentan su concentración en la cadena trófica (Echeverría et al. 2014).

Esta biomagnificación es un peligro potencial para los recursos costeros, pudiendo afectar así al turismo y a la pesca, a ecosistemas como manglares y arrecifes y/o directamente a organismos acuáticos de importancia ecológica y comercial.

Tablas de Referencia de Consulta Rápida SQiRTs (por sus siglas en inglés)

La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA por sus siglas en inglés) ha desarrollado los SQiRTs, (Buchmann 2008) que son tablas de valores de referencia de consulta rápida, que se utilizan para ayudar a evaluar los riesgos potenciales hacia los estadios tempranos de la biota en agua, sedimentos o suelos contaminados. Esta herramienta de referencia presenta las concentraciones de daño probable a los estadios tempranos de los organismos a causa de contaminantes orgánicos e inorgánicos en diversos medios ambientales.

Los SQiRTs pueden ser utilizados para identificar los posibles impactos a los recursos costeros y hábitats potencialmente afectados por los sitios de desechos peligrosos (Buchmann 2008). En la Tabla 1.2 se presentan los SQiRTs de los EPT que se cuantificaron en el presente trabajo.

*Tabla 1.2 Valores de referencia de elementos inorgánicos en el agua (SQiRTs, Buchman 2008).*

EPT	AGUA SUBTERRANEA $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	AGUA SUPERFICIAL			
		DULCE		MARINA	
		Exposición Aguda $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	Exposición Crónico $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	Exposición Aguda $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	Exposición Crónica $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
As total	10	340	150	69	36
Cu	1300	2.0	0.25	4.8	3.1
Cd	5	2.0	0.25	40	8.8
Cr	100				
V		280	19		50

## 2. ANTECEDENTES

### **2.1 La península de Yucatán**

La geología de la Península de Yucatán está conformada por depósitos de piedra caliza altamente permeables, que en su conjunto pertenecen a un sistema kárstico (Smart 2006). Los sistemas kársticos presentan una serie compleja de procesos fisicoquímicos, pero siempre está presente la disolución de la roca. Estos son frecuentes en varios tipos de rocas, como yesos, calizas, dolomías y rocas detríticas consolidadas con clastos (López-Geta 2009). Los acuíferos kársticos proporcionan el 25% de los suministros mundiales de agua potable, sin embargo, son muy susceptibles a la contaminación (Ford 2007). El acuífero se recarga por la infiltración de aguas de lluvia y los volúmenes que se descargan después de los usos superficiales.



*Figura 2.1 Modelo general de escurrimiento y drenaje subterráneo en la cuenca de la península de Yucatán. (Hipólito 2009)*

En la Península, el agua parte del punto topográficamente más alto, ubicado al sur de Xpujil y desde allí se establecen flujos radiales en dirección a las costas de Quintana Roo, Yucatán y Campeche (Figura 2.1), por lo que en el estado de Yucatán se observa un escurrimiento con dirección de sur a norte, con un gradiente hidráulico de 0.08%, teniendo como punto final la zona costera de Yucatán (ZCY) (Marin 1990).

Los rasgos geomorfológicos de la península al estar dominados por procesos kársticos promueven la infiltración total del agua pluvial dirigiendola hacia la de recarga del acuífero, el cual, está estratificado en: una capa dulce hasta los 50m de profundidad superpuesta a una capa salada, producto de la intrusión salina (González et al. 2007).

El subsuelo de la zona costera está formado por rocas carbonatadas solubles de origen marino, con abundantes conductos de disolución y fracturas. Pero también en la planicie costera se forman regosoles: suelos inmaduros resultado de la acumulación de material calcáreo reciente, sin consolidación y escaso en nutrientes. La región costera es una franja paralela a la costa de más o menos 20 km de ancho en la que afloran calizas compactas recristalizadas de ambiente marino en facies de banco y litoral de textura fina a media (García y Castro 2010).

La variabilidad hidrológica se asocia al patrón climático y es dependiente del balance entre los aportes de agua dulce vía descargas subterráneas y los marinos. Las DAS (descargas de aguas subterráneas), aguas residuales domésticas y cambios en los tiempos de residencia del agua, aparecen como los principales factores que controlan la dinámica de nutrientes y los síntomas de eutrofización (Herrera-Silveria 2006).

Específicamente, el sistema marino se caracteriza por las diferencias ambientales, las cuales responden a las funciones regionales y locales como las corrientes marinas y las DAS (Herrera-Silveira y Morales 2009).

## **2.2 Elementos Potencialmente Tóxicos**

La costa yucateca recibe una descarga significativa de agua de El Acuífero de la Península de Yucatán. Algunos estudios informan sobre la presencia de metales en el acuífero (Pacheco 2004) y en las lagunas costeras del Estado (Arcega-Cabrera et al. 2009 y 2014) pero no existe información respecto a la variación espacio-interanual de metales en la costa litoral.

El Sr es un metal que puede ser usado como trazador de diferentes tipos de agua. De acuerdo con un estudio realizado por Ward (1995) las concentraciones medias de Sr en agua dulce y agua de río son menores que las encontradas en aguas marinas. Saxena et al. (2004) establecieron que el contenido de Sr podría estar vinculado a varios tipos de agua. En sus trabajos sugieren concentraciones de Sr  $< 1\ 600\ \mu\text{g/L}$  para agua subterránea,  $1\ 600\text{-}5\ 000\ \mu\text{g/L}$  para agua salobre y  $> 5\ 000\ \mu\text{g/L}$  para aguas salinas.

### 2.3 Nutrientes

Los nutrientes inorgánicos disueltos ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  y Fósforo Reactivo Soluble PRS) se han utilizado como indicadores de eutrofización (US EPA, 2001; EEA, 1999), mientras que Clorofila-*a* se ha utilizado como un indicador precoz de las desviaciones de la situación sanitaria del agua marina. En el caso específico del sistema marino costero de Yucatán, se ha prestado especial atención a PRS y Sílice Reactivo Soluble (SiRS). La razón de esto es que en las regiones kársticas, como la Península de Yucatán, el PRS podría ser un nutriente limitante debido a su precipitación en presencia de carbonato de calcio para formar apatita (Coelho et al, 2004; Slomp y Van Cappellen, 2004); mientras que el SiRS, se puede utilizar como un trazador de aportes de aportes de aguas subterráneas (Herrera-Silveira 1996; Aranda Cirerol et al. 2006), debido a que durante su paso por el subsuelo se disuelve el silicio por reacciones químicas con los minerales de las rocas caliza, así mismo la variación climática influye en las fluctuaciones de SiRS y a la liberación del sílice por parte de la regeneración de las frústulas de las diatomeas y radiolarios (Aguilar-Trujillo, 2010; Pech 2015) .

Con base en lo anterior, los vertidos de aguas continentales provocadas por las actividades antropogénicas pueden producir pulsos de concentraciones altas de PRS, que podrían tener un impacto en la composición de especies de fitoplancton, llevando al aumento en la abundancia de especies oportunistas que son responsables de las floraciones de algas nocivas (Lee et al. 2005; Herrera-Silveira y Morales 2009)

Las principales causas de la eutrofización de los ecosistemas costeros de Yucatán se relacionan con los efluentes de aguas residuales provenientes de desarrollos urbanos, turísticos, de la acuicultura, y de forma muy importante con la falta de sistemas de tratamiento de las aguas residuales de la industria agropecuaria (Reyes 2001; Herrera-Silveira et al. 2002). Sin embargo, las modificaciones en la hidrología e hidrodinámica de los ecosistemas costeros por obras de infraestructura portuaria tienen un impacto severo en los cambios de su estado trófico (Herrera Silveira et al. 2005).

### 3. HIPÓTESIS

Dado que existen diversas fuentes antropogénicas de metales y nutrientes en la ZCY, se espera que la presencia de dichos contaminantes en el agua costera esté asociada a los sitios espacialmente relacionados con dichas actividades, es decir, que la concentración de metales y nutrientes será mayor en aquellas zonas con actividades antropogénicas cercanas a la costa y será menor cuanto mayor sea la distancia de las fuentes a la zona de muestreo del agua costera.

Con los trazadores SiRS en el caso de nutrientes, y de Sr para los metales se espera obtener una relación entre los aportes de aguas subterráneas a la ZCY y la presencia de metales y nutrientes en la ZCY, con lo que se avanzará en el entendimiento de la interacción entre acuífero y zona costera y por tanto su conectividad, así mismo como la influencia del acuífero en la calidad del agua de la ZCY.

Debido a la geología kárstica de la península de Yucatán, la presencia de metales y nutrientes en la ZCY se espera esté relacionada con las DAS, es decir, si en la zona de muestreo del agua costera se ubican descargas de agua subterránea, es probable que la concentración de metales y nutrientes sea mayor que en sitios donde dichas descargas estén ausentes.

## 4. OBJETIVO

Identificar la variación espacial e interanual de metales y nutrientes a escala municipal del litoral yucateco, para identificar las zonas con mayor concentración y analizar su relación con condiciones fisicoquímicas del agua o fuentes probables de contaminantes.

### **4.1 Objetivos Particulares**

- Determinar la concentración y las diferencias espaciales e interanuales de EPT (As, Cd, Cr, Cu, V y Sr) en agua en la ZCY.
- Identificar diferencias espaciales e interanuales de nutrientes inorgánicos disueltos ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , PRS, SiRS) y Clorofila-*a* en la ZCY.
- Determinar el estado trófico mediante el índice TRIX (Trophic Index) en la ZCY.
- Identificar por análisis multivariado las condiciones fisicoquímicas asociadas a zonas con concentraciones de metales y nutrientes que indiquen un estado eutrófico o de contaminación.

- Identificar posibles relaciones entre las actividades antropogénicas que se realizan en los municipios del litoral de Yucatán y las concentraciones registradas de metales y nutrientes.

## 5. ZONA DE ESTUDIO

El estado de Yucatán se localiza entre 32° 43' y 14° 32' latitud Norte y entre 86° 42' y 118° 22' longitud Oeste cuenta con 360 km de litorales, lo que representa el 3.1% del total nacional, con una tasa de crecimiento de la población del 2% anual (superior a la media estatal o nacional). Tiene como límites el estero de Celestún, cuya boca, en la cual se encuentra el Real de Salinas, pertenece hoy al estado de Campeche, y termina en las Bocas de Conil, en el límite con el estado de Quintana Roo (INEGI 2015).

El 85.5% de la superficie del estado es una región cálida subhúmeda y el restante 14.5%, la parte norte, es una región seca y árida. Yucatán tiene un régimen de precipitación de lluvias en verano, y escasa el resto del año. El patrón interanual está caracterizado por tres estaciones bien definidas: estación de secas (marzo a mayo); estación de lluvias (junio a octubre); y estación de frentes fríos (noviembre a febrero), referida en la región como “Nortes”. Para los años de estudio 2013 y 2014 se obtuvo una precipitación acumulada anual de 1419 mm y 1148 mm respectivamente.

El acuífero kárstico de la Península de Yucatán es uno de los sistemas más extensos y espectaculares en el planeta, se extiende sobre un área de aproximadamente 165000 km<sup>2</sup> en México, Guatemala y Belice (Bauer-Gottwein et al. 2010). Su cuenca hidrográfica presenta particularidades como una topografía muy homogénea, ausencia de ríos y suelos kársticos lo que favorece la infiltración de agua proveniente de la precipitación hacia el acuífero. A su vez, éste descarga en los ecosistemas costeros, a través de manantiales y fuentes difusas, un aporte estimado de 9-11 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup> (Herrera Silveira et al. 2005). En la Figura 5.1 se muestra la información más reciente sobre los patrones generales de flujos prevalentes de la península.

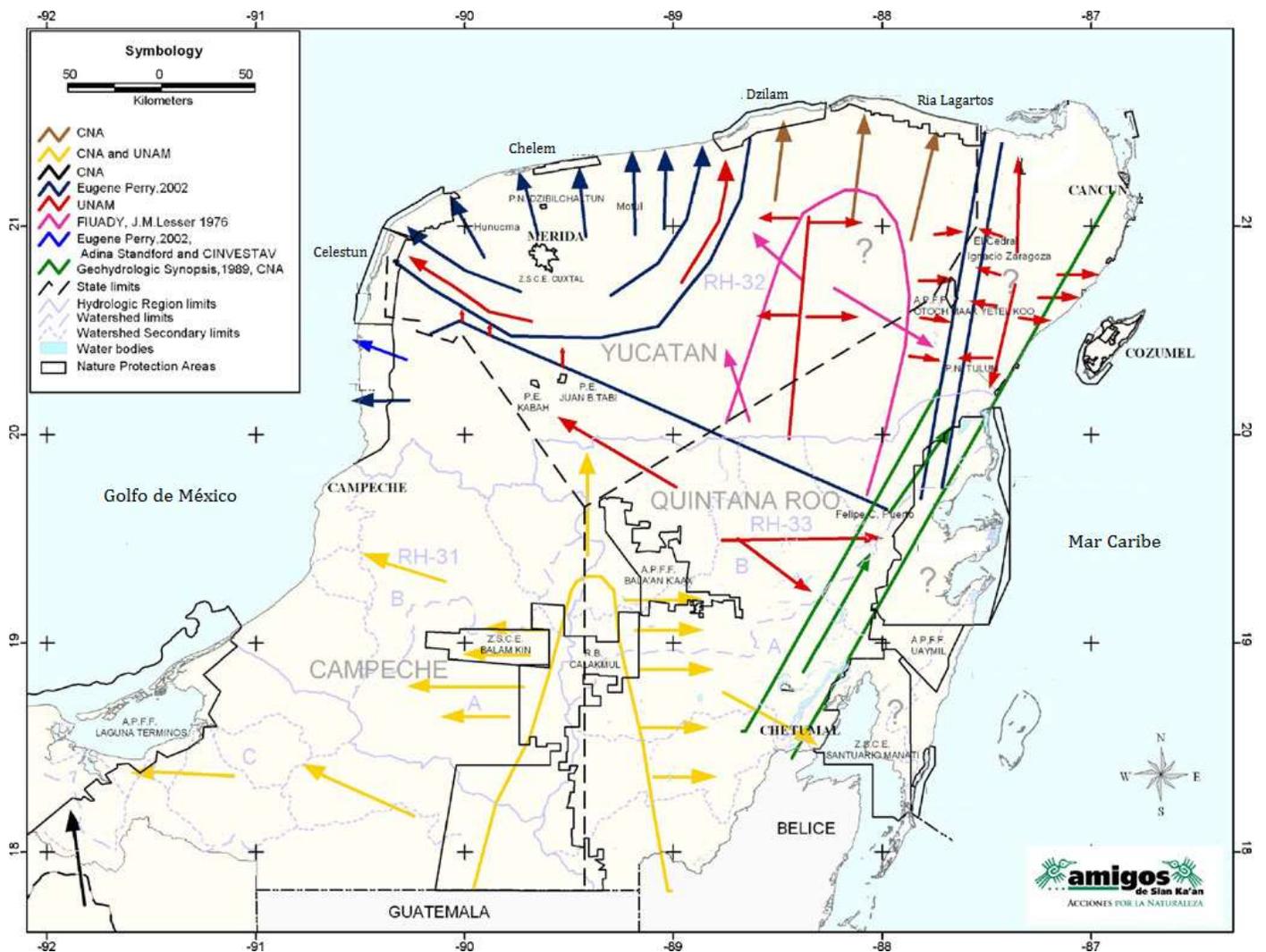


Figura 5.1 Mapa regional del consenso de los flujos de aguas subterráneas (Tomado de Bauer-Gottwein et al. 2010; ASK 2003)

En lo que respecta a las corrientes marinas, la surgencia de cabo Catoche (figura 5.2) se manifiesta en primavera y verano cuando la corriente de Yucatán es más intensa. El afloramiento se evidencia con el levantamiento de la isoterma de 22.5°C de una profundidad entre 220 y 250 m en el oeste del canal de Yucatán, hasta una profundidad entre 10 y 70m sobre la plataforma continental del norte de la Península de Yucatán. El agua de la surgencia se desplaza hacia el oeste con velocidades alrededor de  $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  cerca de la costa y de  $23 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  en la región más alejada de esta. Considerando estas velocidades se estima que el agua fría puede cruzar la plataforma entre 17 y 40 días.

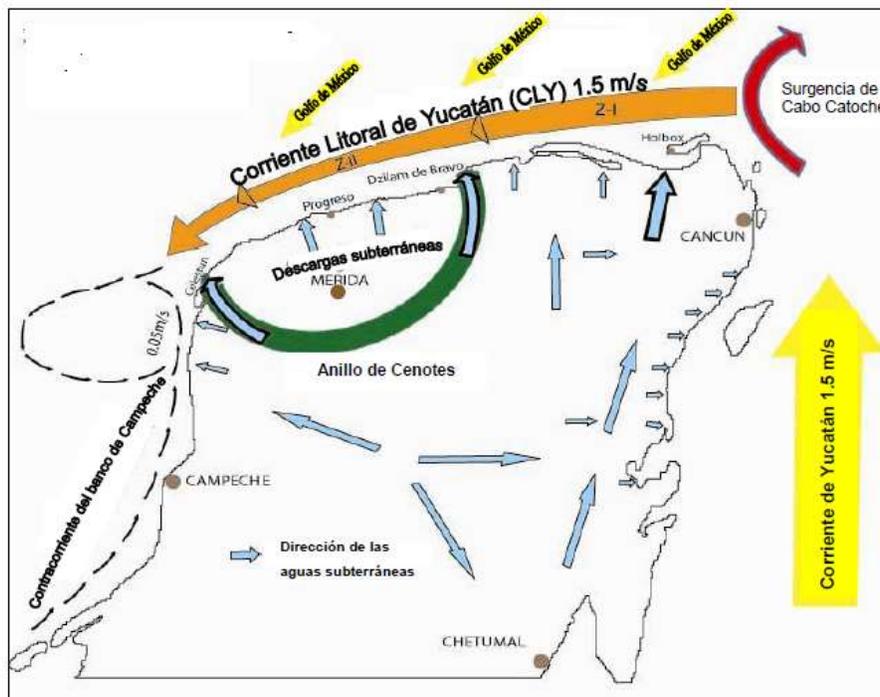


Figura 5.2 Esquema de las corrientes costeras y el flujo de agua subterránea en la Península de Yucatán (Modificación de Morales, Sara 2007)

La zona costera de Yucatán con una extensión de 360 Km aproximadamente, incluye 13 municipios: Celestún, Hunucmá, Progreso, Ixil, Telchac Puerto, Sinanché, Yobain, Dzidantún, Dzilam de Bravo, San Felipe, Rio Lagartos y Tizimín los cuales se muestran en la Figura 5.3

Como se observa en la Tabla 5.1, dentro de las principales actividades económicas que se desarrollan en la zona costera del estado de Yucatán están la pesca, el turismo y la agricultura. Las actividades económicas desarrolladas en la zona costera y en todo el estado pueden estar generando un impacto en el acuífero, a consecuencia de la geología kárstica en la Península de Yucatán. Las lluvias saturan el terreno, colman el bajo relieve y se infiltran al subsuelo, arrastrando consigo los materiales superficiales, dando origen a las aguas subterráneas en cavernosidades como grutas, cavernas o sumideros (Gil 2010). Las aguas subterráneas tienen como destino final la zona costera por lo que se ha informado que puede estar funcionando como fuente de contaminantes hacia esta área (Árcega-Cabrera et al. 2014, 2015; Derrién et al. 2015).

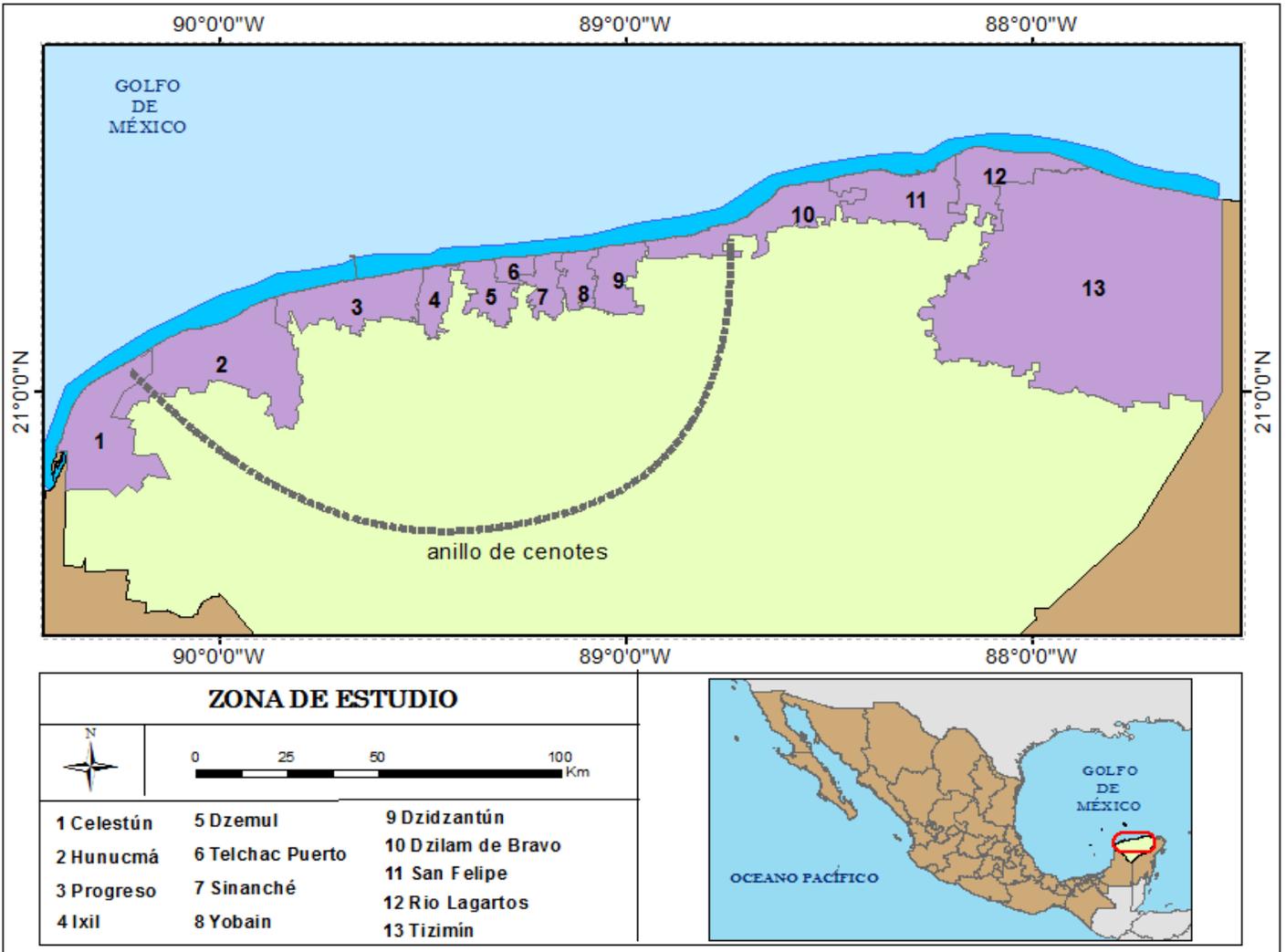


Figura 5.3 Zona de estudio: ZCY con los 13 municipios costeros

Tabla 5.1 Municipios de la ZCY (elaborada a través de los datos de INEGI, 2015)

MUNICIPIO	MAPA	Extensión Línea de Costa	EXTENSIÓN (AREA)	POBLACIÓN	DENSIDAD POBLACIONAL	PRINCIPALES ACTIVIDADES ECONÓMICAS
Celestún	1	37 Km	868.63 km <sup>2</sup>	6,831 hab.	8 hab/ km <sup>2</sup>	Pesca Salineras Turismo
Hunucmá	2	38.7 Km	599.10 Km <sup>2</sup>	30 731 hab.	51 hab/ km <sup>2</sup>	Pesca Agricultura
Progreso	3	38.5 Km	270.10 Km <sup>2</sup>	49 454hab.	183 hab/ km <sup>2</sup>	Pesca Turismo Agricultura
Ixil	4	8.8 Km	134.13 km <sup>2</sup>	3803 hab.	28 hab/ km <sup>2</sup>	Pesca Agricultura Turismo
Dzemul	5	9.8 Km	123.21 km <sup>2</sup>	3489 hab.	28 hab/ km <sup>2</sup>	Pesca Agricultura
Telchac Puerto	6	11.1 Km	173.73 km <sup>2</sup>	1726 hab.	10 hab/ km <sup>2</sup>	Pesca Turismo Agricultura
Sinanché	7	7.2 Km	131.57 km <sup>2</sup>	3126 hab.	24 hab/ km <sup>2</sup>	Pesca Agricultura Pecuario
Yobain	8	9.4 Km	81.75 km <sup>2</sup>	2056 hab.	26 hab/ km <sup>2</sup>	Agricultura Pecuario
Dzidzantún	9	12.8 Km	198 km <sup>2</sup>	8133 hab.	41 hab/ km <sup>2</sup>	Agricultura Pecuario
Dzilam de Bravo	10	59.9 Km	241.43 km <sup>2</sup>	2248 hab.	9 hab/ km <sup>2</sup>	Pesca Agricultura
San Felipe	11	33.4 Km	680.85 km <sup>2</sup>	1842 hab.	3 hab/ km <sup>2</sup>	Pesca Agricultura Salineras Ecoturismo
Rio Lagartos	12	19.4 Km	249.09 km <sup>2</sup>	3438 hab.	14 hab/ km <sup>2</sup>	Salieras Pesca Ecoturismo
Tizimín	13	52 Km	4 132 km <sup>2</sup>	69 553 hab.	17 hab/ km <sup>2</sup>	Agricultura Pecuario Pesca Turismo

## 6. METODOLOGÍA

### **6.1 Muestreo**

El muestreo para la recolección de agua superficial se realizó a lo largo de la costa de Yucatán de acuerdo con las estaciones señaladas en el POETCY 2007 (Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero del Estado de Yucatán) en los meses de julio y agosto de 2013 y 2014. Estas, están distribuidas a lo largo de la zona costera de Yucatán, en un arreglo espacial que favorece la caracterización de esta zona. Posteriormente se diseñó en el Laboratorio de Producción Primaria del CINVESTAV-IPN Unidad Mérida la adición de estaciones, ya que el objetivo fue contar con información a escala municipal, por lo que este diseño tener al menos 3 estaciones de muestreo por municipio.

Espacialmente fueron 67 estaciones a lo largo de la ZCY (figura 6.1) Se realizaron dos muestreos con deiferencia entre elloa de un año, en la misma época para fines comparativos. La ubicación geográfica de cada estación de muestreo se estableció previamente y en el sitio se localizó con un GPS Garmin 65s (precisión  $\pm 1\text{m}$ )

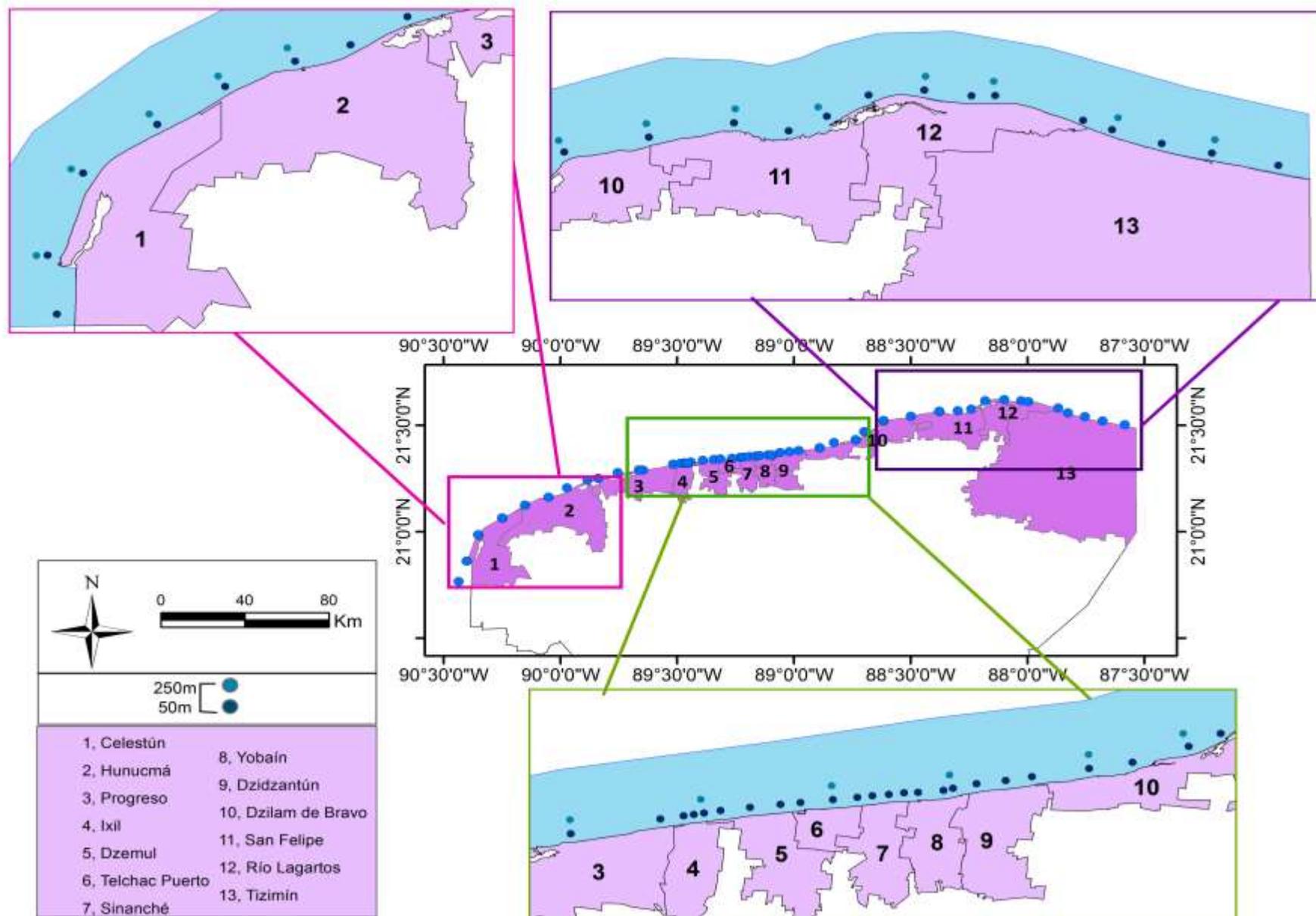


Figura 6.1 Localización de las estaciones de muestreo de la zona costera de Yucatán.

Los muestreos se realizaron en los meses julio y agosto para cada año, 2013 y 2014. De acuerdo con el reporte de precipitación nacional de CONAGUA se registraron 154.7 mm y 205.6 mm para los meses de Julio y Agosto 2013 y 111.3 mm y 177.0 mm para los meses Julio y Agosto del 2014, por lo que la época climática en la que se realizó el muestreo corresponde a la época de lluvias( figura 6.2).

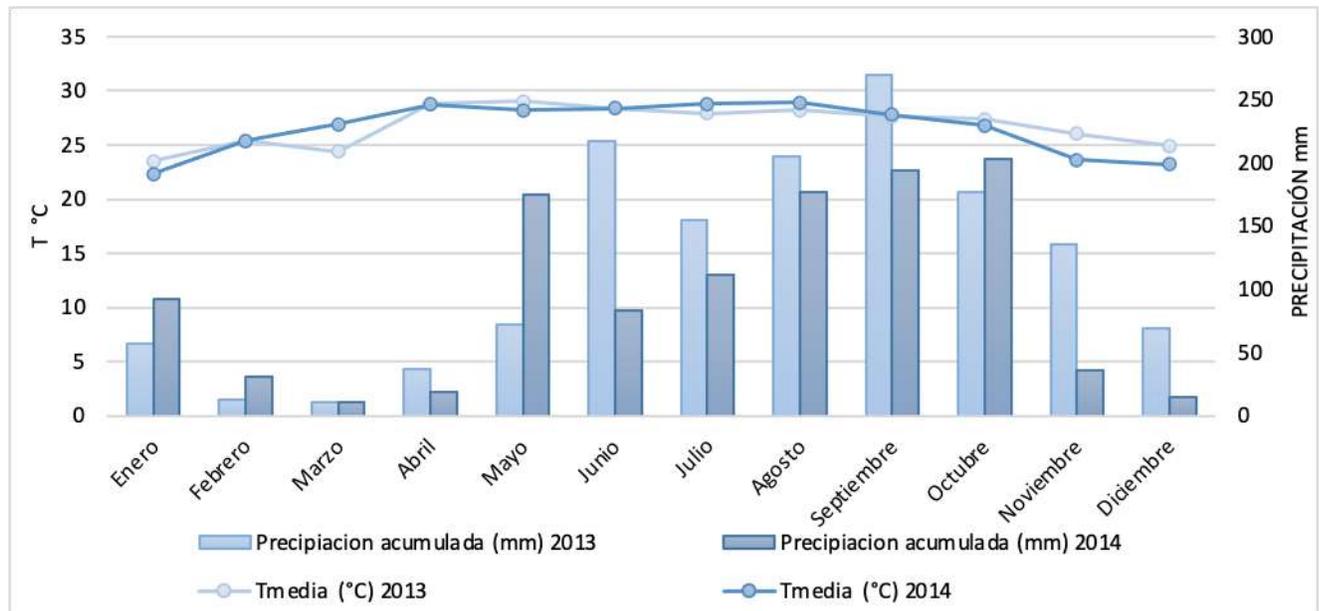


Figura 6.2 Climatogramas del estado de Yucatán para los años 2013 y 2014

## 6.2 Parámetros Físicoquímicos

Las mediciones de parámetros físicoquímicos del agua superficial de la ZCY (temperatura, oxígeno disuelto y salinidad) se llevaron a cabo *in situ* con una sonda multiparamétrica YSI-6600 previamente calibrada de acuerdo con las especificaciones del proveedor, esto lo llevó a cabo el equipo de muestreo del laboratorio de producción primaria del CINEVSTAV-IPN Unidad Mérida.

### 6.3 Nutrientes y estado trófico

Debido a que no se presenta estratificación de la columna de agua en el área de estudio (Aranda-Cirerol et al., 2006), las muestras fueron colectadas de la superficie usando botellas Nalgen de 1L, filtradas a través de membranas Millipore de 0.45µm y preservadas en frío y oscuridad hasta su análisis en laboratorio.

De acuerdo con las técnicas de Strickland y Parsons (1984) se cuantificaron nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), fósforo reactivo soluble (PRS) y sílice reactivo soluble (SiRS). El nitrógeno inorgánico disuelto (NID) fue obtenido de la suma de  $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ , para poder calcular la relación de Redfield. Para la clorofila-*a* se utilizó el método de la extracción por acetona al 90%, la absorción fue medida con un espectrofotómetro y se usó la fórmula de Jeffrey & Humphrey (1975) para calcular su concentración.

Cabe mencionar que estos análisis se realizaron en el Laboratorio de Producción primaria del CINEVSTAV-IPN Unidad Mérida

El Índice TRIX fue obtenido con la siguiente ecuación:

$$TRIX = \frac{[\log(\text{Chl} - a * |\%OD| * \text{NID} * P + 1.5)]}{1.2}$$

Este índice es una combinación de cuatro variables de estado que directamente expresan la productividad (Cl-a y oxígeno), condición nutricional (nitrógeno y fósforo inorgánico disuelto). Respecto al porcentaje de saturación del oxígeno, es importante mencionar que, como cualquier otro gas, el oxígeno se ve afectado por los procesos de difusión. La transferencia del oxígeno disuelto presente en el agua, hacia la flora y fauna va a depender de este porcentaje de saturación además de la concentración.

Así también, dicho porcentaje de saturación puede estar afectado por la temperatura, es decir, a una menor temperatura hay una mayor saturación de cualquier gas y viceversa. Es decir, que una variación en la temperatura del agua costera (diferencial entre día y noche, por ejemplo) dará como resultado una menor saturación de oxígeno por procesos físicos, mientras que los procesos biológicos y químicos, como la producción primaria/eutroficación estarán relacionados con la concentración de oxígeno disuelto presente (APHA 1995).

El cálculo del porcentaje de saturación involucrará a la concentración de oxígeno, salinidad y la temperatura, y el estado ambiental presente estará de acuerdo con la siguiente clasificación

Tabla 6.1 Porcentaje de saturación y nivel de Oxígeno disuelto (OD)

Nivel de DO	% de saturación de DO
Supersaturación	101%
Excelente	90 – 100%
Adecuado	80 – 89%
Aceptable	60 – 79%
Pobre	<60%

## 6.4 Metales

La muestra se recolectó en una botella de plástico de 125 mL, se mantuvo en frío. Posteriormente se filtró y se acidificó con 0.125 mL de HNO<sub>3</sub> concentrado.

Se realizó una extracción con una resina de intercambio iónico, Chelex 100. Se pesaron 3.5 g de resina, se empacó en la columna previamente lavada con HNO<sub>3</sub> AL 50% v/v, se pre acondicionó la resina con 10 mL de una solución de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 1M, 30 mL de H<sub>2</sub>O destilada y finalmente con 20 mL más de NH<sub>4</sub>Ac 1M (figura 6.3).



*Figura 6.3 Sistema montado para la extracción de metales en agua con alta salinidad por intercambio con resina Chelex*

A la muestra se le ajusto el pH entre 5.5 y 6 con  $\text{NH}_4\text{Ac}$  1M, se trasvasó a la columna y se reguló a un flujo de  $1\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . Al término se trató la resina con 15mL de  $\text{NH}_4\text{Ac}$  1M para remover la matriz de sales en la resina, se lavó con 25mL de  $\text{H}_2\text{O}$  destilada, y finalmente se adicionaron 20mL de  $\text{HNO}_3$  2M a la columna para la recuperación de los metales retenidos por la resina en un matraz de 25.0 mL el cual se aforó (figura 6.4).



*Figura 6.4 Paso final de la extracción. Elución de los metales intercambiados por la resina Chelex 100. Enrace a 25.0 mL con  $\text{HNO}_3$  2M*

Se cuantificó la concentración de Cd, Cu, Cr y V por la técnica analítica de Absorción Atómica (AA) acoplado a horno de grafito (AA-HG), mientras que para el caso de As se cuantificó con la técnica de AA acoplado a generador de hidruros (AA-GH). El Sr se cuantificó con la técnica de AA acoplado a flama (AA-FLAMA) con un equipo Perkin Elmer AAnalyst 800. En la tabla 6.2 se muestran las características principales, de acuerdo con cada metal y As, para las técnicas de cuantificación utilizadas.

Tabla 6.2 Características principales de la cuantificación para cada metal y As

METAL	MODIFICADOR DE MATRIZ	LÍMITE DE DETECCIÓN UG/L	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN UG/L	LINEALIDAD
As	0.00mg Pd 0.003mg Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.0006	0.001	0-10 ug/L
Cd	0.05mg NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 0.003mg Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.0007	0.001	0-8 ug/L
Cr	0.015 Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.0038	0.006	0-50 ug/L
Cu	0.005mg Pd 0.003mg Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.0003	0.0005	0-100 ug/L
V	-	0.0021	0.003	0-100 ug/L
Sr		0.0003	0.0005	0-10 mg/L

La extracción se realizó en 8 lotes; para el control de calidad de los análisis cada lote de muestras tenía su respectivo blanco y materia de referencia, el cual fue SLEW-3: Estuarine water reference material for trace metals, en la tabla 6.3 se muestran los resultados del material de referencia.

Tabla 6.3 Porcentaje de error y recuperación respecto al material de referencia SLEW-3

METAL	CERTIFICADO DE SLEW 3 µg·L <sup>-1</sup>	CONCENTRACIÓN OBTENIDA µg·L <sup>-1</sup>	%ERROR	%RECUPERACION
As	1.36 ± 0.09	1.49	9.56	109.56
Cd	0.048 ± 0.004	0.05	6.25	104.17
Cr	0.183 ± 0.019	0.20	8.20	109.29
Cu	1.55 ± 0.12	1.35	12.90	87.09
V	2.57 ± 0.31	2.66	3.50	103.50

## 6.5 Análisis estadístico

Para caracterizar la variación espacial e interanual de los parámetros fisicoquímicos, la concentración de nutrientes y metales de la zona, se llevó a cabo un análisis gráfico de los resultados obtenidos utilizando diagramas de cajas y bigotes. De igual manera se realizó la prueba de Kruskal-Wallis para determinar si existen diferencias significativas interanuales y espaciales para cada año a lo largo de todo el transecto de muestreo por municipios.

Posteriormente y con el objetivo de identificar los procesos presentes en la zona a través de las relaciones no lineales de los parámetros medidos se llevó a cabo un análisis multivariado, que consistió en realizar primero un análisis de componentes principales, mediante el cual se identificaron las variables significativas. A continuación, se realizó un análisis de factores, el cual ayudó a identificar los procesos que influyen en la variación espacial interanual, finalmente se realizó un análisis de conglomerados para identificar agrupaciones de sitios con características similares. Todos los valores fueron previamente transformados con  $\log(X+1)$  para evitar sesgo en los resultados por diferencias en orden de magnitud o de tipo de variable. (MacCallum 1999).

Es importante mencionar que para el análisis multivariado de las concentraciones de nutrientes se integró en una misma variable las concentraciones de  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ , ya que la especie del N como  $\text{NO}_2^-$  ambientalmente no es significativa, pues es una especie menos soluble en agua y menos estable termodinámicamente (García et al. 1994, Pacheco 2003).

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software Statistica 10.

## **6.6 Representación gráfica de las principales actividades agropecuarias de los municipios de la ZCY**

Se realizaron mapas de la densidad poblacional, del porcentaje de territorio sembrado, de la abundancia de producción de los principales cultivos, de la densidad de producción, de la densidad de las aves de corral, de la densidad de ganado porcino y de la densidad del ganado vacuno de los municipios de la ZCY y de los municipios colindantes con estos. La información con la que se realizaron se encuentra en el Anexo Estadísticas Agricultura y Ganadería, la cual fue obtenida del Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos para cada municipio y del Censo Agropecuario 2007 del portal del INEGI. Estos mapas se realizaron con el Software ArcMap 10.1

## 7. RESULTADOS

### **7.1 Principales actividades agropecuarias de los municipios de la ZCY.**

El mapa regional del consenso de los flujos de aguas subterráneas (Bauer-Gottwein et al. 2010; ASK 2003) que se muestra en la Figura 5.1 muestra los patrones de flujos prevalentes de la península, con base en esto se integró la información de las principales actividades antropogénicas que pueden afectar a la calidad del agua del acuífero, la cual tiene como destino final la zona costera.

Con la información de las principales actividades económicas se desarrollaron las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6 y 7.7, las cuales muestran: la densidad poblacional, el porcentaje de territorio sembrado, las toneladas cosechadas, la densidad de producción, la densidad de las aves de corral, la densidad de ganado porcino y la densidad del ganado vacuno respectivamente de los municipios de la ZCY y de los municipios colindantes con estos.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra que el municipio de la ZCY con mayor densidad demográfica es Progreso, seguidos de Hunucmá y Dzidzantún, mientras que Mérida, municipio colindante de Progreso, es el que presenta mayor densidad poblacional.

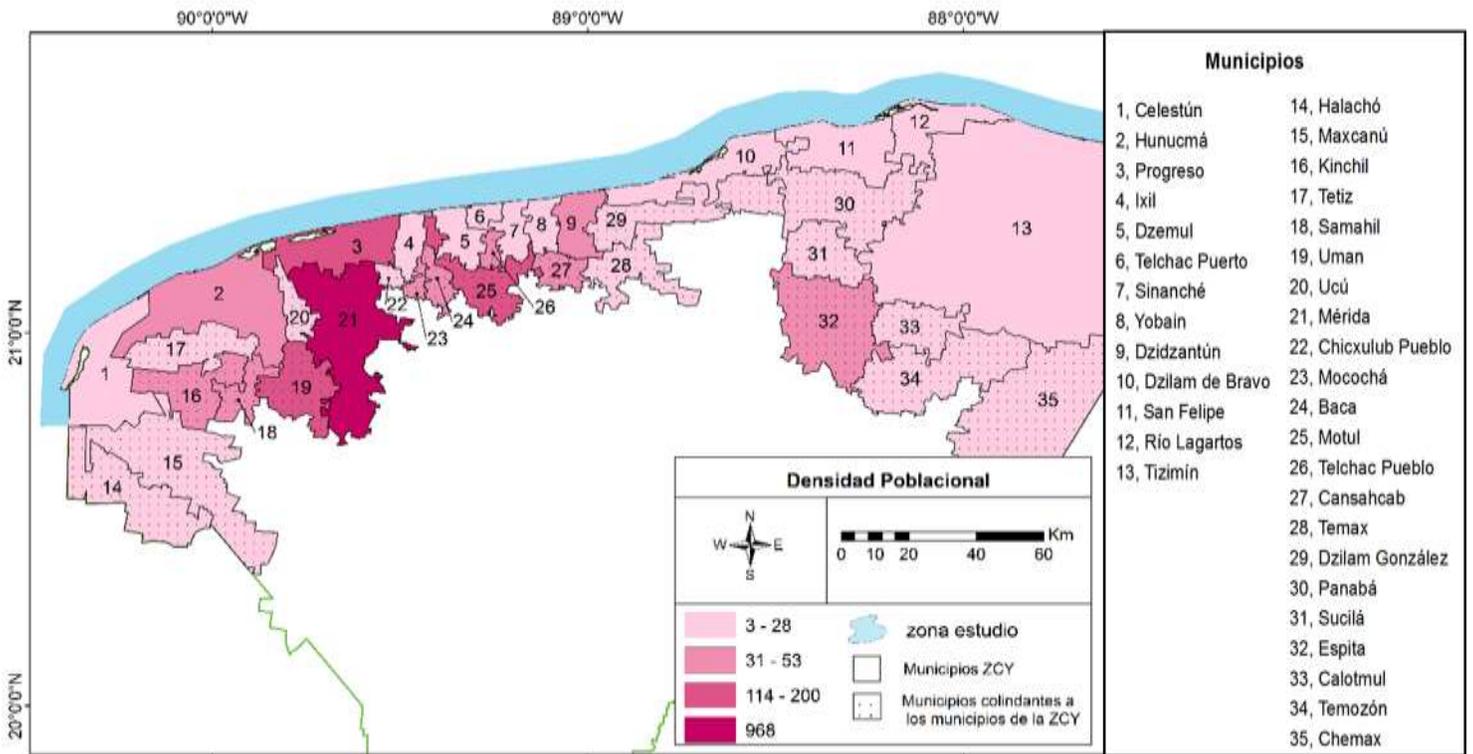


Figura 7.1 Mapa de la densidad poblacional de los municipios de la ZCY y los municipios colindantes. INEGI 2015

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa que de manera general para los municipios de la ZCY el área de siembra por municipio aumenta hacia el Este. Los municipios con mayor porcentaje de siembra de la ZCY son Tizimín y Rio Lagartos. Panabá y Sucilá, municipios colindantes de San Felipe y Rio Lagartos, son los que presentan mayor porcentaje de siembra, y de acuerdo con diagrama de flujo de agua subterránea (figura 5.1), podrían tener un impacto en la zona costera de estos municipios de la ZCY.

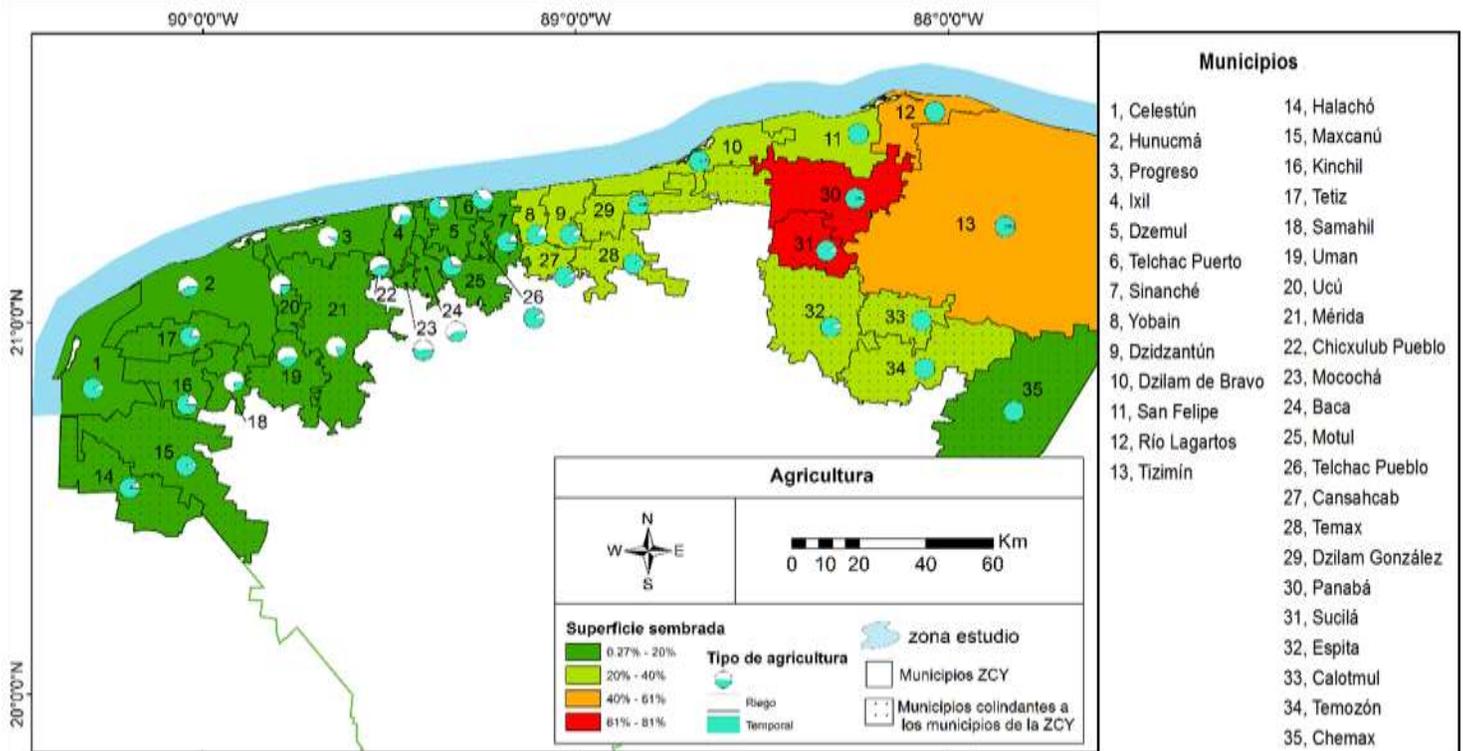


Figura 7.2 Mapa del porcentaje de área de siembra dedicado a la agricultura por municipio de la ZCY y de los municipios colindantes a estos. INEGI 2009

En la mayoría de los municipios el tipo de siembra es interanual, con excepción de algunos municipios del Oeste de la ZCY, como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, los cuales cuentan también con sistema de siembra por riego. Por ello se elaboró el mapa de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el cual muestra la producción en toneladas por municipio, observándose que la mayor producción se encuentra en el Este de la ZCY. Sin embargo, una mejor referencia para poder asociar un impacto al acuífero y por ende a la ZCY, se elaboró la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la cual muestra la densidad de producción. Este mapa se realizó con base en que el 94% de la producción del estado se concentra en cereales y forrajes, siendo los pastos el cultivo principal de estos municipios (INEGI 2009). En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa que Dzilam de Bravo y Yobain son los municipios costeros con mayor densidad de producción agrícola. A pesar de que Tizimín es el municipio costero con mayor área de siembra y mayor producción.

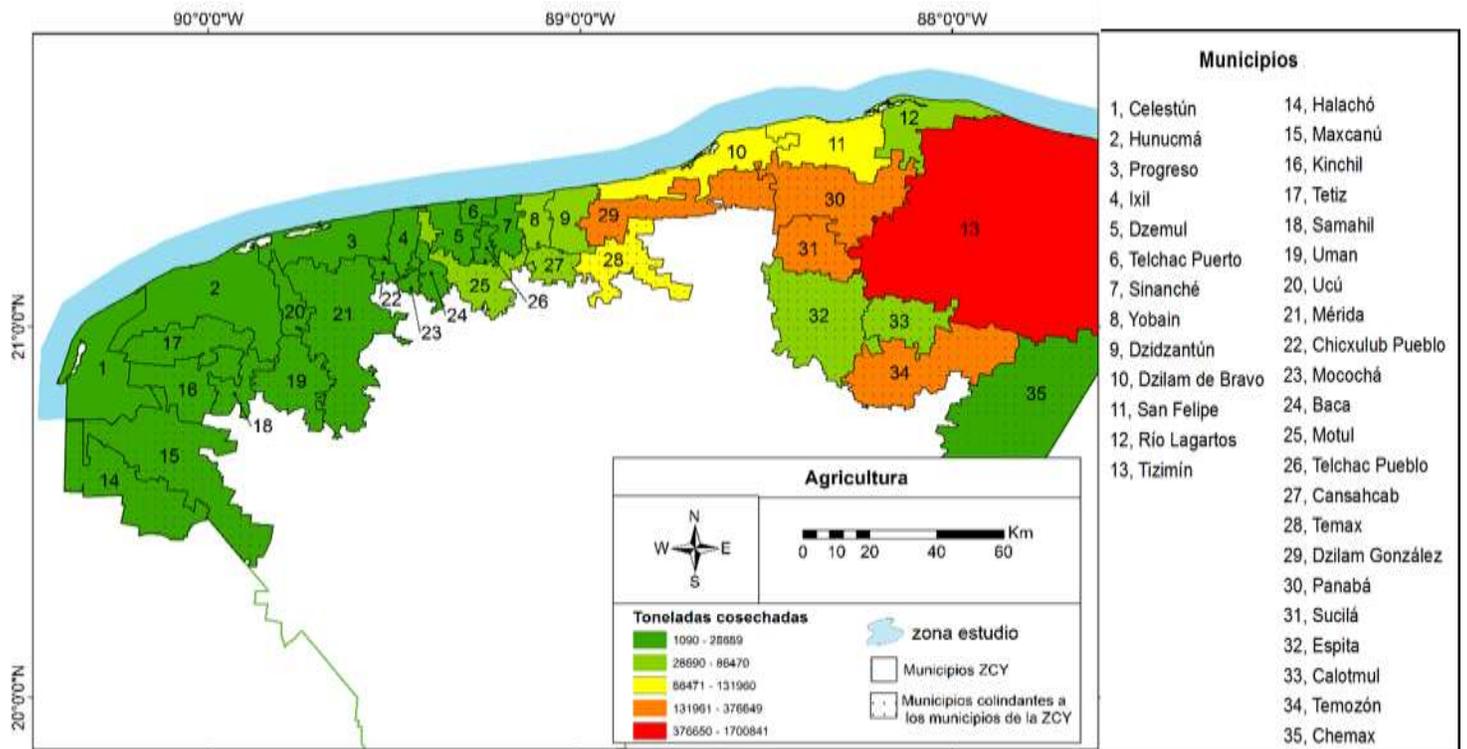


Figura 7.3 Mapa de la producción en toneladas de los principales cultivos por municipio de la ZCY y de los municipios colindantes a estos. INEGI 2009

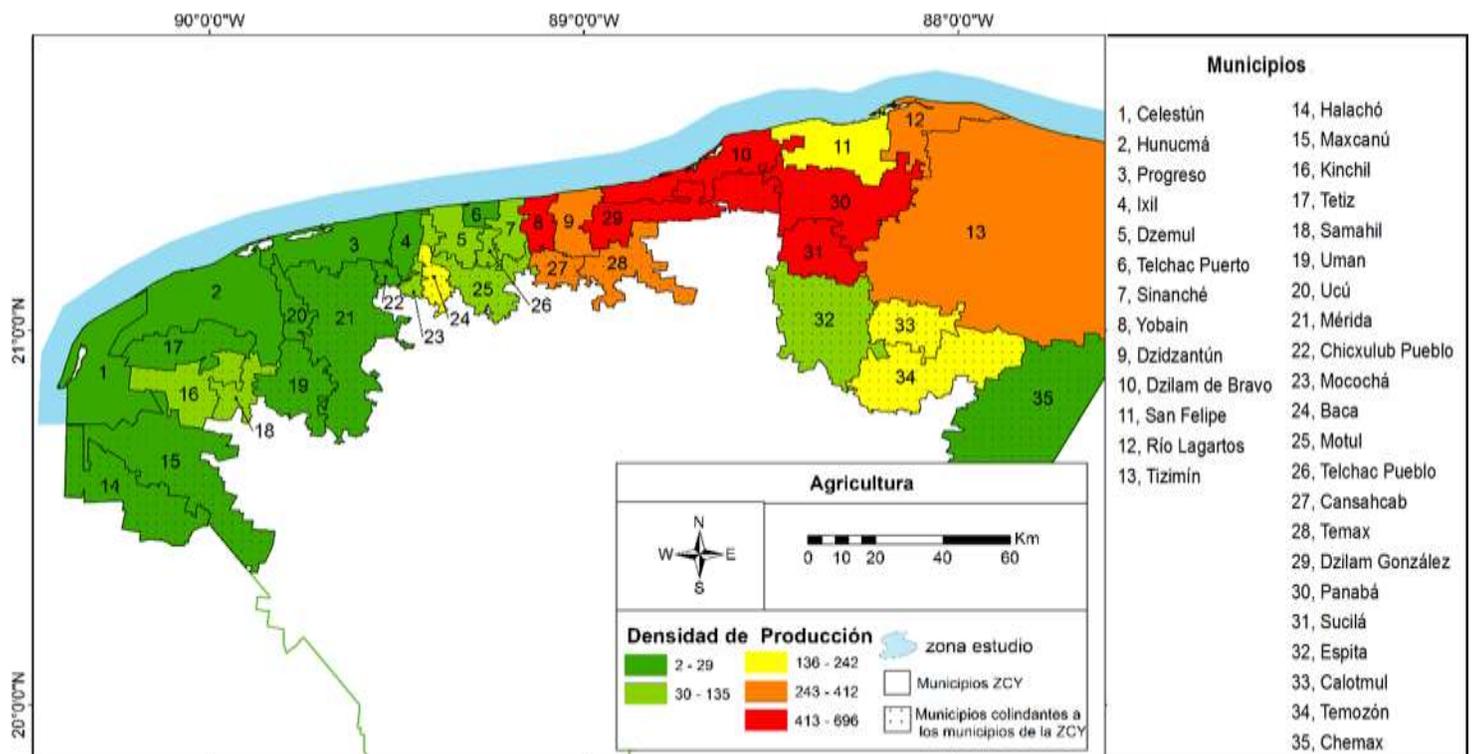


Figura 7.4 Mapa de la densidad de producción de los principales cultivos por municipio de la ZCY y de los municipios colindantes a estos. INEGI 2009.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la densidad de aves de corral. De los municipios de la ZCY, Dzemul presenta una densidad de más de 19 000 especímenes por kilómetro cuadrado. De los municipios colindantes con mayor densidad es Baca con más de 62 000 especímenes por kilómetro cuadrado cuyo municipio colindante de la ZCY es Ixil. El municipio de Mérida presenta una densidad de aves de más de 3400.

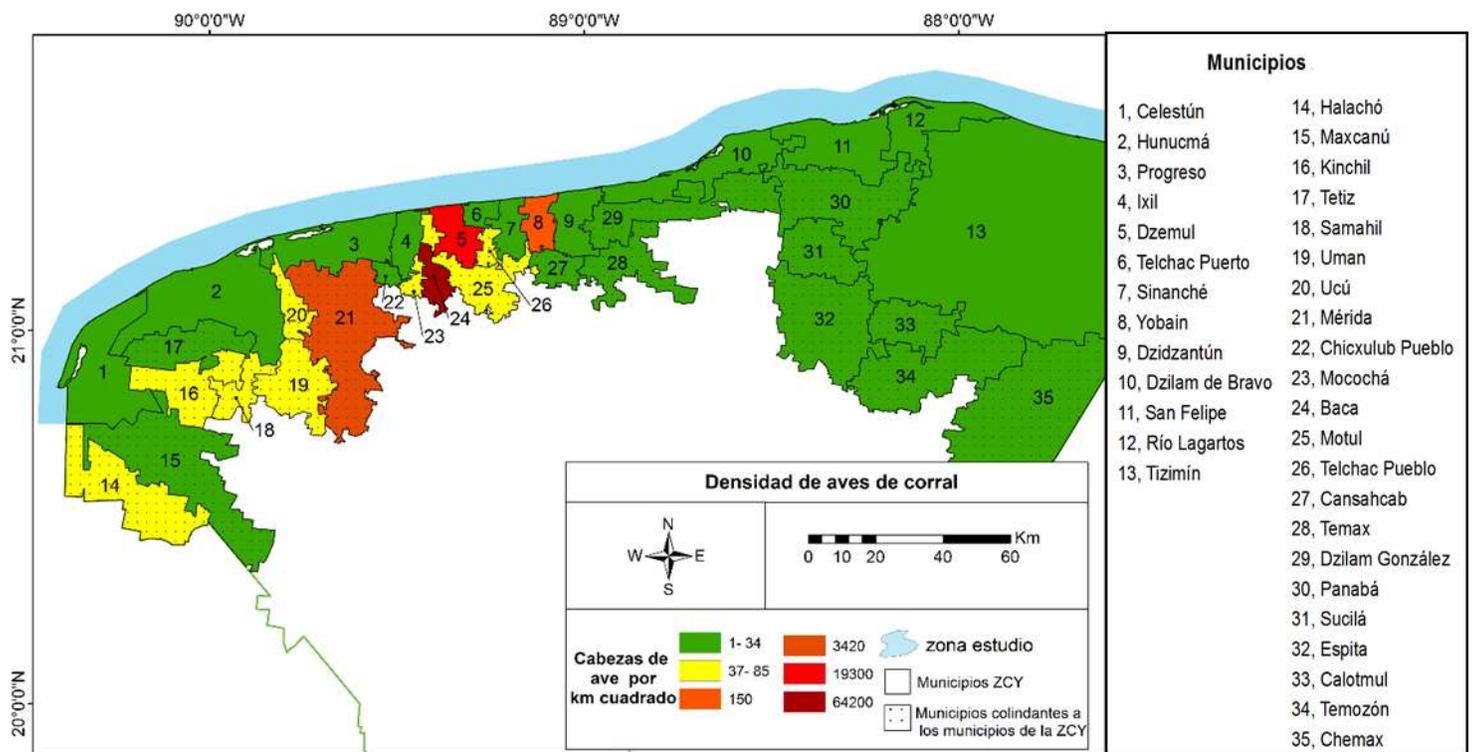


Figura 7.5 Mapa de la densidad de aves de corral de los municipios de la ZCY y los municipios colindantes. INEGI 2009

La mayor densidad de ganado porcino (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se encuentra en los municipios de Mérida, Ucú y Tetiz, los cuales de acuerdo con el diagrama del flujo de agua subterránea de la figura 5.1 pueden afectar principalmente a los municipios del Oeste de la ZCY. De manera general, existe mayor densidad de ganado bovino en los municipios del Este (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La mayor densidad de éste se encuentra en Sucilá con 74 cabezas por km<sup>2</sup>.

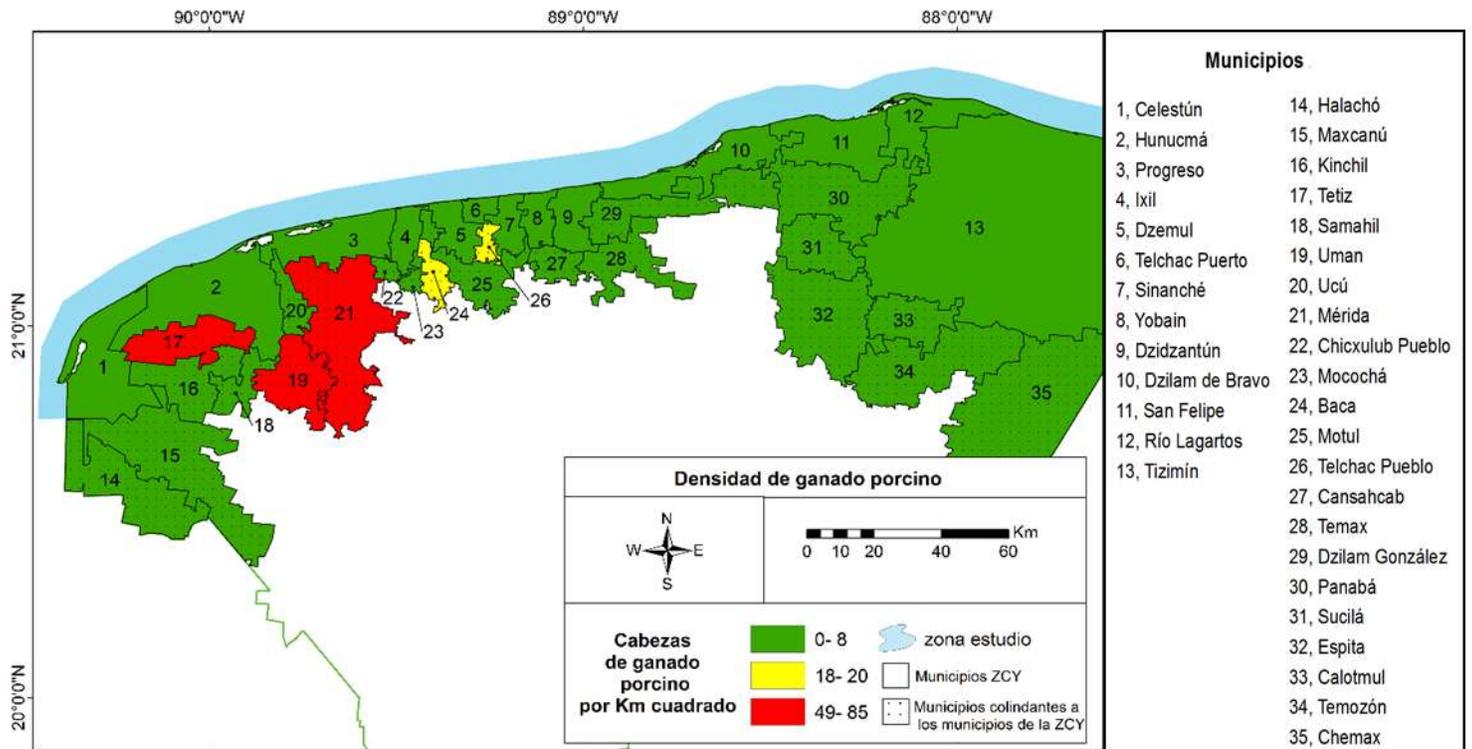


Figura 7.6 Mapa de la densidad de ganado porcino de los municipios de la ZCY y los municipios colindantes a estos. INEGI 2009

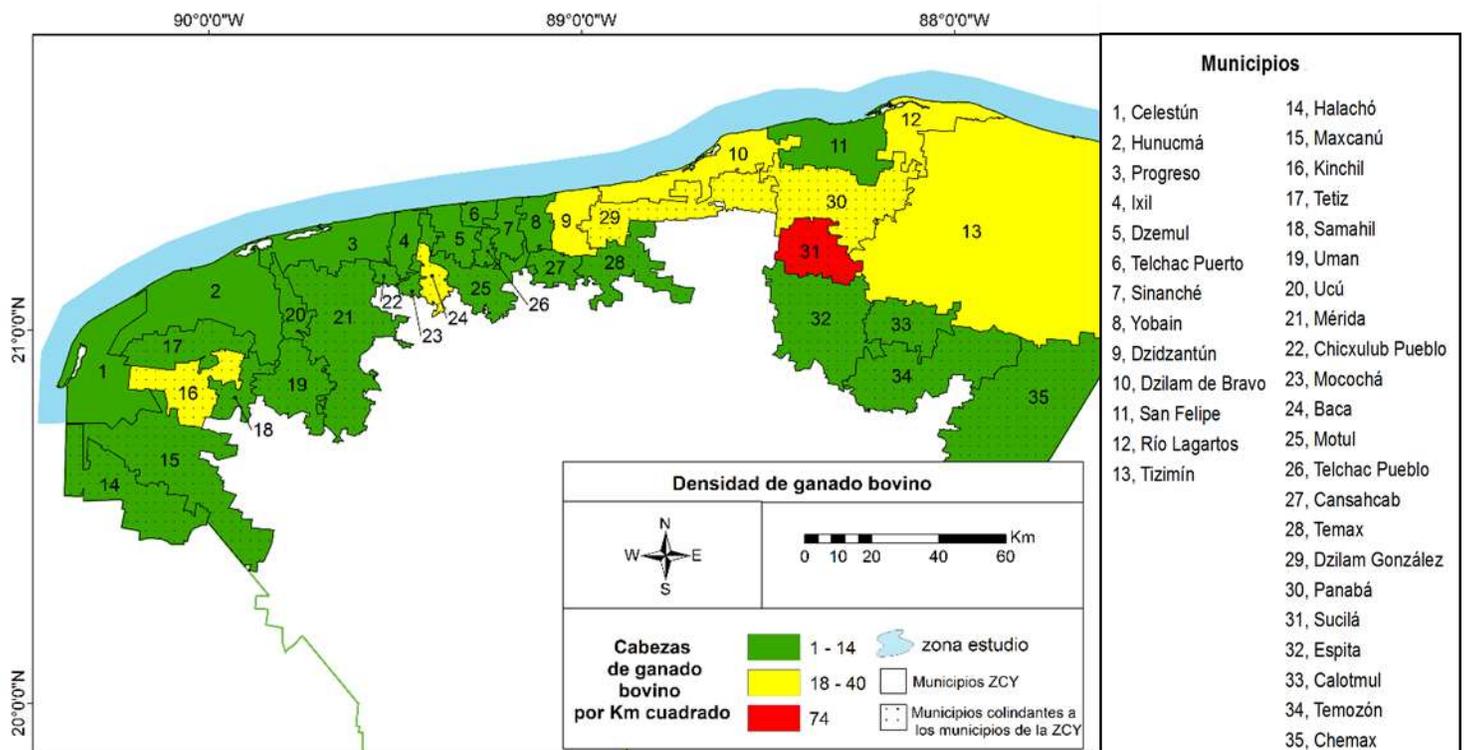


Figura 7.7 Mapa de la densidad de ganado bovino de los municipios de la ZCY y los municipios colindantes a estos. INEGI 2009

## 7.2 Caracterización físico-química de la zona (Estadística Descriptiva)

En la Tabla 7.1 se muestran los resultados obtenidos de la medición *in situ* de la profundidad y parámetros físicoquímicos del agua superficial de la ZCY.

Tabla 7.1 Estadística descriptiva de los parámetros físicoquímicos

MUNICIPIO		Z (m) 2013	Z (m) 2014	T (°C) 2013	T (°C) 2014	S UPS 2013	S UPS 2014	OD (mg/L) 2013	OD (mg/L) 2014
CELESTÚN	mediana	1.70	1.50	31.00	31.50	36.50	36.14	3.98	6.90
	min	1.50	1.20	30.30	31.30	32.70	35.92	3.87	6.31
	max	2.50	2.30	32.60	31.80	38.90	36.31	4.18	7.12
	25%	1.50	1.30	30.40	31.30	35.90	35.96	3.94	6.41
	75%	2.00	2.20	31.20	31.70	37.80	36.31	4.06	7.05
HUNUCMÁ	mediana	1.85	1.50	30.86	30.10	34.81	35.96	5.35	6.51
	min	1.60	1.20	29.90	29.70	31.60	35.80	3.45	6.36
	max	2.50	2.10	31.08	30.60	34.91	36.19	5.45	7.19
	25%	1.60	1.30	30.00	29.90	34.50	35.81	3.62	6.41
	75%	2.00	1.80	30.99	30.50	34.90	35.99	5.42	6.82
PROGRESO	mediana	2.00	1.85	31.40	30.45	34.65	36.39	5.28	6.07
	min	1.60	1.30	30.70	30.10	34.40	36.15	4.72	5.13
	max	3.50	2.30	31.60	30.90	35.10	36.49	5.63	6.52
	25%	1.80	1.70	31.00	30.20	34.50	36.32	5.13	5.85
	75%	3.20	1.90	31.50	30.70	34.90	36.42	5.48	6.21
IXIL	mediana	1.65	1.35	31.10	30.25	34.40	36.28	5.04	5.96
	min	1.30	1.10	31.00	30.10	34.20	36.26	4.92	5.63
	max	2.50	1.80	31.50	30.90	34.40	36.30	5.17	6.69
	25%	1.45	1.15	31.05	30.15	34.30	36.27	4.93	5.70
	75%	2.10	1.65	31.30	30.60	34.40	36.30	5.16	6.43
DZEMUL	mediana	1.50	1.20	30.70	30.30	34.90	36.46	5.05	5.29
	min	1.40	1.20	30.50	30.20	34.30	36.34	4.66	4.65
	max	1.50	1.30	30.80	30.40	35.20	36.52	5.13	5.73
	25%	1.40	1.20	30.50	30.20	34.30	36.34	4.66	4.65
	75%	1.50	1.30	30.80	30.40	35.20	36.52	5.13	5.73

MUNICIPIO		Z (m) 2013	Z (m) 2014	T (°C) 2013	T (°C) 2014	S UPS 2013	S UPS 2014	OD (mg/L) 2013	OD (mg/L) 2014
TELCHAC	mediana	1.30	1.35	30.35	30.30	35.05	36.45	4.62	5.08
	min	0.50	0.70	30.10	29.80	34.90	36.41	4.12	4.76
	max	2.00	3.20	30.50	30.90	35.20	36.90	4.78	5.98
	25%	0.55	0.80	30.20	30.05	34.95	36.42	4.32	4.92
	75%	2.00	2.50	30.45	30.60	35.15	36.69	4.76	5.54
SINANCHÉ	mediana	2.00	1.70	30.00	30.90	34.70	36.68	4.36	4.79
	min	1.90	1.60	29.80	29.60	34.60	36.48	3.79	4.29
	max	2.00	1.80	30.40	31.10	34.90	36.87	4.51	5.25
	25%	1.90	1.60	29.80	29.60	34.60	36.48	3.79	4.29
	75%	2.00	1.80	30.40	31.10	34.90	36.87	4.51	5.25
YOBAIN	mediana	2.00	1.85	29.25	30.85	35.05	36.72	3.75	4.76
	min	1.50	1.30	28.50	30.60	34.70	36.60	3.57	4.34
	max	2.00	3.00	29.70	31.10	35.20	36.88	3.99	5.00
	25%	1.75	1.55	28.70	30.70	34.85	36.65	3.62	4.46
	75%	2.00	2.45	29.65	31.00	35.15	36.82	3.91	4.98
DZIZANTÚN	mediana	1.05	0.95	29.20	30.80	34.65	36.29	3.91	4.81
	min	0.50	0.60	28.90	30.60	34.20	34.73	3.87	4.54
	max	1.60	1.80	31.80	33.90	34.90	36.44	8.34	9.20
	25%	0.55	0.65	29.00	30.65	34.35	35.47	3.89	4.55
	75%	1.55	1.50	30.55	32.40	34.85	36.41	6.13	7.13
DZILAM DE BRAVO	mediana	1.60	1.60	30.30	32.50	35.00	36.34	4.56	6.27
	min	0.50	0.70	29.40	30.20	34.40	35.14	3.40	5.83
	max	2.00	2.60	31.00	33.60	35.70	37.10	6.20	8.68
	25%	1.30	1.40	29.60	31.00	34.60	35.49	3.70	5.88
	75%	1.70	1.90	30.60	33.20	35.60	37.05	5.47	6.96
SAN FELIPE	mediana	1.60	1.40	29.90	32.00	35.50	37.62	4.55	5.80
	min	0.50	0.60	28.00	30.80	35.10	36.13	1.47	3.17
	max	2.80	1.70	31.20	32.70	36.30	39.50	7.19	6.75
	25%	0.50	0.70	28.90	30.90	35.20	37.13	2.07	4.81
	75%	1.80	1.50	30.60	32.30	36.20	39.39	6.28	5.91
RÍO LAGARTOS	mediana	1.90	1.40	29.70	27.70	36.10	36.23	5.61	6.33
	min	0.90	0.50	28.90	26.50	35.40	36.19	5.11	5.15
	max	2.40	2.10	30.60	29.70	36.30	36.45	7.41	6.98
	25%	1.20	0.80	29.60	27.30	36.00	36.20	5.36	6.06
	75%	2.30	1.90	30.00	28.20	36.20	36.39	6.05	6.48
TIZIMÍN	mediana	1.50	1.10	28.70	25.30	36.30	36.12	5.88	6.14
	min	1.10	0.70	28.40	25.00	35.20	36.03	5.72	5.38
	max	2.40	1.40	29.20	26.10	36.60	36.23	6.09	6.66
	25%	1.50	1.00	28.50	25.10	35.70	36.07	5.74	5.42
	75%	2.40	1.30	28.70	26.00	36.30	36.18	5.95	6.19

## PROFUNDIDAD

La profundidad es una variable que se relaciona directamente con el incremento o disminución del volumen de agua presente en el sistema, así como con la batimetría del sitio. En la zona de estudio la profundidad no presentó diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a**, las medianas más bajas se presentaron en Telchac Puerto y Dzidzantún para ambos años. Sin embargo, ambos municipios presentaron gran variabilidad como se observa en la figura 7.8a. Las mayores medianas de profundidad se encontraron en Progreso y Rio Lagartos para el 2013, y Progreso, Sinanché y Yobain para el 2014. Los municipios con mayor variabilidad en la profundidad fueron Telchac Puerto, Dzidzantún, San Felipe y Rio Lagartos. Y los que presentaron menor variabilidad son Celestún, Hunucmá, Progreso, Ixil y Dzemul.

Interanualmente la profundidad no tuvo diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ). En el 2013 se registraron profundidades de 0.5m hasta 3.5m, mientras que en el 2014 se registró un intervalo de 0.5 a 3.2 m. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.b** se observa que el 2014 presentó una mediana menor que en el 2013.

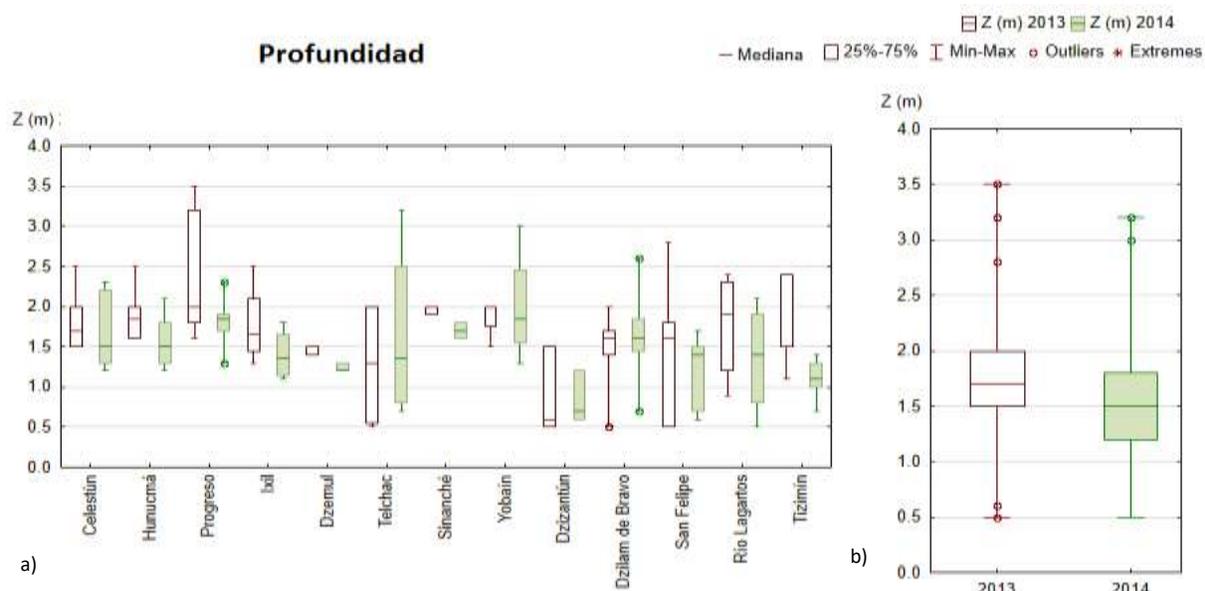


Figura 7.8 a) Diagrama de caja y bigote para la profundidad de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la profundidad de la ZCY.

## TEMPERATURA

La temperatura del agua, desde Celestún hasta Dzidzantún, para ambos años no presentó variabilidad. Sin embargo, desde Dzilam de Bravo hasta Tizimín esta variabilidad fue mayor y se observó que los valores de temperatura van descendiendo hacia el este de la ZCY para ambos años (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a**). Tizimín es el municipio que presentó menores valores de temperatura para ambos años. Espacialmente si existieron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) para cada año.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.b** se observa que las medianas para ambos años se observaron muy cercanas,  $30.3^{\circ}\text{C}$  y  $30.6^{\circ}\text{C}$  respectivamente. Interanualmente no existieron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ). Sin embargo, en 2014 se observaron valores atípicos y una mayor variabilidad. Esto muestra que el sistema en sí puede considerarse poco variable en términos de temperatura promedio, pero no así para la temperatura de la zona este de la Península.

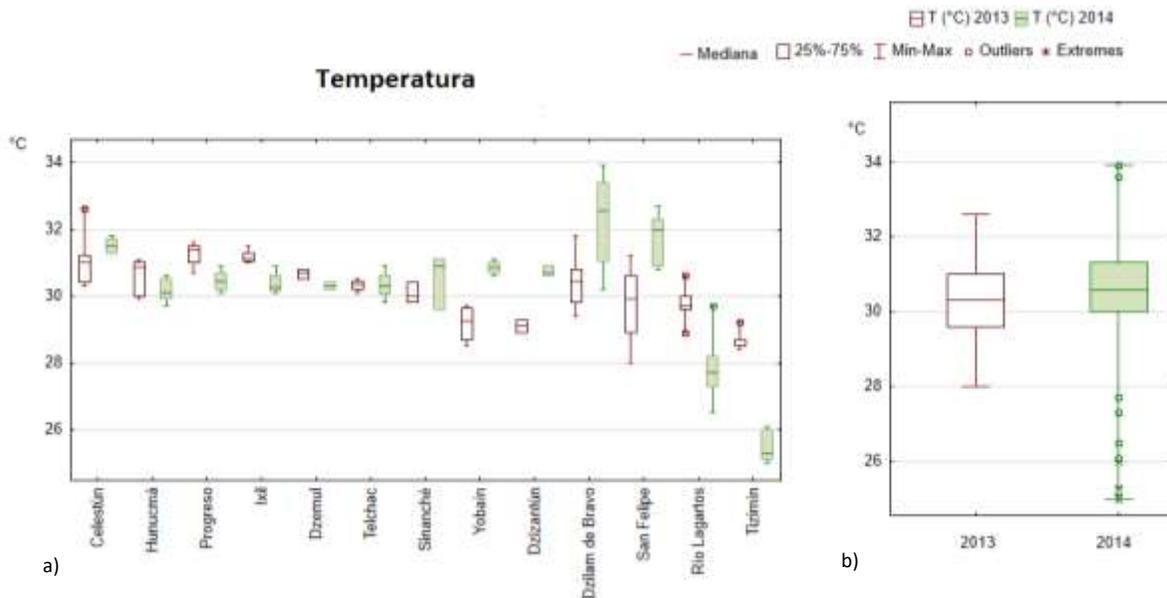


Figura 7.9 a) Diagrama de caja y bigote para la temperatura de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la temperatura de la ZCY.

## SALINIDAD

La salinidad como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a** presentó menores concentraciones en el 2013 que en 2014, a lo largo de toda la ZCY. Los municipios con mayor variabilidad y salinidad fueron Dzilam de Bravo y San Felipe para ambos años. Especialmente la salinidad si presento diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ).

La salinidad presentó una variación interanual con diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.b**), mostrando claramente aumento en la salinidad, ya que se tiene una mediana de 35 UPS para el 2013 y una mediana de 36.3 UPS para el 2014.

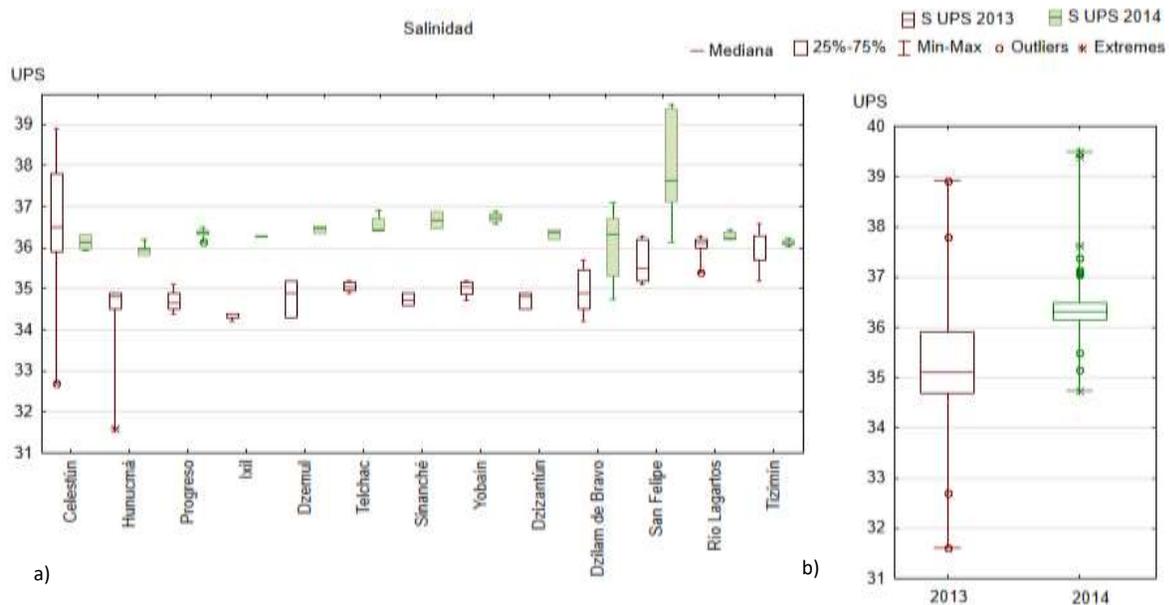


Figura 7.10) Diagrama de caja y bigote para la salinidad de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la salinidad de la ZCY

## OXIGENO DISUELTO (OD)

Espacialmente se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a**, que el OD presentó la misma tendencia para ambos años, siendo los municipios centrales en los que se registró menor concentración de OD y menor variabilidad. Los municipios del este (de Dzilam de Bravo a San Felipe) presentaron mayor variabilidad e incluso Rio Lagartos presentó valores extremos. Espacialmente existieron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) para cada año.

La concentración de OD presentó variación interanual con diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.b**. En el 2013 se registró menor concentración con una mediana de 4.79 mg/L y en el 2014 la mediana fue de 6.06 mg/L.

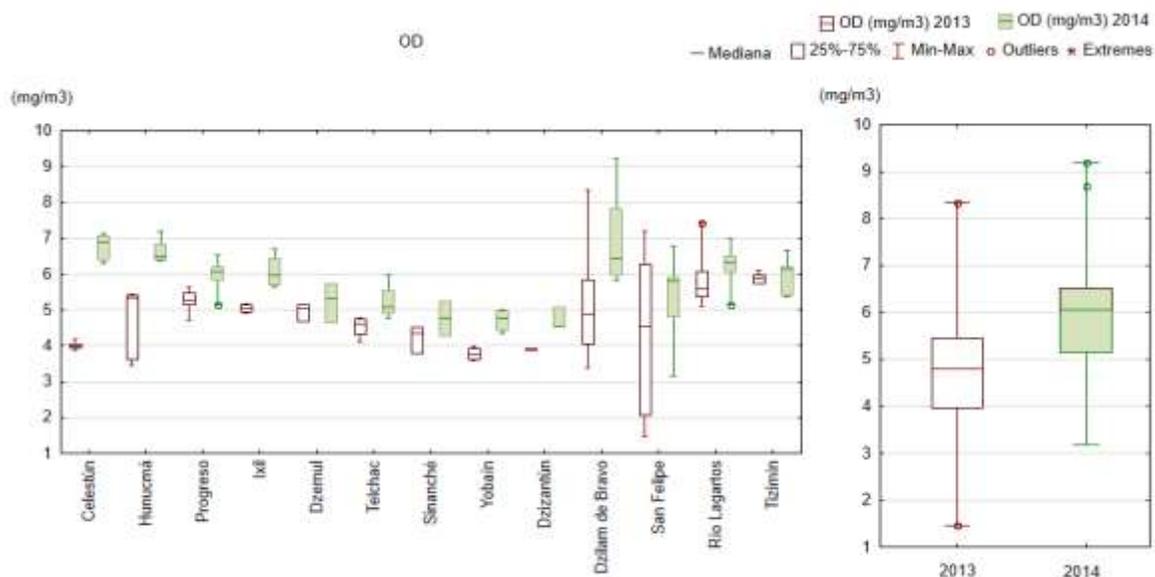


Figura 7.11 a) Diagrama de caja y bigote para el oxígeno disuelto de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual del oxígeno disuelto de la ZCY.

### 7.3 Nutrientes y Clorofila-a (Estadística Descriptiva)

Las concentraciones de nutrientes presentes en la ZCY indican la calidad del agua, mientras que la clorofila-a es un indicador de la productividad de la zona. La Tabla 7.2 muestra las concentraciones registradas para ambos años a lo largo de la ZCY.

Tabla 7.2 Estadística descriptiva de la concentración de nutrientes. Las concentraciones de los nutrientes están definidas en  $\mu\text{M}$  y la Cl-a en  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

Municipio		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 2013	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 2014	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> 2013	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> 2014	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 2013	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 2014	PRS 2013	PRS 2014	SiRS 2013	SiRS 2014	Cl-A 2013	Cl-A 2014
Celestún	mediana	1.25	0.84	0.20	0.19	2.63	0.94	0.19	0.18	8.50	4.10	2.51	0.32
	min	0.98	0.23	0.07	0.10	0.66	0.14	0.09	0.06	8.04	2.40	1.43	0.19
	max	4.39	2.37	0.36	0.40	26.68	1.31	0.28	0.35	9.64	16.54	4.10	0.74
	25%	1.06	0.51	0.08	0.17	1.13	0.56	0.13	0.18	8.14	2.70	2.35	0.29
	75%	2.18	1.41	0.26	0.29	6.82	1.13	0.28	0.29	9.41	7.60	3.47	0.74
Hunucmá	mediana	4.52	0.52	0.30	0.12	2.26	0.50	0.27	0.17	8.57	5.25	1.67	0.42
	min	4.12	0.05	0.17	0.06	1.32	0.31	0.03	0.12	6.23	2.90	1.12	0.11
	max	6.50	1.76	0.50	0.25	8.47	1.59	0.69	0.41	13.00	9.10	2.13	0.77
	25%	4.21	0.16	0.23	0.06	1.53	0.32	0.09	0.17	7.55	3.00	1.34	0.21
	75%	4.81	0.86	0.46	0.21	5.18	1.19	0.63	0.29	10.36	7.55	1.87	0.65
Progreso	mediana	1.31	0.31	0.16	0.19	1.28	0.63	0.45	0.32	6.09	6.70	1.45	0.22
	min	0.95	0.06	0.02	0.04	0.76	0.41	0.22	0.22	4.09	5.33	1.15	0.11
	max	2.16	1.06	0.31	0.48	5.58	1.27	1.53	0.41	10.14	43.40	2.09	0.38
	25%	1.14	0.11	0.07	0.08	1.18	0.44	0.31	0.22	4.68	5.50	1.34	0.21
	75%	1.54	0.70	0.24	0.25	2.45	0.81	0.53	0.35	7.32	30.53	1.76	0.24
Ixil	mediana	1.01	0.92	0.29	0.19	3.41	0.66	0.34	0.38	5.29	5.65	1.19	0.15
	min	0.54	0.14	0.04	0.12	0.84	0.18	0.25	0.29	3.27	2.78	0.94	0.10
	max	1.51	1.65	0.43	0.42	5.89	0.94	0.63	0.61	13.32	6.40	1.42	0.21
	25%	0.73	0.47	0.09	0.14	1.01	0.31	0.30	0.32	4.20	3.84	0.99	0.10
	75%	1.30	1.34	0.43	0.32	5.76	0.91	0.48	0.51	9.39	6.40	1.37	0.21
Dzemul	mediana	1.07	0.32	0.39	0.17	8.13	1.13	0.25	0.35	8.41	7.60	1.13	0.11
	min	0.62	0.15	0.33	0.10	3.00	0.63	0.08	0.22	6.91	6.20	1.11	0.10
	max	1.17	5.49	0.45	0.17	11.58	3.64	0.50	0.41	8.91	17.65	1.59	0.34
	25%	0.62	0.15	0.33	0.10	3.00	0.63	0.08	0.22	6.91	6.20	1.11	0.10
	75%	1.17	5.49	0.45	0.17	11.58	3.64	0.50	0.41	8.91	17.65	1.59	0.34

Municipio		NO <sub>3</sub> 2013	NO <sub>3</sub> 2014	NO <sub>2</sub> 2013	NO <sub>2</sub> 2014	NH <sub>4</sub> 2013	NH <sub>4</sub> 2014	PRS 2013	PRS 2014	SiRS 2013	SiRS 2014	CI-A 2013	CI-A 2014
Telchac	mediana	1.66	1.44	0.21	0.20	2.71	1.39	0.69	0.20	6.23	11.95	1.02	0.17
	min	0.95	0.11	0.13	0.10	1.37	1.13	0.38	0.11	4.41	4.11	0.93	0.10
	max	2.11	5.58	0.59	0.27	5.39	2.14	1.25	0.35	7.95	13.10	1.18	0.52
	25%	1.26	0.48	0.16	0.15	1.57	1.16	0.39	0.14	5.07	7.65	0.95	0.11
	75%	1.93	3.80	0.42	0.24	4.53	1.87	1.11	0.29	7.34	12.90	1.13	0.37
Sinanché	mediana	3.30	0.56	0.53	0.35	4.63	2.25	0.25	0.18	4.91	7.60	1.11	0.12
	min	2.55	0.45	0.46	0.29	3.66	2.25	0.22	0.18	4.64	6.50	1.05	0.10
	max	4.50	1.30	0.75	0.42	11.34	3.63	1.00	0.29	6.68	12.20	2.23	0.21
	25%	2.55	0.45	0.46	0.29	3.66	2.25	0.22	0.18	4.64	6.50	1.05	0.10
	75%	4.50	1.30	0.75	0.42	11.34	3.63	1.00	0.29	6.68	12.20	2.23	0.21
Yobain	mediana	2.40	2.09	0.41	0.28	4.70	1.45	0.52	0.17	6.09	7.90	1.43	0.56
	min	1.54	0.76	0.34	0.10	3.61	0.69	0.23	0.11	5.73	4.10	0.86	0.02
	max	3.09	3.03	0.64	0.81	5.37	3.05	1.50	0.53	6.18	10.43	1.47	1.19
	25%	1.96	1.06	0.36	0.11	3.89	0.75	0.24	0.14	5.91	4.95	1.12	0.07
	75%	2.75	2.93	0.54	0.62	5.29	2.57	1.14	0.35	6.14	10.21	1.47	1.09
Dzidzantún	mediana	3.05	1.59	0.40	0.10	6.09	1.75	0.29	0.17	5.11	7.16	1.83	0.52
	min	2.35	0.44	0.28	0.04	2.66	0.73	0.09	0.11	2.91	5.00	0.29	0.10
	max	4.88	4.15	0.44	0.21	8.26	2.00	0.41	0.39	7.50	10.10	1.99	0.54
	25%	2.53	1.01	0.32	0.06	3.97	1.16	0.18	0.14	3.39	5.83	1.04	0.31
	75%	4.13	2.88	0.44	0.17	7.58	1.96	0.36	0.28	6.93	8.88	1.93	0.53
Dzilam de Bravo	mediana	2.42	0.79	0.25	0.08	2.55	0.73	0.31	0.11	3.09	7.77	1.05	0.21
	min	0.59	0.27	0.08	0.04	1.58	0.23	0.05	0.03	2.09	3.22	0.04	0.10
	max	4.13	3.58	0.43	0.21	4.53	1.50	0.72	0.22	16.68	11.66	1.99	0.55
	25%	0.82	0.54	0.14	0.06	1.79	0.41	0.05	0.03	2.55	4.33	0.60	0.10
	75%	3.16	2.14	0.39	0.15	3.68	1.00	0.38	0.17	11.14	9.32	1.70	0.21
San Felipe	mediana	1.51	0.82	0.16	0.12	2.55	0.59	0.22	0.11	8.23	4.40	0.68	0.32
	min	0.74	0.29	0.06	0.01	0.50	0.09	0.05	0.06	3.41	3.11	0.13	0.21
	max	2.51	1.92	0.44	0.19	6.61	1.00	0.42	0.47	14.68	22.64	1.57	0.52
	25%	1.02	0.36	0.08	0.04	0.66	0.32	0.14	0.06	6.14	3.77	0.34	0.22
	75%	1.78	1.41	0.20	0.19	3.97	0.64	0.38	0.39	10.04	9.66	1.33	0.44
Río Lagartos	mediana	1.46	1.03	0.09	0.04	0.71	0.27	0.27	0.06	3.91	4.11	0.87	0.53
	min	1.18	0.21	0.02	0.02	0.32	0.09	0.13	0.06	1.09	2.11	0.29	0.10
	max	2.25	1.40	0.15	0.10	4.16	0.77	0.69	0.17	5.95	7.99	1.86	0.67
	25%	1.29	0.59	0.06	0.02	0.39	0.18	0.13	0.06	2.55	3.44	0.56	0.21
	75%	2.05	1.18	0.10	0.08	1.79	0.64	0.41	0.11	5.32	6.33	1.69	0.66
Tizimín	mediana	1.33	1.07	0.03	0.10	0.63	0.23	0.75	0.11	2.27	4.22	1.92	0.45
	min	0.51	0.37	0.01	0.02	0.47	0.14	0.16	0.03	1.95	3.66	1.03	0.11
	max	1.65	2.18	0.10	0.25	12.32	0.81	0.81	0.24	7.82	11.77	3.08	1.40
	25%	1.24	1.05	0.02	0.04	0.47	0.18	0.47	0.03	2.23	4.10	1.50	0.11
	75%	1.39	1.51	0.05	0.12	1.13	0.68	0.81	0.17	6.41	8.66	2.63	0.92

## Nitrato

Especialmente para el 2013 en el municipio de Hunucmá se registró la mayor concentración de nitrato, mientras que la menor mediana se observó en Dzemul en ambos años. Sin embargo, en el 2014 este municipio presenta mayor variabilidad, consecuencia de la alta concentración registrada en una estación de muestreo como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a**. La concentración de nitrato especialmente para el 2013 si presentó diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ), sin embargo, en el 2014 no se observaron.

La concentración de nitrato en el agua de la ZCY para el 2013 se registró entre 0.5 y 6.4  $\mu\text{M}$ , y para el siguiente año entre 0.05 y 5.6  $\mu\text{M}$ . En el 2014 se presentaron valores atípicos y extremos con menor variabilidad. Interanualmente si existieron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ), la mediana mayor se registró el 2013 con una concentración de 1.6  $\mu\text{M}$  y para el 2014 fue de 0.84  $\mu\text{M}$ , como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.b**.

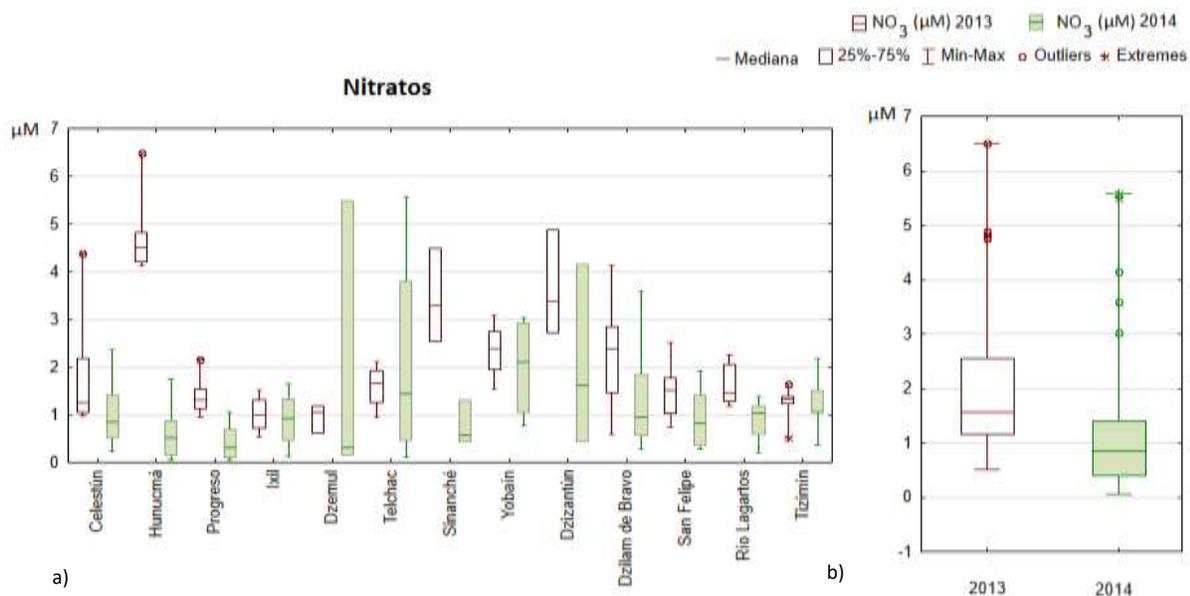


Figura 7.12 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de nitrato de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de nitrato de la ZCY.

## Nitrito

El nitrito presentó una tendencia similar a el nitrato, mayor concentración en los municipios del centro de la ZCY, con diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) para ambos años. Sinanché presentó mayor concentración de nitrito para ambos años y la menor concentración se registró para Tizimín en 2013 y Río Lagartos en 2014 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a.**

Como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.b** la concentración mediana en el 2013 es mayor que en el 2014,  $0.21 \mu\text{M}$  y  $0.12 \mu\text{M}$  respectivamente. Respecto a la variabilidad, esta es menor para el 2014 pero presenta más valores atípicos y extremos.

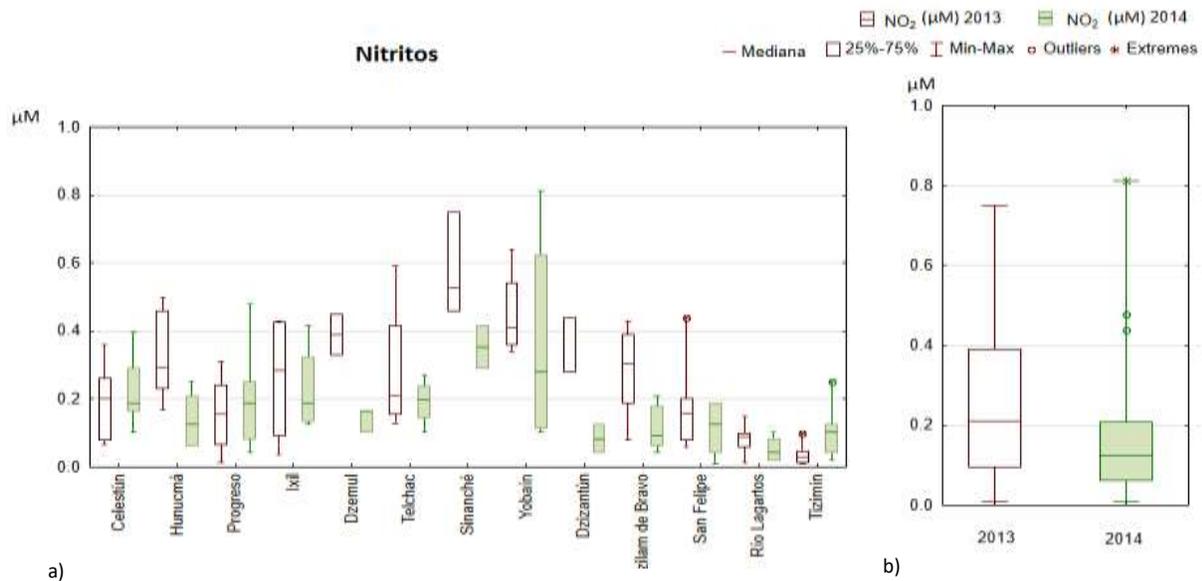


Figura 7.13 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración del ion amonio de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración del ion amonio de la ZCY.

## Ion Amonio

La concentración de ion amonio en el agua de la ZCY es mayor en los municipios centrales. En el año 2013 se registró el mayor valor atípico en el municipio de Celestún, el municipio con mayor concentración es Dzemul y en el 2014 las menores concentraciones se registraron en Tizimín. Como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a**, ambos años presentaron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ).

La concentración del ion amonio presento la misma interanualidad que el nitrito y nitrato, es decir se cuantificaron menores concentraciones en el 2014 con diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ), como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.b**. La variabilidad para el 2013 fue mayor que en el 2014 y las medianas para cada año fueron de  $2.63 \mu\text{M}$  y  $0.73 \mu\text{M}$  respectivamente.

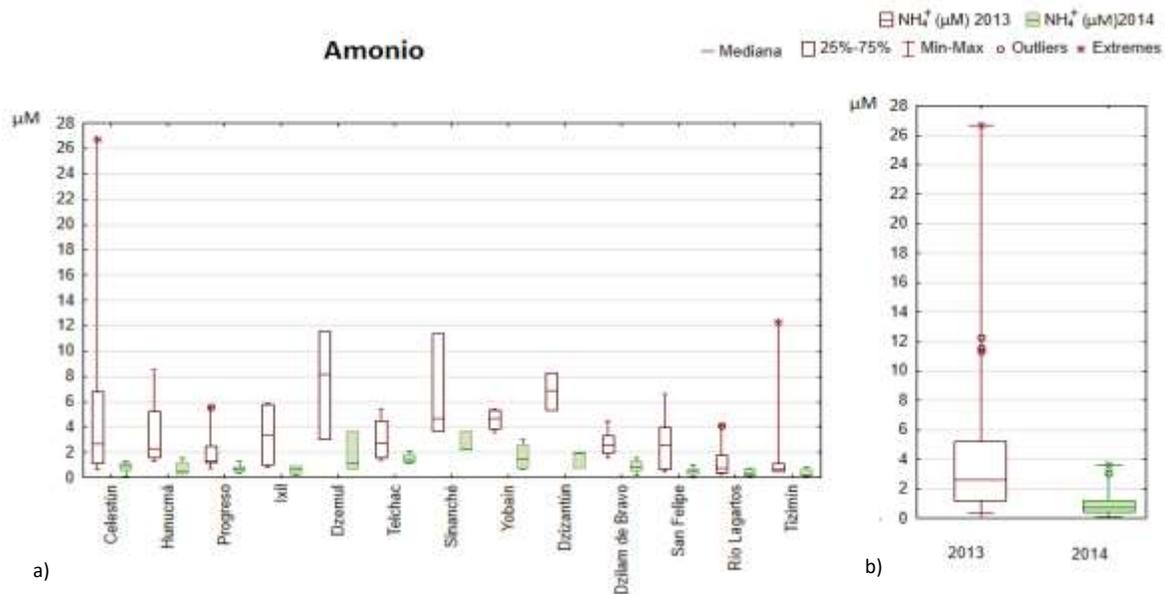


Figura 7.14 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de nitrato de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de nitrato de la ZCY.

## Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID)

La concentración de NID es la suma de las concentraciones de  $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$ . Por lo tanto, su variación espacial e interanual de manera general presentó el mismo comportamiento que el de cada especie, mayores concentraciones en los municipios del centro de la ZCY (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a**). Interanualmente en el 2013 presentó la mayor variabilidad y mediana respecto al 2014.

Es importante señalar que el  $\text{NO}_2^-$  presenta un menor aporte a la concentración de NID para ambos años, esto es debido a que esta especie es inestable termodinámicamente en el ambiente. En el 2013 el  $\text{NH}_4^+$  es la forma del N con mayor concentración y en el 2014 sucedió lo mismo a excepción de los municipios de Tizimín, Río Lagartos y San Felipe, donde la mayor concentración de N se encuentra en forma de  $\text{NO}_3^-$ .

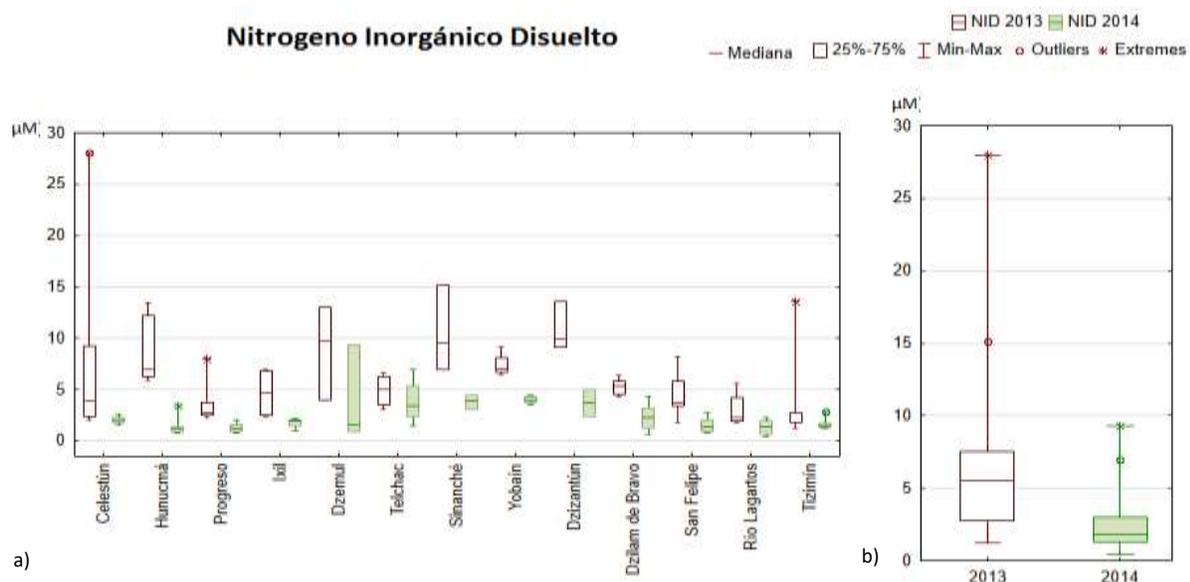


Figura 7.15 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de NID de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de nitrato de la ZCY.

## Fósforo Reactivo Soluble (PRS)

El fósforo reactivo soluble (PRS) espacial e interanualmente presentó menor concentración y variabilidad en el 2014 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Telchac, Yobain y Tizimín presentaron las medianas más altas, 0.68  $\mu\text{M}$ , 0.51  $\mu\text{M}$  y 0.75  $\mu\text{M}$  respectivamente, así como la mayor variabilidad para el 2013. Progreso con 0.45  $\mu\text{M}$  e Ixil con 0.34  $\mu\text{M}$  presentaron las medianas más altas para el 2014. Especialmente si existieron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a**). Para el 2013 en el agua de la ZCY se registró una concentración de 0.3 a 1.5  $\mu\text{M}$  con una mediana de 0.31  $\mu\text{M}$ . Para el 2014 el intervalo de concentración fue de 0.03 a 0.61  $\mu\text{M}$  con una mediana de 0.17  $\mu\text{M}$  como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.b**.

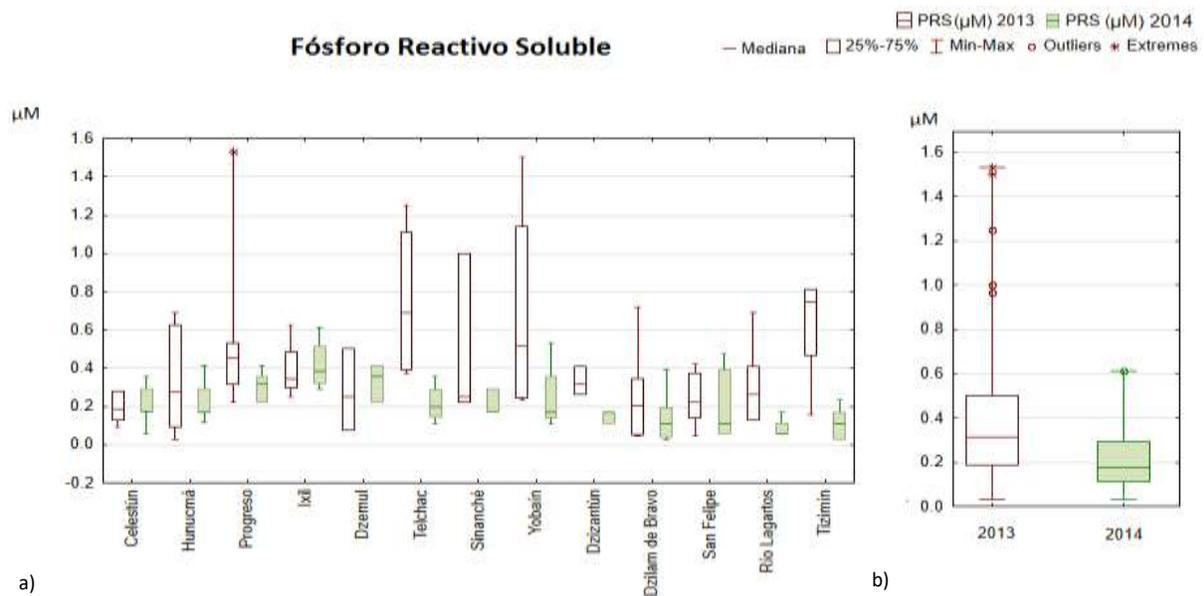


Figura 7.16 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración del fósforo reactivo soluble de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de fósforo reactivo soluble de la ZCY.

Relación Redfield NID:PRS

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la relación Redfield que se determinó para las aguas de la zona costera de los municipios de la ZCY. En el municipio de Hunucmá se registró una relación con una mediana de 42 y un intervalo de 9.2 a 208, siendo el municipio con la mayor variabilidad y mediana para el 2013. En el municipio de Celestún para ese mismo año se reportó la mayor relación con un valor de 299.

La relación Redfield N:P en la ZCY registró un intervalo de 1.6 a 299 con una mediana de 16 para 2013, y para el 2014 un intervalo de 1.9 a 99 con una mediana de 11.4, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.b**, por lo que de manera general el nutriente limitante para la ZCY es el P.

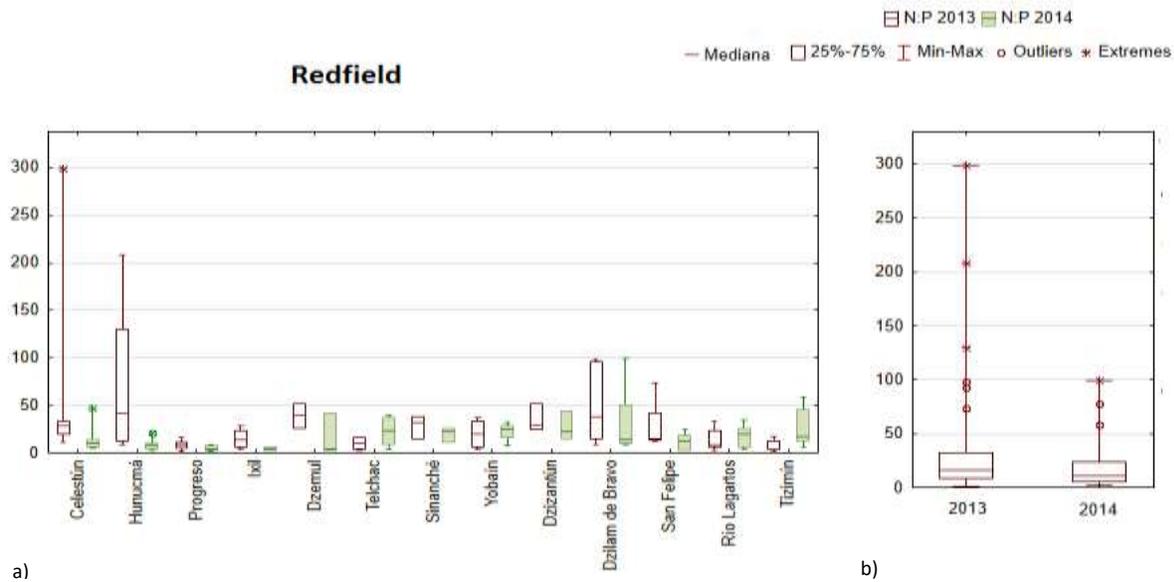


Figura 7.17 a) Diagrama de caja y bigote para la relación de Redfield de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de relación de Redfield de la ZCY.

### Sílice Reactivo Soluble (SiRS)

La concentración de SiRS en la ZCY se reportó con una mediana de 6.2µM para ambos años, sin embargo, se observó mayor variabilidad para el año 2014, el cual incluso presenta valores atípicos. El SiRS como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, no presentó diferencias significativas interanuales ( $p \leq 0.05$ ).

En el 2013 la mayor mediana se reportó en San Felipe y en Telchac para el 2014, con valores de 8.22 µM y de 11.95µM respectivamente. En el 2014 en Progreso se registró una concentración máxima de 43.3µM siendo la mayor concentración de toda la ZCY para ambos años. Especialmente el 2013 si presentó diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ), caso contrario con el 2014.

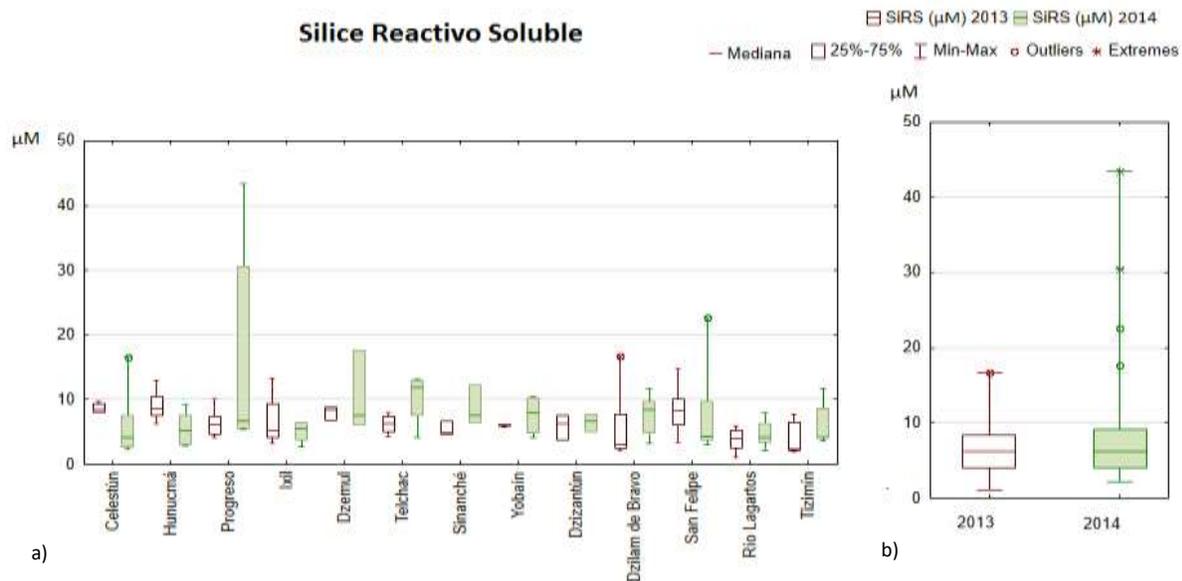


Figura 7.18 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de sílice reactivo soluble de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de sílice reactivo soluble de la ZCY

## Clorofila a.

La Clorofila-*a* es un pigmento asociado a la biomasa fitoplanctonica del sistema. Especialmente se registró mayor biomasa de fitoplancton en Celestún para el 2013 y en Yobain para el 2014, ya que estos municipios presentaron la mayor mediana para cada año con 2.5 mg m<sup>-3</sup> y 0.56 mg m<sup>-3</sup> respectivamente, (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a**). Especialmente en el 2013 si existieron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) pero para el 2014 no.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.b** se observa que las medianas para cada año, 2013 y 2014, son 1.34 mg m<sup>-3</sup> y 0.22 mg m<sup>-3</sup> respectivamente, con un intervalo en el 2013 de 0.04 a 4.1 mg m<sup>-3</sup> y de 0.02 a 1.4 mg m<sup>-3</sup> para el 2014. Existió menor variabilidad para el 2014 e interanualmente si existieron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ).

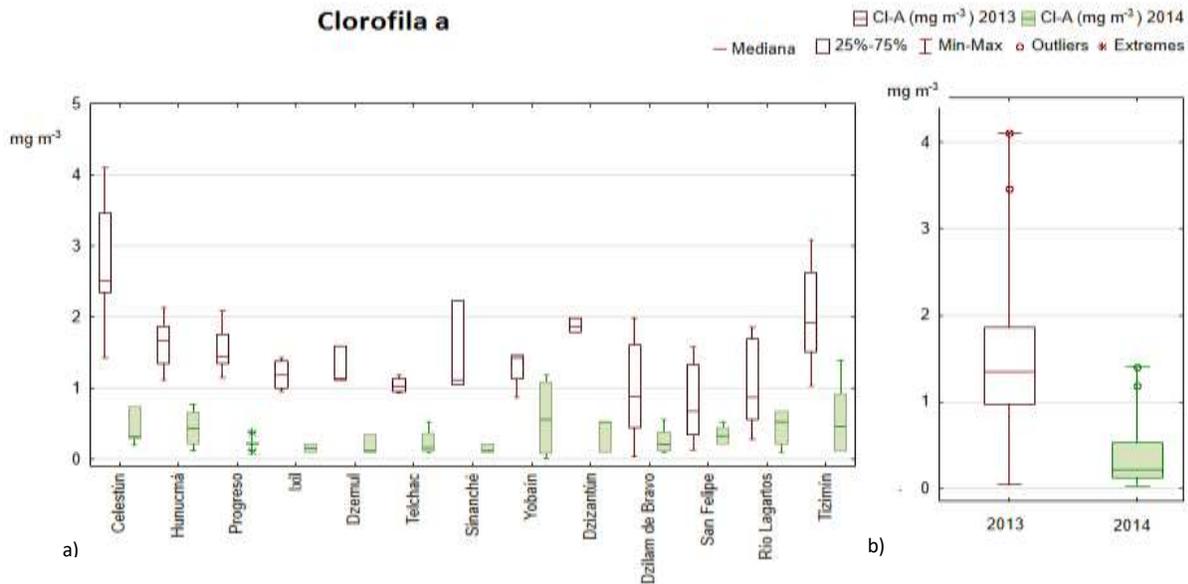


Figura 7.19 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de la clorofila-a de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de clorofila-a de la ZCY.

### Calidad del agua con base en el estado trófico.

La evaluación de la calidad del agua de la ZCY se realizó mediante la obtención del estado trófico usando el índice TRIX. Yobain fue el municipio con la mayor mediana con un valor de 4.7 y la menor calidad de agua de toda la ZCY en el 2013. Rio Lagartos y Dzilam de Bravo fueron los municipios con la mejor calidad del agua, con una mediana de 3.8 y 3.7 respectivamente en el índice TRIX. Sin embargo, Dzilam de Bravo fue el municipio con mayor variabilidad. En el 2014 la calidad de agua fue buena, Yobain nuevamente presentó la mayor mediana con un valor de 3.6, y Rio Lagartos y Dzilam de Bravo fueron los municipios con la mejor calidad de agua para la ZCY en el 2014 con una mediana de 2.4

). En el 2013 si hay diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ), en 2014 no fue así.

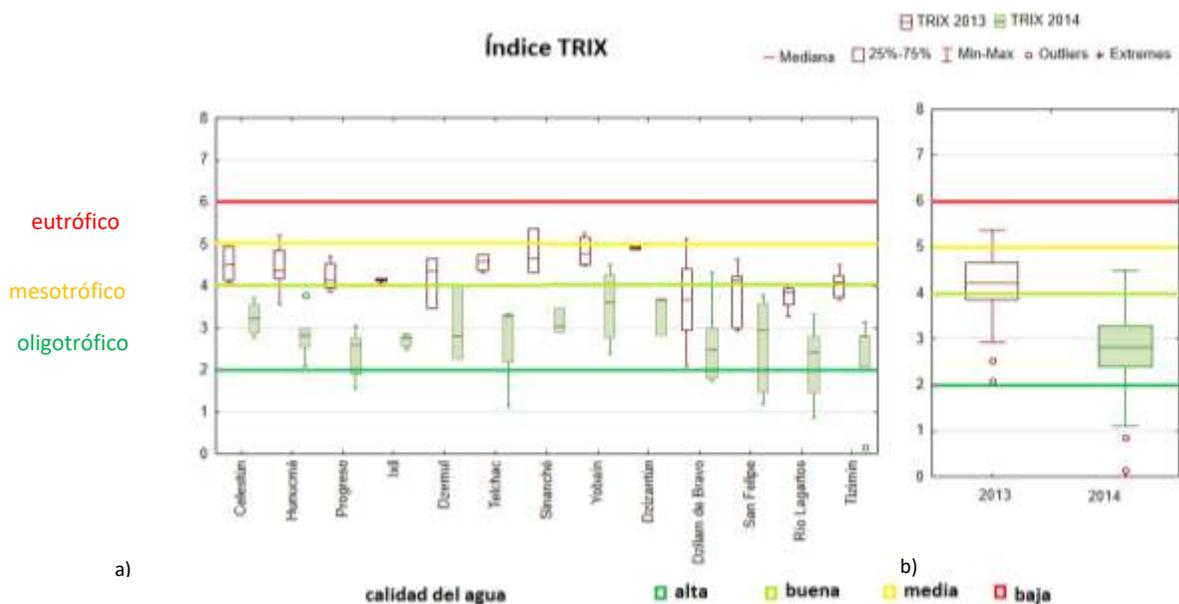


Figura 7.20 a) Diagrama de caja y bigote para el índice TRIX de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual para el índice TRIX de la ZCY.

Interanualmente en toda la ZCY la calidad del agua y el estado trófico mejoró. Como se observa en la

b. En la ZCY en el 2013 se obtuvo una calidad del agua regular con valores de índice TRIX entre 2 y 5, mientras que en 2014 entre 1.1 y 4.5. La mediana en cada año se registró en diferentes estados tróficos, para el 2013 a pesar de que el nivel trófico es medio, la calidad del agua permanece aceptable; para 2014 hay mejor calidad del agua y un estado trófico bajo.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar la representación espacial de la calidad del agua de la ZCY respecto a cada municipio. En el 2013 los municipios con un estado trófico mejor son Dzilam de Bravo y Rio Lagartos ya que son oligotróficos, es decir de baja producción, mientras que el resto presentan un estado mesotrófico. Para el 2014 todos los municipios son oligotróficos. Sin embargo, se puede observar que puntualmente existen aportes a la ZCY que desfavorecen la calidad del agua incrementando el nivel trófico.

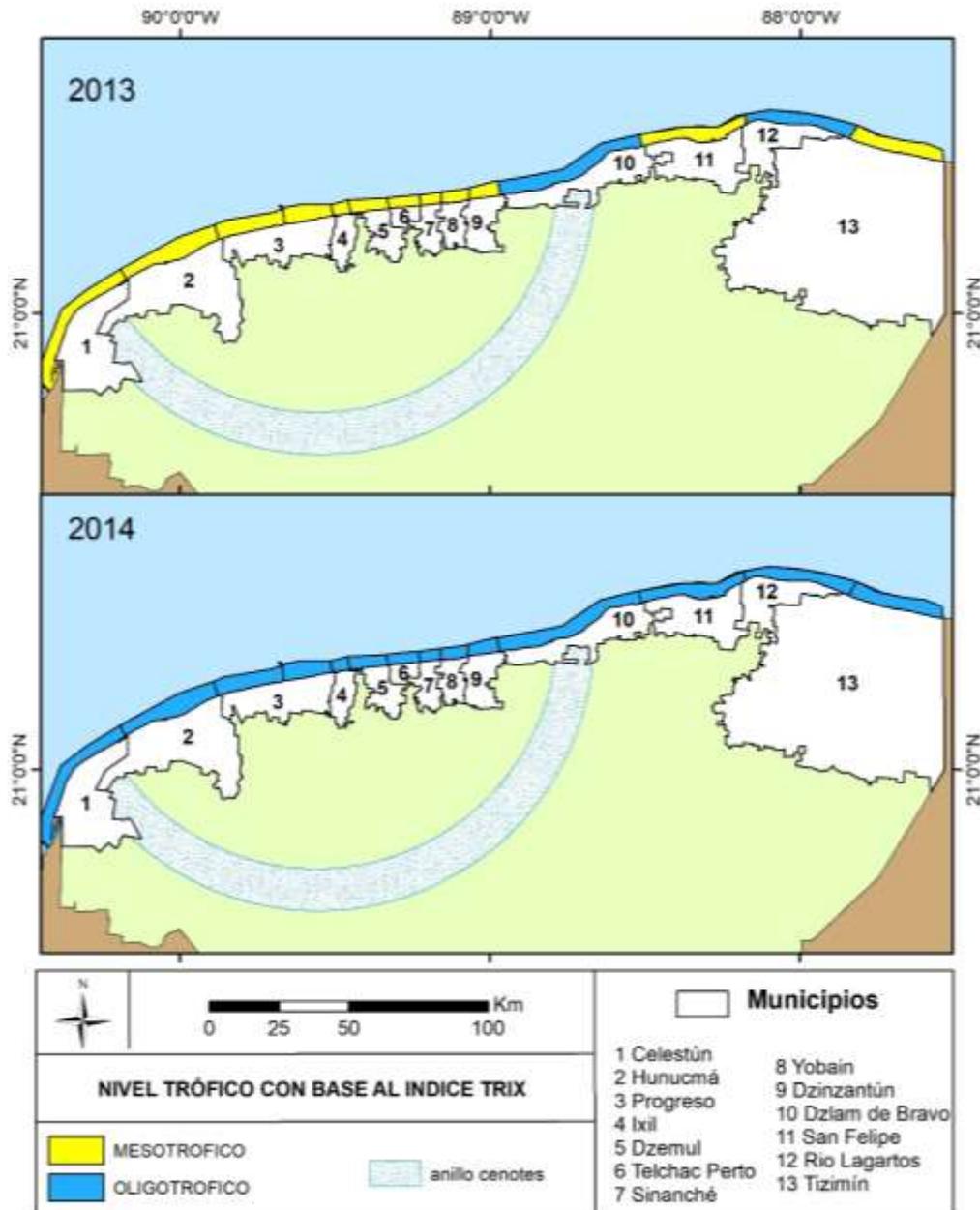


Figura 7.21 Representación espacial del índice de TRIX para el año 2013 y 2014

## 7.4 Procesos espaciales e interanuales de Nutrientes (Análisis multivariado)

### Nutrientes y fisicoquímicos 2013

El análisis de componentes principales (ACP) permitió establecer la relación entre las variables del sistema. El análisis de factores determinó el peso que cada variable significativa tuvo dentro de un proceso en particular y por último el análisis de agrupamiento, nos identificó los sitios cuyas características y procesos fueron similares.

En el ACP para el 2013 se explicó el 62% total de la variabilidad observada en los dos primeros componentes; el primer factor explicó el 39.40% y el segundo factor explicó el 22.60%. Las variables significativas representadas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.7.28** para el 2013 fueron,  $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , OD, PRS, S, SiRS y T. Se observó relación directa entre  $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  cuya relación es inversa al OD y la salinidad (S) (Figura 7.22).

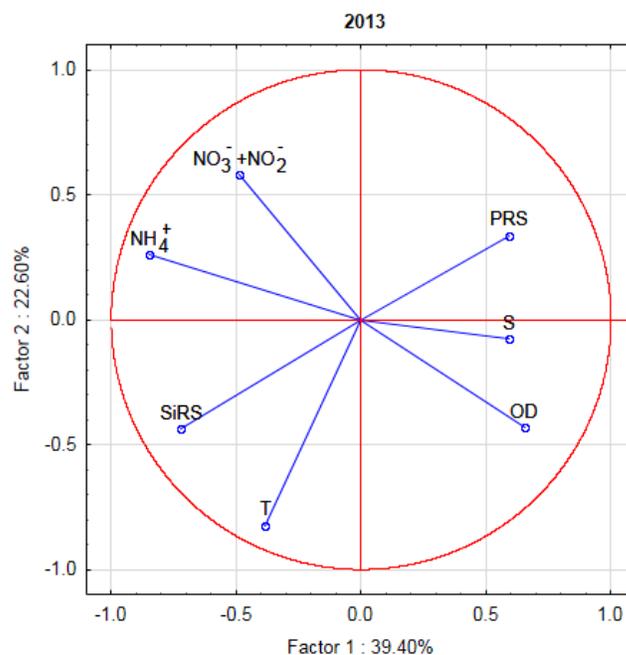


Figura 7.22 Diagrama de análisis de componentes principales con la concentración de nutrientes y parámetros fisicoquímicos para la ZCY 2013

El análisis de factores (Tabla 7.3), explicó el 62% de la variabilidad mediante dos factores. Las variables incluidas en el análisis fueron aquellas que fueron significativas en el ACP. El factor 1 explicó el 33.0 % relacionandose al OD inversamente con la concentración de  $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ . El factor 2 explicó el 29.0% y se relacionó a la temperatura directamente con la concentración de SiRS e inversamente con la concentración de PRS. La salinidad no fue significativa en ningún factor.

Tabla 7.3 Análisis de factores para la ZCY 2013 de la concentración de nutrientes y parámetros fisicoquímicos (Los números en rojo representan las variables que poseen mayor peso en cada factor).

VARIABLE	FACTOR 1	FACTOR 2
T	-0.23	<b>-0.88</b>
S	-0.50	0.32
OD	<b>-0.78</b>	0.08
$\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$	<b>0.75</b>	0.13
SiRS	0.28	<b>-0.80</b>
PRS	-0.24	<b>0.65</b>
$\text{NH}_4^+$	<b>0.82</b>	-0.34
Expl.Var	2.28	2.06
Prp.Totl	0.33	0.29
Varimax normalizada Componentes Principales (Valor significativo >0.65)		

El análisis de agrupamiento realizado con estas variables para el 2013 dio como resultado la formación de tres zonas (Fig. 7.23). Se observa que los municipios de Tizimín, Rio Lagartos y Progreso integraron la zona definida como 1N; Yobain, Dzidzantún, Sinanché, Dzilam de Bravo y Hunucmá se encuentran en la zona 2N y finalmente Dzemul, Telchac, Ixil, San Felipe, y Celestún conformaron la zona 3N (Fig. 7.24).

Las principales diferencias entre las tres zonas están dadas con base en la concentración de OD,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ , PRS y SiRS. La zona 1 N presentó la menor mediana de  $\text{NH}_4^+$  (2.01  $\mu\text{M}$ ) y SiRS (4.73  $\mu\text{M}$ ), así como la mayor mediana de OD (5.62  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) y PRS (0.48  $\mu\text{M}$ ). En el grupo 2N, las concentraciones de las formas inorgánicas del N fueron mayores en sus tres especies ( $\text{NO}_3^- +$

$\text{NO}_2^-$ ,  $3.64 \mu\text{M}$  y  $\text{NH}_4^+$ ,  $3.67\mu\text{M}$ ), lo que se corroboró con la menor relación Redfield N:P. La zona 3N presento la mayor mediana de SiRS.

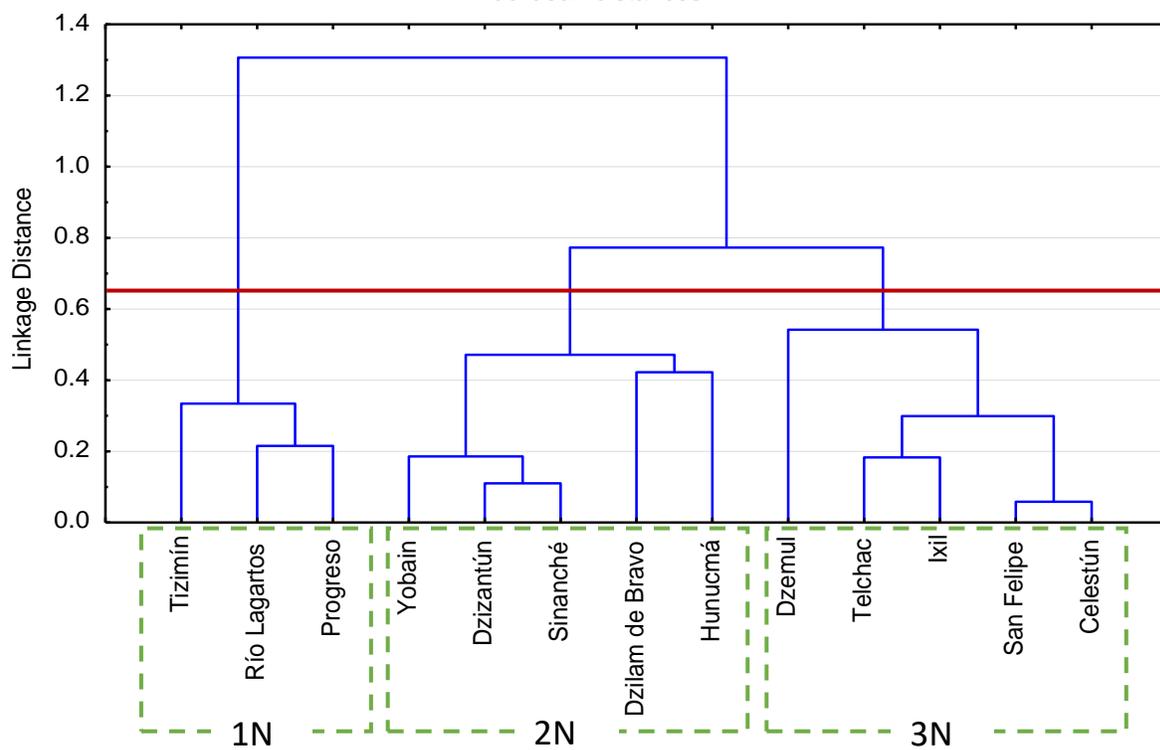


Figura 7.23 Diagrama de Cluster con el método de Ward's y distancias euclidianas para la ZCY 2013 de la concentración de nutrientes y parámetros fisicoquímicos

Tabla 7.4 Medianas de fisicoquímicos y nutrientes de la ZCY para el 2013 de los grupos encontrados por el análisis multivariado.

Grupo	Z (m)	T (°C)	S UPS	OD (mg/m3)	$\text{NH}_4^+$ $\mu\text{M}$	$\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ $\mu\text{M}$	PRS $\mu\text{M}$	Redfield	SiRS $\mu\text{M}$	Cl- $\alpha$ $\text{mg}^*\text{m}^{-3}$
1N	1.95	29.8	35.8	5.62	2.01	1.54	0.48	10.2	4.73	1.48
2N	1.70	30.0	34.8	4.18	3.67	3.64	0.28	29.7	6.14	1.47
3N	1.6	30.6	35.2	4.5	3.00	1.51	0.28	19.3	8.14	1.18

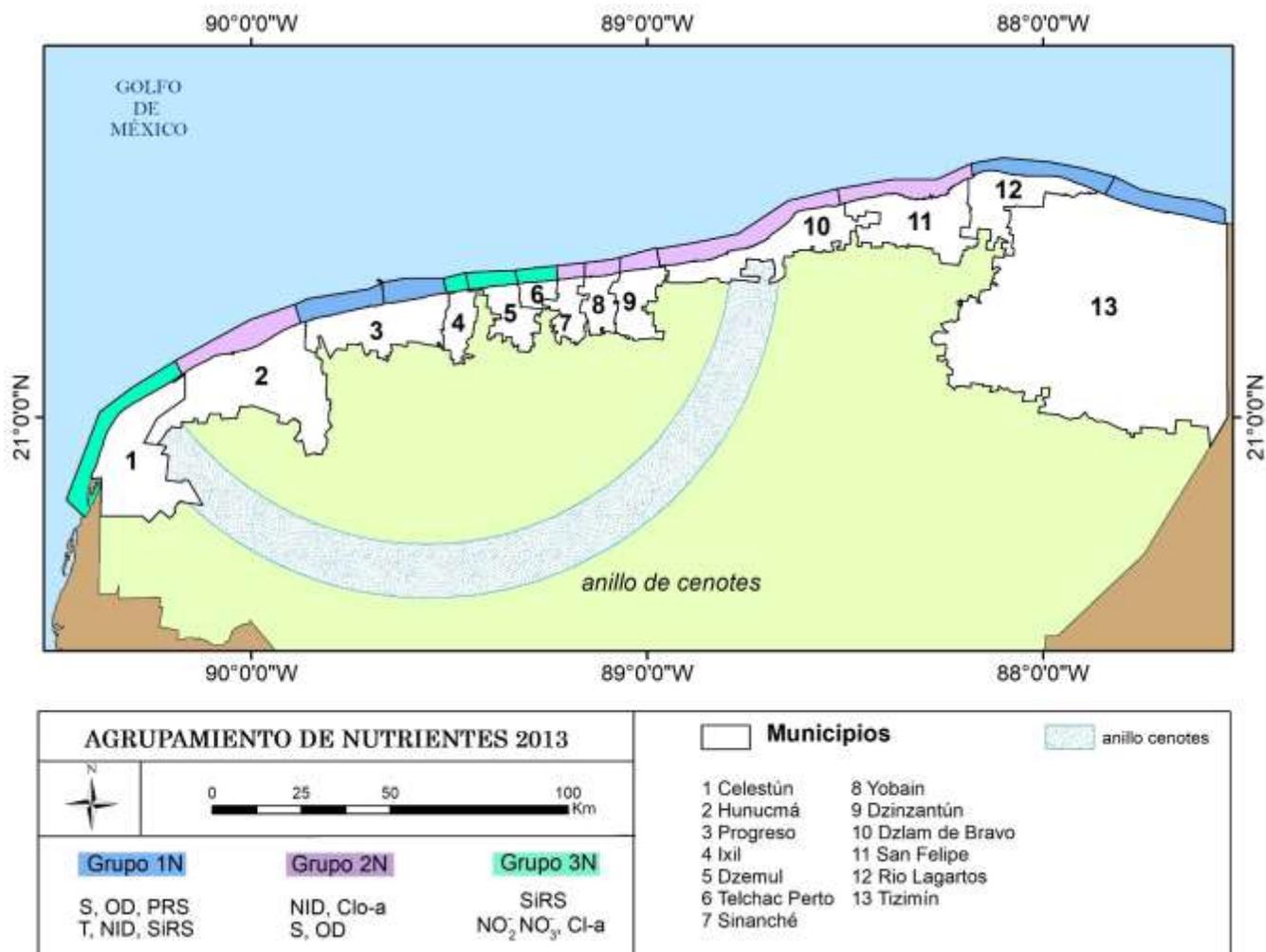


Figura 7.24 Representación espacial de los grupos formados por el análisis de agrupamiento de nutrientes para la ZCY 2013

### Nutrientes y fisicoquímicos 2014

El ACP para el 2014 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**7.25) explicó el 72.77% total de la variabilidad observada; el primer factor explicó el 43.44% y el segundo factor explicó el 29.33%. Las variables significativas en 2014 fueron: OD, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, SiRS, T, PRS y Cl-a. Se observa una relación directa entre NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y SiRS que su vez es inversa con el OD. La Cl-a presento una relación inversa al PRS y relación directa con NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + NO<sub>2</sub><sup>-</sup>.

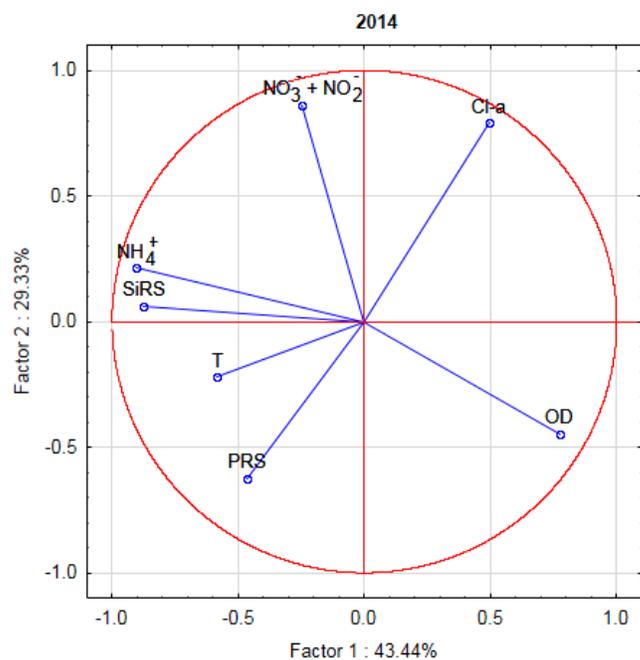


Figura 7.25 Diagrama de análisis de componentes principales con la concentración de nutrientes y parámetros fisicoquímicos para la ZCY 2014

El análisis de factores (Tabla 7.5) explicó el 74% de la variabilidad mediante dos factores. El factor 1 explicó el 41% y relacionó inversamente al SiRS y  $\text{NH}_4^+$  con el OD. El factor 2 se relacionó al PRS inversamente con  $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$  y Cl-a. La temperatura en el análisis de factores al estar en ambos factores sin valor significativo, nos indica que tiene relación con ambos.

Tabla 7.5 Análisis de factores para la ZCY 2014 de la concentración de nutrientes y parámetros fisicoquímicos (Los números en rojo representan las variables que poseen mayor peso en cada factor).

VARIABLE	FACTOR 1	FACTOR 2
SiRS	0.83	0.30
$\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$	0.57	-0.69
$\text{NH}_4^+$	0.91	0.17
T	0.45	0.44
OD	-0.89	0.10
PRS	0.17	0.76
Cl-a	-0.14	-0.92
<b>Expl.Var</b>	2.88	2.21
<b>Prp.Totl</b>	0.41	0.33
Varimax normalizada Componentes Principales (Valor significativo >0.65)		

El análisis de agrupamiento para la variación espacial del 2014 definió 3 zonas principales, (Fig. 7.26). En la zona 4N están Dzidzantún, Yobain y Telchac. La zona 5N lo conforman Sinanché, Dzemul, Dzilam de Bravo, Ixil y Progreso finalmente la zona 6N Tizimín, Río Lagartos, San Felipe, Hunucmá y Celestún (Fig. 7.27).

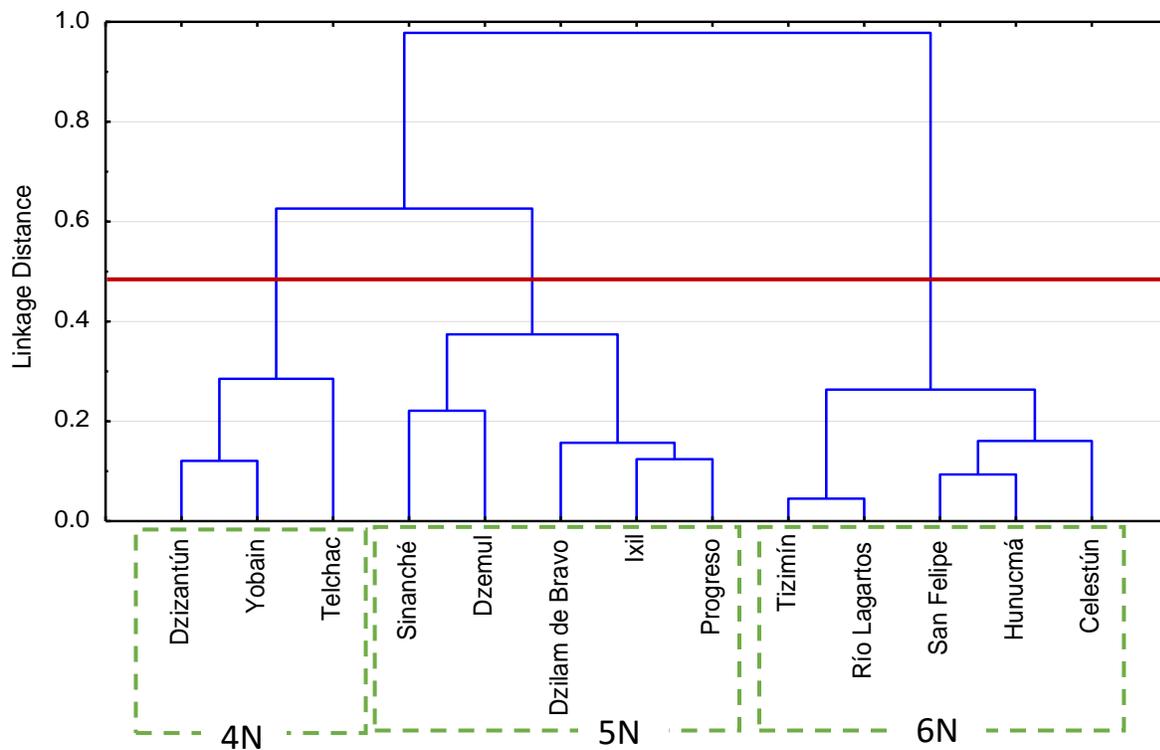


Figura 7.26 Diagrama de Cluster con el método de Ward's y distancias euclidianas para la ZCY 2014 de la concentración de nutrientes y parámetros fisicoquímicos

Las principales diferencias entre los grupos esta dada con base en el OD,  $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- \text{NH}_4^+$ , PRS y SiRS (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.7.6). El grupo 4N presentó la menor mediana de OD ( $4.95\text{mg}/\text{m}^3$ ) y la mayor concentración de nutrientes (SiRS  $7.6\ \mu\text{M}$ ,  $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$   $1.73\ \mu\text{M}$  y  $\text{NH}_4^+$   $1.59\ \mu\text{M}$ ). La zona 6N, presento la menor concentración de SiRS ( $4.26\ \mu\text{M}$ ) y la mayor concentración de OD ( $6.36\ \text{mg}/\text{m}^3$ ), sin embargo, a pesar de la baja concentración de nutrientes este grupo presento la mayor productividad asociada a la concentración de Cl- $\alpha$ .

Tabla 7.6 Medianas de fisicoquímicos y nutrientes de la ZCY para el 2014 de los grupos encontrados por el análisis multivariado

Grupo	Z (m)	T (°C)	S UPS	OD (mg/m3)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (μM)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (μM)	PRS (μM)	Redfield	SiRS (μM)	Cl-a (mg*m <sup>-3</sup> )
4N	1.3	30.7	36.5	4.95	1.59	1.73	0.17	23.6	7.66	0.21
5N	1.6	30.7	36.4	5.96	0.84	0.85	0.26	8.86	6.70	0.21
6N	1.4	30.4	36.2	6.36	0.56	1.01	0.17	11.6	4.26	0.37

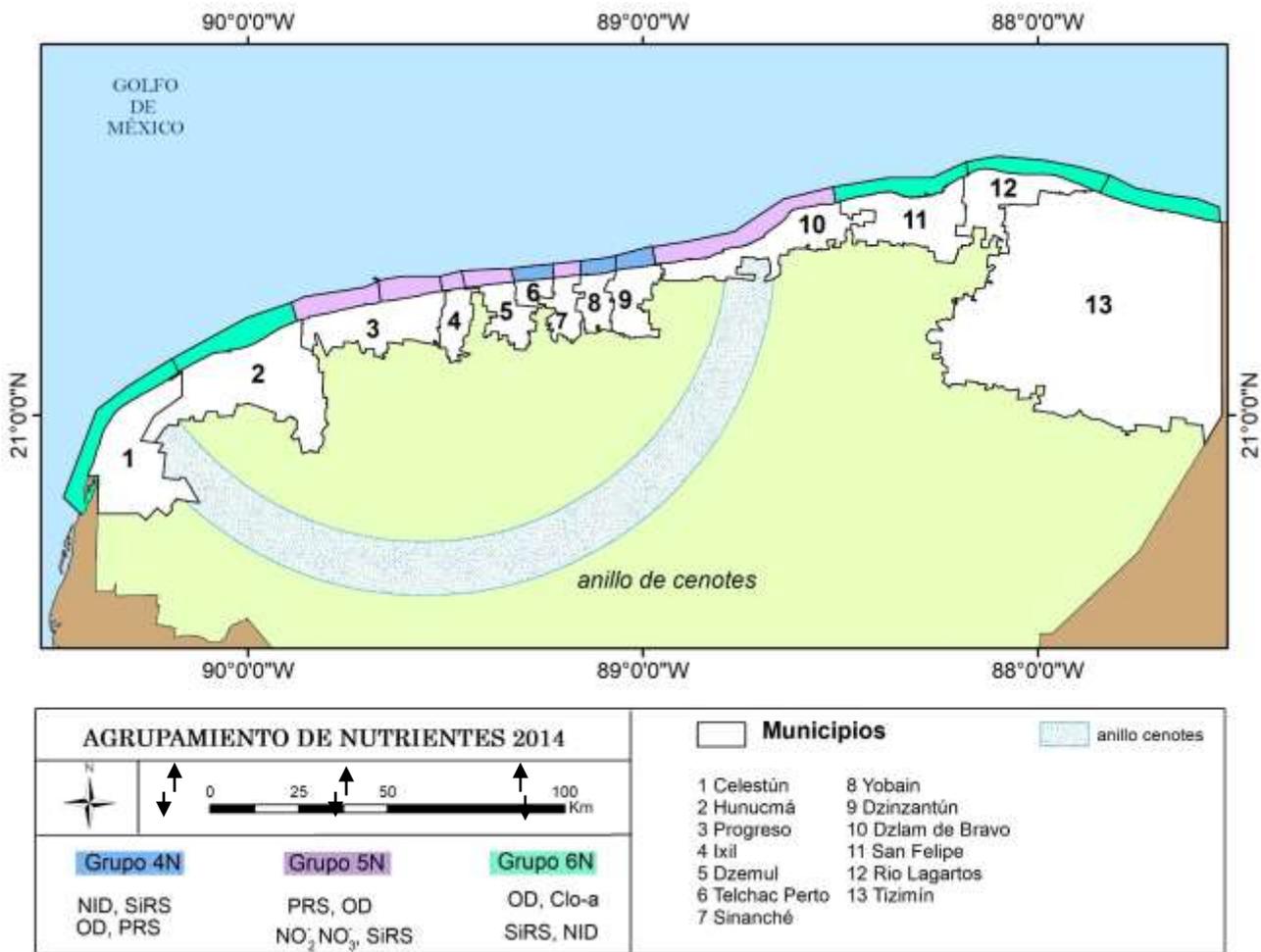


Figura 7.27 Representación espacial de los grupos formados por el análisis de agrupamiento de nutrientes para la ZCY 2014

## 7.5 Metales y Arsénico (Estadística Descriptiva)

Las concentraciones de metales registradas de acuerdo con la técnica de cuantificación corresponden a metales disueltos superficiales de la ZCY. Se tomó como referencia de calidad del agua los valores reportados en los SQuiRTs para niveles de daño a los estados primarios de la biota. La Tabla 7.7 muestra las concentraciones de los metales As, Cu, Cd, Cr, V y Sr registradas para ambos años a lo largo de la ZCY.

Tabla 7.7 Estadística descriptiva de la concentración de metales. Las concentraciones están en  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Municipio		As 2013	As 2014	Cu 2013	Cu 2014	Cd 2013	Cd 2014	Cr 2013	Cr 2014	V 2013	V 2014	Sr 2013	Sr 2014
<b>Limite de Detección (LD)</b>		<b>0.0006</b>		<b>0.0003</b>		<b>0.0007</b>		<b>0.0038</b>		<b>0.0021</b>		<b>0.0003</b>	
<b>Celestún</b>	mediana	0.012	<LD	4.619	4.828	<LD	0.056	<LD	<LD	1.049	0.929	292	617
	min	<LD	<LD	2.931	3.000	<LD	0.009	<LD	<LD	0.714	0.517	188	504
	max	0.104	0.031	5.840	16.375	0.126	0.170	1.495	0.051	1.233	2.016	648	817
	25%	<LD	<LD	3.054	3.593	<LD	0.025	<LD	<LD	0.969	0.831	205	576
	75%	0.066	0.019	5.754	6.433	0.024	0.126	0.442	0.027	1.124	1.177	333	775
<b>Hunucmá</b>	mediana	0.02	<LD	3.24	10.33	0.01	0.10	<LD	<LD	0.88	1.04	298	747
	min	<LD	<LD	1.02	5.13	<LD	0.02	<LD	<LD	0.08	0.69	193	565
	max	0.06	<LD	5.18	19.40	0.02	0.57	0.66	0.26	1.02	1.26	651	812
	25%	<LD	<LD	1.39	7.16	<LD	0.08	<LD	<LD	0.34	0.85	234	673
	75%	0.04	<LD	3.96	14.08	0.02	0.13	0.03	0.11	1.01	1.17	485	790
<b>Progreso</b>	mediana	0.03	0.01	3.62	4.93	0.03	0.06	<LD	0.21	0.79	0.58	616	679
	min	<LD	<LD	1.07	4.55	<LD	0.01	<LD	<LD	0.22	0.34	209	539
	max	0.07	0.15	22.81	41.43	0.05	0.13	0.80	2.99	1.09	0.73	846	859
	25%	0.03	<LD	1.42	4.60	0.01	0.03	<LD	<LD	0.32	0.48	266	546
	75%	0.04	0.02	9.83	8.48	0.04	0.12	<LD	0.93	0.96	0.67	694	794
<b>Ixil</b>	mediana	0.03	0.02	4.60	3.93	0.01	0.07	0.18	0.02	0.65	0.38	279	787
	min	0.02	0.00	1.40	3.36	<LD	0.01	<LD	<LD	0.35	<LD	177	556
	max	0.04	0.05	5.58	7.74	0.04	0.09	0.75	1.70	1.09	2.30	795	840
	25%	0.02	0.01	2.93	3.50	<LD	0.03	<LD	<LD	0.39	0.15	216	661
	75%	0.03	0.04	5.16	5.97	0.03	0.08	0.56	0.88	0.99	1.37	549	825
<b>Dzemul</b>	mediana	<LD	0.01	2.86	4.16	0.01	0.14	<LD	<LD	0.43	0.31	329	734
	min	<LD	<LD	2.74	3.49	<LD	0.04	<LD	<LD	0.09	0.23	123	720
	max	0.02	0.03	3.62	4.80	0.01	0.22	<LD	1.29	0.62	0.37	914	777
	25%	<LD	<LD	2.74	3.49	<LD	0.04	<LD	<LD	0.09	0.23	123	720
	75%	0.02	0.03	3.62	4.80	0.01	0.22	<LD	1.29	0.62	0.37	914	777

Municipio		As 2013	As 2014	Cu 2013	Cu 2014	Cd 2013	Cd 2014	Cr 2013	Cr 2014	V 2013	V 2014	Sr 2013	Sr 2014
<b>LD</b>		<b>0.0006</b>		<b>0.0003</b>		<b>0.0007</b>		<b>0.0038</b>		<b>0.0021</b>		<b>0.0003</b>	
<b>Telchac</b>	mediana	0.01	0.03	6.42	8.10	0.00	0.07	0.15	<LD	0.64	0.54	285	816
	min	<LD	<LD	3.11	3.63	<LD	0.06	<LD	<LD	0.03	0.16	196	568
	max	0.03	0.06	9.39	16.82	0.03	0.10	0.95	0.04	1.16	1.36	634	908
	25%	<LD	<LD	3.82	3.84	<LD	0.06	<LD	<LD	0.11	0.28	232	688
	75%	0.02	0.06	8.86	14.49	0.02	0.09	0.62	0.02	1.13	1.01	468	866
<b>Sinanché</b>	mediana	<LD	<LD	3.47	3.73	0.01	0.15	<LD	<LD	0.75	1.09	176	566
	min	<LD	<LD	2.26	2.73	<LD	0.04	<LD	<LD	<LD	0.49	117	440
	max	<LD	0.00	3.55	4.71	0.01	0.94	0.17	0.07	1.20	1.79	220	916
	25%	<LD	<LD	2.26	2.73	<LD	0.04	<LD	<LD	<LD	0.49	117	440
	75%	<LD	0.00	3.55	4.71	0.01	0.94	0.17	0.07	1.20	1.79	220	916
<b>Yobain</b>	mediana	0.01	<LD	5.56	8.26	0.01	0.07	<LD	0.15	1.33	0.93	293	651
	min	<LD	<LD	2.99	4.66	<LD	0.04	<LD	<LD	1.18	0.85	286	582
	max	0.02	<LD	6.55	12.24	0.05	0.17	0.78	11.94	1.55	1.55	546	802
	25%	<LD	<LD	4.16	6.09	0.01	0.05	<LD	<LD	1.21	0.89	289	612
	75%	0.02	<LD	6.17	10.62	0.03	0.13	0.39	6.12	1.48	1.24	420	731
<b>Dzidzantún</b>	mediana	<LD	<LD	3.81	4.40	0.06	0.11	<LD	0.17	1.59	1.06	216	652
	min	<LD	<LD	3.10	4.29	0.02	0.10	<LD	<LD	1.51	0.99	183	610
	max	<LD	0.01	6.03	10.44	0.26	0.18	<LD	1.82	1.70	1.22	305	753
	25%	<LD	<LD	3.10	4.29	0.02	0.10	<LD	<LD	1.51	0.99	183	610
	75%	<LD	0.01	6.03	10.44	0.26	0.18	<LD	1.82	1.70	1.22	305	753
<b>Dzilam de Bravo</b>	mediana	0.01	<LD	4.46	4.24	0.00	0.12	<LD	<LD	1.24	0.87	237	749
	min	<LD	<LD	2.09	1.18	<LD	0.04	<LD	<LD	0.96	0.53	146	341
	max	0.04	0.04	7.94	8.82	0.05	0.33	0.80	0.82	1.56	1.40	803	901
	25%	0.00	<LD	2.74	2.23	<LD	0.06	<LD	<LD	1.10	0.67	188	529
	75%	0.03	0.01	5.62	6.11	0.03	0.23	0.19	0.21	1.39	1.14	629	827
<b>San Felipe</b>	mediana	0.00	<LD	8.21	5.37	0.08	0.07	<LD	<LD	1.11	0.72	554	784
	min	<LD	<LD	3.07	2.23	0.01	0.03	<LD	<LD	0.52	0.44	188	619
	max	0.05	0.04	20.98	11.24	0.31	0.36	0.74	5.47	1.41	0.83	730	836
	25%	<LD	<LD	4.63	4.78	0.01	0.04	<LD	<LD	0.75	0.49	200	620
	75%	0.02	0.02	9.73	8.63	0.12	0.35	<LD	0.22	1.35	0.77	706	802
<b>Río Lagartos</b>	mediana	<LD	<LD	2.91	4.40	0.00	0.05	<LD	<LD	1.12	0.85	379	740
	min	<LD	<LD	1.77	1.68	<LD	0.04	<LD	<LD	0.92	0.60	345	540
	max	0.02	0.01	8.27	17.06	0.07	0.09	0.05	<LD	1.18	1.15	456	824
	25%	<LD	<LD	2.36	3.04	<LD	0.04	<LD	<LD	1.00	0.73	372	565
	75%	0.00	<LD	4.86	6.60	0.01	0.06	<LD	<LD	1.12	1.04	437	811
<b>Tizimín</b>	mediana	<LD	<LD	5.36	7.56	0.02	0.09	<LD	<LD	1.12	0.86	442	776
	min	<LD	<LD	2.56	5.81	0.01	0.04	<LD	<LD	0.98	0.61	292	486
	max	0.00	0.00	7.58	39.78	0.09	0.15	0.67	<LD	1.24	1.99	506	816
	25%	<LD	<LD	3.06	6.09	0.01	0.06	<LD	<LD	1.00	0.67	343	646
	75%	0.00	<LD	7.37	20.79	0.06	0.11	0.33	<LD	1.23	0.89	498	807

## Arsénico

Las concentraciones de As cuantificadas en el agua superficial de la ZCY no sobrepasan los límites establecidos por los criterios de SQuiRTs en ninguno de los dos años de estudio, como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.8.**

En el municipio de Progreso se cuantificó la mayor mediana con un valor de  $0.035 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  para el año 2013 y para Telchac en el 2014 con un valor de  $0.032 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a.** La concentración de As de 2013 en la ZCY se determinó en un intervalo entre LD y  $0.10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  con una mediana de 0.003 mientras que en el 2014 las concentraciones se determinaron entre LD y  $0.15 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , sin diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ).

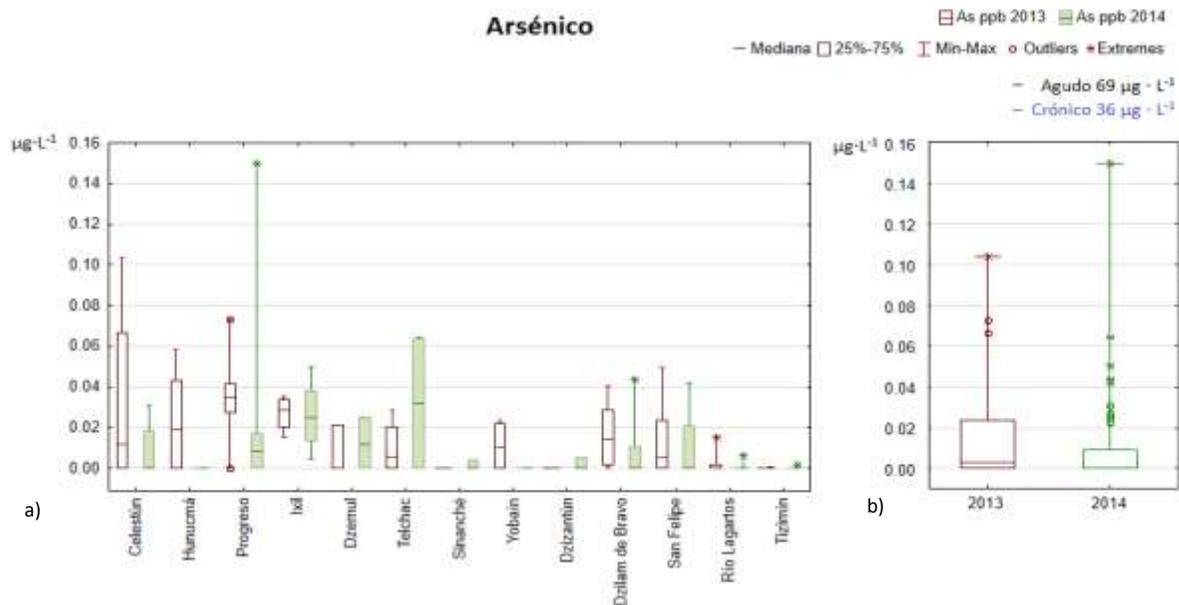


Figura 7.28 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de Arsénico de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de Arsénico de la ZCY.

## Cobre

La concentración de Cu máxima que se cuantificó en el 2013 corresponde al municipio de Progreso con una concentración de  $23 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  y la mayor mediana se cuantificó en San Felipe con un valor de  $8.20 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ . En el 2014 en Progreso se registró la máxima concentración con un valor de  $41.4 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  y en Hunucmá la mayor mediana, que fue de  $10.32 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  como se observa en la figura 7.29a. Especialmente no existieron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) para ningún año.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.9b** se observa que las concentraciones de Cu para el 2013 se presentaron entre  $1$  y  $22 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  con una mediana de  $4.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  superior al valor crónico recomendado en los SQiRTs. En el 2014 las concentraciones para la ZCY se cuantificaron entre  $1$  y  $42 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  con una mediana de  $5.13 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  la cual supera el valor de exposición aguda ( $4.8 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) recomendado en los SQiRTs.

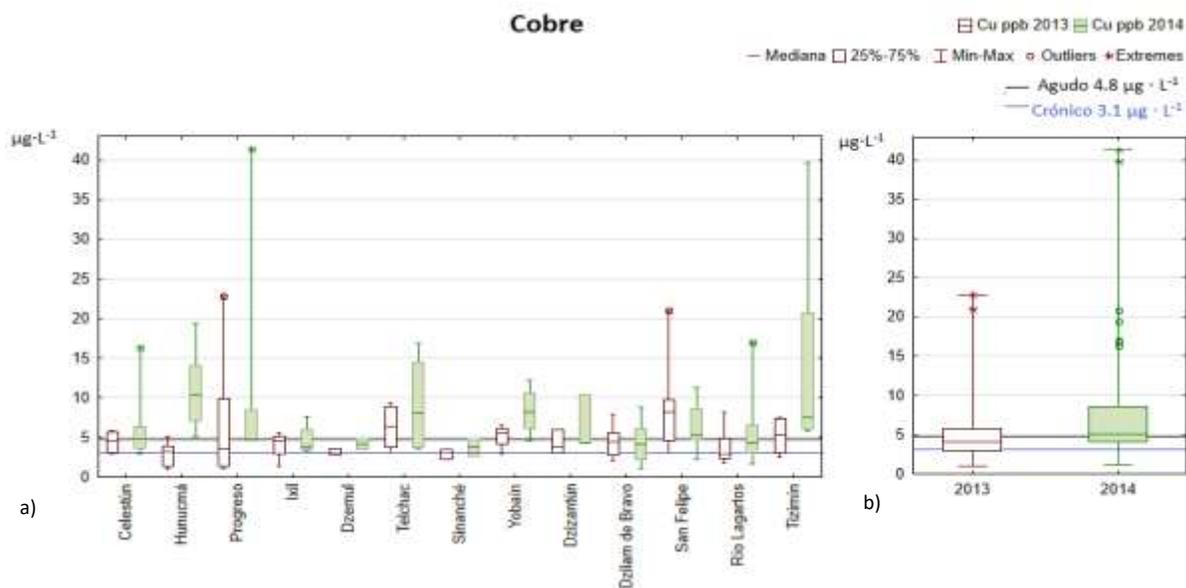


Figura 7.29 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de Cobre de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de Cobre de la ZCY.

## Cadmio

El municipio de San Felipe fue el municipio en el cual se cuatificó mayor concentración de Cd y la mayor mediana con valores de  $0.31 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  y  $0.08 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  respectivamente para el 2013. En el 2014 Hunucmá y Sinanché presentaron las concentraciones máximas para la ZCY con valor de  $0.57$  y  $0.94 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  respectivamente, la mayores medianas se registraron en Dzemul con  $0.14 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  y Sinanché con  $0.15 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.30a**. Espacialmente no existieron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) para ningún año.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.30b** se observa que existió menor concentración de Cd en el 2013, con una mediana de  $0.01 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  y en el 2014 una concentración mediana de  $0.07 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ . Interanualmente si existieron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ). Como se ve en la figura 8.31 el Cd no rebasa los valores de SQUIRTS para ningún año en la ZCY.

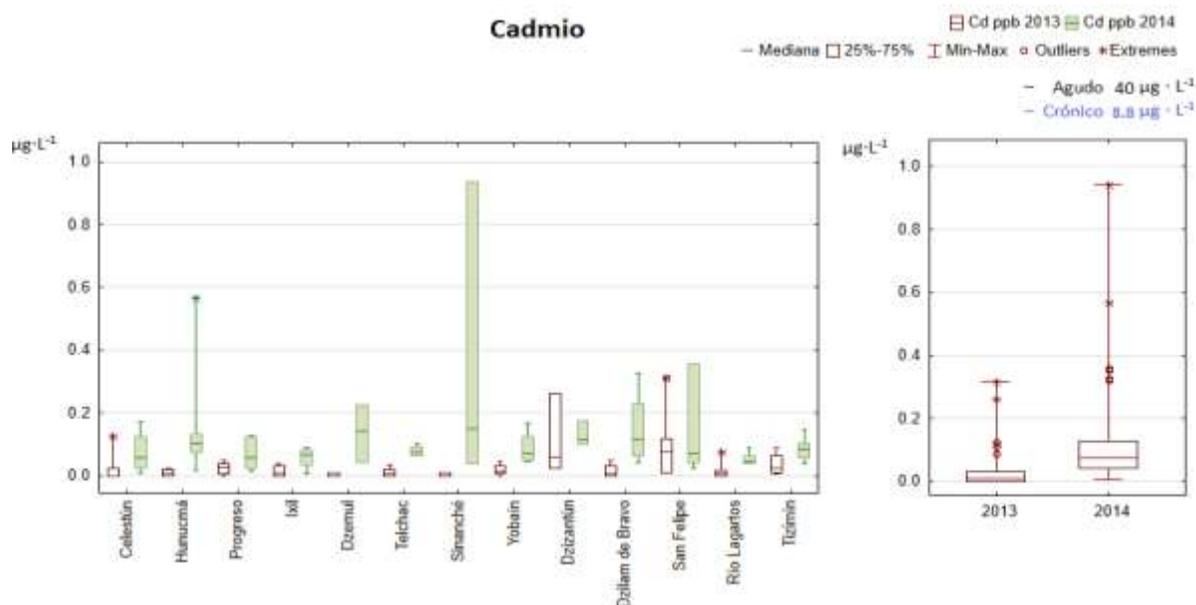


Figura 7.30 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de Cadmio de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de Cadmio de la ZCY.

### Cromo

La concentración máxima para el 2013 fue de  $1.8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  y se cuantificó en el municipio de Celestún; la mayor mediana se localizó en el municipio de Ixil con un valor de  $0.182\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; para el 2014 la mayor concentración fue de  $12 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  en el municipio de Yobain y la mayor mediana en Progreso con un concentración de  $0.20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.31a.**

La concentración de cromo total presentó variación interanual siendo menor para el 2013 en comparación con el 2014, sin diferencias significativas ( $p\leq 0.05$ ), como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.b.**

Los valores SQiRTs para el Cr están reportados por especies, (Cr III  $27.4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  y Cr VI  $50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  para daño crónico), sin embargo, la concentración cuantificada no sobrepasa ningún valor recomendado para cualquier especie de Cr.

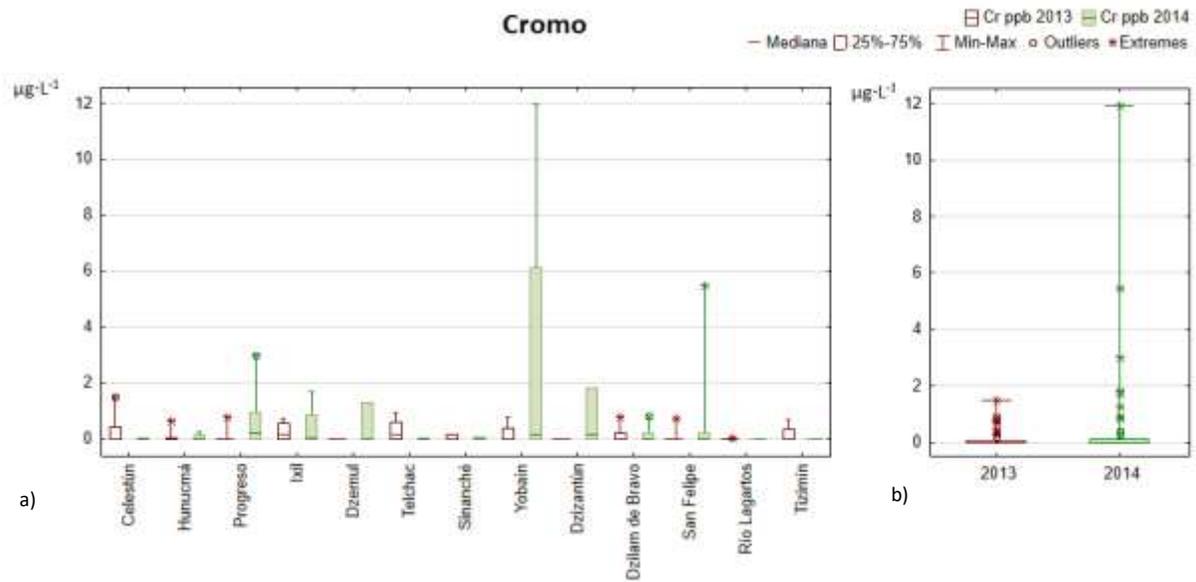


Figura 7.31 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de Cromo de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de Cromo de la ZCY.

## Vanadio

Los municipios que presentan las mayores medianas para el 2013 fueron Dzidzantún,  $1.6 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , y Yobain,  $1.33 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; en el 2014 Hunucmá con  $0.88 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , Sinanché  $1.08 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , y Dzidzantún,  $1.06 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a.**

El V se registró a lo largo de toda la ZCY en un intervalo de 0 a  $1.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  y 0 a  $2.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  para el 2013 y 2014 respectivamente como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.b.** La mediana del 2013 cuyo valor es  $1.06 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  fue mayor que la del 2014,  $0.83 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , aunque con menor variabilidad. Interanualmente si existieron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ).

La concentración de V no sobrepasa el valor de SQuiRTs a lo largo de la ZCY.

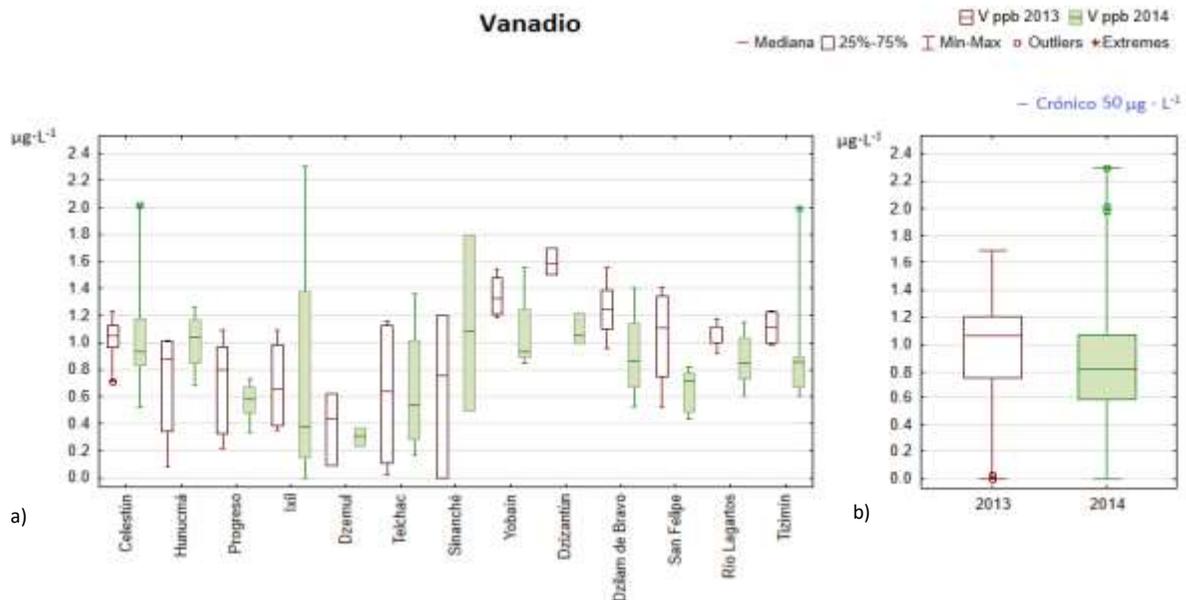


Figura 7.32 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de Vanadio de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de Vanadio de la ZCY.

## Estroncio

El municipio que presentó la mayor mediana para el 2013 fue en Progreso 616  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  y el municipio con la menor mediana para ese mismo año fue Sinanché 175.5  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . En el 2014 las mayores medianas se localizaron en Telchac 816  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , Ixil 787  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  y San Felipe 784  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a.** No existieron diferencias significativas ( $p\leq 0.05$ ) a lo largo de la ZCY para cada año.

El Sr presentó una menor concentración para el 2013 que para el 2014, con diferencias significativas ( $p\leq 0.05$ ). En el 2013 se cuantificaron concentraciones entre 117 y 914  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  y una mediana de 302  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , para el 2014 las concentraciones de la ZCY se cuantificaron entre 341 y 916  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  con una mediana de 732  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , como se observa en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

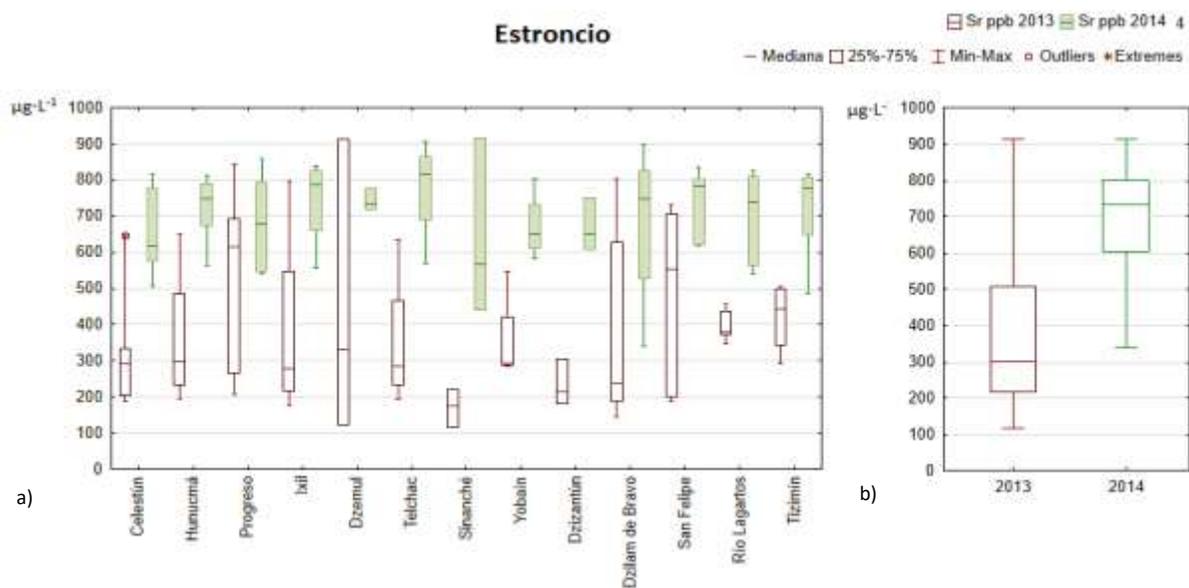


Figura 7.33 a) Diagrama de caja y bigote para la concentración de Estroncio de la ZCY agrupada por municipio (variación espacial) para los años 2013 y 2014. b) Diagrama de la variación interanual de la concentración de Estroncio de la ZCY.

## 7.6 Procesos espaciales e interanuales de Nutrientes (Análisis multivariado)

### Metales y fisicoquimicos 2013

El ACP para el 2013 (Fig. 7.34) explicó el 62.81% total de la variabilidad observada, el primer factor explica el 38.68 % y el segundo factor el 24.13% de ésta. Las variables significativas en el ACP fueron salinidad (S), OD, T, As, Cr, V y Sr para el 2013. Se observó que la relación entre As y T fue directa, así mismo la relación entre la S y el Cr es inversa. El Sr presento una relación directa con el OD.

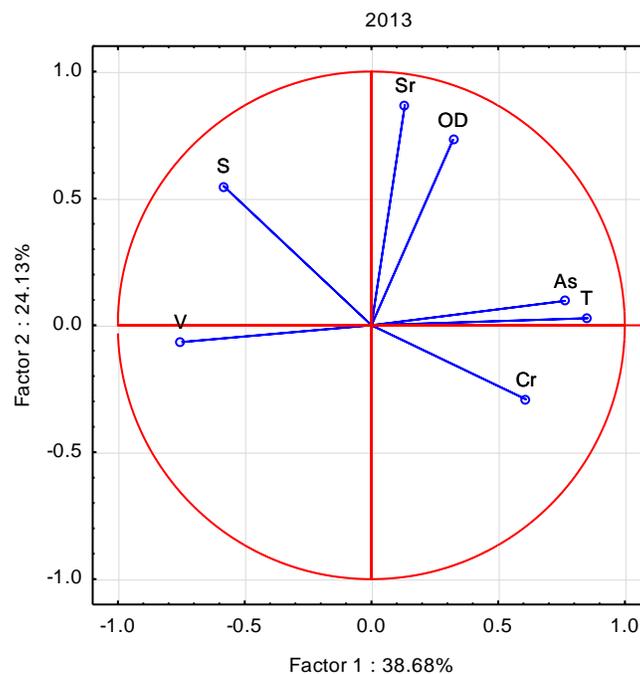


Figura 7.34 Diagrama de análisis de componentes principales con la concentración de metales y As y parámetros fisicoquímicos para la ZCY 2013

El análisis de factores (tabla 7.8) explicó el 63% de la variabilidad mediante dos factores, las variables incluidas en el análisis de factores con aquellas que fueron significativas en el ACP. El factor 1 explicó el 38% de la variabilidad y relacionó directamente la T, As y Cr que su vez presentan una relación inversa con el V y S. El segundo factor explica el 25% de la variabilidad, el cual relaciona directamente el OD y Sr.

Tabla 7.8 Análisis de factores para la ZCY 2013 de la concentración de metales, As y parámetros fisicoquímicos (Los números en rojo representan las variables que poseen mayor peso en cada factor).

VARIABLE	FACTOR 1	FACTOR 2
T	-0.83	0.18
S	0.67	0.43
OD	-0.19	0.78
As	-0.73	0.23
Cr	-0.65	-0.18
V	0.73	-0.20
Sr	0.03	0.88
<b>Expl.Var</b>	2.67	1.72
<b>Prp.Totl</b>	0.38	0.25
Varimax normalizada Componentes Principales (Valor significativo >0.65)		

En el análisis de agrupamiento de la concentración de metales con las variables fisicoquímicas para el 2013 se formaron tres zonas (fig. 7.35). Los municipios de Tizimín, Río Lagartos, San Felipe y Progreso definen ala zona 1M; por otra parte, Dzemul, Telchac, Ixil y Hunucmá, integran la zona 2M; finalmente Sinanché, Dzilam de Bravo, Dzidzantún, Yobain y Celestún conforman la zona 3M.

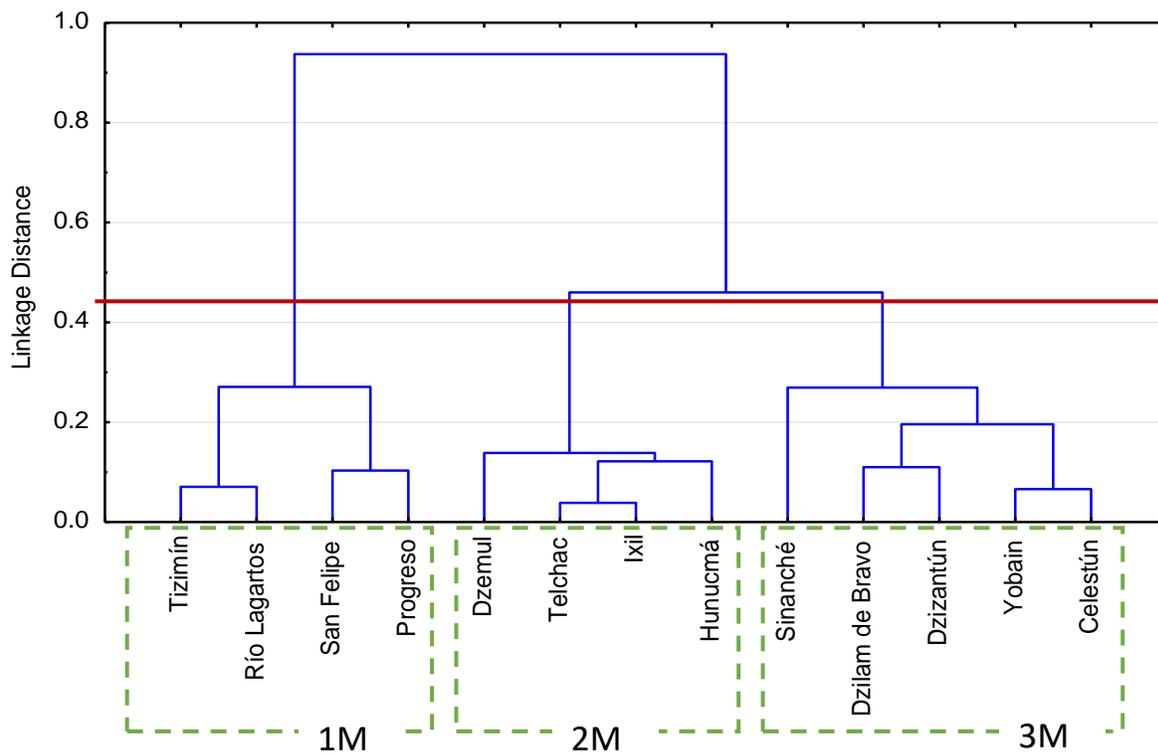


Figura 7.35 Diagrama de Cluster con el método de Ward's y distancias euclidianas para la ZCY 2013 de la concentración de metales, As y parámetros fisicoquímicos

Las principales diferencias entre los grupos están con base en la concentración de Sr, OD, As, Cu y V. Como se observa en la tabla 7.9 el grupo 1M, presentó la mayor concentración de Sr ( $420 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), Cu ( $4.74 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) y S. El grupo 2M es el que presentó la mayor concentración de As ( $0.0187 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) la menor en V ( $0.62 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) y salinidad (34.8 UPS). Mientras que el tercer grupo presentó la menor concentración de Sr ( $266 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) y OD ( $3.98 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),

Tabla 7.9 Medianas de fisicoquímicos, metales y As de la ZCY para el 2013 de los grupos encontrados por el análisis multivariado

Grupo	Z (m)	T (°C)	S UPS	OD ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	As ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Cu ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Cd ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Cr ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	V ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Sr ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )
1M	1.80	29.9	35.7	5.48	<LD	4.74	0.022	0.0001	1.04	420
2M	1.60	30.8	34.8	4.9	0.0187	3.61	0.009	0.0001	0.62	302
3M	1.7	30.3	35.0	3.98	<LD	4.25	0.011	0.0001	1.20	266

Si lo vemos espacialmente como se muestra en la figura 7.36 la zona 1M incluye al municipio con mayor densidad demográfica (Progreso) de la ZCY y al de mayor área de superficial dedicada al sector agropecuario (Tizimín). La zona 3M se encontraron los municipios que presentan la intersección del anillo de cenotes con la ZCY, Celestún y Dzilam de Bravo.

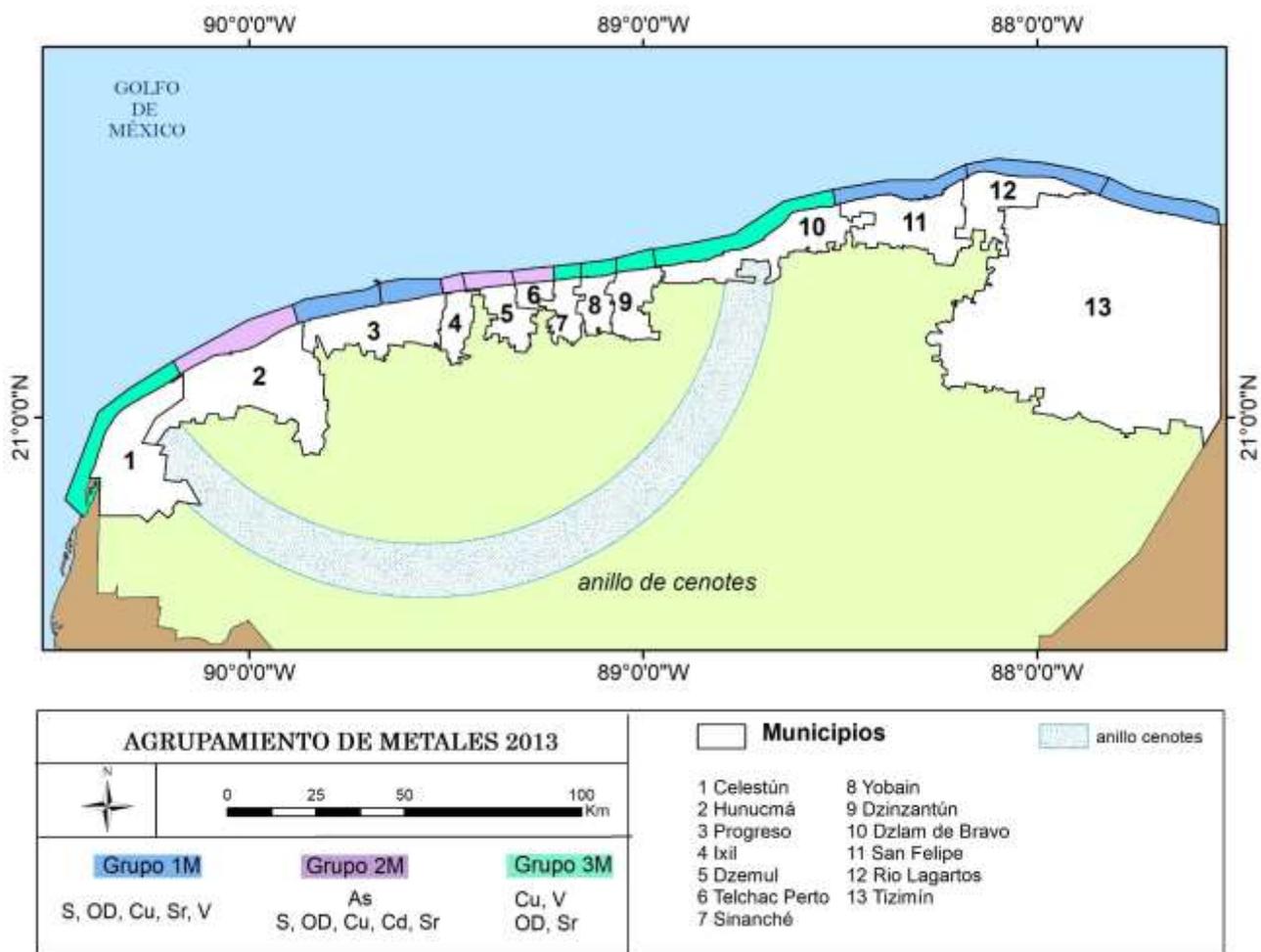


Figura 7.36 Representación espacial de los grupos formados por el análisis de agrupamiento de metales y As para la ZCY 2013

### Metales y fisicoquímicos 2014

Para el 2014 se observó que el ACP (figura 7.37) explicó el 65.43% total de la variabilidad observada. El primer. El primer factor explicó el 36.98 % y el segundo factor el 28.45%, Las variables significativas representadas en la figura fueron salinidad (S), T, OD, As, V y Sr. En este ACP se observa que la relación de S y T con el OD es inversa, así mismo se observa que la concentración de Sr es inversa a la concentración de V.

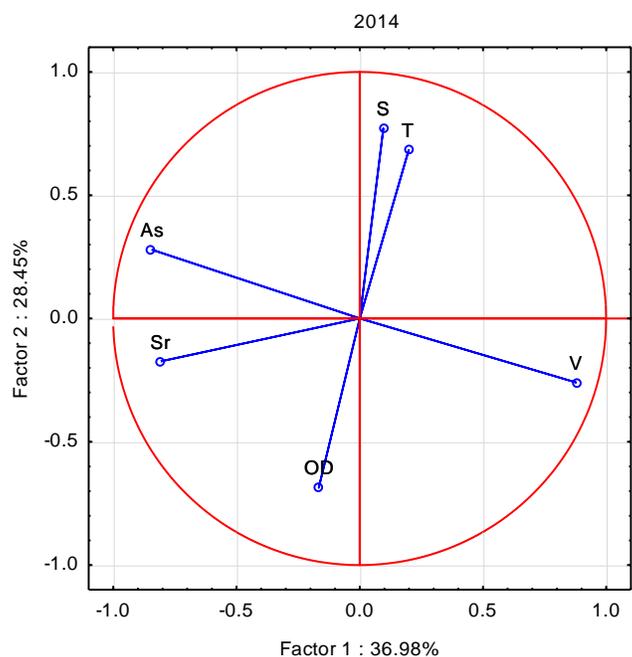


Figura 7.37 Diagrama de análisis de componentes principales con la concentración de metales y As y parámetros fisicoquímicos para la ZCY 2014

El análisis de factores (tabla 7.10) explicó el 65% de la variabilidad mediante dos factores, el factor 1 explicó el 37% y el factor 2 explicó el 28%, las variables incluidas en el análisis fueron aquellas que fueron significativas en el ACP. El factor 1 relacionó inversamente al V con Sr y As. El factor 2 relacionó inversamente el OD con la T y S, lo que nos puede indicar la existencia de una zona de mezcla de aguas.

Tabla 7.10 Análisis de factores para la ZCY 2014 de la concentración de metales, As y parámetros fisicoquímicos (Los números en rojo representan las variables que poseen mayor peso en cada factor).

VARIABLE	FACTOR 1	FACTOR 2
T	-0.06	0.71
S	0.06	0.77
As	0.88	0.11
Sr	0.76	-0.33
V	-0.91	-0.08
OD	0.03	-0.71
<b>Expl.Var</b>	2.20	1.726477
<b>Prp.Totl</b>	0.37	0.287746
Varimax normalizada Componentes Principales (Valor significativo >0.70)		

En el análisis de agrupamiento de las variables significativas en el 2014 se formaron tres zonas principales (Fig. 7.38). La zona 4M, se asociaron los municipios de Dzidzantún, Yobain y Sinanché. La zona, 5M, está integrado por Dzemul, Ixil, San Felipe, Telchac y Progreso. Finalmente, la zona 6M lo integran los municipios de Tizimín, Río Lagartos, Dzilam de Bravo, Hunucmá y Celestún.

Las principales diferencias entre los dos grupos, como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.7.11**, están dadas por OD, y los metales As, Cu, Cd, Cr, V y Sr. El grupo 3M presentó la menor concentración de OD ( $4.68\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), Cu ( $4.69\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) y Sr ( $647\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), y la mayor concentración de todos los grupos para los metales Cd, Cr y V de  $0.11\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $0.037\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  y  $1.02\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  respectivamente. El grupo 4M presento la mayor concentración de As ( $0.0083\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) y la menor de V ( $0.533\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ). Mientras que el grupo 6M presento la mayor concentración de OD ( $6.41\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) y Cu ( $5.77\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )

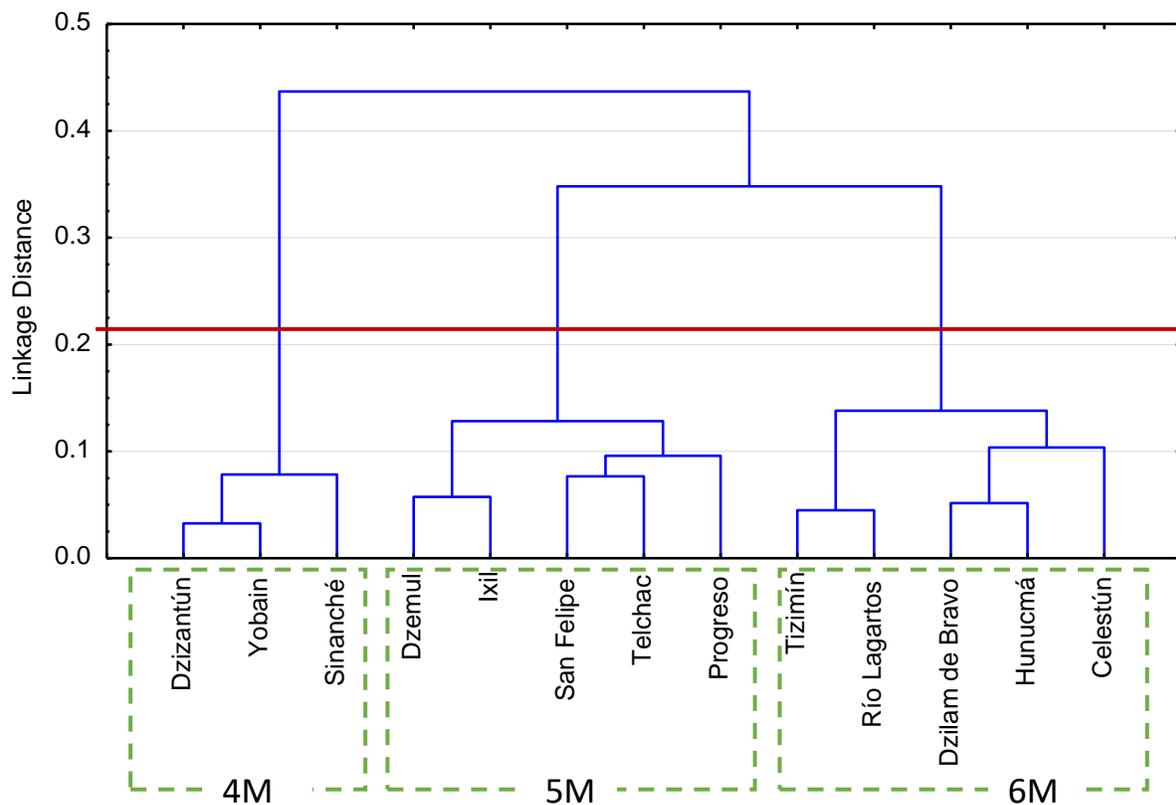


Figura 7.38 Diagrama de Cluster con el método de Ward's y distancias euclidianas para la ZCY 2014 de la concentración de metales, As y parámetros fisicoquímicos

Tabla 7.11 Medianas de fisicoquímicos, metales y As de la ZCY para el 2014 de los grupos encontrados por el análisis multivariado

Grupo	Z (m)	T (°C)	S UPS	OD (mg*m <sup>-3</sup> )	As μg·L <sup>-1</sup>	Cu μg·L <sup>-1</sup>	Cd μg·L <sup>-1</sup>	Cr μg·L <sup>-1</sup>	V μg·L <sup>-1</sup>	Sr μg·L <sup>-1</sup>
4M	1.65	30.9	36.6	4.68	<LD	4.69	0.11	0.0374	1.02	647
5M	1.40	30.5	36.4	5.78	0.0083	4.79	0.071	0.0001	0.533	771
6M	1.5	30.2	36.2	6.41	<LD	5.77	0.074	0.0001	0.888	732

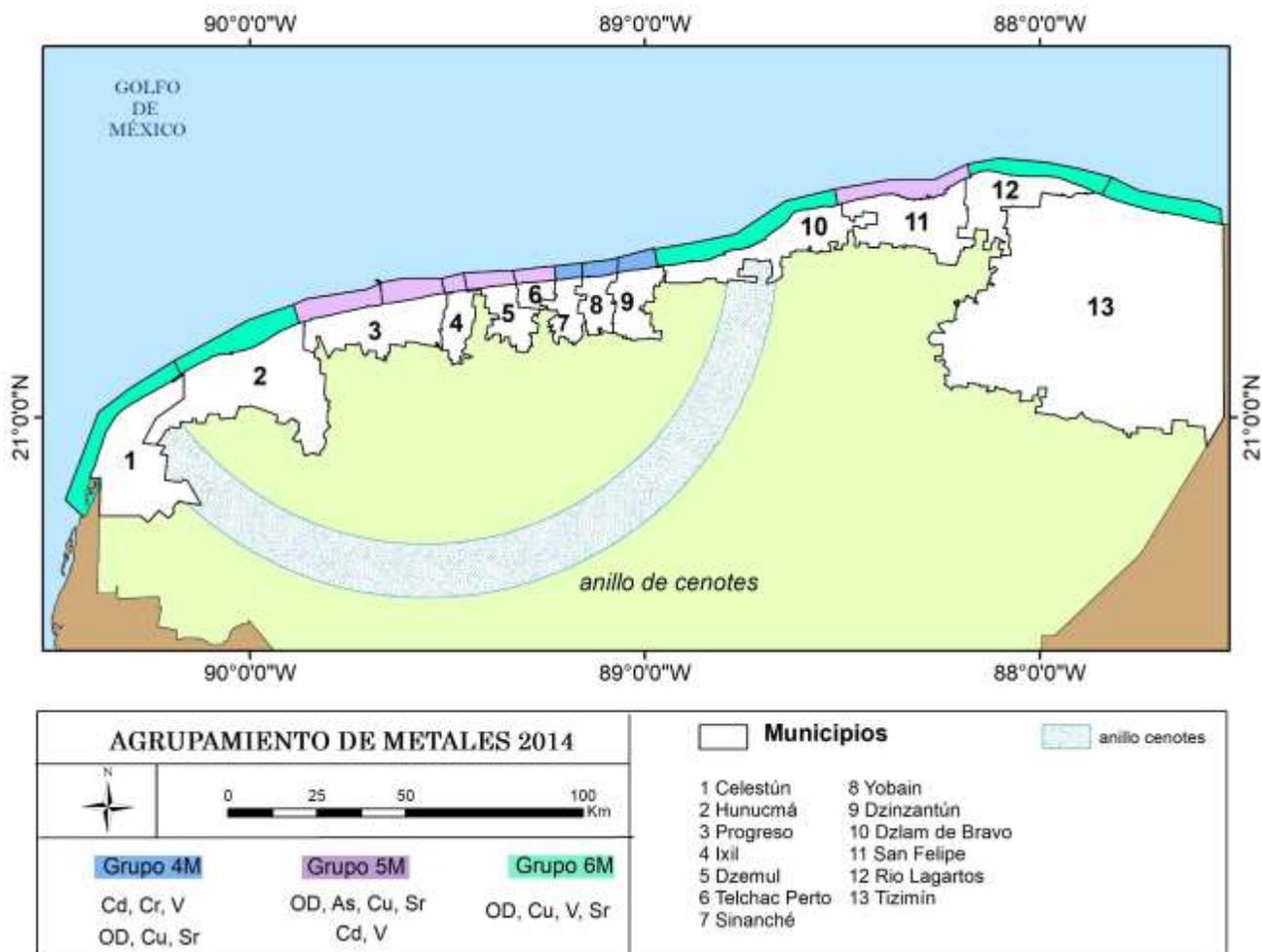


Figura 7.39 Representación espacial de los grupos formados por el análisis de agrupamiento de metales y As para la ZCY 2014

## 8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La caracterización del agua de la ZCY, mediante la evaluación de diferentes características fisicoquímicas y la cuantificación de nutrientes inorgánicos disueltos y metales, permitió integrar un análisis sobre la calidad del agua costera, y con ello proponer el diagnóstico de la zona en función de dichas variables. Además, al integrar el componente temporal en el estudio, permitió la comparación y análisis entre dos años que para el caso presentaron diferencias notables en el volumen de precipitación. De acuerdo con CONAGUA el registro fue de 216.9 y 154.7 mm (371.6 mm) para los meses de junio y julio 2013, y 83.6 y 111.3 mm (194.9 mm) para el mismo periodo del 2014. Esta diferencia de casi el 50% de precipitación no solo significó el aumento en el volumen de agua que descargó en la ZCY como consecuencia de la precipitación local, sino que, como otros ecosistemas, con el aporte de agua desde el continente se diluyen o se aumentan las concentraciones de los contaminantes dependiendo de la temporalidad del muestreo, capacidad de adsorción de la matriz sedimentaria, flujo del agua subterránea, etc. Esta variabilidad del flujo y por ende del probable transporte de elementos y compuestos, es resultado de las características geológicas de la península de Yucatán, que corresponde a un sistema kárstico, con una roca altamente permeable (caliza), donde la lluvia penetra directamente en el acuífero y viaja a través de las cavernas y fracturas hacia el mar (Arcega-Cabrera, et.al 2014; Perez-Ceballos, et.al 2008). Enríquez, et al. (2013), identifican tres regiones principales de descarga, región central oriental (21.6N, 87.75W), alrededor de Dzilam Bravo

(21.4N, 89 W) y la región occidental de la costa (21.1N, 90.3W). Arcega-Cabrera (2021b) así como Dótor-Almazan (2021) muestran la influencia que estas DAS tienen en la variación espacial y temporal de elementos tales como el Cd y V.

La influencia de las DAS se observó en variables como la salinidad, la cual en 2013 presentó una mediana de 35 UPS, valor que fue menor al del 2014 (mediana de 36.3 UPS) con diferencias significativas entre años. La salinidad menor del 2013, asociada a lo mencionado sobre la mayor precipitación en ese mismo año, puede estar siendo la respuesta de la zona costera a una mayor entrada de agua del acuífero. De igual manera se presenta una mayor variabilidad espacial en salinidad durante el 2013, lo cual también puede estar reflejando la influencia de las DAS las cuales como menciona Enriquez et al. (2010) están zonificadas a lo largo de la ZCY.

Otro indicador del balance de aportes de agua marina y dulce es la concentración de Sr, la cual en 2013 fue de 302  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  y en 2014 de 732  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , indicando que hubo menor aporte de agua dulce en este año. Ambas variables demuestran que en 2013 el aporte de agua dulce a través de DAS a la ZCY fue mayor, indicando la conectividad hidrológica de corto plazo entre tierra y costa en esta región (Mondal 2010, Ward 1995).

La variación de la profundidad está relacionada con la morfología de fondo, el volumen de agua que aporta del acuífero y forzamientos externos locales como la variación mareal o por efecto del viento a lo largo de la ZCY (Carrillo et al. 2017, Reyes-Mendoza et al. 2016, Enriquez et al. 2013, Zavala-Hidalgo et al. 2003). En el caso de los años 2013 y 2014 la profundidad presentó una mediana menor en 2014, que fue un año con menor precipitación y por ende menor DAS. Sin embargo, para poder determinar la influencia de las DAS y los forzamientos externos se requeriría llevar a cabo un estudio exhaustivo a lo largo de la ZCY, debido a que las variabilidades en la profundidad probablemente están asociadas a la diferencia de posicionamiento entre los puntos muestreados y a la diferencia de la fecha en la que se tomaron las muestras, que implica una diferencia en la fase de la marea que presenta la zona.

En la ZCY se registró un descenso de temperatura (Fig.7.9) que puede estar relacionada con la entrada de agua fría de la corriente de Yucatán al este de la península, y las DAS, con lo que esta variable también puede estar influenciada por procesos mar-costa, como las corrientes marinas (Herrera-Silveira y Morales 2009; Kantun Manzano et.al 2018).

En relación con la concentración de OD, el valor más alto se registró en la zona central, lo cual puede estar relacionado con procesos físicos o biológicos. En el primer caso la turbulencia ocasionada por marea y/u oleaje favorece la difusión de OD entre la atmósfera y el agua, mientras que la productividad biológica también contribuye con aumento en las concentraciones de OD (Herrera-Silveira, et.al 2002). Sin embargo, dado que esta variable es regularmente tomada en el momento específico de muestreo en cada estación, y esto sucede regularmente a distinta hora del día, podría no ser el mejor indicador de los procesos de producción y consumo en la columna de agua. Pueden existir cambios diarios de las concentraciones de OD, por lo que hay que considerar los datos con precaución. Es recomendable para esta variable la medición a lo largo de un ciclo diario o a la misma hora en cada estación de muestreo, sin embargo, ambos procedimientos resultan logísticamente complicados. En este estudio las mayores concentraciones por municipio de OD corresponden a los mayores valores de Clorofila-*a*, sugiriendo que los valores observados son resultado de la productividad fitoplanctónica (Herrera-Silveira et al. 2004; Herrera-Silveira y Morales-Ojeda 2009).

Sin embargo, la relación interanual es inversa, es decir, en 2013 se registró menor concentración de OD que en 2014, asociando esto a una mayor precipitación durante 2013 (Fig. 6.2) y a que las aguas subterráneas generalmente contienen baja concentración de OD (Arcega-Cabrera et al. 2021), puede estar indicando la influencia de las DAS en el OD de la zona costera. Como menciona Herrera-Silveira (1994b), existe una gran variabilidad de los parámetros fisicoquímicos y biológicos asociados a la dinámica misma de la zona costera, pero también,

para el caso de Yucatán, a la influencia que las DAS tienen en la calidad del agua costera (Arcega-Cabrera et al. 2014, Derrién et al. 2015, Kantún-Manzano et al. 2018).

El análisis de la variabilidad espacial y anual de los parámetros fisicoquímicos permite comprender una parte de la hidrología del sistema de la ZCY. En términos generales indican la influencia que la precipitación y los consiguientes aportes aumentados de agua subterránea, tienen en la zona marina, siendo claramente mayores para el 2013. Con esto en mente se analizará el comportamiento de nutrientes y metales en la ZCY para entender las variaciones tanto espaciales como temporales del sistema costero somero de esta región.

Las diferencias significativas entre años pueden estar relacionadas con la influencia del incremento de precipitación y el mayor volumen de DAS en la ZCY, como se mencionó anteriormente, ya que se observa mayor concentración de nutrientes en 2013 (Fig 6.2, Fig. 7.12 a Fig. 7.16, Fig 8.1). Es de llamar la atención que en la zona centro de la ZCY se presenta la mayor concentración de estos, sin embargo, las DAS con mayor flujo están reportadas en las zonas distales este y oeste. Entonces, probablemente el aporte de nitrato que se observa en este sitio no sólo se deba a las actividades antropogénicas tierra adentro, sino también puede estar siendo aportado por actividades cercanas a la costa (Fig 8.1).

Las contribuciones de nitrato se pueden asociar a diferentes fuentes. Si bien el Nitrógeno es un nutriente esencial para la biota, elevadas concentraciones de éste en las aguas subterráneas se asocian al uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, la descarga de aguas residuales derivadas de las actividades humanas y de la actividad ganadera (Herrera-silveira et al. 2004; Aranda-Cirerol et al. 2006., Herrera-Silveira y Morales-Ojeda 2009; Arcega-Cabrera et al. 2021).

El nitrito al igual que el nitrato también presentó diferencias significativas anuales, con una mayor concentración en el 2013 y en la zona centro por lo que muy probablemente estemos

ante una situación similar para ambos compuestos, teniendo fuentes distantes a la costa, siendo estas últimas las menos afectadas por las variaciones hidrológicas.

Aranda Cirerol et al. (2006) reportaron que en la ZCY el aumento de amonio y otros nutrientes en las aguas costeras provienen de residuos, aguas residuales, la re-suspensión de sedimentos, el amonio al igual que las otras especies de nitrógeno también presentó mayor concentración en 2013 asociado a mayor precipitación y mayor flujo en DAS.

La concentración de Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) es la suma de las concentraciones de  $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$ , por ende, el comportamiento es esperado y corrobora lo planteado por Aranda-Cirerol et al. (2006) acerca de la relación entre el incremento de N y sus especies en agua costera promovido por mala disposición y manejo de residuos por fuentes cercanas y lejanas a la costa.

Entonces, para las especies de nitrógeno se tiene que la concentración en la ZCY depende en gran medida de la variación hidrológica y de las actividades tierra adentro. A mayor cantidad de agua en el acuífero se tendrá mayor concentración de N y sus especies. Es probable en las zonas distales este y oeste, la fuente probable sea las actividades antropogénicas y descargas al acuífero tierra adentro, mientras que en la zona centro de la ZCY es probable que las actividades y asentamientos cercanos a la costa tengan una mayor influencia a través de la escorrentía y percolación.

Para el PRS se tiene que al igual que para el nitrógeno y sus especies, la mayor concentración se registró en 2013 (Fig. 7.12 a Fig. 7.16) asociado a la mayor precipitación (Fig.6.2). Hay también mayor variabilidad, la cual puede estar asociada a la influencia de fuentes puntuales tales como infiltraciones de los tanques sépticos que permean al acuífero y cuya influencia se magnifican debido a la alta densidad poblacional (Álvarez y Herrera-Silveira, 2006; Aranda-Cirerol et al.,

2004). Como ejemplo está Progreso y el municipio colindante, Mérida, el cual tiene la mayor densidad poblacional y donde más del 47% (INEGI, 2010) de la población usa fosa séptica (figura 7.1).

De acuerdo con EEA (1999), Ryther y Dunstan (1971), Fisher et al. (1992), Nixon et al. (1996), Vitousek et al. (1997) y Morales (2007) el N y el P son los nutrientes limitantes en los sistemas acuáticos para el crecimiento del fitoplancton. Generalmente el P es el nutriente limitante en ecosistemas de agua dulce y el N en ecosistemas de zonas costeras. En el caso de la ZCY ambos nutrientes están siendo aportados por fuentes tierra adentro, por lo que es probable que esto esté contribuyendo a la presencia de mayor fitoplancton asociado al año de mayores precipitaciones (2013).

El SiSR al ser usado como trazador para medir la contribución del agua dulce a la ZCY (Murgulet, et.al 2020). Sus concentraciones indican escorrentía de agua dulce que percolación al agua subterránea, la cual disuelve la sílice en condiciones reductivas y a altas tasas de mineralización de la roca en climas tropicales (Herrera-Silveira 1994; Aranda Cirerol 2006; Morales 2007). A lo largo de la ZCY existen diferentes tipos de descarga, muy puntuales como ocurre en el municipio de Dzilam de Bravo o por escorrentías como ocurre en Progreso, por ejemplo.

Respecto a la clorofila-*a* se tiene que esta puede asociar con la producción primaria de un sistema, por ende, a mayor concentración de nutrientes mayor concentración de clorofila-*a*, aunque también el caso inverso se da cuando el fitoplancton ha consumido los nutrientes y aún su biomasa se mantiene alta (Herrera-Silveira y Morales-Ojeda, 2009). Se ha observado que la concentración interanual para todos los nutrientes es mayor para el 2013 que en el 2014 lo cual tiene impacto en la calidad del agua de cada año, es decir, en 2013 la calidad de agua fue menor que en el 2014(Fig. 7.21).

La concentración de nutrientes y de clorofila- $\alpha$  se han utilizado como un indicador de eutrofización (Herrera-Silveira 1994; Aranda Cirerol 2006; Morales 2007, Herrera-Silveira y Morales-Ojeda, 2009, entre otros), ya que el exceso de nutrientes en un sistema puede ser contraproducente y provocar un proceso de eutrofización y ocasionar el desarrollo de especies nocivas para el ecosistema. Para la ZCY se observó la relación entre el aumento de nutrientes asociados a mayor precipitación e incremento del flujo de las DAS, con la mayor concentración de clorofila- $\alpha$ .

El índice TRIX nos indica un sistema mesotrófico mientras que para el 2014 (Fig. 7.22) es oligotrófico. Anteriormente se discutió que esta mayor concentración de nutrientes puede estar relacionada con mayor precipitación en 2013 y por ende mayor acarreo de elementos hacia la costa por las DAS. Lo que se refleja en la calidad del agua de la ZCY, pues a mayor nivel trófico menor la calidad del agua.

En términos generales, la calidad del agua de la ZCY con base en el análisis TRIX indica que para el año 2013 (Fig. 7.21) con mayor precipitación y probablemente con un mayor flujo en la DAS, la concentración de nutrientes aumentó, viéndose afectada negativamente la calidad del agua, reflejándose en el estado mesotrófico que se registró como se mencionó anteriormente.

La variabilidad interanual indica que en 2014 la condición se revierte (Fig 7.22) las precipitaciones disminuyen, la concentración de nutrientes es menor y la consecuencia en el ecosistema es la de un estado oligotrófico, que es la condición “normal” de esta región y que se traduce en buena calidad del agua.

Con respecto a los resultados del análisis multivariado se registró que en 2013 el aporte de nutrientes está relacionado con aportes de aguas subterráneas a través de DAS, escorrentía y percolación dadas las altas concentraciones de nutrientes observadas y que presentan relación

inversa con la salinidad y el OD (Figura 7.29). Dichos aportes no son homogéneos a lo largo de la ZCY (ni espacial, ni temporalmente) y esto puede deberse a aportes de municipios aledaños a la costa que pueden aportar una alta concentración de nutrientes al acuífero; y también por los aportes *in situ* de las actividades y asentamientos antropogénicos.

El ACP mediante el factor 1 nos muestra, el componente de las DAS, donde relaciona, inversamente a las especies de NID con la T y el SiRS, es decir, las aguas con menor temperatura y que tienen la presencia de SiRS están relacionadas con altas concentraciones de NID, por lo que nos indica el aporte de NID está siendo ocasionado por las DAS a la ZCY. Por su parte el factor dos, nos enseña el componente antrópico, al agrupar todos los nutrientes, y separando las variables fisicoquímicas del sistema.

Al observar el análisis de factores de los nutrientes y las variables fisicoquímicas de manera integral (tabla 7.4). La relación inversa entre el OD y las especies de N del primer factor y el PRS con la temperatura y salinidad del segundo factor, se puede señalar que el factor 1 corresponde a los aportes de las DAS con menor temperatura y salinidad y altas concentraciones de N inorgánico, posiblemente asociados a aguas residuales. Mientras que el factor dos relaciona a los procesos regidos por procesos marinos de la ZCY.

La clasificación de la ZCY para este año con base en el análisis de agrupamiento se dividió en tres zonas (Figura. 7.31). La zona 1N corresponde a aquellos municipios que pueden tener mayor impacto a la ZCY debido a la alta densidad poblacional como Progreso o a las actividades agropecuarias como en Tizimin, en esta zona se reportó la mayor concentración de PRS. En la zona 2N presentó la menor S y OD, lo que indica, que en estos municipios hay una mayor influencia de las aguas subterráneas del acuífero, con alto contenido de NID. Incluso dentro de este grupo se encuentra Dzilam de Bravo, municipio que presenta la intersección del anillo de cenotes con la ZCY y donde es común observar manantiales costeros. La zona 3N, es un grupo de municipios en los que a pesar de tener aporte de aguas subterráneas que se ve reflejado en

la alta concentración de silicio, es el que presentó la menor productividad primaria medida como Cl-a.

En el 2014 el aporte de nutrientes por agua subterránea no presentó la misma influencia que en el 2013, esto probablemente relacionado con un menor flujo del acuífero dada una menor precipitación pluvial. En cuanto a los aportes de nutrientes en este año, se observó una relación directa entre  $\text{NH}_4^+$  y SiRS que su vez es inversa con el OD, (Figura. 7.32) lo que puede estar indicando el aporte de amonio a través de las aguas residuales del acuífero hacia la ZCY. La Cl-a presentó relación inversa al PRS y relación directa con  $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ , por lo que la productividad primaria de la ZCY puede estar siendo limitada por la concentración de N.

El ACP del 2014 mediante el factor 1, diferencia entre la productividad de la ZCY (Cl-a y OD) y el aporte de nutrientes por parte de las DAS al relacionar el NID inversamente con la T. El factor 2 al relacionar al NID con la Cl-a nos explica de igual forma que la productividad del sistema está siendo influenciada principalmente por la presencia de  $\text{NO}_3^-$ .

La relación inversa entre el SiRS y  $\text{NH}_4^+$  con el OD, que se muestra en la Tabla 7.6 puede estar indicando la contribución de agua del acuífero con una mayor concentración de silicatos producto de la disolución o interacción agua/roca de la matriz kárstica. Mientras que la relación inversa del PRS con  $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$  y Cl-a (Tabla 7.6), variables que se asocian con la productividad de este año y la cual puede estar condicionada por el N inorgánico (Fourqurean et al., 1993, Null et al., 2014) siendo menor la concentración debido a la disminución del flujo del acuífero ocasionado por menores precipitaciones en 2014.

La clasificación de este año dio como resultados nuevamente 3 zonas (Fig. 7.33) que a su vez fueron diferentes en comparación con el año anterior. La zona 4N, que incluye a los municipios del centro de la ZCY (Fig. 7.34) y donde el mayor número de descargas es por escorrentías en el área cercana a la costa presentó la menor mediana de OD ( $4.95 \text{ mg/m}^3$ ) y la mayor

concentración de nutrientes ( $\text{SiRS} = 7.6 \mu\text{M}$ ;  $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- = 1.73 \mu\text{M}$ ; y  $\text{NH}_4^+ = 1.59 \mu\text{M}$ ). El aporte de las DAS es menor comparado con el año anterior, debido a la menor precipitación que existió, por lo que el NID puede ser asociado a las actividades en la zona costera de cada municipio.

La zona 6N, cuyos municipios son los extremos, donde las descargas de agua subterránea tienden a ser más importantes debido a la intersección del anillo de cenotes, fracturas, etc (Herrera-Silveira et al., 2004; Aranda-Cirerol et al., 2006; Morales 2009), presentó la menor concentración de SiRS ( $4.26 \mu\text{M}$ ) y la mayor concentración de OD ( $6.36 \text{ mg/m}^3$ ), sin embargo, a pesar de la baja concentración de nutrientes este grupo presentó la mayor productividad, del lado Este de la ZCY, probablemente influenciada por la surgencia de cabo Catoche, por lo que dichos nutrientes son consecuencia de una respuesta del sistema a este aporte natural de nutrientes.

La clasificación de las zonas de la ZCY depende de la importancia relativa de controles regionales/locales, terrestres/marítimos, así como el tipo e intensidad de las actividades humanas realizadas en cada zona (Herrera-Silveira y Morales 2009, Lapointe et al. 2004). Herrera-Silveira y Morales 2009 reportaron 4 zonas hidroquímicas de la ZCY, correspondientes a un estudio que integra las 3 temporadas climatológicas de la región desde febrero 2002 a noviembre 2006. Esta clasificación a pesar de ser diferentes con las determinadas en este estudio, no presentan similitud, pero sí una tendencia similar con la clasificación del 2014, como la baja temperatura de las zonas influenciadas por la surgencia de cabo Catoche, reportado en su ZIV, o la concentración de especies del N y las descargas por escorrentía de la zona 5N, reportada en su ZII. Las diferentes zonas en ambos estudios pueden deberse a que es una zona con dinámica constante y que las variaciones dependerán de la temporalidad de la zona y factores como las lluvias y las DAS.

Tabla 8.1 Clasificación de la calidad del agua de las subzonas de la ZCY Herrera-Silveira 2009 (clasificación buena= alta+buena del TRIX)

Región	Indice Trix	Nivel Trofico	Calidad del agua
HZ I Celestun- Palmar San Felipe	4-4.8	Mesotrónica (moderado)	buena
HZ II Progreso - Telchac	4-5	meso-eutrofico (moderado –alta)	mala
HZ III Dzilam- Las Bocas	4.5-5.5	meso-oligotrofico (moderado-bajo)	buena
HZ IV Ria Lagartos -Cuyo	4-4.8	Mesotrónica (moderado)	buena

En cuanto a calidad del agua Herrera-Silveira y Morales 2009 indicaron que la condición del sistema costero era mesotrónica (Tabla 8.1). Como ya se menciono anteriormente, en este estudio se observo como mejoro en toda la ZCY su nivel trófico, pasando de un estado mesotrónico y de calidad del agua regular a un nivel trofico menor (oligotrofico) y mejorar su calidad del agua, cuyas diferencias se pueden asociar a los diferentes aportes de las DAS por la disminución de la precipitación. El único municipio que presentó una buena calidad del agua y un nivel trofico bajo en ambos años fue Dzilam de Bravo, esto coincide tanto con lo reportado por Herrera-Silveira y Morales 2009, como por Aranda-Cirerol et. al, en 2006 donde indico que Dzilam de Bravo es la zona mas pristina de la ZCY.

La diferencia que se observa en la calidad del agua tanto en este estudio como en los reportado por Herrera-Silvera y Moales en 2009, nos indica que en el sistema de la ZCY esta altamente influenciada por las DAS, y que temporalmente es dinámica, por lo que es importe el monitoreo de la zona. Espacialmente podemos asociar que la mejor calidad del agua se reporta para la zona de Dzilam de Bravo y esta se ha logrado mantener.

En la Tabla 8.2 se realiza una comparación de los resultados de este estudio, con otras concentraciones reportadas de nutrientes en dos zonas costeras diferentes en el mundo y con el estudio previo realizado para la misma zona. Respecto ambos estudios de esta zona, la mediana se encuentra en el mismo orden de magnitud para todos los nutrientes, aunque en el

caso de  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$  y SiRS el máximo se duplico ( $\text{NO}_3$  y SiRS) o incremento hasta 4 veces su valor, lo que nos indica que los aportes puntuales han incrementado entre ambos estudios. Respecto a los valores reportados en otros estudios de zonas kársticas, donde la zona costera esta influenciada por DAS, se observó que en comparación con el estudio de Zhang et. al 2009, y de Tamborski et al. 2020 las concentraciones de nutrientes fueron mayores en este estudio. Sin embargo, Tamborski et al. 2020 reporta las concentraciones de las DAS ( $\text{NO}_3^-$  24–81  $\mu\text{M}$ , SiRS 60–110  $\mu\text{M}$ , PRS 0.15–0.46  $\mu\text{M}$ ,  $\text{NO}_2^-$  ~0–0.06  $\mu\text{M}$  y  $\text{NH}_4^+$  0.04–0.23  $\mu\text{M}$ ) mencionando que la descarga de agua subterránea es muy variable en el tiempo, y esta pueden inferirse con las mediciones de salinidad, como los flujos de estos nutrientes pueden estar afectados por factores como una fuerte precipitación, corroborando lo que se ha observado y planteado en este estudio.

Tabla 8.2 Comparación de la concentración de nutrientes con otras zonas de estudio

	Zona de estudio	T (°C)	S UPS	OD (mg/L)	$\text{NO}_3$ $\mu\text{M}$	$\text{NO}_2$ $\mu\text{M}$	$\text{NH}_4$ $\mu\text{M}$	PRS $\mu\text{M}$	SiRS $\mu\text{M}$	Cl- $\sigma$
Este estudio (2013-2014)	ZCY	30.45 (25-33.9)	36.1 (31-39)	5.37 (1.4-9)	1.25 (0.5-6.5)	0.165 (0.01-0.81)	1.18 (0-26)	0.23 (0.03-1.5)	6.21 (1-43)	0.67 (0.02-10.2)
Herrera Silveira 2009 (2002-2006)	ZCY	26.8	36.9 (33-37)	6.4 (2-7)	1.9 (1-3)	0.21 (0.1-0.8)	2.4 (0-6)	0.6 (0-0.4)	4 (0-24)	0.35 (0-5)
Zhang et. al 2009 (2002-2005)	Biscayne Bay, Florida	-	-	-	0.56 (0.18-1.94)	0.13 (0.06-0.30)	1.07 (0.28-3.07)	0.02 (0.01-0.08)	2.3 (0.1-12.6)	-
Tamborski et. al 2020 (2018)	Northwest Mediterranean Sea, France	-	37.8 (28-38)	-	1.19 (0.9-16.13)	0.207 (0.13-1.40)	0.113 (0.04-44.18)	0.039 (0.02-2.20)	1.85 (1.7-19.9)	-

En cuanto a los metales, nos enfocaremos mayormente en el As por ser un éste elemento considerado como potencialmente tóxico por la EPA (2013), al Cu que fue el único elemento que rebasó el valor de SquiRTs (Buchman, 2008), el Cd, que si bien no rebasó el valor mencionado, tiene una presencia ubicua en la ZCY y concentraciones elevadas del mismo han sido previamente reportadas (Pacheco 1994) y el Sr, que corrobora la influencia de la precipitación, escurriéntía y percolación en los aportes de agua dulce a la zona costera.

En cuanto al As tenemos que, si bien no rebasó el valor de SquiRTs, para daño crónico, ni agudo establecidos por Buchman (2009), si presentó una mayor concentración en la zona oeste de la ZCY, lo cual puede estar asociado a una mayor producción y engorda de aves para esa zona del estado (Fig 8.2). El As se encuentra en la Roxarsona, un compuesto organoarsénico utilizado como profiláctico antiparasitario y agente de aumento de peso, es usado en México como aditivo alimenticio para la engorda de aves y ganado, éste actualmente está prohibido por la FDA por su impacto en el medio ambiente (Kan y Meijer 2007; Arcega-Cabrera y Fargher 2016), también es utilizado en baterías, herbicidas para la agricultura, conservador de maderas, en pinturas, medicamentos, colorantes y fabricación de vidrio (Fergusson 1990). Por ello, es probable que su presencia esté relacionada con la actividad aviar, siendo Mérida el municipio que reporta la presencia de varias granjas avícolas (figura 7.3) que a través de sus excretas pueden estar liberando As al agua subterránea y de ahí a la ZCY. El As no se encuentra en una concentración capaz de producir daño a los estados primarios de la biota (Buchaman, 2009) sin embargo, su presencia es constante en la ZCY tanto en espacio como en tiempo, lo que indica un aporte constante de este elemento desde la parte interior del Estado hacia la zona costera, lo cual, ante un evento de mayor descarga del acuífero podría llegar a generar un problema en los vulnerables sistemas costeros, como ya fue informado para el Cd por Pacheco et al. (2004).

En cuanto al Cu tenemos que éste es usado como conservador de alimentos, colorante y lo encontramos en un sin número de productos para el control de plagas. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 8.1 en el municipio de Progreso, se observa un máximo de concentración de As ( $0.15\mu\text{gL}^{-1}$ ) y Cu ( $41.43\mu\text{gL}^{-1}$ ), y es 20 veces mas para el As y el doble para Cu respecto al año anterior,

esta concentración se cuantificó para la misma estación, por lo que se puede asociar a un aporte puntual de estos metales en dicha zona relacionada con las actividades urbanas y agropecuarias que se desarrollan en este municipio o en los municipios aledaños tanto costeros como al interior del Estado.

Sin embargo, el Cu no incrementa su concentración de forma asociada a la mayor precipitación, esto puede ser resultado de 1) que el Cu, fácilmente se adsorbe al material particulado suspendido, el cual, ante un evento de mayor flujo puede ser transportado más allá de la zona de monitoreo, 2) es probable también que en 2013 la concentración de Cu haya sido diluida ante el incremento del flujo del acuífero y las DAS, 3) también, de acuerdo con Sadiq (1992) un exceso de Cu en el agua de mar promueve su precipitación en fase sólida depositándolo en los sedimentos de la zona de mezcla entre el agua dulce del acuífero y el agua de mar.

La concentración Cu rebasa los valores SQuiRTS (Buchman 2009) para la exposición aguda y crónica, pudiendo producir daños en los estadíos tempranos de la biota, por ello es necesario señalar que constituye un probable peligro potencial para la biota de la ZCY y se sugiere que las medidas para disminuir su presencia en el agua subterránea se lleven a cabo de forma inmediata. El Cd, Cr y V no rebasan los valores SquiRTs, sin embargo, es probable que su variación espacial esté asociada a las actividades antropogénicas tierra adentro, así como a los aportes puntuales de los municipios costeros.

Es importante señalar que la Península de Yucatán no presenta aportes naturales de Cd y en general así sucede con toda la plataforma calcárea continental, por lo que su presencia debe ser causada por actividades humanas (Saenz 2005). El Cd se utiliza como material de recubrimiento, pigmento de la pintura, en plásticos, fungicida y es un componente de algunos fertilizantes (Mondal 2010). El Cd es un elemento que está asociado a la materia orgánica a un  $\text{pH} > 6$ , con la cual forma complejos. Lo anterior puede explicar la presencia de Cd en la ZCY (González y Vázquez 1994, Schulin et al. 1995; Páez 1998) ya que el Cd puede estar siendo co-transportado en el agua subterránea asociado a partículas de materia orgánica. De igual manera existe evidencia de que la formación de fases sólidas juega un papel en la sorción (adsorción y

desorción) Cd (II) en suspensiones de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) alrededor de pH 7. La calcita adsorbe este catión inicialmente por una reacción rápida que parece implicar el intercambio de Ca por Cd (Herber 2008), con base en las características geológicas de la Península de Yucatán este equilibrio puede estar presente.

La concentración elevada de Cd en la ZCY podría estar relacionada a las actividades agrícolas de la zona y al manejo de estas (figura 7.2), ya que este metal está asociado a fertilizantes fosfatados, así como a la incineración de desechos domésticos, actividad muy común en el estado de Yucatán.

La variación anual de estroncio fue útil para la identificación de la presencia de agua subterránea en la ZCY ya que de acuerdo con Mondal (2010) este metal presentara menos concentración en aguas dulces que en aguas marinas (Ward 1995), entonces en un evento de mayor aporte de aguas subterráneas se espera una disminución en la concentración de este metal en la ZCY. La mediana en el 2013 fue de  $302 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  y mas del doble ( $732 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) para el 2014, (Fig. 7.28) por lo que coincidiendo con Modal (2010) se puede asociar un mayor aporte de aguas subterráneas, lo cual coincide con que en el 2013 existio mayor precipitación (371.6mm) que en el 2014 (194.9mm) para los meses de junio y julio. La diferencia de casi el 50% en la precipitación y en la concentración de Sr hace referencia a como a la influencia del agua pluvial y las aguas subbterráneas llegan a la ZCY.

Como se mencionó anteriormente, es probable que las bajas concentraciones de la mayoría de los elementos que se encontraron en 2013 sean respuesta a un proceso de dilución o cotransporte, y de ser así, entonces se esperaría una relación entre la salinidad y la concentración de los elementos, siendo en este caso directa e indicando que, dado el proceso de dilución, al haber una menor salinidad habría una menor concentración, lo cual se presentó en 2013 para la ZCY.

Con respecto a los resultados del análisis multivariado de los metales, la relación directa que presento el Sr con el OD, en el 2013 nos indica la presencia de DAS en la ZCY pues el Sr a bajas

concentraciones esta relacionado a aguas continentales (Ward 1995). La relación directa de la T con el As y Cr, se puede asociar a que la fuente de estos metales es por parte de las DAS. Mientras que la relación directa entre el V y la salinidad (S), puede estar relacionada a los procesos de remineralización de la zona costera, además de considerar que la zona de estudio pertenece al Golfo de México, la cual es una zona petrolífera, no es de extrañar que este elemento, que está presente en elevadas concentraciones en el petróleo, esté asociado a salinidades altas del agua de mar (Arcega-Cabrera, et.al 2021b, Dótor-Almazan, et. al 2021).

De acuerdo con Ward 1995, la menor concentración de Sr está asociada a aguas dulces, de igual manera se espera que las aguas subterráneas presenten una concentración menor de oxígeno disuelto debido a la reducción de la materia orgánica y a la poca interacción con la atmósfera. Con base en lo anterior es probable que en la zona 1M (Fig. 7.37) los metales estén asociados mayormente con aportes marinos y en la zona 3M con aportes del acuífero, sin embargo, sería necesario medir la concentración de metales en sedimentos para poder determinar si está existiendo una precipitación hacia los sedimentos.

Si vemos espacialmente las zonas (Fig7.37), la zona 1M incluye al municipio con mayor densidad demográfica (Progreso) de la ZCY y al de mayor área de superficial dedicada al sector agropecuario (Tizimín), por lo que si bien la concentración de metales puede estar regida por un componente principalmente marino, agua-sedimento, es probable que la presencia de dichos metales pueden ser aportes de las DAS a la ZCY a través de escorrentía y percolación principalmente de las actividades cercanas a la costa, además de DAS asociadas a actividades tierra adentro (lejanas a la costa) (Arcega-Cabrera, et.al 2021b, Dótor-Almazan, et. al 2021). De igual manera podrían haber sido liberados a columna de agua por procesos de remineralización de la materia orgánica, o podrían haber precipitado en los sedimentos por formación de fases insolubles por competencia iónica (cloruros principalmente) (Dótor-Almazan, et. al 2021). Sin embargo, dada la compleja hidrogeoquímica de los metales en zonas de transición agua dulce/salada, se requiere llevar a cabo un estudio más fino para poder determinar la movilidad de los metales en la ZCY y sus probables fuentes.

La relación inversa de la Salinidad y T con el OD que se registro en el 2014 puede estar indicando que los metales y As están asociados a entradas marinas, sin embargo, la presencia de una mezcla de aguas está dada por el OD inverso a la salinidad (agua subterránea) y por la relación del Sr tanto con la salinidad (agua marina) como con el OD (agua dulce). Sin embargo, para poder asegurar esto ser requeriría llevar a cabo un estudio con más tiempos de muestreo para crear una serie de análisis tanto en agua como en sedimento y determinar un comportamiento inverso entre la concentración de metales en ambos compartimentos. Esto corroboraría que los metales están siendo aportados por agua subterránea, pero ante cambios de salinidad y condiciones oxido-reductoras forman fases insolubles que precipitan.

La clasificación de zonas en el 2014, podemos observar en la figura 7.39 que la diferencia de la zona 4M corresponde a los municipios de centro cuya mayor influencia proviene de las DAS, la zona 5M presento la mayor concentración de Sr y por lo cual en este año esta mas definido por los procesos marinos presentes en la ZCY, finalmente la zona 6M son los municipios de los exptremos y los de intersección con el anillo de cenotes. Es importante señalar que para 2014 la distancia entre los grupos obtenidos en el análisis de agrupamiento es muy pequeña para ser considerada significativa, por lo que es probable que la baja precipitación de ese año esté generando un ambiente costero más dominado por agua marina y por ende con una tendencia a la homogeneidad en términos de metales.

El comportamiento encontrado en los metales y la identificación de las probables fuentes, se complica dada la facilidad con que estos elementos son movilizados en el medio ambiente ante cambios de salinidad, oxígeno disuelto, condiciones oxido-reductoras, adsorción a material particulado y precipitación a sedimentos. Así también, es probable que la misma hidrología de la zona vadosa del acuífero esté jugando un papel fundamental en el aporte de estos elementos a la ZCY, aparte de la precipitación pluvial y el incremento del flujo del acuífero.

En la tabla 8.4 se observa la comparación de las concentraciones de metales en tres zonas diferentes a la del estudio. La zona de Malacca en comparación con este estudio tiene altas concentraciones de metales, en especial de As, en donde Juen 2013 et. al. reporta que el valor máximo corresponde a un sitio en específico que podría estar relacionado con un aporte de subproductos de la agricultura, mientras que atribuye que el Cd y Cr es probable que estén asociados a contaminación industrial. Por otro lado, tenemos las zonas de Malaga y Greater Bay Area (GBA), cuyas concentraciones reportadas son del mismo orden de magnitud que las de este estudio, estas zonas también tienen presencia de acuíferos kársticos. Luo et al 2022 reporta tanto las concentraciones de la zona costera como del agua subterránea y de las descargas de los ríos en la zona de estudio, y menciona As, Cd y Cr, presentan un flujo cuya presencia en la zona costera proviene principalmente de las DAS mencionando que es probable que las fuentes de estos metales sean por actividades antropogénicas.

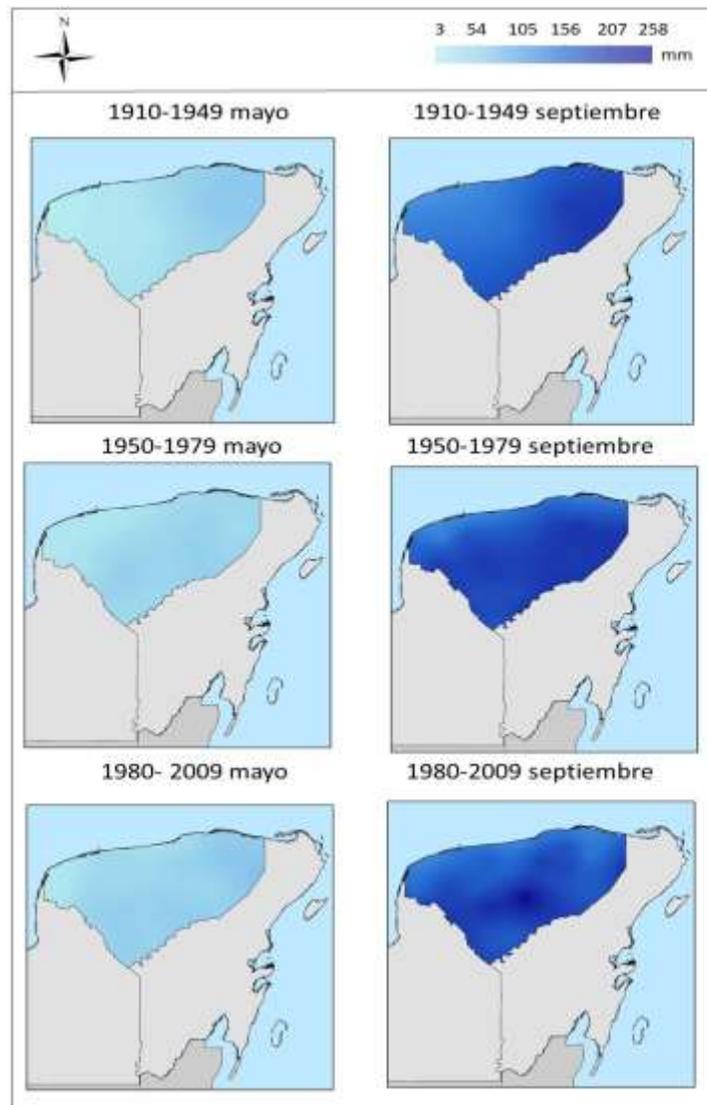
Tabla 8.4 Comparación de la concentración de metales con otras zonas costeras del mundo. (Karsticas o tropicales)

	Zona de estudio	T (°C)	S UPS	OD (mg/L)	C mS	As ppb	Cu ppb	Cd ppb	Crppb	Vppb	Sr ppb
Este estudio (2013-2014)	ZCY	30.45 (25-33.9)	36.1 (31-39)	5.37 (1.4-9)	60.2 (0.5-6.5)	<LD (<LD-0.15)	4.72 (1.02-41.4)	0.04 (<LD-0.94)	<LD (<LD-11.9)	0.934 (<LD-2.30)	606.7 (116-915)
Luo et al. 2022 (2019)	GBA China		22.85 ± 12.61	4.56 ± 0.46		1.36 ± 0.28	0.68 ± 1.62	0.07 ± 0.02	0.84 ± 0.26		
Alonso et. al 2013	Malaga, España					ND	1.31 (ND-2.92)	0.184 (ND-0.48)	0.75 (ND-1.73)		
Looi et.al 2013	Malacca, Malasia		21.92 (7.4-32.2)	4.11 (0.54-6.78)	35.73 (15.4-49.0)	43.49 (4.98-86.14)	86.08 (5.21-537.7)	0.58 (<LD-5.66)	0.35 (<LD-2.04)		

## 8.1 Calidad de agua y cambio climático

El cambio climático tiene el potencial de producir anomalías en la temperatura y la precipitación que alteran las características atmosféricas del ciclo hidrológico global a través de una mayor evaporación, aumento del nivel del mar, deshielo de los glaciares y casquetes polares, cambios en los patrones de lluvia y eventos climáticos extremos (IPCC 2014).

Respecto a la variación en la precipitación en Yucatán, se observa que presenta un diferencial de más de un orden de magnitud entre estiaje y lluvias (Fig. 8.1), y que de acuerdo con el promedio no existe una tendencia clara que indique que el sistema está evolucionando hacia las sequías o hacia las inundaciones, dada la variabilidad interanual existente en la zona.



*Figura 8.1 Mapas de promedio de la precipitación en épocas de estiaje (mayo) y lluvias (septiembre) para Yucatán, generados con los datos disponibles de CONAGUA (2021)*

Como ejemplo de la tendencia del sistema en términos hídricos, se muestra a continuación el gráfico de anomalías de la media de precipitación para Yucatán (Fig. 8.2)

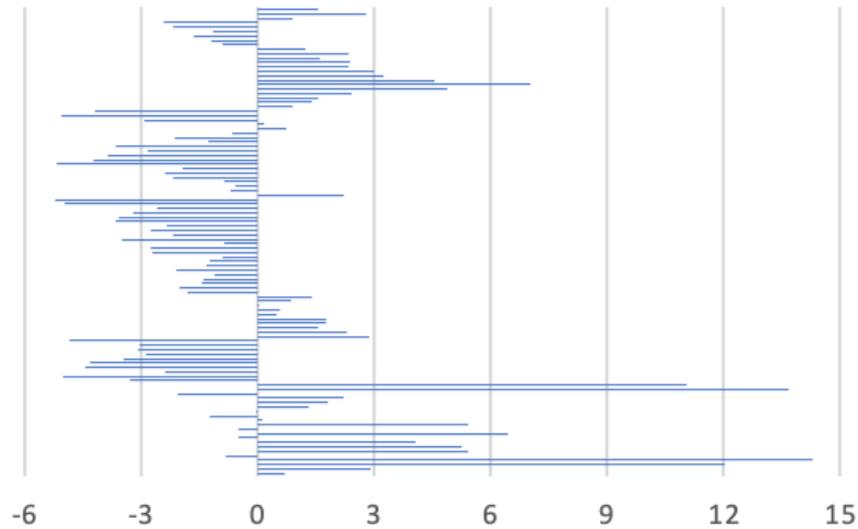


Figura 8.2 Anomalías con respecto al nivel medio del agua en pozos de abastecimiento de la Península de Yucatán. La línea cero se estableció utilizando el valor medio de los registros mensuales en los principales pozos de abastecimiento de la península de Yucatán de 2002 a 2018 de CONAGUA, 2021.

Sin embargo, El Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) y el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Orellana-Lanza y Espadas-Manrique, 2009) realizaron una serie de predicciones teniendo en cuenta la información actual sobre las tendencias de precipitación a lo largo de la Península para crear probables escenarios futuros de anomalías de precipitación que muestran dónde se podrían esperar sequías o inundaciones en relación con el cambio climático (Figura 8.3).

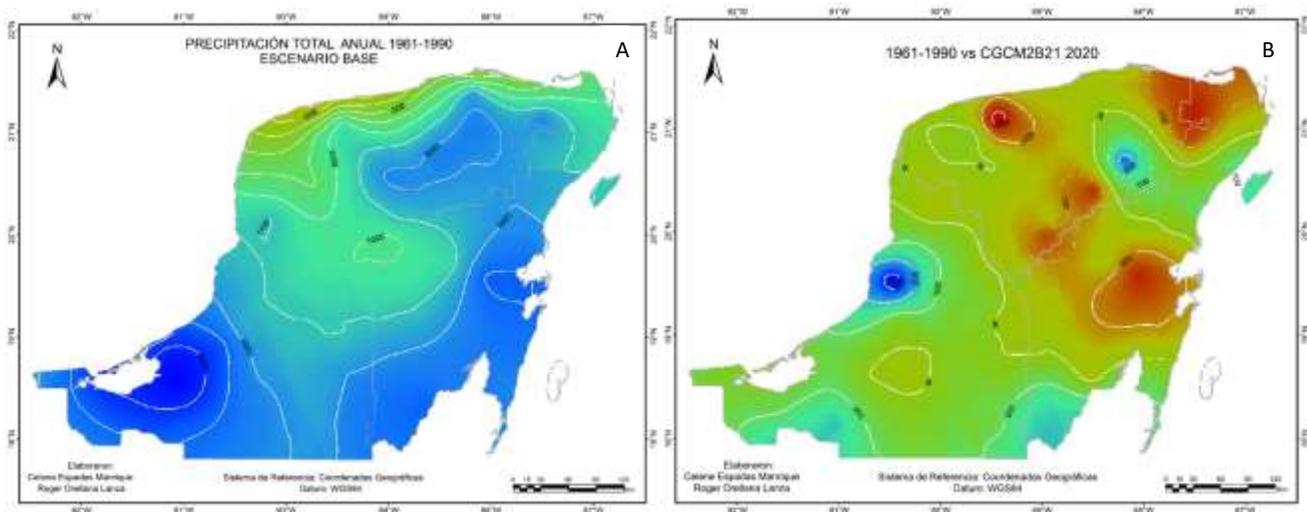


Figura 8.3 Datos base (A) utilizados en el cálculo de anomalías futuras de precipitación (b) en la península de Yucatán. Tomado de Orellana et al. (2009).

Los impactos del cambio climático en la contaminación de las aguas subterráneas son un problema importante, que se intensifica cuando se reduce el almacenamiento (en eventos de menor precipitación). La degradación más grave de la calidad del agua en las regiones agrícolas como es la parte central de Yucatán, es causada por el uso de fertilizantes y pesticidas, que resulta en la escorrentía de productos químicos de los campos agrícolas a las aguas superficiales y la filtración en las aguas subterráneas (Polanco et al. 2020). La contaminación por nitrato de las aguas subterráneas es importante en Yucatán (Pacheco et al. 2001) y como observamos en este estudio, durante eventos de lluvias este nitrato es acarreado hasta la zona costera afectando con ello la calidad del agua de esta.

Es decir, bajo fuertes lluvias aumentará la escorrentía, lo que permitirá una mayor lixiviación y transporte de agroquímicos a las aguas subterráneas, así como promover que aquellos elementos y compuestos que quedaron atrapados en la matriz sedimentaria sean liberados al agua subterránea en condiciones de alta carga hidráulica, como tormentas o huracanes; si aunado a esto tenemos una disminución de sistemas como los manglares que son reconocidos por los diversos servicios ecosistémicos que brindan (Ewel et al., 1998; Sanjurjo y Welsh, 2005), incluidos sus roles como hábitats para sustentar la pesca, zonas de amortiguamiento para la protección contra huracanes e inundaciones (Alongi, 2008; Gilman et al., 2008), biofiltros de nutrientes que mantienen la calidad del agua de lagunas costeras, sumideros de carbono, refugios de vida silvestre regional y migratoria, así como por su valor turístico y cultural (Yañez-Arancibia et al. 1998; Valiela et al. 2001), se verá promovida una disminución en la calidad del agua y afectando con ello al sistema costero.

## 9. CONCLUSIONES

- La ZCY, dadas sus características geológicas kársticas, está altamente influenciada por las DAS. Estas influenciarán la ZCY de acuerdo con el volumen de precipitación pluvial, y con la velocidad de llenado de la zona vadosa del acuífero.
- En 2013 el aporte de nutrientes está dirigido en su mayoría por aportes antropogénicos como aguas residuales, desechos de agricultura y ganadería, la densidad demográfica del municipio, la convergencia del anillo de cenotes y la zona de costa. En el 2014 los procesos influidos por controles mar-costa, como las corrientes marinas propias, principalmente la corriente de Yucatán o como ocurre con la surgencia de Cabo Catoche, presentaron una mayor influencia.
- Para nutrientes, en presencia de una mayor precipitación pluvial, los aportes principales están relacionados con aguas subterráneas y probablemente con fuentes aledañas a la zona de municipios costeros. Cuando dicha precipitación disminuye, los aportes se diversifican, incluyendo al aporte por las actividades en los municipios costeros y en menor medida al de los aledaños.

- Los municipios costeros de la ZCY mostraron ser la fuente principal de nutrientes en el año con menor precipitación, mientras que en el año con mayor precipitación tanto los municipios costeros, como los aledaños fungieron como fuente de nutrientes, a través de DAS, percolación y escorrentía.
- Para los metales no se puede diferenciarse entre los municipios costeros o los aledaños como fuente principal dada la complejidad de la hidrogeoquímica de los elementos y la hidrología de la zona. Sin embargo, se registró un aporte de As, Cu, Cd y V relacionado con agua subterránea y que probablemente indique que las actividades antropogénicas tierra adentro tengan mayor influencia en la concentración de metales en la ZCY.
- Se registró que el Cu es el único metal que sobrepasa las concentraciones de los criterios de SQUIRTS, tanto para los niveles de exposición crónica como la aguda para ambos años, indicando un aporte constante e independiente de las condiciones hidrológicas y asociado a los municipios costeros y aledaños, por lo que se recomienda tomar medidas inmediatas para disminuir su concentración en el agua subterránea.
- La calidad del agua de la ZCY presentó una asociación significativa con el aporte de nutrientes en presencia de una alta precipitación pluvial. En el año con mayor precipitación la calidad del agua fue media, indicando un ambiente mesotrófico. En el año con menor precipitación la calidad del agua fue buena, indicando un ambiente oligotrófico
- La concentración de SiRS y Sr que fueron como trazadores indicaron que si hay presencia de agua del acuífero en la ZCY.
- La clasificación por zonas clasificó a los municipios con características similares, sin embargo, estas zonas no son definitivas y pueden variar a través del tiempo, por diversos factores como el aumento o disminución de DAS o por aumento o disminución de la precipitación. Por ello la ZCY es un sistema dinámico que requiere del monitoreo constante.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso Castillo, M. L., Sánchez Trujillo, I., Vereda Alonso, E., García de Torres, A., & Cano Pavón, J. M. (2013). Bioavailability of heavy metals in water and sediments from a typical Mediterranean Bay (Málaga Bay, Region of Andalucía, Southern Spain). *Marine Pollution Bulletin*, 76(1–2), 427–434. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2013.08.031>
- Alvarez-Góngora, C., y Herrera-Silveria, J.A. (2006). Variations of phytoplankton community structure related to water quality trends in a tropical karstic coastal zone. *Marine Pollution Bulletin* 52:48-60
- APHA (1995). Standard methods for the examination of water and wastewater. Amer. Publ. Health Assoc.
- Aranda-Cirerol, N. (2004). Eutrofización y calidad del agua de una zona costera tropical. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona. Barcelona, España. 2004.
- Aranda Cirerol, Nancy; Herrera-Silveira, Jorge A.; Comín Francisco A (2006) Nutrient water quality in a tropical coastal zone with groundwater discharge northwest Yucatán, México *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 68, 445-454
- Arcega-Cabrera F & A. M.-B. (2009). Variations of Pb in a mine-impacted tropical river, Taxco, México: use of geochemical, isotopic and statistical tools. *Appl Geochem* 24, 162–171.
- Arcega-Cabrera F; N.-B. E.-V. (2014). Lead from hunting activities and its potential environmental threat in a protected wetland in Yucatan, Mexico. . *Environ Ecotoxicol Safety* 100, 251–257.

- Arcega-Cabrera, F.; Garza Pérez, R.; Noreña Barroso, E., & Ocegüera-Vargas, I. (2015). Impacts of Geochemical and Environmental Factors on Seasonal Variation of Heavy Metals in a Coastal Lagoon Yucatan, Mexico. *Bull Environ Contam Toxicol*, 58–65.
- Arcega-Cabrera F. & L.F. Fargher (2016) Education, fish consumption, well water, chicken coops, and cooking fires: Using biogeochemistry and ethnography to study exposure of children from Yucatan, Mexico to metals and arsenic, *Science of the Total Environment* 568, 75–82.
- Arcega-Cabrera F, Sickman JO, Fargher L, Herrera-Silveira J, Lucero D, Ocegüera-Vargas I, Lamas-Cosío E, Robledo-Ardila PA. (2021) Groundwater Quality in the Yucatan Peninsula: Insights from Stable Isotope and Metals Analysis. *Ground Water*. 59(6):878-891. doi: 10.1111/gwat.13109.
- Arcega-Cabrera, F., Bouchot, G. G., Cosío, E. L., Almazán, A. D., Moreno, V. C., & Tapia, I. M. (2021b). Spatial and Temporal Variations of Vanadium and Cadmium in Surface Water from the Yucatan Shelf. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 0123456789, 2–7. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03234-3>
- ASK (Amigos de Sian Ka'an) (2003) Tratamiento de Aguas Residuales: construyendo las Bases Para la Conservación del Agua y su Biodiversidad Asociada en la Península de Yucatan [Wastewater treatment: constructing the basis for the conservation of water and the associated biodiversity on the Yucatan Peninsula]. CD-ROM, Amigos de Sian Ka'an, The Nature Conservancy y la Comisión de Áreas Naturales Protegidas, Cancún, Quintana Roo, Mexico
- Bauer-Gottwein, Peter; Gondwe, Bibi R. N.; Charvet, Guillaume; Marín, Luis E. ; Rebolledo-Vieyra, Mario; Merediz-Alonso, Gonzalo (2010) Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal* 19, 507–524
- Bianchi, T.S., Pennock, J.R., and Twilley, R.R. (1999) Biogeochemistry of Gulf of Mexico Estuaries: Implications for management. En: Bianchi, T.S., Pennock, J.R. y R.R. Twilley. *Biogeochemistry of Gulf of Mexico Estuaries*. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Bonnand, P; James, R.H.; Parkinson, I.J.; Connelly, D.P; Fairchild, I.J. (2013) The chromium isotopic composition of seawater and marine carbonates. *Earth and Planetary Science Letters* 382, 10–20
- Brown A. L.; Martin, J. B., Sreaton, E. J., Ezell, J. E., Spellman, P., & Gulley, J. (2014) Bank storage in karst aquifers: The impact of temporary intrusion of river water on carbonate dissolution and trace metal mobility. *Chemical Geology* 385, 56–69.
- Brown, Theodore L.; LeMay, Eugene; Bursten, Bruce E.; Burdge, Julia R. (2004), *Química. La ciencia central*. Pearson education, 9na edición, México
- Buchman, M. F. (2008) NOAA Screening Quick Reference Tables, NOAA OR&R Report 08-1, Seattle WA, Office of response and Restoration Division, National Oceanic and Atmospheric Administration, 5-6.
- Carrillo L, Lamkin JT, Johns EM, Vásquez-Yeomans L, Sosa-Cordero F, Malca E, Smith RH, Gerard T (2017) Linking oceanographic processes and marine resources in the western caribbean sea large

- marine ecosystem subarea. *Environ Dev* 22:84–96. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2017.01.004>
- Cloern, J.E., (2001) Our evolving conceptual model of coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series* 210, 223–253.
- CONAGUA Precipitación a nivel nacional y por entidad Federativa. Consultado Mayo 2015  
<http://smn.cna.gob.mx/climatologia/TempsyPrecip/Mensuales/2013Prec.pdf>  
<http://smn.cna.gob.mx/climatologia/TempsyPrecip/Mensuales/2014Prec.pdf>
- Constanza, R.; d'Arge, R., de Groot, R; Farber, S; Grasso, M; Hannon, B., y otros. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253–260.
- Contreras, F. B.; Castañeda, L. O.; Torres-Alvarado, R., & Gutiérrez M., I. F. (1996). Nutrientes en 39 lagunas costeras mexicanas. *Rev. Biol Trop* 44, 417-425.
- Delgadillo López, A. E. (2012). Determinación de parámetros fisicoquímicos, estado eutrófico y metales pesados de la laguna de Tecocomulco, Hidalgo; identificación de compuestos quelantes de *Hydrocotyle ranunculoides* L.f. *Tesis que para obtener el grado de Doctor en ciencias ambientales*. Higoalco, México.
- Dótor-Almazán, A., Gold-Bouchot, G., Lamas-Cosío, E., Huerta-Díaz, M. A., Ceja-Moreno, V., Ocegüera-Vargas, I., Zapata-Pérez O., Arcega-Cabrera, F. (2021). Spatial and temporal distribution of trace metals in shallow marine Sediments of the yucatan shelf, gulf of mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, doi:10.1007/s00128-021-03170-2
- Echeverría García, A. W., & Gold-Bouchot, G. (2014). Metales pesados en la fauna silvestre. En A. V. Botello, J. Rendon von Osten, J. A. Benítez, & G. Gold-Bouchot, *Golfo de México, Contaminación e impacto ambiental: Diagnostico y tendencia* (Vol. I). UAC,UNAM-ICMyL, CINVESTAV-Unidad Mérida.
- EEA. (13 de Abril de 2011). *European Environment Agency*. Recuperado el Mayo de 2015, de <http://www.eea.europa.eu/publications/92-826-5409-5/page035new.html>
- Enriquez C, Mariño Tapia I, Jerónimo Moreno G, Capurro Filograsso L (2013) Thermohaline processes in a tropical coastal zone. *Cont Shelf Res* 69:101–109. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.08.018>
- EPA (2013) CADDIS volume 2: sources, stressors & responses: metals.  
[http://www.epa.gov/caddis/ssr\\_met\\_int.html](http://www.epa.gov/caddis/ssr_met_int.html). Consulted August–September 2013
- FAO. (2015). Recuperado el 2015, de <http://www.fao.org/forestry/icam/4302/es/>
- Fergusson, Jack. (1990) *The Heavy Elements. Chemistry, Environmental Impact and Health Effects*. Chemistry Department, University of Canterbury Ed. Pergamon Press. U.K.
- Fong P.; Zedler, J.B. & Donahue, R:M. (1993). Nitrogen vs. Phosphorus limitation of algal biomass in shallow coastal lagoons. *Limnology and Oceanography*. 38 (5), 1993, 906 - 923.

- Figueroa-Zavala, B.; Correa-Sandoval, J.; Ruiz-Zarate, M.; Weissenberger, H. & Gonzalez Solís, D. (2015). Environmental and socioeconomic assessment of a poorly known. *Ocean & Coastal Management* 110, 25-37.
- Fisher, T.R., Peele, E.R., Ammerman, J.W., y Harding, L. (1992). Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. *Marine Ecology Progress Series* 82, 51-63.
- Ford, D.C. and P.W. Williams. (2007) *Karst geomorphology and hydrology*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Chichester, U.K.
- Fourqurean, J.W.; Jones, R.D.; Zieman, J.C. (1993) Process influencing water column nutrient characteristics and phosphorus limitation of phytoplankton biomass in Florida Bay, FL, USA: inferences from spatial distributions. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 36 (3), 295-314
- García, Gil; Graniel Castro, Eduardo, (2010) *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán Capítulo 1 Contexto físico, Geología* (págs.4-6). México. CICY tomado de <http://www.cicy.mx/Sitios/Biodiversidad/> Última revisión: noviembre 2016
- García, R.M., García, M.M. y Cañas, P.R. (1994) Nitratos, Nitritos y compuestos de N-nitroso. Centro panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la salud. Organización Mundial de la Salud. Serie Vigilancia 13. pp. 19-27.
- Glynn Henry, J; W. Heinke, Gary, (1999) *Ingeniería Ambiental Capítulo 9 Ecología* (pág. 318). México Traducción de M en C. Héctor Javier Escalona y García, UNAM
- González-Fierro A. y Vazquez-Botello A. (1994). Presencia de metales en sedimentos recientes y organismos de la laguna de Sontecomapan, Veracruz, México. *Hidrobiológica: Universidad Autónoma Metropolitana*. México. Vol. 4 (1-2), págs. 35-43.
- González Herrera, R., Rodríguez Castillo, R., & Coronado Peraza, V. (2007). Atenuación natural en el acuífero yucateco. *Int. Contam. Ambiental* 23, 5-15.
- Guagliardi, I; Domenico Cicchella; Rosanna De Rosa; Nicola Ricca; Gabriele Buttafuoco; (2016) Geochemical sources of vanadium in soils: Evidences in a southern Italy area, *J. Geochem. Explor. in press*
- Heaton, T. 1985. Isotopic and chemical aspects of nitrate in the ground water of the Springbok Flats. *Water, SA*. Vol. 11, No. 4, pp. 199-208
- Herber, Robert F. M.(2008) *6 Cadmium de Elements and Their Compounds in the Environment: Occurrence, Analysis and Biological Relevance, Second Edition* Edited by E. Merian (†), M. Anke, M. Ihnat and M. Stoeppler 689-708
- Hernández Terrones, L., Null, K., Ortega-Camacho, D., & Paytan, A. (2015). Water quality assessment in the Mexican Caribbean: Impacts on the coastal ecosystem. *Continental Shelf Research* 102, 62–72.

- Herrera-Silveira J.A. (1994). Nutrients from Underground Water Discharges in Coastal Lagoon. *Verhandlungen International Vereinigung fur Theoretische and Angewandte Limnologie*, 25:1398-1401.
- Herrera-Silveira, J.A. (1994b). Spatial and temporal patterns in a tropical coastal lagoon with groundwater discharges. *Journal of Coastal Research* 10 (3): 738-746.
- Herrera-Silveira, J.A., Medina-Gómez, I., Aranda-Cirerol, N., Zaldivar, A., Ramírez, J. and Trejo, J. 2002. Trophic status in coastal waters of the Yucatán Peninsula (SE, México) using water quality indicators. In: Brebia C.A. (Ed.). *Environment Problems in Coastal Regions IV*. Wit-Press, Southampton, Boston. Fourth International Conference on Environmental Problems in Coastal Regions, Rhodes Island, Greece. 351-359.
- Herrera-Silveira, J. A., Comín, F. A., Aranda-Cirerol, N., Troccoli, L. y L. Capurro. (2004). Coastal Waters Quality Assessment In The Yucatan Peninsula: Management Implications. *Ocean & Coastal Management*. 47:625-639.
- Herrera Silveira, J., Aranda, N., Troccoli Ghinaglia, L., Comín, F., & Madden, C. (2005). Cap.IV: Manejo de la Zona Costera del Golfo de México. Eutrofización costera en la Península de Yucatán. En *Diagnóstico ambiental del Golfo de México 2* (págs. 823-850). México. SEMARNAT, INEC, Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies.
- Herrera-Silveria. (2006). Lagunas costeras de Yucatán, México: Investigación, diagnóstico y manejo, . *Ecotropicos 19(2)*, 94-108 .
- Herrera-Silveira, J. A., & Morales Ojeda, S. M. (2009). Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico: Assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation. *Marine Pollution Bulletin* 59, 72–86.
- Hipólito Rodríguez, P., Palma Grayeb, R., Mondragón, V. M., Chazaro García, G., & Bando, U. (JUNIO de 2009). *INE-SEMARNAT*. Obtenido de Capítulo 4. Diagnóstico Actual de la Zona Costera del Golfo de México 4.3 Diagnóstico hidrológico. Recuperado de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/609/cap4.pdf>
- Howarth, R.W., Marino, R. y Cole, J.J., 1988. Nitrogen fixation in freshwater, estuarine, and marine ecosystems. 2. Biogeochemical controls. *Limnology and Oceanography*. 33(4, part 2), 688-701.
- INEGI (2009) Estados Unidos Mexicanos. Censo Agropecuario 2007, VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Aguascalientes, Ags. 2009.
- INEGI (2015). Recuperado el mayo de 2015, de [www.inegi.com.mx](http://www.inegi.com.mx)
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp

- IPCS. International Programme on Chemical Safety. (2001). Vanadium pentoxide and other inorganic vanadium compounds, World Health Organisation, Ginebra, No. 29.
- IOC/UNESCO, I. F. (2011). A Blueprint for Ocean and Coastal Sustainability.
- Jeffrey, S.W., Humphrey, G.F. (1975). New spectrophotometric equation for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemistry Physiology.Ptlazen.* 167:191-194.
- Kan, C.A., & Meijer, G.A.L., (2007), The risk of contamination of food with toxic substances present in animal feed. *Anim. Feed Sci. Technol.* 133 (1), 84–108.
- Kantún-Mazano CA, Herrera Silveira JA, Arcega-Cabrera F (2018) Influence of coastal submarine groundwater discharges on sea- grass communities in a subtropical karstic environment. *Bull Environ Contam Toxicol* 100(1):176–183
- Kitsiou, Dimitra y Karydis, Michael (2011), Coastal marine eutrophication assessment: A review on data analysis, *Environment International* 37, 778–801
- Larsson, M.A.; Baken, S.; Gustafsson, J.P.; Hadialhejazi, G.; Smolders, E., 2013. Vanadium bioavailability and toxicity to soil microorganisms and plants. *Environ. Toxicol. Chem.* 32, 2266–2273
- Lee, J.H.W.; Hodgkiss, I.J.; Wong, K.T.M.; Lam, I.H.Y., (2005). Real time observations of coastal algal blooms by an early warning system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 65, 172e–190.
- Li, C., Wang, H., Liao, X., Xiao, R., Liu, K., Bai, J., Li, B., & He, Q. (2022). Heavy metal pollution in coastal wetlands: A systematic review of studies globally over the past three decades. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127312. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.127312>
- Looi, L. J., Aris, A. Z., Wan Johari, W. L., Md. Yusoff, F., & Hashim, Z. (2013). Baseline metals pollution profile of tropical estuaries and coastal waters of the Straits of Malacca. *Marine Pollution Bulletin*, 74(1), 471–476. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2013.06.008>
- López-Geta, Juan Antonio; Fornés Azcoiti, Juan María; Ramos González, Gerardo; Villarroja Gil, Fermín (2009) *Las aguas subterráneas, un recurso natural del subsuelo; 4ta edicion; Instituto Geológico y Minero de España; España*
- Luo, M., Zhang, Y., Li, H., Hu, W., Xiao, K., Yu, S., Zheng, C., & Wang, X. (2022). Pollution assessment and sources of dissolved heavy metals in coastal water of a highly urbanized coastal area: The role of groundwater discharge. *Science of the Total Environment*, 807, 151070. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151070>
- MacCallum, R.C., K. Widaman, S. Zhang, and S. Hong. 1999. Sample size in factor analysis. *Psychological Methods* 4, no. 1: 84–99.
- Marin, L. E. 1990. Field Investigationns and Numerical Simulation of Groundwater Flow in the Karstic Aquifer of Northwestern Yucatan, Mexico. Ph. D. Thesis. 183pp., Northern Illinois University, DeKalb, Il, USA

- Morales-Ojeda, S.M. 2007. Diagnóstico de la zona marino costera del Estado de Yucatán basado en la caracterización hidrológica y del fitoplancton. CINVESTAV, Merida. M.Sc. Thesis, p. 153.
- Mondal N. C.; Singh, V. S. Singh; Puranik S.C; Singh, V.P. (2010) *Trace element concentration in groundwater of Pesarlanka Island, Krishna Delta, India*. Environ Monit Assess 163, 215-227.
- Moreno Fragoso, D. P., Quintero Manzano, J., & Lopez Cuevas, A. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *Contactos* 78, 25-33.
- Movellán Mendoza, Enrique (2003) Memoria de Tesis Modelado de la cuña salina y del flujo de nutrientes en el tramo estuarino del Rio Ebro. UNIVERSIDAD DE BARCELONA Departamento de Ecología.
- Murgulet D, Douglas AR, Herrera-Silveira JA, Mariño-Tapia I, Valle-Levinson A (2020). Submarine groundwater discharge along the northern coast of the Yucatán Peninsula. NCKRI Symposium 8. 16th Sinkhole Conference 206-219 pp
- Nixon, S.W., Ammenman, J.W., Atkinson, L.P., Berounsky, V.M., Billen, G., Boicourt, W.C., Boynton, W.R., Church, T.M., DiToro, D.M., Elmgren, R., Garber, J.H., Giblin, A.E., Jahnke, R.A., Owens, N.J.P., Pilson, M.E.J., y Seitzinger, S.P. (1996). The fate of nitrogen and phosphorus at the land sea margin of the north Atlantic Ocean. *Biogeochemistry* 35, 141-180.
- Null, Kimberly A.; L. Knee, Karen; Crook, Elizabeth D.; de Sieyes, Nicholas; Rebolledo-Vieyra, Mario; Hernández-Terrones, Laura; Paytan, Adina; (2014) Corrigendum to: "Composition and fluxes of submarine groundwater along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula" *Continental Shelf Research* 77, 38–50
- Orellana, R., Espadas, C., Conde, C., and Gay García, C., 2009. Atlas. Escenario de cambio climático en la península de Yucatán. Mérida, Yucatán: Unidad de Recursos Naturales, Centro de Investigación Científica de Yucatán y Centro de Ciencias de la Atmosfera de la Universidad Autónoma de México ISBN: 978-607-7823-06-3
- Pacheco Ávila, J., & Cabrera Sansores, A. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. *Ingeniería 7 Artículo de Divulgación*, 47-54.
- Pacheco, J. (2004). Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los pozos de extracción de agua potable y evaluación de la infraestructura física de los sistemas de abastecimiento de las cabeceras municipales del estado de Yucatán. Final Report, Mérida. *Fondos Mixtos CONACYT-Gobierno del Estado de Yucatan*.
- Pacheco, J., Marín, L., Cabrera, S., Steinich, B., Excolero, O., (2001). Nitrate temporal and spatial pattern in 12 water-supply wells, Yucatan, Mexico. *Environ. Geol.* 40 (6), 708–715
- Páez-Ozuna, F. (2014). Metales y metaloides: origen, movilidad y ciclos biogeoquímicos. En J. R.-B. A. V. Botello, *Golfo de México, Contaminación e impacto ambiental: Diagnostico y tendencia*. UAC, UNAM-ICMyL, CINVESTAV-Unidad Mérida.

- Parsons, T.; Maita, C. & Lally, C. 1984. A manual of chemical and biological methods of seawater analysis. Pergamon Press, Oxford. 173 pp.
- Pérez-Ceballos, R, Pacheco-Ávila, J y Euán-Ávila, J. (2008). Evaluación a escala regional de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en Yucatán, México. *Ambiente Ecológico*, 1-18
- Polanco-Rodríguez, A.G., Arcega-Cabrera, F., Araujo-León, J.A., Lamas-Cosío, E. (2020) Organochlorine Pesticides and Potentially Toxic Elements in Groundwater from a Protected Reserve in the Maya Region of Hopelchen, Mexico *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 104 (5), pp. 568-574. doi: 10.1007/s00128-020-02848-3
- Ponce Velez, G., & Botello, A. (1991). Aspectos geoquímicos y de contaminación por metales pesados en la laguna de terminos, Campeche. En *Hidrobiológica* (Vol. 1, págs. 1-10). México.
- Ryther, J.H., Dunstan, W.M. (1971). Nitrogen, phosphorus and eutrophication in the coastal marine environment. *Science* 171, 1198-1203
- Quinby-Hunt, M.S., Turekian, K.K. (1983). Distribution of elements in sea water. *Eos Trans. AGU* 64, 130–132
- Reyes-Mendoza O, Mariño-Tapia I, Herrera-Silveira J, Ruiz-Mar-tínez G, Enriquez C, Largier JL (2016) The effects of wind on upwelling off Cabo Catoche. *J Coast Res* 32:638–650. <https://doi.org/10.2112/JCOAS-TRES-D-15-00043.1>
- Sadiq, Muhammad (1992) Toxic Metal Chemistry in Marine Environments. New York: Marcel Dekker, 198-240.
- Saxena, V. K., Mondal, N. C., & Singh, V. S. (2004). Identification of seawater ingress using Strontium and Boron in Krishna delta, India. *Current Science*, 86(4), 586–590.
- Schulin R., Geiger G. & Furrer G. (1995). Heavy metal retention by soil organic matter under changing environmental conditions. Biogeochemistry of pollutants in soil and sediments: risk assessment of delayed and non-linear responses. 53-85
- SEMARNAT. (2015).
- Smart, P. B. (2006). Cave development on the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Quintana Roo, Mexico. *Geol. Soc. America Special Paper*, 404.
- Smith, V. H., Tilman, G. D. y Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution* 100:179-196.
- Soriano, A., Pallarés, S., Pardo, F., Vicente, A., Sanfeliu, T., & Bech, J. (2012.). Deposition of heavy metals from particulate settleable matter in soils of an industrialised area. *J. Geochem. Explor.* 113, 36–44.
- Spark, D. (2005). Toxic metals in the environment: the role of surfaces. *Elements* 1 (4), 193-197.

- Stoecker, Barbara; (2008) 7 Chromium Elements and their Compounds in the Environment. 2nd Edition  
2nd Edition. Edited by E. Merian, M. Anke, M. Ihnat, M. Stoepler 709-729
- Strickland, J. and Parsons, T. 1972. A practical handbook of seawater analysis. Bulletin of the Fisheries  
Research Board of Canada, 167, 310 pp.
- Tamborski, J., van Beek, P., Conan, P., Pujo-Pay, M., Odobel, C., Ghiglione, J. F., Seidel, J. L., Arfib, B.,  
Diego-Feliu, M., Garcia-Orellana, J., Szafran, A., & Souhaut, M. (2020). Submarine karstic springs  
as a source of nutrients and bioactive trace metals for the oligotrophic Northwest  
Mediterranean Sea. *Science of the Total Environment*, 732, 1–14.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139106>
- US-EPA. (1997). Protecting Coastal Waters from Nonpoint Source Pollution. U.S. Environmental  
Protection Agency. Washington D.C. USA. 841-F-96- 004E.
- Valderrama-Landeros, L.H., Rodríguez-Zúniga, M.T., Troche-Souza, C., Velazquez- Salazar, S., Villeda-  
Chavez, E., Alcantara-Maya, J.A., Vazquez-Balderas, B., Cruz- Lopez, M.I., Ressler, R., 2017.  
Manglares de Mexico: actualizacion y exploracion de los datos del sistema de monitoreo  
1970/1980–2015. Comision Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de  
Mexico, p. 128
- Valiela, I., Bowen, J.L., York, J.K., 2001. Mangrove forests: one of the World's threatened major tropical  
environments. *Bioscience* 51 (10), 807–815. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051)
- Villanueva Fragoso, S. (2014). Introducción. En A. V. Botello, J. Rendon von Osten, J. A. Benítez, & G.  
Gold-Boucht, *Golfo de México, Contaminación e impacto ambiental: Diagnostico y tendencias* (3  
ed., Vol. 1, pág. 501). UAC,UNAM-ICMyL, CINVESTAV-Unidad Mérida.
- Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco J. y Melillo, J. (1997). Humandomination of Earth's  
ecosystems. *Science* 277:494-499.
- Vollenweider, R. A., Giovanardi, F., Montanari, G., y A. Rinaldi. (1998). Characterization of the trophic  
conditions of marine coastal waters with special reference to the new adriatic sea: proposal for a  
trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*, 9: 329-357.
- Ward, N. I. (1995). Trace elements. In F. W. Fifield, & P. J. Haines (Eds.), *Environmental analytical  
chemistry*. Chapman and Hall: Blackie Academic and Professional.
- Wang , Deli; Sañudo Wilhelmy, Sergio A.; (2009) Vanadium speciation and cycling in coastal waters  
*Marine Chemistry* 117, 52–58
- Whitfield, M., Turner, D.R., (1987) The role of particles in regulating the composition of seawater. In:  
Stumm, W. (Ed.), *Aquatic Surface Chemistry*. Wiley–Interscience, New York, pp. 457–493
- Yáñez Arancibia, A., & Day, J. (2004). The Gulf of Mexico:towards an integration of coastal management  
with large marine ecosystem management. *Ocean & Coastal Management* 47 , 537–563.

- Yañez-Arancibia, A., Twilley, R., Lara-Domínguez, A.L., (1998). Los ecosistemas de manglar frente al cambio climático global. *Madera Bosques* 4 (2). [https://doi.org/ 10.21829/myb.1998.421356](https://doi.org/10.21829/myb.1998.421356), 1998:3-19
- Zavala-Hidalgo J, Morey SL, O'Brien JJ (2003) Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *J Geophys Res* 108(C12):3389. [https:// doi. org/ 10. 1029/ 2003J C0018 79](https://doi.org/10.1029/2003JC001879)
- Zhang, L., Shi, Z., Jingping, Z., Jiang, Z., Wang, F., & Xiaoping, H. (2015). Spatial and seasonal characteristics of dissolved heavy metals in the east and west Guangdong coastal waters, South China. *Marine Pollution Bulletin*
- Zhang, J. Z., Kelble, C. R., Fischer, C. J., & Moore, L. (2009). Hurricane Katrina induced nutrient runoff from an agricultural area to coastal waters in Biscayne Bay, Florida. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84(2), 209–218. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2009.06.026>

# 11. ANEXO ESTADÍSTICAS AGRICULTURA Y GANADERÍA

Nombre Municipio	Área (Km <sup>2</sup> )	Superficie sembrada por principales cultivos (Km <sup>2</sup> )	área sembrada/área municipio	Superficie mecanizada (hectáreas)	Superficie sembrada mecanizada (%)	Superficie sembrada interanual (hectáreas)	Superficie sembrada interanual (%)	Superficie sembrada por riego (hectáreas)	Superficie sembrada por riego (%)
Yucatán	39524	7535	19	24852	3.3	700800	93.0	52724	7.0
Baca	118.78	20	17	0	0.0	805	39.3	1240	60.6
Calotmul	361.5	131	36	18	0.1	12977	99.2	103	0.8
Cansahcab	146.9	33	23	0	0.0	3071	92.9	235	7.1
Celestún	868.63	2	0	0	0.0	220	94.4	14	6.0
Chemax	1402.288	131	9	0	0.0	13105	99.8	21	0.2
Chicxulub Pueblo	196.72	4	2	0	0.0	168	41.5	237	58.5
Dzemul	123.91	15	12	0	0.0	1173	78.1	328	21.9
Dzidzantún	198	45	23	0	0.0	4102	90.8	415	9.2
Dzilam de Bravo	214.43	64	30	0	0.0	6184	97.3	170	2.7
Dzilam González	545.45	206	38	0	0.0	20061	97.5	507	2.5
Espita	496.91	103	21	15	0.1	9643	93.6	662	6.4
Halachó	671.91	22	3	70	3.2	1991	89.6	231	10.4
Hunucmá	599.1	8	1	0	0.0	313	40.3	463	59.7
Ixil	134.13	2	1	0	0.0	47	30.5	107	69.5
Kinchil	160.95	20	12	0	0.0	1564	78.5	430	21.6
Maxcanú	1320.82	28	2	70	2.5	2653	96.5	97	3.5
Mérida	858.41	10	1	0	0.0	197	20.6	757	79.4
Mocochá	57.48	4	7	0	0.0	220	51.3	208	48.5
Motul	297.63	38	13	0	0.0	2764	72.9	1028	27.1
Panabá	788.15	551	70	443	0.8	53351	96.9	1701	3.1
Progreso	270.1	3	1	0	0.0	26	9.6	247	90.8
Río Lagartos	249.09	125	50	0	0.0	12432	99.4	72	0.6
Samahil	161.088	11	7	0	0.0	241	22.4	833	77.6
San Felipe	680.85	200	29	10	0.0	19823	99.1	180	0.9
Sinanché	131.57	16	12	0	0.0	1369	85.1	241	15.0
Sucilá	307.25	250	81	116	0.5	23473	94.0	1499	6.0
Telchac Pueblo	81.75	12	15	0	0.0	1082	90.4	115	9.6
Telchac Puerto	173.73	2	1	0	0.0	121	64.0	67	35.4
Temax	329.52	87	26	0	0.0	8336	96.0	351	4.0
Temozón	1087	325	30	42	0.1	32341	99.5	150	0.5
Tetiz	180.11	5	3	0	0.0	381	82.8	79	17.2
Tizimín	4132	2288	55	4402	1.9	220685	96.5	8111	3.5
Ucú	192.89	1	0	0	0.0	23	24.2	72	75.8
Uman	350.551	6	2	0	0.0	255	40.7	371	59.3
Yobain	81.75	27	33	0	0.0	2288	84.1	434	15.9

Nombre Municipio	Área (Km2)	BOVINO	Densidad BOVINO CABEZAS x km2	PORCINO	Densidad PORCINO CABEZAS x km2	AVES DE CORRAL	Densidad AVES CABEZAS x km2	OVINO	Densidad OVINO CABEZAS x km2	EQUINO	Densidad EQUINO CABEZAS x km2
Yucatán	39524	408873	10.3	241999	6.1	14904196	377.1	94978	2.4	6741	0.2
Baca	118.78	3175	26.7	2392	20.1	7622841	64176.1	531	4.5	147	1.2
Calotmul	361.5	3562	9.9	893	2.5	7328	20.3	788	2.2	29	0.1
Cansahcab	146.9	1514	10.3	543	3.7	2834	19.3	265	1.8	23	0.2
Celestún	868.63	725	0.8	171	0.2	3297	3.8	324	0.4	12	0.0
Chemax	1402.288	8835	6.3	3099	2.2	27949	19.9	1220	0.9	64	0.0
Chicxulub Pueblo	196.72	916	4.7	884	4.5	2261	11.5	308	1.6	38	0.2
Dzemul	123.91	1127	9.1	351	2.8	2397427	19348.1	58	0.5	6	0.0
Dzidzantún	198	4320	21.8	933	4.7	6081	30.7	1368	6.9	57	0.3
Dzilam de Bravo	214.43	3913	18.2	241	1.1	944	4.4	247	1.2	88	0.4
Dzilam González	545.45	10254	18.8	899	1.6	5143	9.4	1401	2.6	117	0.2
Espita	496.91	5388	10.8	1060	2.1	13992	28.2	977	2.0	46	0.1
Halachó	671.91	1265	1.9	2285	3.4	37953	56.5	453	0.7	24	0.0
Hunucmá	599.1	1225	2.0	528	0.9	12212	20.4	497	0.8	11	0.0
Ixil	134.13	587	4.4	465	3.5	2138	15.9	481	3.6	32	0.2
Kinchil	160.95	4751	29.5	840	5.2	8881	55.2	602	3.7	21	0.1
Maxcanú	1320.82	2992	2.3	3636	2.8	11446	8.7	1553	1.2	191	0.1
Mérida	858.41	6696	7.8	55722	64.9	2938665	3423.4	7987	9.3	294	0.3
Mocochá	57.48	350	6.1	94	1.6	2826	49.2	239	4.2	11	0.2
Motul	297.63	2985	10.0	2292	7.7	17844	60.0	1997	6.7	42	0.1
Panabá	788.15	20603	26.1	4220	5.4	6645	8.4	1987	2.5	315	0.4
Progreso	270.1	540	2.0	1650	6.1	2943	10.9	73	0.3	10	0.0
Río Lagartos	249.09	10034	40.3	122	0.5	822	3.3	259	1.0	34	0.1
Samahil	161.088	891	5.5	586	3.6	7302	45.3	13025	80.9	21	0.1
San Felipe	680.85	6033	8.9	59	0.1	632	0.9	559	0.8	157	0.2
Sinanché	131.57	1588	12.1	377	2.9	2156	16.4	736	5.6	5	0.0
Sucilá	307.25	22765	74.1	1131	3.7	4240	13.8	3707	12.1	198	0.6
Telchac Pueblo	81.75	873	10.7	1453	17.8	4711	57.6	481	5.9	17	0.2
Telchac Puerto	173.73	268	1.5	0	0.0	248	1.4	30	0.2	2	0.0
Temax	329.52	4596	13.9	1032	3.1	6249	19.0	427	1.3	24	0.1
Temozón	1087	8935	8.2	1971	1.8	24388	22.4	1795	1.7	107	0.1
Tetiz	180.11	1283	7.1	15245	84.6	6130	34.0	275	1.5	17	0.1
Tizimín	4132	125574	30.4	7201	1.7	104658	25.3	7537	1.8	1520	0.4
Ucú	192.89	298	1.5	833	4.3	7143	37.0	136	0.7	52	0.3
Uman	350.551	1610	4.6	17050	48.6	29946	85.4	5196	14.8	95	0.3
Yobain	81.75	554	6.8	70	0.9	12279	150.2	559	6.8	8	0.1

## 12. ANEXO ESTADÍSTICO

### 12.1 Pruebas de Normalidad

#### a) Físicoquímicos y profundidad

	N	max D	K-S	Lilliefors	W	p	Normalidad
Z (m) 2013	67	0.162787	p < .10	p < .01	0.937727	0.002272	No
Z (m) 2014	67	0.094005	p > .20	p < .15	0.959360	0.027946	No
T (°C) 2013	67	0.075821	p > .20	p > .20	0.979975	<b>0.353232</b>	
T (°C) 2014	67	0.211551	p < .01	p < .01	0.879650	0.000010	No
S UPS 2013	67	0.137501	p < .20	p < .01	0.908153	0.000116	No
S UPS 2014	67	0.232684	p < .01	p < .01	0.759113	0.000000	No
OD (mg/m <sup>3</sup> ) 2013	67	0.074743	p > .20	p > .20	0.962155	0.039431	No
OD (mg/m <sup>3</sup> ) 2014	67	0.073919	p > .20	p > .20	0.962314	0.040214	No

#### b) Nutrientes y clorofila-a

	N	max D	K-S	Lilliefors	W	p	Normalidad
NO <sub>3</sub> 2013	67	0.166413	p < .05	p < .01	0.871158	0.000005	No
NO <sub>3</sub> 2014	67	0.177358	p < .05	p < .01	0.768198	0.000000	No
NO <sub>2</sub> 2013	67	0.113326	p > .20	p < .05	0.939086	0.002637	No
NO <sub>2</sub> 2014	67	0.153096	p < .10	p < .01	0.824877	0.000000	No
NH <sub>4</sub> 2013	67	0.196977	p < .05	p < .01	0.702175	0.000000	No
NH <sub>4</sub> 2014	67	0.161471	p < .10	p < .01	0.832636	0.000000	No
PRS 2013	67	0.197298	p < .05	p < .01	0.829003	0.000000	No
PRS 2014	67	0.181463	p < .05	p < .01	0.929031	0.000901	No
SiRS 2013	67	0.070957	p > .20	p > .20	0.957711	0.022847	No
SiRS 2014	67	0.203872	p < .01	p < .01	0.653315	0.000000	No
Cl-A 2013	67	0.099621	p > .20	p < .10	0.952253	0.011865	No
Cl-A 2014	67	0.189198	p < .05	p < .01	0.845813	0.000001	No

c) Metales y As

	N	max D	K-S	Lilliefors	W	p	Normalidad
As 2013	62	0.237012	p < .01	p < .01	0.750675	0.000000	No
As 2014	67	0.335345	p < .01	p < .01	0.485972	0.000000	No
Cu 2013	62	0.179316	p < .05	p < .01	0.712345	0.000000	No
Cu 2014	67	0.226237	p < .01	p < .01	0.643632	0.000000	No
Cd 2013	62	0.293565	p < .01	p < .01	0.556413	0.000000	No
Cd 2014	67	0.254197	p < .01	p < .01	0.586853	0.000000	No
Cr 2013	62	0.413133	p < .01	p < .01	0.562382	0.000000	No
Cr 2014	67	0.399765	p < .01	p < .01	0.288036	0.000000	No
V 2013	62	0.162843	p < .10	p < .01	0.929552	0.001556	No
V 2014	67	0.100790	p > .20	p < .10	0.935727	0.001829	No
Sr 2013	62	0.181283	p < .05	p < .01	0.884096	0.000028	No
Sr 2014	67	0.137409	p < .20	p < .01	0.957550	0.022407	No

## 12.2 Pruebas de diferencia significativas

### Espacial

a) Fisicoquímicos y Profundidad

Parámetro	2013				2014			
	F(12,54)	p ( $\alpha=0.05$ )	KW (12,67)	p ( $\alpha=0.05$ )	F(12,54)	p ( $\alpha=0.05$ )	KW (12,67)	p ( $\alpha=0.05$ )
Z (m)	1.86	0.06	17.31	<b>0.14</b>	1.78	0.08	22.42	< 0.05
T (°C)	9.03	< 0.05	45.44	< 0.05	36.34	< 0.05	53.20	< 0.05
S UPS	3.80	< 0.05	42.75	< 0.05	5.44	< 0.05	40.45	< 0.05
OD (mg/m3)	2.53	< 0.05	33.33	< 0.05	5.99	< 0.05	44.30	< 0.05

b) Nutrientes y clorofila-*a*

Parametro	2013				2014			
	F(12,54)	p ( $\alpha=0.05$ )	KW (12,67)	p ( $\alpha=0.05$ )	F(12,54)	p ( $\alpha=0.05$ )	KW (12,67)	p ( $\alpha=0.05$ )
NO <sub>3</sub>	10.29	< 0.05	37.59	< 0.05	1.21	0.30	12.61	0.40
NO <sub>2</sub>	6.51	< 0.05	39.14	< 0.05	3.18	< 0.05	24.43	< <b>0.05</b>
NH <sub>4</sub>	1.19	0.31	23.29	< 0.05	5.51	< 0.05	31.59	< <b>0.05</b>
PRS	1.97	0.05	20.22	<b>0.06</b>	3.10	< 0.05	28.77	< <b>0.05</b>
SiRS	1.99	< 0.05	29.18	< 0.05	1.36	0.22	15.32	0.22
Cl-A	5.57	< 0.05	32.56	< 0.05	1.47	0.16	15.66	0.21
NID	2.04	< 0.05	30.75	< 0.05	3.35	< 0.05	31.46	< 0.05
Redfield	3.35	< 0.05	31.46	< 0.05	1.28	0.26	27.51	< 0.05
TRIX	1.28	0.26	27.51	< 0.05	1.41	0.19	24.80	< 0.05

c) Metales y As

Parametro	2013				2014			
	F(12,49)	p ( $\alpha=0.05$ )	KW (12,62)	p ( $\alpha=0.05$ )	F(12,54)	p ( $\alpha=0.05$ )	KW (12,67)	p ( $\alpha=0.05$ )
As	1.48	0.17	19.08	<b>0.09</b>	1.33	0.23	21.02	0.05
Cu	1.25	0.28	12.97	<b>0.37</b>	1.30	0.24	20.36	0.06
Cd	2.05	< 0.05	16.58	<b>0.17</b>	1.45	0.17	12.29	0.42
Cr	0.47	0.92	5.88	<b>0.92</b>	1.12	0.37	11.88	0.46
V	4.60	< 0.05	33.74	< 0.05	1.48	0.16	26.18	< <b>0.05</b>
Sr	0.80	0.65	12.34	<b>0.42</b>	0.38	0.96	5.58	0.94

## Interanual

a) Físicoquímicos y Profundidad

	F (1,132)	p ( $\alpha=0.05$ )	KW(1,134)	p ( $\alpha=0.05$ )
Z (m)	4.39	< 0.05	6.99	< <b>0.05</b>
T (°C)	0.05	0.83	2.22	0.14
S UPS	63.68	< 0.05	55.88	< <b>0.05</b>
OD (mg/m3)	38.25	< 0.05	34.03	< <b>0.05</b>

b) Nutrientes y clorofila-*a*

<b>NUTRIENTE</b>	<b>F (1,132)</b>	<b>p (α=0.05)</b>	<b>KW(1,134)</b>	<b>p (α=0.05)</b>
NO <sub>3</sub>	19.88	< 0.05	28.87	< 0.05
NO <sub>2</sub>	8.97	< 0.05	7.16	< 0.05
NH <sub>4</sub>	31.35	< 0.05	43.35	< 0.05
PRS	17.83	< 0.05	13.21	< 0.05
SIRS	1.94	0.17	0.08	0.77
CI-A	122.34	< 0.05	74.43	< 0.05
NID	46.02	< 0.05	51.74	< 0.05
Redfield	5.45	< 0.05	5.28	< 0.05
TRIX	131.88	< 0.05	73.19	< 0.05

a) Metales y As

<b>METAL</b>	<b>F (1,132)</b>	<b>p (α=0.05)</b>	<b>KW(1,134)</b>	<b>p (α=0.05)</b>
As	2.05	0.16	5.68	< 0.05
Cu	6.42	< 0.05	8.49	< 0.05
Cd	19.91	< 0.05	51.60	< 0.05
Cr	1.75	< 0.05	0.30	0.58
V	1.88	0.17	6.28	< 0.05
Sr	114.30	< 0.05	54.84	< 0.05