



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en CIENCIAS DEL AGUA

CARACTERIZACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN  
ZONAS CLAVE DE DISTRIBUCIÓN Y SU RELACIÓN  
CON UN MEGAPROYECTO TREN MAYA

Tesis que presenta

ARGENTINA RABAGO CASTRO

En opción al título de

MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

Cancún, Quintana Roo, México

2024

## DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

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

Firma:  \_\_\_\_\_

Nombre: Argentina Rabago Castro

*CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.*  
*POSGRADO EN CIENCIAS DEL AGUA*



**RECONOCIMIENTO**

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de Argentina Rabago Castro titulado **Caracterización de aguas subterráneas en zonas clave de distribución y su relación con un megaproyecto Tren Maya**, fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, en la línea de investigación de Seguridad Hídrica en Sistemas Socioambientales , en el laboratorio de cromatografía y el laboratorio de Físicoquímicos del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección del Dr. Gilberto Acosta González y la codirección de la Dra. Rosa María Leal Bautista, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias del Agua de este Centro.

Atentamente



---

Dr. José Luis Hernández Stefanoni  
Director de Docencia

Cancún, Quintana Roo, México a 11 de octubre del 2024

## AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis fue posible gracias al apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca que me fue asignada (1166191).

Al proyecto de investigación “El impacto de megaproyectos en sistemas socioecológicos desde una perspectiva transdisciplinaria: el Programa de Desarrollo Integral en los territorios del Tren Maya” (CLAVE 319113; PRONAI-PRONACES) por el apoyo recibido.

Al posgrado en Ciencias del Agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) y los laboratorios de Cromatografía, Fisicoquímica y Bacteriología de la Unidad en Ciencias del Agua (UCIA) por brindarme la oportunidad de utilizar los equipos y materiales necesarios para el desarrollo de este proyecto.

Agradezco al Dr. Gilberto Acosta González, mi director de tesis, por proporcionarme las herramientas necesarias para desarrollar el proyecto, por su dedicación, atención y disposición en aclarar mis dudas a lo largo de la tesis. Gracias por escucharme y apoyarme en todo momento.

A la Dra. Rosa María Leal Bautista, codirectora de mi tesis, por atender mis dudas y explicarme pacientemente, facilitando así la comprensión de estas. Gracias a su apoyo continuo pude entender mejor la dirección del proyecto de investigación.

Agradezco al Dr. Eduardo Cejudo Espinosa por aceptar ser parte de mi comité, por sus valiosas observaciones y aportaciones al proyecto y correcciones al documento. Reconozco y valoro su compromiso y esfuerzo hacia este trabajo.

Al Dr. Germán Giácoman Vallejos por formar parte de mi comité y por sus valiosos comentarios en cada examen presentado. Estoy agradecida por sus aportaciones a mi tesis y por su apoyo y paciencia a lo largo de este proceso.

A la Dra. Elsa Noreña Barroso por su interés en el proyecto y por sus correcciones al documento. Su paciencia y amabilidad al atender mis dudas han sido invaluable. Gracias por su dedicación a mi proyecto de investigación.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al personal técnico de la UCIA, especialmente al M. en C. José Epigmenio Bautista García y a la Quím. Daniela Ortega Camacho, por su apoyo y orientación a lo largo de mi proyecto de investigación. Su disposición para compartir sus conocimientos y ayudarme en el uso de los equipos fue esencial. Gracias a su experiencia y

profesionalismo cada análisis resultó más sencillo y eficiente. Sin su colaboración, esta investigación no habría sido posible.

A la estudiante de prácticas profesionales Valeria Franco, por su apoyo en laboratorio, al Dr. Yosvanis Batista por despertar mi interés en la hidrogeoquímica, gracias por sus conocimientos brindados, y a la Dra. Rubí Chablé por escucharme y aconsejarme cuando lo necesitaba.

A mis compañeros y amigos del posgrado de la generación 2022, Héctor García, Wendy Ortíz, Marbeya González, María de Jesús Juárez, Maricruz Arcique, Adriana Hernández y Jimena Peraza, de quienes guardo gratos recuerdos durante mi estancia en Cancún. Me siento muy agradecida de ser parte de esta generación, son los mejores compañeros que he tenido durante toda mi trayectoria académica.

Quiero agradecer especialmente a mi familia:

A quien me impulsó a continuar en el posgrado cuando estaba a punto de rendirme, mi madre, Orvilia Castro Garza, a quien amo y admiro por su valentía y coraje. Por siempre estar para mí y mis hermanos, incluso a la distancia.

A mi padre, Jorge Abel Rabago Valdes, a quien amo y admiro, y de quien siempre he recibido apoyo, quien me ha enseñado que el esfuerzo y la dedicación son claves para alcanzar mis sueños. Por trabajar incansablemente para darnos todo.

A mis hermanos, Genesis Rabago, Jorge Abel Rabago Jr. y Martin Rabago, quienes siempre estuvieron al pendiente de mí durante este proceso. Su apoyo incondicional, comprensión y aliento han sido una fuente constante de motivación. Sin su amor y respaldo, este camino habría sido mucho más difícil. Los amo, estoy muy agradecida de tenerlos en mi vida.

A mi sobrina, Valeria Martínez, quien llena mis días de alegría y energía. Gracias por ser una fuente constante de motivación; te amo, estoy muy orgullosa de ti y de todo lo que eres.

Y agradezco a mi compañero de camino, mi novio y mejor amigo, Héctor García. Quien estuvo para mí día y noche, brindándome calma en mis momentos más desesperados y siempre encontrando las palabras adecuadas para reconfortarme. Gracias por creer en mí cuando más lo necesitaba. Tu apoyo incondicional, paciencia y amor siempre me han ayudado a dar lo mejor de mí. Gracias por otro logro compartido; seguiremos siendo un gran equipo hasta el final.

## DEDICATORIA

*A Dios, por darme la fortaleza para culminar este posgrado y guiarme siempre por el camino correcto.*

*A mis compañeritos; Michi, Brincolín, Zeus, Odín, Princesa, Tifi, Tortu, Maya y Max. A quienes trasnochaban conmigo; Mochi y Abbacchio. A quienes extraño y jamás olvidaré; Elvis y Princesita. Y a quien me apoyó durante mi estancia en Cancún; Gordi. Los amo.*

*Dedico este trabajo de investigación con gran amor a mis padres y hermanos, quienes, con su ejemplo, dedicación y palabras de aliento, siempre me han impulsado a superarme. Nunca dejaron de creer en mí, incluso en los momentos en que yo misma dudaba. Este logro es por y para ustedes. Los amo eternamente.*

# ÍNDICE

<b>LISTADO DE FIGURAS</b> .....	<b>iv</b>
<b>LISTADO DE TABLAS</b> .....	<b>vii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>x</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>2</b>
<b>ANTECEDENTES</b> .....	<b>2</b>
1.1 MEGAPROYECTOS EN EL MUNDO Y EN MÉXICO .....	2
1.2 SISTEMA KÁRSTICO DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN .....	4
1.3 GEOLOGÍA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN .....	6
1.3.1 GEOLOGÍA DEL TRAMO 4 ESTE.....	9
1.3.2 GEOLOGÍA DEL TRAMO 4 OESTE .....	10
1.3.3 GEOLOGÍA DEL TRAMO 7 .....	11
1.4 HIDROGEOLOGÍA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN .....	12
1.4.1 HIDROGEOLOGÍA DEL TRAMO 4 ESTE.....	15
1.4.2 HIDROGEOLOGÍA DEL TRAMO 4 OESTE .....	15
1.4.3 HIDROGEOLOGÍA DEL TRAMO 7.....	16
1.5 CONDICIONES DEL AGUA DE SUMINISTRO PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA.....	17
1.5.1 CONDICIONES DEL AGUA DE SUMINISTRO PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 4 ESTE .....	17
1.5.2 CONDICIONES DEL AGUA DE SUMINISTRO PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 4 OESTE.....	18
1.5.3 CONDICIONES DEL AGUA DE SUMINISTRO PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 7 .....	19
1.6 CONDICIONES HIDROGEOQUÍMICAS PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA.....	20
1.6.1 CONDICIONES HIDROGEOQUÍMICAS PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 4 ESTE .....	20
1.6.2 CONDICIONES HIDROGEOQUÍMICAS PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 4 OESTE.....	20
1.6.3 CONDICIONES HIDROGEOQUÍMICAS PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 7 .....	21
1.7 INDICADORES SOCIALES PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA .....	22

1.7.1 INDICADORES SOCIALES PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 4 ESTE.....	22
1.7.2 INDICADORES SOCIALES PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 4 OESTE.....	23
1.7.3 INDICADORES SOCIALES PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 7 .....	24
1.8 NORMATIVAS MEXICANAS EMPLEADAS PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA .....	25
1.8.1 NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-2021, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LÍMITES PERMISIBLES DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	25
1.8.2 NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-2021, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN CUERPOS RECEPTORES PROPIEDAD DE LA NACIÓN.....	26
<b>MARCO CONCEPTUAL .....</b>	<b>27</b>
1.9 AGUA SUBTERRÁNEA .....	27
1.10 CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE DE AGUA: HIDROGEOQUÍMICA.....	28
1.11 FORMAS DEL NITRÓGENO (N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> Y N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....	30
1.12 CAPTADORES DE AGUA DE LLUVIA .....	31
1.13 MEGAPROYECTO .....	32
1.14 LÍNEA BASE .....	32
<b>JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>33</b>
<b>HIPÓTESIS .....</b>	<b>33</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>34</b>
GENERAL .....	34
ESPECÍFICOS.....	34
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>35</b>
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>35</b>
2.1 IMPORTANCIA DE LOS SITIOS DE ESTUDIO.....	35
2.2 MUESTREO DE AGUA SUBTERRÁNEA .....	36
2.3 FUENTES DE SUMINISTRO PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA.....	39
2.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL AGUA.....	42
2.4.1 APOORTE DE LOS PARÁMETROS RESPECTO A LA CALIDAD Y COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA .....	42
2.4.2 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS <i>IN SITU</i> .....	45
2.4.3 PARÁMETROS EN LABORATORIO .....	45
2.4.3.1 <i>ESCHERICHIA COLI</i> .....	45
2.4.3.2 COLOR VERDADERO .....	46
2.4.3.3 ALCALINIDAD (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....	47
2.4.3.4 FORMAS DEL NITRÓGENO (N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> Y N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....	48

2.4.3.5 CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE DE AGUA: HIDROGEOQUÍMICA .....	49
2.5 TOPOGRAFÍA.....	49
2.6 ANÁLISIS DE DATOS.....	50
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>52</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL AGUA.....	52
3.1.1 PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS <i>IN SITU</i> .....	52
3.1.1.1 pH.....	53
3.1.1.2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA .....	54
3.1.1.3 TEMPERATURA.....	56
3.1.2 PARÁMETROS EN LABORATORIO .....	57
3.1.2.1 <i>ESCHERICHIA COLI</i> .....	57
3.1.2.2 COLOR VERDADERO .....	60
3.1.2.3 ALCALINIDAD .....	62
3.1.2.4 FORMAS DEL NITRÓGENO (N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> Y N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....	63
3.1.2.5 CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE DE AGUA: HIDROGEOQUÍMICA .....	67
3.2 CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES FISCOQUÍMICAS Y BACTERIOLÓGICAS .....	70
3.3 INDICADORES SOCIALES.....	71
<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>73</b>
3.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL AGUA.....	73
3.4.1 PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS <i>IN SITU</i> .....	73
3.4.1.1 pH.....	73
3.4.1.2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA .....	73
3.4.1.3 TEMPERATURA .....	74
3.4.2 PARÁMETROS EN LABORATORIO .....	75
3.4.2.1 <i>ESCHERICHIA COLI</i> .....	75
3.4.2.2 COLOR VERDADERO .....	78
3.4.2.3 ALCALINIDAD .....	79
3.4.2.4 FORMAS DEL NITRÓGENO (N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> Y N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....	80
3.4.2.5 CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE DE AGUA: HIDROGEOQUÍMICA .....	81
3.5 CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES FISCOQUÍMICAS Y BACTERIOLÓGICAS .....	83
3.6 INDICADORES SOCIALES.....	84
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>85</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>87</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>99</b>

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Climograma de la península de Yucatán del año 2022. Fuente: CONAGUA, (2022). ....6	6
<b>Figura 2.</b> Clasificación geológica de la península de Yucatán. Tomado de Perry <i>et al.</i> (2009). ....7	7
<b>Figura 3.</b> Regiones fisiográficas de la península de Yucatán. Fuente: Perry <i>et al.</i> (2002). ....8	8
<b>Figura 4.</b> Estratigrafía de la costa noreste de Quintana Roo (Modificado por Ward, 1985). .... 10	10
<b>Figura 5.</b> Mapa del estado de Yucatán donde se presenta la geología (López, 1973). .... 11	11
<b>Figura 6.</b> Mapa geológico de la península de Yucatán. Tomado de: Ortiz-Flores <i>et al.</i> (2019)...12	12
<b>Figura 7.</b> Dirección de flujo del agua subterránea en la península de Yucatán. Tomado de: CONAGUA, 2008. .... 14	14
<b>Figura 8.</b> Modelo regional de flujo de agua en la península de Yucatán ..... 14	14
<b>Figura 9.</b> Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero Xpujil, estado de Campeche. Tomado de: Ortiz-Flores <i>et al.</i> , 2019. .... 17	17
<b>Figura 10.</b> Familias de agua que predominan en los municipios del estado de Yucatán. Tomado de: Ávila <i>et al.</i> (2004). .... 21	21
<b>Figura 11.</b> Zona no saturada (de aireación) y zona saturada de un material geológico. Fuente: Tarbuck <i>et al.</i> , 2005. .... 27	27
<b>Figura 12.</b> Trayecto del Tren Maya. Tomado de: FONATUR, 2022. .... 35	35
<b>Figura 13.</b> Ubicación de los tramos de muestreo. Elaboración propia. .... 36	36
<b>Figura 14.</b> Puntos de muestreo del Tramo 4 Este. Elaboración propia. .... 37	37
<b>Figura 15.</b> Puntos de muestreo del Tramo 4 Oeste. Elaboración propia. .... 38	38
<b>Figura 16.</b> Puntos de muestreo del Tramo 7. Elaboración propia ..... 38	38
<b>Figura 17.</b> Fuentes de abastecimiento; a) Pozo de distribución en Centenario, b) Pozo artesiano en Yalcobá, c) Cárcamo de bombeo en El Chichonal. Fotografías de Héctor Rumaldo García Castillo. .... 41	41
<b>Figura 18.</b> Fuentes de abastecimiento; a) Captador de agua de lluvia en Ing. EEC, b) Cenote Chuckum en Tikuch, c) Cenote Verde Lucero en Puerto Morelos. Fotografías de Héctor Rumaldo García Castillo y Gilberto Acosta González. .... 41	41
<b>Figura 19.</b> Fuentes de abastecimiento; Cenote Campamento en Agua Azul. Fotografía de Gilberto Acosta González. .... 42	42
<b>Figura 20.</b> Sonda multiparamétrica, marca Hanna HI 98129. .... 45	45
<b>Figura 21.</b> Procedimiento del análisis bacteriológico: a) Vaciado de muestra en la placa, b) Sellado de placa, c) Conteo de pocillos fluorescentes. Fotografías de Héctor Rumaldo García Castillo. .... 46	46
<b>Figura 22.</b> Espectrofotómetro Eppendorf. .... 47	47

<b>Figura 23.</b> Potenciómetro Accumet XL 600. ....	48
<b>Figura 24.</b> Análisis de las formas del nitrógeno: a) Muestras analizadas de nitrógeno de amonio, b) Muestras analizadas de nitrógeno de nitritos. ....	48
<b>Figura 25.</b> Cromatógrafo de iones 882 Compact IC Plus de Metrohm. ....	49
<b>Figura 26.</b> GPS diferencial marca Trimble R8s GNSS. ....	50
<b>Figura 27.</b> Gráfica de pH en los tramos de estudio. LL N: Lluvias-Nortes 2022, S: Secas 2023. ....	53
<b>Figura 28.</b> Gráfica de conductividad eléctrica de los tramos de estudio. LL N: Lluvias-Nortes 2022, S: Secas 2023. ....	55
<b>Figura 29.</b> Gráfica de temperatura de los tramos de estudio. LL N: Lluvias-Nortes 2022, S: Secas 2023. ....	56
<b>Figura 30.</b> Porcentaje de los sitios que cumplen con la NOM-127-SSA1-2021. ....	59
<b>Figura 31.</b> Boxplot de color verdadero de los tramos de estudio. LL N: Lluvias-Nortes 2022, S: Secas 2023. ....	61
<b>Figura 32.</b> Gráfica de alcalinidad de los tramos de estudio. LL N: Lluvias-Nortes 2022, S: Secas 2023. ....	62
<b>Figura 33.</b> Boxplot de las formas del nitrógeno en ambas temporadas climáticas. LL N: Lluvias-Nortes 2022, S: Secas 2023. Nota: se aplicó $\log_{10}$ a los valores correspondientes al análisis de nitrógeno de nitratos. ....	66
<b>Figura 34.</b> Clúster de las muestras colectadas en ambas temporadas. LL N: Lluvias-Nortes 2022, S: Secas 2023. ....	67
<b>Figura 35.</b> Modelo de Escalamiento Multidimensional (MDS) de iones mayoritarios. ....	68
<b>Figura 36.</b> MDS 2D burbuja de cloruros. ....	69
<b>Figura 37.</b> MDS 2D burbuja de sulfatos. ....	70
<b>Figura 38.</b> Matriz de correlación de Spearman de los parámetros analizados. Nota: Las cruces indican que no existe significancia estadística. ....	71
<b>Figura 39.</b> Diagrama de radar, se muestran los indicadores sociales medidos por el INEGI (2020) y CONEVAL (2020). ....	72
<b>Figura 40.</b> Mapas de <i>E. coli</i> en el Tramo 4 Este. a) Temporada de lluvias-nortes 2022 y b) Temporada de secas 2023. ....	76
<b>Figura 41.</b> Mapas de <i>E. coli</i> en el Tramo 4 Oeste. a) Temporada de lluvias-nortes 2022 y b) Temporada de secas 2023. ....	76
<b>Figura 42.</b> Mapas de <i>E. coli</i> en el Tramo 7. A) Temporada de lluvias-nortes 2022 y b) Temporada de secas 2023. ....	77

**Figura 43.** Curva de calibración para análisis de amonio..... 106  
**Figura 44.** Curva de calibración para análisis de nitritos..... 107

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Descripción de los tramos del Tren Maya. Datos tomados de: Guía del Tren Maya, 2024. ....	3
<b>Tabla 2.</b> Límites máximos permisibles de calidad de agua para uso y consumo humano de las variables consideradas en este estudio. Fuente: NOM-127-SSA1-2021. ....	25
<b>Tabla 3.</b> Límites permisibles de color verdadero de la NOM-001-SEMARNAT-2021. Fuente: NOM-001-SEMARNAT-2021. ....	26
<b>Tabla 4.</b> Fuentes de abastecimiento de agua de las localidades. ....	39
<b>Tabla 5.</b> Aporte de los parámetros para su decisión de uso. ....	42
<b>Tabla 6.</b> Promedio más alto de las características del agua en temporada de lluvias-nortes 2022. ....	52
<b>Tabla 7.</b> Promedio más alto de las características del agua en temporada de secas 2023. ....	52
<b>Tabla 8.</b> Resultados de pH del PERMANOVA basado en el análisis de similitud de Bray-Curtis. Los valores de p significativos ( $\alpha=0.05$ ) son indicados en negrita. ....	54
<b>Tabla 9.</b> Resultados de conductividad eléctrica de PERMANOVA basado en el análisis de similitud de Bray-Curtis. Los valores de p significativos ( $\alpha=0.05$ ) son indicados en negrita. ....	55
<b>Tabla 10.</b> Resultados de temperatura de PERMANOVA basado en el análisis de similitud de Bray-Curtis. Los valores de p significativos ( $\alpha=0.05$ ) son indicados en negrita. ....	57
<b>Tabla 11.</b> Resultados de bacteriología de los puntos muestreados en temporada de lluvias-nortes 2022 y secas 2023. ....	57
<b>Tabla 12.</b> Resultados de E. coli de PERMANOVA basado en el análisis de similitud de Bray-Curtis. Los valores de p significativos ( $\alpha=0.05$ ) son indicados en negrita. ....	60
<b>Tabla 13.</b> Resultados de color verdadero de PERMANOVA basado en el análisis de similitud de Bray-Curtis. ....	61
<b>Tabla 14.</b> Resultados de alcalinidad de PERMANOVA basado en el análisis de similitud de Bray-Curtis. Los valores de p significativos ( $\alpha=0.05$ ) son indicados en negrita. ....	63
<b>Tabla 15.</b> Concentraciones de nitrógeno de amonio, nitritos y nitratos en temporada de lluvias-nortes 2022 y secas 2023, en los tramos estudiados. ....	64
<b>Tabla 16.</b> Resultados de las formas del nitrógeno de PERMANOVA basado en el análisis de similitud de Bray-Curtis. Los valores de p significativos ( $\alpha=0.05$ ) son indicados en negrita. ....	67
<b>Tabla 17.</b> Número más probable, parte 1. ....	99
<b>Tabla 18.</b> Número más probable, parte 2. ....	100
<b>Tabla 19.</b> Promedios de los parámetros in situ de los sitios, muestreadas en temporada de lluvias-nortes 2022 y secas 2023. ....	101

**Tabla 20.** Nombres, posición geográfica y altitud de los sitios muestreados ..... 104

**Tabla 21.** Resultados de color verdadero de los puntos muestreados en temporada de lluvias-nortes 2022 y secas 2023 ..... 108

**Tabla 22.** Resultados de alcalinidad de los puntos muestreados en temporada de lluvias-nortes 2022 y secas 2023 ..... 110

## RESUMEN

La península de Yucatán se caracteriza por su geología, principalmente compuesta por rocas carbonatadas, lo que la convierte en una región kárstica. El agua subterránea fluye en un acuífero de agua dulce que sobreyace en agua salada, lo que la hace vulnerable a la contaminación, por la intrusión de agua de mar y actividades humanas.

El estudio que se presenta tiene como objetivo principal caracterizar el agua subterránea en los tramos 4 Este, 4 Oeste y 7 del trazo propuesto para el megaproyecto del Tren Maya. Se busca establecer una línea base sobre las condiciones del agua destinada al uso y consumo humano antes de la ejecución del megaproyecto. Además, se pretende evaluar el posible impacto que un proyecto de la magnitud del Tren Maya podría tener sobre el acuífero y, por consiguiente, la disponibilidad de agua para las comunidades locales.

Para cumplir los objetivos, se recolectaron muestras de agua de diferentes reservorios de agua de abastecimiento: cenotes, pozos artesianos, pozos de distribución, cárcamos de bombeo y captadores de agua de lluvia en tramos seleccionados del megaproyecto identificados como Tramo 4 Este, Tramo 4 Oeste y Tramo 7.

Los resultados, en conjunto con la estadística, indican condiciones diferentes entre los tramos: en el estado de Campeche se reportan altas concentraciones de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) de hasta 635.04 mg/l. Por otro lado, el Tramo 4 Oeste presenta concentraciones elevadas de nitrógeno de nitratos ( $\text{N-NO}_3^-$ ) de hasta 32.79 mg/l, así mismo se detectaron concentraciones elevadas de los indicadores fecales, tal es el caso de *E. coli* en el Tramo 4 Este ( $>2419.60$  NMP/100ml).

Como línea base, estos resultados indican que las diferentes fuentes de distribución ya sean pozos, cenotes o captadores de agua de lluvia ya presentan una problemática si se destina a un uso potable ya que no cumple con algunos de los parámetros establecidos por la NOM-127-SSA1-2021.

Es fundamental conocer las condiciones del agua de abastecimiento para uso y consumo humano de la región, en donde se ejecutará el megaproyecto Tren Maya, para tomar medidas y proteger la salud pública, ya que garantizar las condiciones de distribución requiere tener en la región una estrategia de manejo de descargas, drenajes y tratamientos de aguas residuales a corto plazo, dada su importancia para el abastecimiento de agua en la península de Yucatán.

## ABSTRACT

The Yucatan Peninsula is characterized by its geology, mainly composed of carbonate rocks, which makes it a karst region. Groundwater flows in a freshwater aquifer that overlies salt water, making it vulnerable to contamination by seawater intrusion and human activities.

The main objective of this study is to characterize the groundwater in sections 4 East, 4 West and 7 of the proposed route for the Mayan Train megaproject. To establish a baseline on the conditions of water for human use and consumption before the execution of the megaproject. In addition, it is intended to evaluate the possible impact that a project of the magnitude of the Tren Maya could have on the aquifer and, consequently, the availability of water for local communities.

To achieve the objectives, water samples were collected from different water supply reservoirs: cenotes, artesian wells, distribution wells, pumping wells and rainwater collectors in selected sections of the megaproject identified as section 4 East, section 4 West and section 7.

The results and statistics, indicate different conditions between the sections: in the state of Campeche, high sulfate concentrations ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) of up to 635.04 mg/l are reported. On the other hand, Section 4 West shows high concentrations of nitrate nitrogen ( $\text{N-NO}_3^-$ ) up to 32.79 mg/l, as well as high concentrations of fecal indicators, such as E. coli in Section 4 East (>2419.60 NMP/100ml).

As a baseline, these results indicate that the different distribution sources; wells, cenotes or rainwater collectors, already present a problem if they are intended for potable use because they do not comply with some of the parameters established by NOM-127-SSA1-2021.

It is essential to know the conditions of the water supply for human use and consumption in the region, where the Tren Maya megaproject will be executed, in order to take measures and protect public health, since guaranteeing the conditions of distribution requires having in the region a strategy for managing discharges, drainage and wastewater treatment in the short term, given its importance for the water supply in the Yucatan peninsula.

## INTRODUCCIÓN

La península de Yucatán es reconocida por su composición predominante de roca carbonatada, lo que la convierte en una región kárstica donde el agua subterránea fluye en un acuífero de agua dulce que se sitúa sobre agua salada (Rocha *et al.*, 2015). Las características hidrogeológicas del acuífero, al ser de tipo no confinado y favorecer la presencia de cenotes, cavernas y conductos de disolución, hacen que el agua subterránea esté considerablemente expuesta, permitiendo la infiltración del agua pluvial (Marín y Perry, 1994; Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). Esta exposición la vuelve vulnerable a eventos de contaminación, como la intrusión de agua de mar y la contaminación derivada de actividades antropogénicas (Ávila *et al.*, 2004; Aguilar-Duarte *et al.*, 2013; Giácoman-Vallejos *et al.*, 2017)

El desarrollo turístico y la urbanización han ido incrementado rápidamente en estos últimos años (Herrera-Silveira *et al.*, 2005), lo que pone en riesgo las condiciones futuras del acuífero, principal fuente de abastecimiento de agua para actividades humanas en la península de Yucatán; sobre todo con megaproyectos, los cuales no solo podrían tener impacto en lo ambiental, sino en la parte política, económica y social (Neri, 2019).

Las líneas base toman relevancia cuando se tienen megaproyectos en construcción, pues es fundamental registrar la situación inicial de las poblaciones circundantes, así como de las situaciones ambientales, por ejemplo la medición de las características químicas y calidad del agua de abastecimiento que tienen las poblaciones antes de la ejecución de un megaproyecto, lo que permite realizar comparaciones con mediciones futuras y así evaluar el impacto que puede tener un proyecto de gran magnitud en la región (Burga, 2011).

El presente estudio está enfocado en caracterizar el agua subterránea en tramos ubicados cerca del trazo propuesto para el megaproyecto Tren Maya y obtener una línea base que permita comprender las condiciones del recurso hídrico en la región antes de la ejecución del megaproyecto.

## CAPÍTULO 1

### ANTECEDENTES

#### 1.1 MEGAPROYECTOS EN EL MUNDO Y EN MÉXICO

Un megaproyecto es una obra de gran escala que ejerce un impacto significativo en el territorio de una región (Talledos Sánchez, 2018) los cuáles han surgido como impulsores clave en el desarrollo turístico de diversas regiones alrededor del mundo, atrayendo a millones de turistas (Cevallos *et al.*, 2018).

Un ejemplo representativo se observa en el estado de Florida, Estados Unidos, en donde el turismo representa un papel importante en la economía, contando con un total de 137.4 millones de visitantes en 2022 (ABC Mundial, 2023). Entre los destinos más visitados se encuentran los parques temáticos de Walt Disney World Resort; Magic Kingdom recibió a 17.1 millones de visitantes, seguido de Hollywood Studios con 10.9 millones, EPCOT con 10 millones y Animal Kingdom con 9 millones de visitantes durante el mismo año (Rowan, 2023), los cuales han desempeñado un papel fundamental en el desarrollo del turismo en la región, ya que también generan ingresos significativos y empleo en la industria turística local.

Del mismo modo, el Caribe mexicano se destaca como uno de los principales destinos turísticos a nivel mundial, atrayendo a más de 12.7 millones de turistas anualmente, en donde megaproyectos como el parque eco-arqueológico Xcaret han desempeñado un papel crucial en el incremento del turismo en la región, recibiendo más de 3.5 millones de visitantes al año (Xcaret, 2024), proyecto que también impulsa el desarrollo económico y genera empleo en las comunidades locales.

Sin embargo, es importante tener en cuenta las preocupaciones planteadas por el ecólogo Exequiel Ezcurra, quien señala que los megaproyectos suelen centrar en la explotación de recursos naturales para obtener beneficios a corto plazo, sin tener en cuenta los graves impactos negativos a largo plazo, tanto ambientales como sociales. Estos impactos pueden afectar desproporcionadamente a las comunidades más vulnerables y menos favorecidas (Massé y Guzmán, 2015).

En Italia, en las ciudades de Venecia y Trieste (ubicadas dentro de una zona kárstica madura), se realizó un trazado previsto para la construcción de un túnel ferroviario de alta velocidad; el túnel ferroviario está situado sobre un acuífero kárstico de suma importancia para Italia. Casagrande *et al.* (2005) mencionan que es más complejo llevar a cabo la construcción de un megaproyecto sobre este tipo de suelos kársticos ya que es necesario realizar más a detalle la

programación de estudios y los análisis correspondientes a ejecutar durante la fase de la construcción. Además, los autores explican que durante la construcción en suelos kársticos, en la mayoría de los casos, los vacíos se logran identificar en el proceso, ya que no es suficiente para poder analizar y evaluar los peligros que se puedan presentar.

Debido a la construcción de un proyecto de tal magnitud, es previsible que algunos inconvenientes sucedan en la península de Yucatán durante la construcción del megaproyecto del Tren Maya. Dado que abarca más de 1,500 km de vías férreas conectando a los estados de Chiapas, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo; la ruta está dividida en tramos, en donde se construyeron estaciones y paraderos (Tabla 1).

**Tabla 1.** Descripción de los tramos del Tren Maya. Datos tomados de: Guía del Tren Maya, 2024.

<b>TRAMO</b>	<b>DISTANCIA (KM)</b>	<b>ESTACIONES</b>	<b>PARADEROS</b>
<b>1: Palenque - Escárcega</b>	226	Palenque, Chiapas Boca del Cerro, Tabasco El Triunfo, Tabasco Escárcega, Campeche	Tenosique, Tabasco Candelaria, Campeche
<b>2: Escárcega - Calkiní</b>	234	Escárcega, Campeche Edzná, Campeche San Francisco de Campeche, Campeche Campeche	Carrillo Puerto, Campeche Campeche Tenabo, Campeche Hecelchakán, Campeche Calkiní, Campeche
<b>3: Calkiní - Izamal</b>	159	Umán, Yucatán Mérida - Teya, Yucatán Izamal, Yucatán	Calkiní, Campeche Mexcanú, Yucatán Tixkokob, Yucatán
<b>4: Izamal - Cancún</b>	239	Izamal, Yucatán Chichen Itzá, Yucatán Valladolid, Yucatán Cancún, Quintana Roo	Nuevo Xcán, Yucatán Leona Vicario, Yucatán

<b>5 Norte: Cancún - Playa del Carmen</b>	49.8	Cancún Aeropuerto, Quintana Roo Puerto Morelos, Quintana Roo Playa del Carmen, Quintana Roo	
<b>5 Sur: Playa del Carmen - Tulum</b>	60.3	Tulum, Quintana Roo Tulum Aeropuerto, Quintana Roo	
<b>6: Tulum - Chetumal</b>	254	Tulum Aeropuerto, Quintana Roo Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo Bacalar, Quintana Roo Chetumal Aeropuerto, Quintana Roo	Limonas, Othón P. Blanco, Quintana Roo
<b>7: Chetumal - Escárcega</b>	287	Chetumal Aeropuerto, Quintana Roo Xpujil, Campeche Escárcega, Campeche	Nicolás Bravo, Quintana Roo Conhuas, Campeche Centenario, Campeche

## 1.2 SISTEMA KÁRSTICO DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

La meteorización es uno de los procesos que se encarga de alterar la composición mineralógica de la roca por medio de reacciones químicas, disolviendo partes de ella y dejando fracciones insolubles que forman el suelo. Los paisajes kársticos están definidos principalmente como el conjunto de la meteorización que se lleva a cabo en rocas como la caliza, dolomía, evaporita y yeso. Escolero *et al.* (2005) mencionaron que el principal proceso geoquímico en los acuíferos kársticos es la disolución de rocas carbonatadas. Por ello, este tipo de paisajes resultan ser característicos de tener un drenaje interno bien desarrollado (Jones y White, 2019).

La geología consiste principalmente en rocas ricas en carbonato de calcio casi puras y evaporitas, lo que forma un sistema kárstico maduro (Marín y Perry, 1994); cabe aclarar que la península de Yucatán no se considera un sistema kárstico maduro en su totalidad. Alcocer *et al.* (1998) mencionan que la mayor parte de la península de Yucatán se encuentra sustentada por calizas porosas y fisuradas. Las características hidrogeológicas del acuífero, su alta vulnerabilidad a la contaminación por ser zona kárstica y su alta infiltración de agua de lluvia, no permiten la existencia de aguas superficiales (Marín y Perry, 1994).

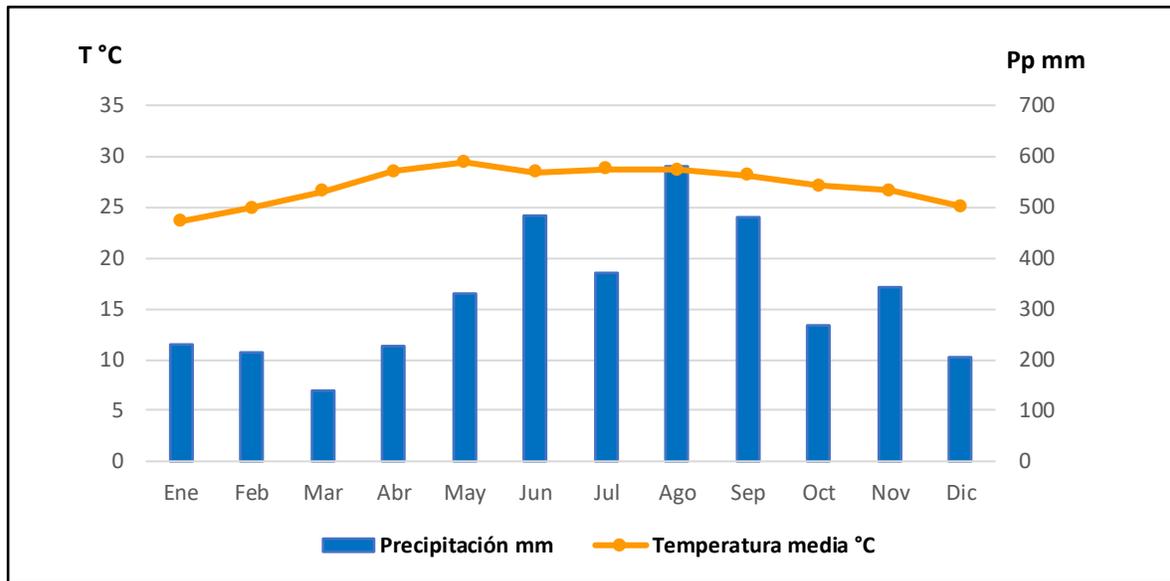
Algunos de los factores contaminantes en el acuífero son la intrusión de agua de mar y la contaminación por actividades humanas, los cuales han ido incrementando debido al aumento de la urbanización que se ha presentado en las últimas décadas en la península de Yucatán (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011).

Las zonas de estudio están ubicadas en la península de Yucatán, en la región sureste de la República Mexicana, la cual abarca los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán, geográficamente se encuentra entre las coordenadas 21° 36' y 17° 49' latitud norte, 86° 44' y 92° 28' longitud oeste, con una extensión de aproximadamente 142,000 km<sup>2</sup>, la cual es representativa del 7.2% de la superficie del país (INEGI, 2020).

El régimen de lluvias en la península de Yucatán marca el patrón climático; la temporada de secas se presenta en los meses de marzo a mayo, la temporada de lluvias en los meses de junio a octubre y la temporada de nortes de noviembre a febrero (Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

La temperatura media al año es de aproximadamente 25°C (Villasuso y Méndez, 2000). En la parte norte de la península de Yucatán las precipitaciones anuales varían desde los 760 mm/año a 1,198 mm/año y en la parte sur varían desde los 1,138 mm/año a 1,440 mm/año. Las mayores precipitaciones se presentan en el mes de septiembre, con un promedio de 232 mm (Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

En el año 2022 la temperatura media fue de 27.1°C y la precipitación media de 1,290 mm. En la Figura 1 se muestran las temperaturas y las precipitaciones medias del año 2022 por mes, en donde se puede observar que el mes con menor precipitaciones fue marzo, con un promedio de 139 mm y las mayores precipitaciones se presentaron en el mes de agosto, con un promedio de 581 mm (CONAGUA, 2022).



**Figura 1.** Climograma de la península de Yucatán del año 2022. Fuente: CONAGUA, (2022).

### 1.3 GEOLOGÍA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

La península de Yucatán está constituida por una geología que en su mayoría son depósitos kársticos altamente permeables, formados por rocas marinas (Villasuso y Méndez, 2000), rocas sedimentarias como calizas, dolomías, evaporitas que alcanzan espesores mayores a 1,500 metros (Weidie, 1985). La península de Yucatán está conformada por una plataforma carbonatada de edad Mesozoica-Cenozoica (Lugo *et al.*, 1992); el Paleoceno (65.5 mda) está representado por rocas carbonatadas y evaporitas pertenecientes a la Formación Icaiché, el Eoceno (56 mda) referido como la Formación Chichén Itzá consiste en una caliza masiva fosilífera, el Oligoceno (34 mda) está presente en la porción nororiental y constituido por una secuencia de calcarenita con margas y lutitas, del Mioceno (23.03 mda) al Plioceno está representado por la Formación Carrillo Puerto constituida por caliza fosilífera, caliza arcillosa y marga, del Plioceno (5.3 mda) al Pleistoceno está formado por bioclastos y calcarenitas y el Cuaternario (2.58 mda) es representado por depósitos de litoral, lacustre, palustre y aluvión (Figura 2).



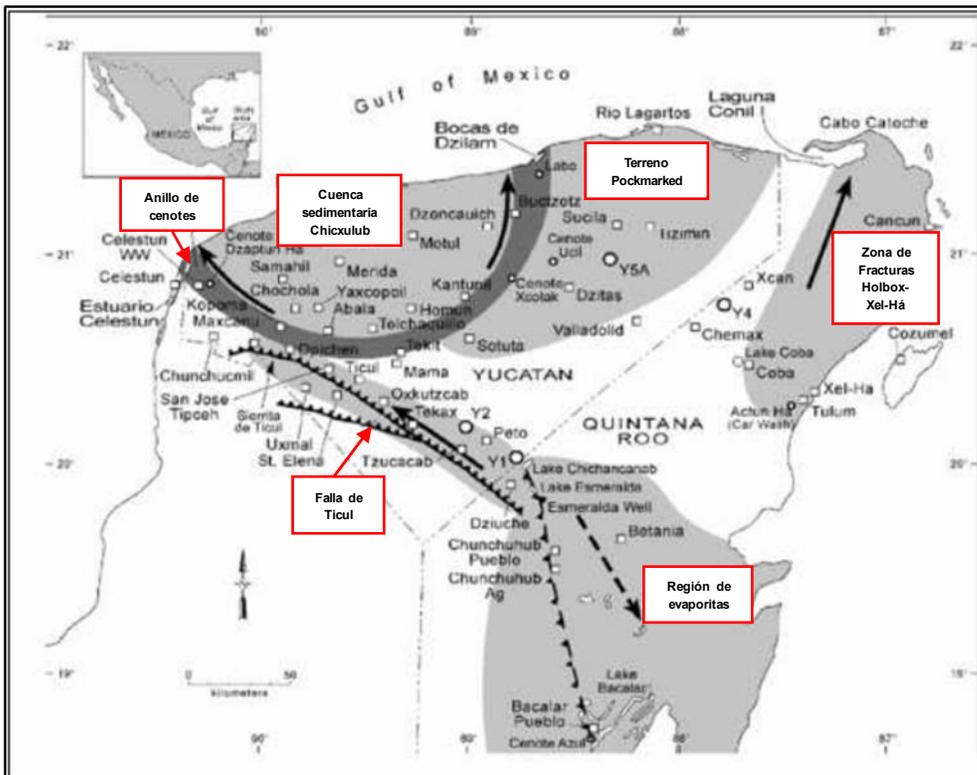
**Figura 2.** Clasificación geológica de la península de Yucatán. Tomado de Perry *et al.* (2009).

Varios autores han identificado a la península de Yucatán como una provincia fisiográfica distintiva (Ordóñez, 1941; Alvarez, 1961; Hubp *et al.*, 1992; Aguirre y Ayala, 1992), caracterizada por una topografía con poca variación altitudinal, carente de una red de ríos superficiales, pero con un flujo subterráneo que da lugar a la formación de sistemas kársticos.

Aguirre (1986) divide en cuatro las regiones geomorfológicas: 1) región costera, que abarca las playas y zona costera, en donde el agua puede presentar alto contenido en sodio y cloruros debido a la intrusión salina; 2) planicies interiores, que comprende la porción norte, este y oeste de la península, incluyendo el Anillo de Cenotes; 3) región de colinas y valles, la cual abarca la parte centro y sur, comprende rocas pertenecientes a edades más antiguas, suelos que son de mayor profundidad, vegetación más alta y más sólida y el nivel freático con mayor profundidad; 4) región de las cuencas, que está ubicada en el estado de Quintana Roo, es un desarrollo kárstico relacionado a la zona de fallamiento (Villasuso y Méndez, 2000).

Perry *et al.* (2002) mencionan que fueron identificadas seis regiones hidrogeoquímicas/fisiográficas (Figura 3) por sus características tectónicas, patrones de

sedimentación y erosión, patrones en la lluvia y la litología, éstas fueron: 1) Cuenca Sedimentaria Chicxulub, la cual tiene una permeabilidad menos desarrollada en sus cavernas a comparación del resto de la península; 2) Anillo de Cenotes, que delimita la Cuenca de Chicxulub de manera semicircular a base de cenotes, es una zona de alta permeabilidad; 3) Terreno Pockmarked, que consiste en un terreno con abundancia de cenotes; 4) Falla de Ticul, en donde la superficie que presenta la falla es una pendiente con dirección oeste-noroeste de aproximadamente 100 km; 5) Zona de Fracturas Holbox-Xel-Há, que consiste en largas cadenas de depresiones de solución alargadas de más de 100 km; 6) Región de evaporitas, el flujo de agua va en dirección sur y oeste.



**Figura 3.** Regiones fisiográficas de la península de Yucatán. Fuente: Perry *et al.* (2002).

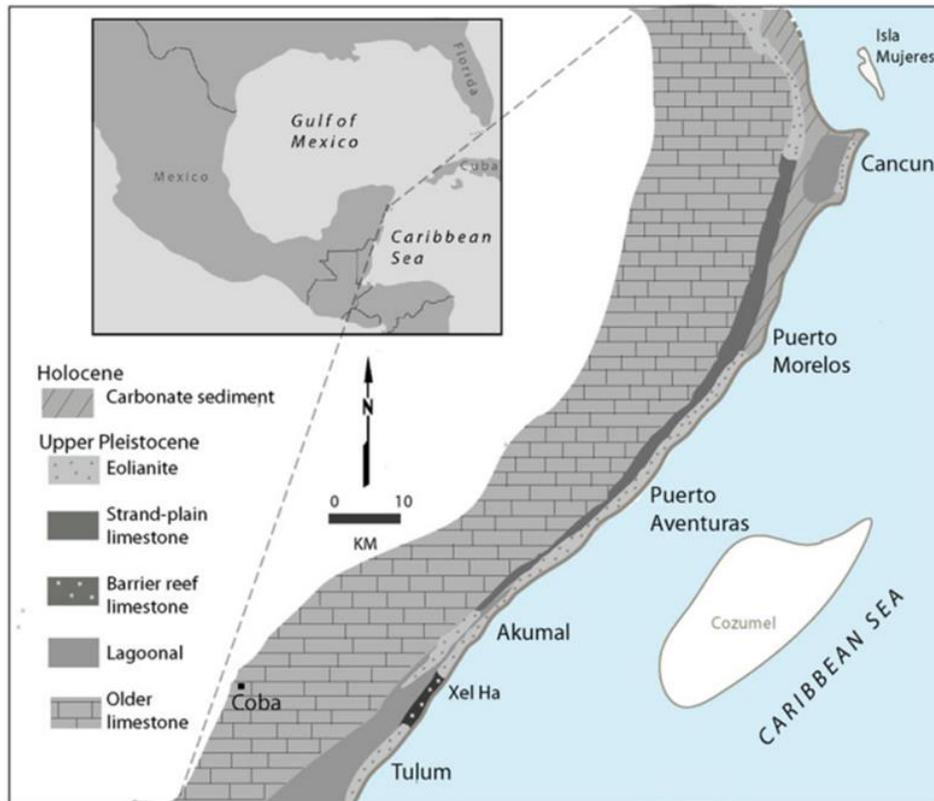
Los ejes estructurales que destacan en la Península tienen una orientación Oeste Noroeste – Este Sureste y Nornoroeste – Suroeste, los cuales están relacionados con la Sierrita de Ticul (falla normal) y el Sistema Bacalar Río Hondo (serie de fallas normales escalonadas, con formas horst y graben, pilares y fosas tectónicas) (Butterlin y Bonnet, 1960), también se destaca la Zona de Fracturas de Holbox que consiste en un conjunto de fracturas (Marín *et al.*, 2004).

### 1.3.1 GEOLOGÍA DEL TRAMO 4 ESTE

En este estudio se dividió el Tramo 4 en dos secciones, separándolo en el límite federativo entre Quintana Roo y Yucatán y denominándolos Tramo 4 Este (Quintana Roo) y Tramo 4 Oeste (Yucatán), los cuales son de interés al igual que el Tramo 7 (Campeche).

El área está compuesta por carbonatos de edad mioceno a holoceno, pertenecientes a la Formación Carrillo Puerto (Ramos, 1975). La más antigua unidad expuesta en la región consiste en una secuencia de caliza y coquina (boundstone) de edad Mioceno-Plioceno. Posteriormente, sobre esta unidad, se encuentran depósitos cuaternarios de arenisca poco consolidada, compuestos principalmente por fragmentos de gasterópodos, pelecípodos, ostras y calcita, de edad Pleistoceno. Además de depósitos lacustres, palustres y de litoral (Servicio Geológico Mexicano, 2006a).

Recientemente los carbonatos costeros han sido divididos en unidades del Pleistoceno, las cuales están compuestas por secuencias marinas (estratos de playa y calizas de arrecife coral) y no marinas (eolianitas, fangolitas carbonatadas lacustres de agua dulce y caliche) acumuladas durante los altiplanos interglaciares (Ward, 1985; 2003) y separadas por discordancias, las cuales indican exposición y erosión de la superficie de la plataforma en retroceso marino (Perry *et al.*, 1995), bajo estos estratos se encuentran rocas carbonatadas pertenecientes al Mioceno-Plioceno (Richards y Richards, 2007) (Figura 4).



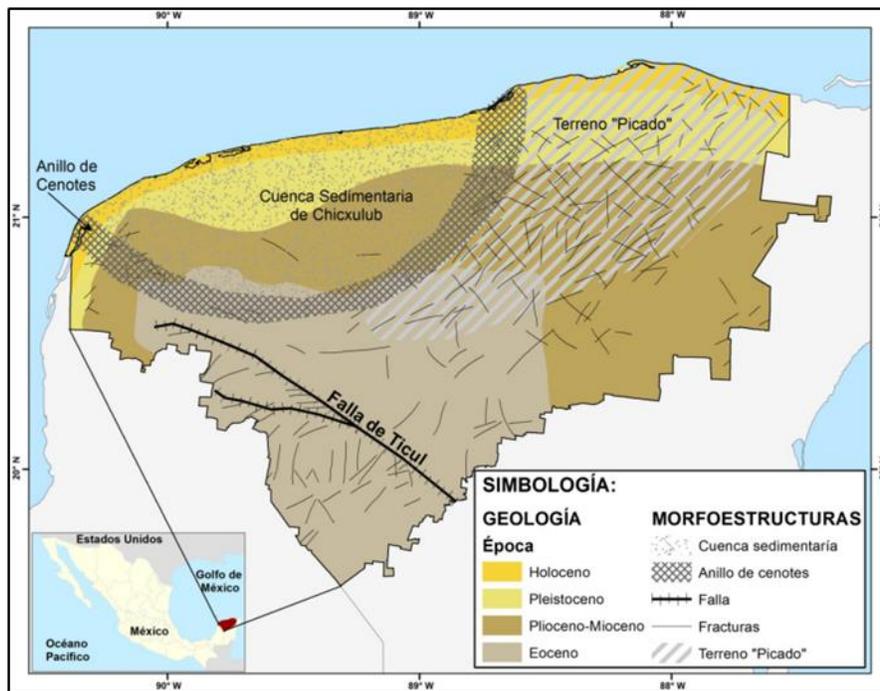
**Figura 4.** Estratigrafía de la costa noreste de Quintana Roo (Modificado por Ward, 1985).

Se han identificado algunos lineamientos que sugieren posibles fallas normales con orientación noreste-suroeste, derivadas de una actividad tectónica distensiva. Estas posibles fallas forman parte de la Depresión Ignacio Zaragoza-Chumpón, la cual afecta a las rocas de la Formación Carrillo Puerto (Servicio Geológico Mexicano, 2006a).

### 1.3.2 GEOLOGÍA DEL TRAMO 4 OESTE

La unidad geológica más antigua que se encuentra aflorando en la región es la Formación Chichén-Itzá, compuesta por rocas carbonatadas: grainstone, wackestone, brecha calcárea y estratos de margas, de edad Eoceno. Sobre esta formación se encuentran afloramientos de rocas del Oligoceno, conformadas por: mudstone, grainstone y boundstone. La formación que la sobreyace es la Formación Carrillo Puerto, con edad Mioceno-Plioceno, compuesta por: mudstone, wackestone, grainstone, packstone, boundstone y brechas calcáreas (Figura 5). Se obtienen materiales pétreos a partir de la explotación de rocas calcáreas en diferentes bancos distribuidos en la zona, de ellos se obtiene piedra para mampostería, grava, polvo (arena) y sello

(granzón), utilizados en la construcción urbana (bloques, viguetas, etc.) y en la infraestructura vial (Servicio Geológico Mexicano, 2006b).



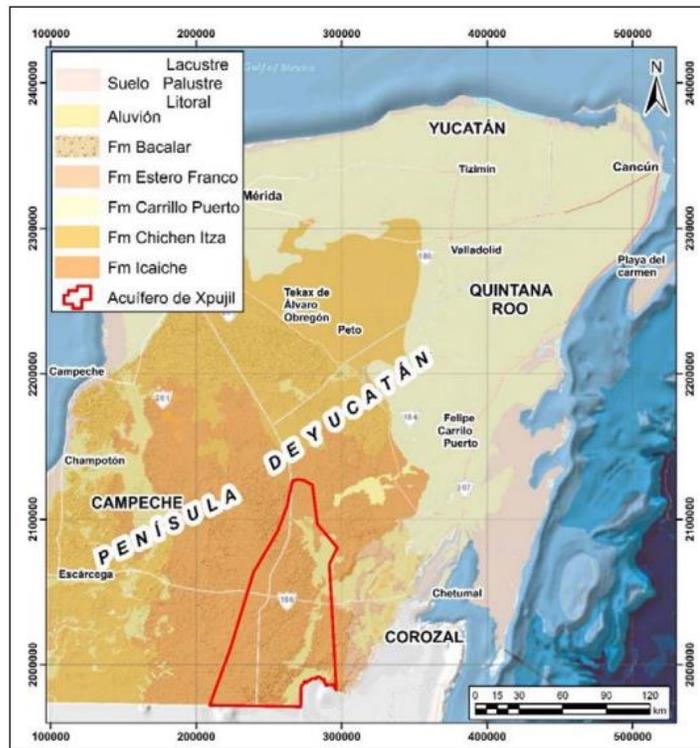
**Figura 5.** Mapa del estado de Yucatán donde se presenta la geología (López, 1973).

### 1.3.3 GEOLOGÍA DEL TRAMO 7

En las selvas de Calakmul se pueden observar afloramientos del Paleoceno, que conforman la elevación más alta de la península, alcanzando los 380 metros sobre el nivel del mar (Ortiz-Flores *et al.*, 2019). La formación más antigua expuesta en la zona es la Formación Icaiché, de edad Paleoceno (Servicio Geológico Mexicano, 2005<sup>a</sup>). En 1960, Butterlin y Bonet informaron sobre la presencia de rocas calizas con arcilla parcialmente silicificadas, las cuales son reconocibles por su color café, blanco o amarillo, y se encuentran en capas dolomitizadas, con la presencia de nódulos de pedernal, yeso, margas y microfauna mal preservada. Estas rocas suelen estar cubiertas por una capa blanda de material intemperizado conocido como “caliche”, así como por arenas margosas (Ortiz-Flores *et al.*, 2019).

Esta formación es cubierta de manera concordante por la Formación Chichén-Itzá, que se compone de caliza y marga con nódulos y pequeñas bandas de sílice, de edad Eoceno. A su vez, la Formación Chichén-Itzá es sobreyacida de manera discordante por la Formación Carrillo Puerto, con edad de Mioceno superior-Plioceno compuesta por coquina y caliza. Todas las unidades están parcialmente cubiertas por sedimentos cuaternarios; depósitos aluviales,

lacustres y palustres (Figura 6). Debido a que en la región se encuentran rocas calcáreas, las aguas pluviales percolan facilitando la disolución del carbonato de calcio, permitiendo la formación de estructuras kársticas como dolinas, las cuales pueden colapsar e interconectarse, creando estructuras mayores conocidas como poljes (Servicio Geológico Mexicano, 2005b).



**Figura 6.** Mapa geológico de la península de Yucatán. Tomado de: Ortiz-Flores *et al.* (2019).

Aunado a ello, existen dep3sitos de materiales como el banco Vyca, una mina que produce yeso utilizado en la elaboraci3n de cemento, con una pureza de yeso del 88.90%; el banco Tancuán, con una pureza del 90.17%; y Chicaná, con una pureza del 89.07% (Servicio Geológico Mexicano, 2005).

#### 1.4 HIDROGEOLOGÍA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

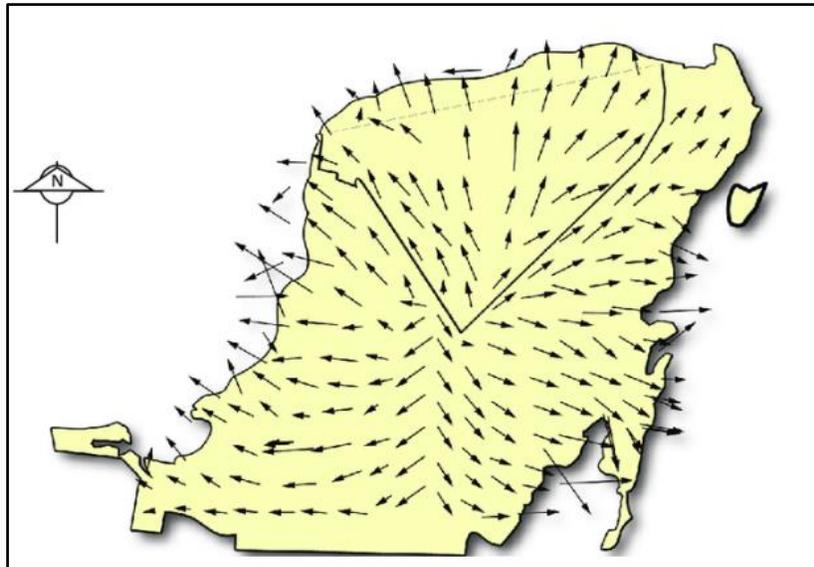
La hidrogeología de la península de Yucatán tiene una fácil disolución de rocas carbonatadas, las formaciones constituyen la “losa calcárea yucateca”, en ella ha ocurrido una gran permeabilidad lo que permite que el agua meteórica pueda tener un fácil y rápido acceso al subsuelo, por lo que no se presentan corrientes superficiales (Back, 1981). La morfología, la topografía y la presencia o ausencia de formaciones geológicas desempeñan un papel importante en el desarrollo de las

condiciones hidrogeológicas de una zona kárstica, ya que éstas, aunadas con factores climáticos, controlan la permeabilidad y la formación del suelo, lo que influye en gran medida en el tipo de gestión del agua que requiere cualquier zona (Back, 1981).

El acuífero kárstico de Yucatán tiene un nivel freático de entre 1.5 a 8 m de profundidad, aproximadamente a 2 km de la costa (López, 1973) y por un flujo de agua subterránea de conductos turbulentos (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). El acuífero consiste en una capa de agua dulce en la que su espesor va aumentando de la costa al centro de la península y está por encima de agua salada (Villasuso y Méndez, 2000; Rocha *et al.*, 2015).

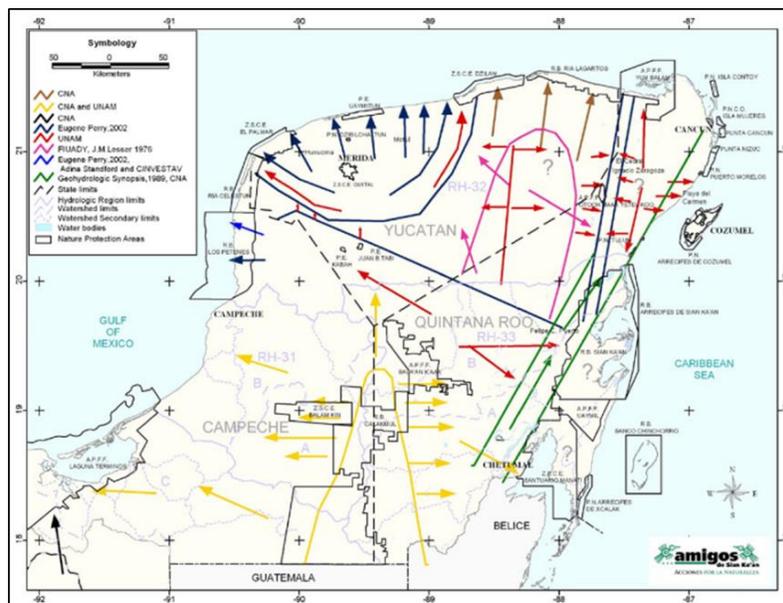
La permeabilidad del acuífero de la península de Yucatán pertenece a la permeabilidad secundaria, pues existe en él la conjunción de fracturas y la permeabilidad del suelo kárstico (Villasuso y Méndez, 2000), lo que da origen a un sistema de formas kársticas como los cenotes (dolinas), poljes y sistemas de cuevas (Lugo *et al.*, 1992). La presencia de red fluvial es nula en la parte central y parte norte de la Península por lo que ocurre una infiltración de precipitación rápida al suelo, lo cual forma parte de la recarga del acuífero (López, 1973).

Bauer-Gottwein *et al.* (2011) mencionan que, en la región de colinas y valles, que abarca la parte centro y sur, del Cretácico, los niveles freáticos medidos resultaron muy variables, lo que les hace concluir que se tiene un sistema acuífero discontinuo. Confirman que se tiene un flujo concéntrico desde el centro de la península de Yucatán hacia los márgenes (Figura 7). Aunado a ello, mencionan que el flujo preferencial se ve perjudicado por zonas de fractura que se encuentran a nivel regional (Anillo de Cenotes, Sierrita de Ticul, Zona de Fracturas Holbox, el Bloque de falla Rio Hondo y La Libertad) pues la geología costera del Plioceno muestra acuíferos continuos y consistentes, y la geología central del Cretácico muestra sistemas de acuíferos discontinuos y compartimentado.



**Figura 7.** Dirección de flujo del agua subterránea en la península de Yucatán. Tomado de: CONAGUA, 2008.

En cuanto a la fisiografía que cambia el flujo radial de la península, se distinguen tres fallas principales (Perry *et al.*, 2002): 1) Anillo de Cenotes, el cual consiste en un sistema de fallas de forma semicircular y en un área con alta permeabilidad; 2) Sierrita de Ticul, su flujo de agua está en dirección al Anillo de Cenotes; y 3) Sistema de Fracturas de Holbox – Xel-Há, la cual está paralela a la costa, el flujo va en dirección al norte (Figura 8).



**Figura 8.** Modelo regional de flujo de agua en la península de Yucatán. Fuente: Bauer-Gottwein *et al.* (2011).

#### 1.4.1 HIDROGEOLOGÍA DEL TRAMO 4 ESTE

La zona de fractura de Holbox es una característica tectónica importante a nivel regional que atraviesa la planicie kárstica del noreste de la península de Yucatán (Tulaczyk *et al.*, 1993). La fractura principal de relevancia en esta zona es la fractura de Holbox-Xel-Ha, que tiene su origen en la costa noreste de la península y se extiende hacia el sur con una tendencia que varía entre N5°E y N10°E (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). Lo visible en la superficie de esta fractura son las depresiones de polje, las cuales pueden inundarse dependiendo de la estación (Weidie, 1978). Según Tulaczyk *et al.* (1993), esta región presenta una alta permeabilidad y ejerce una influencia significativa en el flujo de aguas subterráneas a nivel regional. El espesor estimado de agua dulce en la región central de la zona de fractura de Holbox es de 120 m aproximadamente (Tulaczyk *et al.*, 1993).

Esto señala una permeabilidad considerable de la fractura de Holbox-Xel-Ha, lo que origina un flujo preferencial, como indicaron Tulaczyk *et al.* (1993) con respecto al comportamiento típico de las fracturas dentro de la zona de fractura de Holbox-Xel-Ha (comportamiento regional). La dimensión de esta estructura geológica y su influencia en el flujo de aguas subterráneas indican un comportamiento similar a una microcuenca, con sus límites establecidos por esta fractura (Zamora-Luria *et al.*, 2020) en donde la hidrología del área se ve influenciada por el escurrimiento superficial, la evapotranspiración y el aumento de la descarga en las áreas costeras (Tulaczyk *et al.*, 1993).

#### 1.4.2 HIDROGEOLOGÍA DEL TRAMO 4 OESTE

El tramo se encuentra cerca de la zona “Pockmarked”, distinguida por ser una zona en la que abundan los cenotes en un área kárstica considerada relativamente madura (Ávila y Sansores, 2018).

Esta región abarca la parte septentrional de la Península, la elevación aumenta de manera gradual hacia el interior, al sur, alcanzando 35 hasta los 40 metros cerca de la base de la Sierrita de Ticul. La topografía local en ocasiones alcanza los 10 metros de elevación. La región está compuesta por carbonatos marinos del Terciario que han experimentado una disolución intensa; se han formado grandes cavidades originadas por la infiltración del agua pluvial, formando acuíferos altamente permeables. La zona altamente karstificada permite una rápida infiltración, lo que hace inexistentes las corrientes superficiales.

La rápida infiltración del agua pluvial al acuífero da lugar al agua como una solución insaturada con alto potencial de disolución, incrementando el tamaño de las fisuras y cavidades, generando

dolinas y cenotes. Estos rasgos varían y son formados por las fluctuaciones del nivel freático, las cuales están de 4 a 5 metros de profundidad en las zonas con más elevación (Aguirre y Ayala, 1992).

La formación de los cenotes está influenciada por la oscilación del nivel freático. Los carbonatos del Terciario en el norte de la Península están dispuestos de forma horizontal y evidencian cambios característicos de facies que influyen en la presencia de áreas con diferentes grados de karstificación (Aguirre y Ayala, 1992).

El Terreno Pockmarked es una región extensa ubicada en el norte del centro del estado de Yucatán, en donde los cenotes son frecuentes en un karst relativamente desarrollado. Según Pope *et al.* (1996), estas características en superficie son las más antiguas y elevadas de la península. Perry *et al.* (1995) atribuyen este desarrollo kárstico a la disolución de evaporitas del Terciario, así como de la anhidrita/yeso proveniente del límite K/T (Cretácico-Terciario).

El límite occidental del Terreno Pockmarked coincide con el Anillo de Cenotes, marcando la transición entre la zona exterior, la cual está sustentada por capas de evaporitas, y la brecha de impacto de evaporitas del Cretácico terminal (Ward *et al.*, 1985), y la zona interior, en donde hay ausencia de evaporitas o se encuentran a gran profundidad para interactuar con las aguas subterráneas. La zona presenta afloramientos estratificados, fragmentos de roca caliza y depresiones de distintos tamaños. Los rasgos kársticos que predominan son dolinas, cenotes, sumideros y pozos de agua. La composición geológica facilita la infiltración en el subsuelo (Ávila y Sansores, 2018; Morales, 2021).

#### 1.4.3 HIDROGEOLOGÍA DEL TRAMO 7

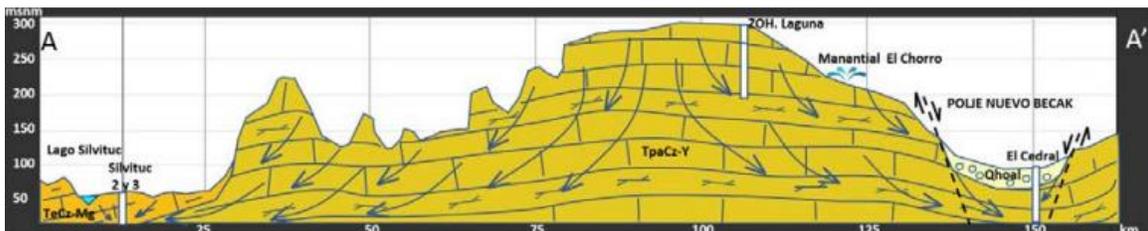
El acuífero está ubicado en una plataforma de rocas calcáreas marinas dentro de la provincia fisiográfica península de Yucatán, ésta se divide en tres subprovincias fisiográficas: Karst y Lomeríos de Campeche, Karst Yucateco y Costa Baja de Quintana Roo. La subprovincia Karst y Lomeríos de Campeche está compuesta por una serie de colinas que alcanzan los 133 hasta los 300 metros, formadas por caliza cristalina dolomitizada y silicificada, con intercalaciones o niveles de yeso y margas, que también contienen nódulos y bandas delgadas de pedernal (Ortiz-Flores *et al.*, 2019).

Los períodos de residencia del agua subterránea son cortos, típicos de rocas sumamente fracturadas, que cuentan con cavidades e intersticios ocasionados por la disolución de la roca, representativo de acuíferos karstificados. La infiltración del agua pluvial permite la disolución de

minerales como el carbonato de calcio y los yesos, originando estructuras kársticas como dolinas fuertemente interconectadas.

Parte del agua pluvial que cae en la península de Yucatán se evapotranspira, mientras que el resto es infiltrado al acuífero subterráneo debido a su alta permeabilidad, por medio de fracturas, cavidades y conductos kársticos de las calizas, esto permite la reserva de grandes cantidades de agua y favorece su recarga. Dado el origen, la conformación fisiográfica y la composición litológica de la península, el flujo subterráneo fluye de manera radial, desde las elevaciones topográficas más notables en la parte central y sur de la península. El acuífero está sobre una interfaz de agua salada, con estratos gruesos de agua dulce en el sur los cuales se van reduciendo a capas delgadas hasta llegar a la línea de costa.

En el acuífero de Xpujil (Figura 9), existe una divisoria (a 290 msnm aproximadamente) donde el flujo de agua subterránea se divide en dos direcciones principales: este y oeste. Mientras que, en la parte sur del acuífero, la dirección que predomina del flujo subterráneo es de norte a sur. (Ortiz-Flores *et al.*, 2019).



**Figura 9.** Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero Xpujil, estado de Campeche. Tomado de: Ortiz-Flores *et al.*, 2019.

## 1.5 CONDICIONES DEL AGUA DE SUMINISTRO PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA

### 1.5.1 CONDICIONES DEL AGUA DE SUMINISTRO PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 4 ESTE

Se encontraron estudios en los que analizan la calidad del agua subterránea en la zona del Tramo 4 Este, con fechas del 2011, 2013 y 2020, años anteriores a la construcción del megaproyecto.

El estudio de Leal-Bautista *et al.* (2011), llevado a cabo en pozos y cenotes en zonas turísticas y no turísticas en Puerto Morelos, Quintana Roo, se centró en evaluar la calidad del agua subterránea de siete sitios evidenciando la presencia de contaminantes fecales utilizando *Escherichia coli*. Se realizaron análisis bacteriológicos y de microbiología molecular. También se

detectó cafeína como indicador de contaminación. Se midieron el pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, temperatura, alcalinidad, nitratos, nitritos, nitrógeno total, fosfato, sólidos suspendidos totales y Demanda Química de Oxígeno. Los resultados confirmaron la contaminación fecal en ambos tipos de sitios, destacando la relación entre la calidad del agua y el turismo. En el artículo destacan la necesidad de políticas efectivas de gestión del agua y evaluación del impacto ecológico del turismo en la región.

Por otra parte, el artículo de Duarte *et al.* (2013) aborda la vulnerabilidad y riesgo de contaminación en los acuíferos kársticos. Los autores destacan la alta susceptibilidad a la contaminación que posee el acuífero. Moore *et al.* (2020) realizaron un estudio en donde examinaron la diversidad microbiana en aguas subterráneas en la península de Yucatán para comprender cómo las variables ambientales afectan esta diversidad. Las muestras fueron tomadas de cenotes y de un pozo en abandono dentro de un complejo turístico en distintas temporadas, en dichas muestras se encontró una alta diversidad microbiana la cual se lo atribuyeron a las cálidas temperaturas y a la entrada de nutrientes por actividades antropogénicas.

#### 1.5.2 CONDICIONES DEL AGUA DE SUMINISTRO PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 4 OESTE

Para el Tramo 4 Oeste se encontraron distintos estudios que evaluaron la calidad del agua en las localidades que se encuentran cercanas al trazo, los estudios previos a la construcción del megaproyecto datan en los años 2004, 2017 y 2020.

Ávila *et al.* (2004) llevaron a cabo un estudio en donde evaluaron la calidad del agua subterránea en el estado de Yucatán, dada su importancia como principal fuente de abastecimiento y su vulnerabilidad a la contaminación debido a la naturaleza kárstica de la región. Se explica que el origen de contaminación en el agua subterránea se debe principalmente al uso no controlado de agroquímicos y la disposición inadecuada de los desechos agrícolas y urbanos. En el estudio se enfocaron en la calidad química y bacteriológica del agua llevando a cabo el muestreo en los sistemas de agua potable de las 106 cabeceras municipales. Los resultados arrojaron que la calidad bacteriológica del agua en la parte oriental del estado era clasificada como "peligrosa" y "muy contaminada". Mientras que en términos de calidad química (nitratos, cloruros, sodio, dureza total y cadmio), la mayoría de los sistemas municipales contaban con una calidad aceptable, con pocos parámetros excediendo los límites permisibles establecidos por la normatividad mexicana.

Por otra parte, Giácoman-Vallejos *et al.* (2017) realizaron un estudio sobre la contaminación del agua subterránea en la región noroccidental del estado de Yucatán, específicamente entre los municipios de Mérida y Progreso. Los autores se enfocaron en analizar la presencia de plaguicidas. Debido a la vulnerabilidad del área de estudio por su naturaleza kárstica las sustancias son fácilmente infiltradas al agua subterránea, los resultados que se obtuvieron mostraron concentraciones altas de plaguicidas, las cuales representan un riesgo para la salud humana, según la NOM-127-SSA1-1994.

Smith *et al.* (2020) también llevaron a cabo un estudio para identificar los principales factores que afectan la calidad del agua subterránea en una zona de agricultura en el estado de Yucatán y una zona sin agricultura en el estado de Quintana Roo. En este estudio los autores compararon los dos tipos de uso del suelo y evaluaron su impacto con datos fisicoquímicos, análisis multivariados, hidrogeoquímica y composición isotópica de nitratos. Concluyeron que la zona agrícola en temporada de lluvias tiene un mayor impacto negativo en la calidad del agua subterránea, ya que los resultados mostraron mayores concentraciones de nitratos, amonio, potasio y conductividad eléctrica. Sugirieron mantener áreas no agrícolas para preservar la calidad adecuada del agua subterránea.

### 1.5.3 CONDICIONES DEL AGUA DE SUMINISTRO PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 7

De los estudios encontrados que evalúan la calidad del agua en municipios que están dentro del Tramo 7 se encuentra Benítez *et al.* (2011) quienes evaluaron la calidad del agua de 50 pozos en todo el estado de Campeche, utilizando análisis *in situ* y de laboratorio. Los resultados obtenidos arrojaron que alrededor de un tercio de los pozos analizados superaron los límites permitidos de la normatividad mexicana para sólidos totales disueltos (STD), pH y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) debido a condiciones geohidrológicas naturales. La mayoría no sobrepasaba los límites permisibles para nutrientes y metales pesados, algunos pozos mostraron concentraciones altas de nitrógeno de nitrito ( $\text{N-NO}_2^-$ ), fósforo total (TP) y plomo (Pb), indicando contaminación de origen antropogénico. En el estudio encontraron que todos los pozos muestreados mostraban presencia de bacterias coliformes. Por lo obtenido en sus análisis, atribuyen la mala calidad del agua a la presencia de vertederos a cielo abierto, un sistema de alcantarillado deficiente y cambios en el uso del suelo. Mencionan que, sin las medidas adecuadas, las actividades antropogénicas podrían aumentar el riesgo de contaminación del agua.

Ortiz-Flores *et al.* en 2019, también llevaron a cabo un análisis detallado de la calidad del agua dentro del estado de Campeche, específicamente en el área del acuífero Xpujil, ubicado en el

municipio de Calakmul, Campeche. Durante este estudio, se realizaron muestreos de agua tanto en pozos como en cenotes, en donde, al igual que los resultados de Benítez *et al.* (2011) todos los pozos analizados mostraron contaminación por bacterias coliformes y también atribuyen la deficiente calidad del agua principalmente a la proliferación de vertederos a cielo abierto, la falta de un adecuado sistema de alcantarillado y los cambios en el uso del suelo en la zona. Además, se sugieren medidas de gestión y manejo del agua basadas en los resultados obtenidos.

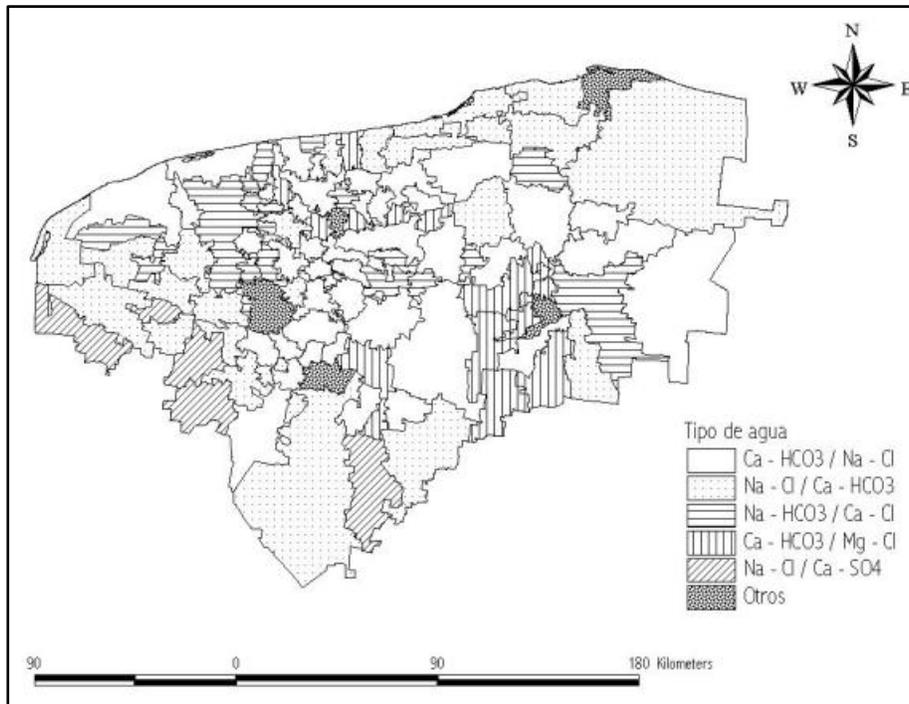
## 1.6 CONDICIONES HIDROGEOQUÍMICAS PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA

### 1.6.1 CONDICIONES HIDROGEOQUÍMICAS PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 4 ESTE

La composición química del agua subterránea en Quintana Roo es evidenciada en la tesis de Carmona-Esquivel (2019), quien recolecta muestras del norte, centro y sur del estado de Quintana Roo entre los meses de marzo y junio del 2018. Para su estudio analizó 35 muestras, pertenecientes a pozos y cenotes con el fin de determinar la relación con la geología local y la intrusión de agua salada, de las que analizó el pH, la conductividad eléctrica, la temperatura y los iones mayoritarios. Con los resultados identificó tres tipos de agua predominantes; cálcica clorurada al norte, clorurada cálcica al centro y cálcica bicarbonatada al sur, y con los índices de saturación se encontró que los minerales que controlan la química del agua en esta zona son: aragonita, calcita y dolomita precipitando y en disolución el yeso, anhidrita, halita y silvita.

### 1.6.2 CONDICIONES HIDROGEOQUÍMICAS PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 4 OESTE

Las muestras de agua potable analizadas por Ávila *et al.* (2004), mediante el diagrama de Piper, también determinaron las familias de aguas predominantes en el estado de Yucatán de acuerdo con el contenido iónico (Figura 10). Este diagrama se construyó utilizando los valores de los iones mayoritarios encontrados en cada uno de los pozos muestreados. Las familias de aguas predominantes se clasificaron en cinco tipos principales en el estado de Yucatán: cálcica bicarbonatada - sódica clorurada (40%), sódica clorurada - cálcica bicarbonatada (22%), sódica clorurada - cálcica clorurada (16%), cálcica bicarbonatada - magnésica clorurada (12%) y sódica clorurada - cálcica sulfatada (5%). Según la Sinopsis Geohidrológica del Estado de Yucatán (SARH, 1988), la familia cálcica-magnésica bicarbonatada es la predominante, con la magnésica-sódica representativa de las áreas de lomeríos y la familia sódica-clorurada como representativa del área costera.



**Figura 10.** Familias de agua que predominan en los municipios del estado de Yucatán. Tomado de: Ávila *et al.* (2004).

### 1.6.3 CONDICIONES HIDROGEOQUÍMICAS PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 7

Para el tramo correspondiente al estado de Campeche, el estudio de Ortiz-Flores *et al.*, en 2019, muestra que realizaron una investigación exhaustiva de los factores hidrogeológicos en el área del acuífero Xpujil, en el municipio de Calakmul, Campeche. En este estudio, los autores realizaron muestreos de agua en pozos y en cenotes, para llevar a cabo los análisis de la composición química del agua. Los resultados fueron analizados en diagramas de Piper, en donde obtuvieron las familias o tipos de agua, las que predominan en el acuífero son las Sulfatadas-Cálcicas y Magnésicas, seguidas por las Bicarbonatadas-Cálcicas y Magnésicas y las Cloruradas-Cálcicas.

## 1.7 INDICADORES SOCIALES PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA

### 1.7.1 INDICADORES SOCIALES PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 4 ESTE

Según el Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI, la población total del estado de Quintana Roo es de 1,857,985 personas. En términos de ocupación laboral, el sector terciario (comercio y servicios), específicamente el turismo, es el más grande, representando el 71.11% de la población ocupada, seguido por el sector secundario (industrial) con el 16.01%, y el sector primario (agropecuario, pesca, silvicultura y otros) con el 10.66%. La distribución de la población en Quintana Roo muestra una notable heterogeneidad, con el 82.46% de la población concentrada en 20 localidades urbanas, mientras que el 17.54% se encuentra en 2,147 localidades rurales. Durante el periodo 1990-1995, la tasa de crecimiento del estado fue del 6.48%, mostrando una disminución del 1.33% en comparación con el periodo anterior (1980-1990), atribuida a programas de planificación familiar. INEGI, 2002 reportó el crecimiento poblacional de los ocho municipios registrados del estado, con Solidaridad registrando el mayor crecimiento del 19.32%, seguido por Benito Juárez (10.56%), Cozumel (6.27%), Felipe Carrillo Puerto (3.06%) y José María Morelos (2.91%). Por otro lado, Isla Mujeres experimentó un decrecimiento del -3.44% y Lázaro Cárdenas un crecimiento del 2.45% (INEGI, 2002<sup>a</sup>). Los datos del INEGI, 2020 reportan once municipios, con Benito Juárez predominando con una población total de 911,503, Solidaridad con 333,800, Othón P. Blanco con 233,648, Cozumel con 88,626, Felipe Carrillo Puerto con 83,990, Tulum con 46,721, Bacalar con 41,754, José María Morelos con 39,165, Lázaro Cárdenas con 29,171, Puerto Morelos con 26,921 e Isla Mujeres con 22,686.

Según datos del INEGI, Lázaro Cárdenas fue uno de los municipios que experimentó un aumento en su crecimiento poblacional, en donde la población en todo el municipio fue de 25,333 personas en 2010, aumentó a 27,243 en 2015 (Manrique *et al.*, 2020) y registrando 29,171 en 2020 (INEGI, 2020). En Lázaro Cárdenas y Puerto Morelos cuentan con un total de viviendas particulares habitadas de 16,618, de las cuales 1,060 son viviendas sin drenaje, además de otros aspectos, esta carencia suma a las condiciones de pobreza de la población en los municipios (INEGI, 2020; CONEVAL, 2020).

## 1.7.2 INDICADORES SOCIALES PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 4 OESTE

El Censo de Población y Vivienda de 2020 del INEGI, muestra que Yucatán tiene una población total de 2,320,898 personas. La distribución laboral muestra que el sector terciario (comercio y servicios) emplea al 53.19% de la población, seguido por el sector secundario (industrial) con un 28.18%, y el sector primario (agropecuario) con un 17.17%. Cerca del 1.46% de la población no especifica su actividad laboral. La distribución poblacional se destaca por su heterogeneidad, ya que el 81.34% de los habitantes reside en 87 localidades urbanas, mientras que el restante 18.66% vive en 3,276 localidades rurales. La tasa de crecimiento de la población entre 1995-2000 fue del 1.49%, mostrando una disminución del 0.91% respecto al período anterior (1990-1995).

Yucatán está dividido en 106 municipios. En 1995, Valladolid tenía una población de 52,496 habitantes, que aumentó a 56,776 en 2000, con una tasa de crecimiento del 1.85%. En Tinum, la población pasó de 8,679 en 1995 a 9,533 en 2000, con una tasa de crecimiento del 1.85%. Finalmente, Uayma tenía 2,804 habitantes en 1995 y 2,976 en 2000, con una tasa de crecimiento del 1.40% (INEGI, 2002b).

Según Pérez-Medina (2011), desde el inicio de los programas de combate a la pobreza se ha observado una mejora en las condiciones de vivienda y educación en Yucatán; en donde destacan mejoras en los indicadores de vivienda, como el aumento de unidades con agua entubada, que pasaron del 70.1% al 90.8% entre 1990 y 2005, y las viviendas con drenaje, que aumentaron del 46% al 69.1% en el mismo período. Es probable que el incremento en viviendas con drenaje, especialmente en áreas rurales, se deba a la construcción de viviendas con recursos del Fondo Nacional de Desastres Naturales (Fonden).

Durante el período de 1990 a 2005, la población alfabeta aumentó del 84% al 89.1%, y la asistencia escolar de niños de entre 6 y 14 años creció del 84.2% al 95.8% en un lapso de 15 años. Sin embargo, existen datos preocupantes relacionados con la pobreza en la región. Según los indicadores de pobreza correspondientes al año 2006, aunque algunos están cerca de la media nacional, reflejan un rezago social significativo. Por ejemplo, casi la mitad de la población no completa su educación básica, y menos de la mitad tiene acceso a servicios públicos de salud. Con datos del CONEVAL, 2020 se obtuvieron los datos más recientes de condiciones de pobreza, en donde Valladolid, Tinum y Uayma suman un total de 26,208 viviendas particulares habitadas y de las que 4,160 viviendas no tienen acceso al drenaje.

En lo que respecta a Valladolid, el INEGI también indica un ligero aumento en su población. En 2010, se reportaron 74,217 habitantes, mientras que en el censo de 2015 se registraron 80,313 residentes (Manrique *et al.*, 2020), y en el año 2020 se registró un total de población de 85,460 en Valladolid, 12,700 en Tinum y 4,191 en Uayma (INEGI, 2020).

### 1.7.3 INDICADORES SOCIALES PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL MEGAPROYECTO TREN MAYA DEL TRAMO 7

De la información recabada del Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI se obtuvo que la población total del estado de Campeche es de 928,363. El estado cuenta con doce municipios, de los cuales Calakmul tiene con una población total de 31,714 y Escárcega con 59,923 habitantes (INEGI, 2020). El Consejo Nacional de Población (CONAPO) en el año 2017, registró una población total de 30,800 en Calakmul, con una tasa de crecimiento anual de 1.7 % entre 2015 y 2017, superando la tasa estatal que es de 1.5%. Según el Censo de Población y Vivienda de 2020 del INEGI, el municipio tiene 184 localidades, de las cuales 105 tienen menos de 20 habitantes. Las principales localidades, como Xpujil, Constitución y Zoh Laguna, concentran el 26.04% de la población total.

Por otro lado, el municipio presenta altos índices de carencia social, según la medición de pobreza del CONEVAL en 2015, con problemas como rezago educativo (26.7%), falta de acceso a servicios básicos como agua potable (32%) y drenaje (26%), y deficiencias en vivienda (11%) y salud (8%). Además, Calakmul es el municipio más marginado y con pobreza extrema de Campeche. Los datos del INEGI del 2015 muestran carencias en servicios básicos como electricidad (4.6%) y agua potable entubada (32.4%), y un alto porcentaje de viviendas recolecta agua de lluvia (47.5%). Los datos del INEGI, 2020 y CONEVAL, 2020 registran un total de 24,753 viviendas particulares habitadas en los municipios de Calakmul y Escárcega, de las cuales 2,523 son viviendas sin acceso al drenaje.

La captación de agua de lluvia en Calakmul se lleva a cabo tanto a nivel vivienda como comunitario. Cada ejido en esta área dispone de captadores de agua de lluvia comunitarios, con una capacidad de 125 mil litros cada uno. Durante la temporada secas, el ayuntamiento suministra agua a través de pipas. El municipio carece de un sistema de tratamiento de aguas residuales, lo que representa un riesgo para el acuífero debido a su vulnerabilidad a la contaminación. Además, el crecimiento demográfico rápido es una de las principales amenazas para la contaminación del acuífero, junto con la falta de infraestructura adecuada como la carencia de sistemas adecuados de drenaje y tratamiento de aguas residuales, la disposición inapropiada de fosas sépticas, las fugas en los sistemas de 24lcantarillado, entre otros factores, y la

contaminación generada por la cría de animales y el uso de pesticidas en los cultivos (Ortiz-Flores *et al.*, 2019).

## 1.8 NORMATIVAS MEXICANAS EMPLEADAS PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

### 1.8.1 NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-2021, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LÍMITES PERMISIBLES DE LA CALIDAD DEL AGUA

La calidad de agua para uso y consumo humano es esencial para prevenir enfermedades relacionadas con infecciones gastrointestinales, por lo que se establecen límites permisibles en cuanto a sus características físicas, químicas, microbiológicas y radiactivas en la NOM-127-SSA1-2021, en donde el objetivo es garantizar la calidad del agua que es entregada a los consumidores por sistemas de abastecimiento públicos y privados.

La normativa define los límites permisibles de calidad que el agua destinada al uso y consumo humano deben cumplir obligatoriamente los organismos responsables de los sistemas de suministro de agua potable, tanto públicos como privados, en toda la nación. Esta norma no es aplicable en aguas residuales tratadas.

En la Tabla 2 se encuentran los parámetros de interés que establece la NOM-127-SSA1-2021 en cuanto a los límites máximos permisibles de calidad de agua para uso y consumo humano.

**Tabla 2.** Límites máximos permisibles de calidad de agua para uso y consumo humano de las variables consideradas en este estudio. Fuente: NOM-127-SSA1-2021.

PARÁMETRO	LÍMITE PERMISIBLE	UNIDADES
<i>E. coli</i>	<1.1 o no detectable	NMP/100 ml
Nitrógeno de nitratos	11	mg/l
Nitrógeno de nitritos	0.9	mg/l
Nitrógeno de amonio	0.5	mg/l
Sulfatos	400	mg/l

1.8.2 NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-2021, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN CUERPOS RECEPTORES PROPIEDAD DE LA NACIÓN.

La Norma Oficial Mexicana tiene como objetivo principal establecer los límites permisibles de contaminantes presentes en las descargas de aguas residuales. Con el propósito de proteger, conservar y mejorar la calidad de las aguas y otros recursos nacionales.

Es obligatorio cumplir con la normativa para aquellos organismos responsables de realizar descargas de aguas residuales en cualquier cuerpo receptor propiedad de la nación. Sin embargo, la normativa no es aplicable a las descargas de agua de drenajes que son exclusivos para aguas pluviales, ni a descargas que se vierten directamente en sistemas de drenaje y alcantarillado municipales.

El método de color verdadero a tres longitudes de onda es una herramienta útil y eficaz para detectar el tipo de contaminación de color en un cuerpo de agua, utilizando la relación entre los colores primarios y sus respectivas longitudes de onda: 436 nm (amarillo), 525 nm (rojo) y 620 nm (azul) (Martínez y Osorio, 2018).

En la Tabla 3 se encuentran los límites permisibles que establece la normativa en cuanto a las longitudes de onda del parámetro de color verdadero.

**Tabla 3.** Límites permisibles de color verdadero de la NOM-001-SEMARNAT-2021. Fuente: NOM-001-SEMARNAT-2021.

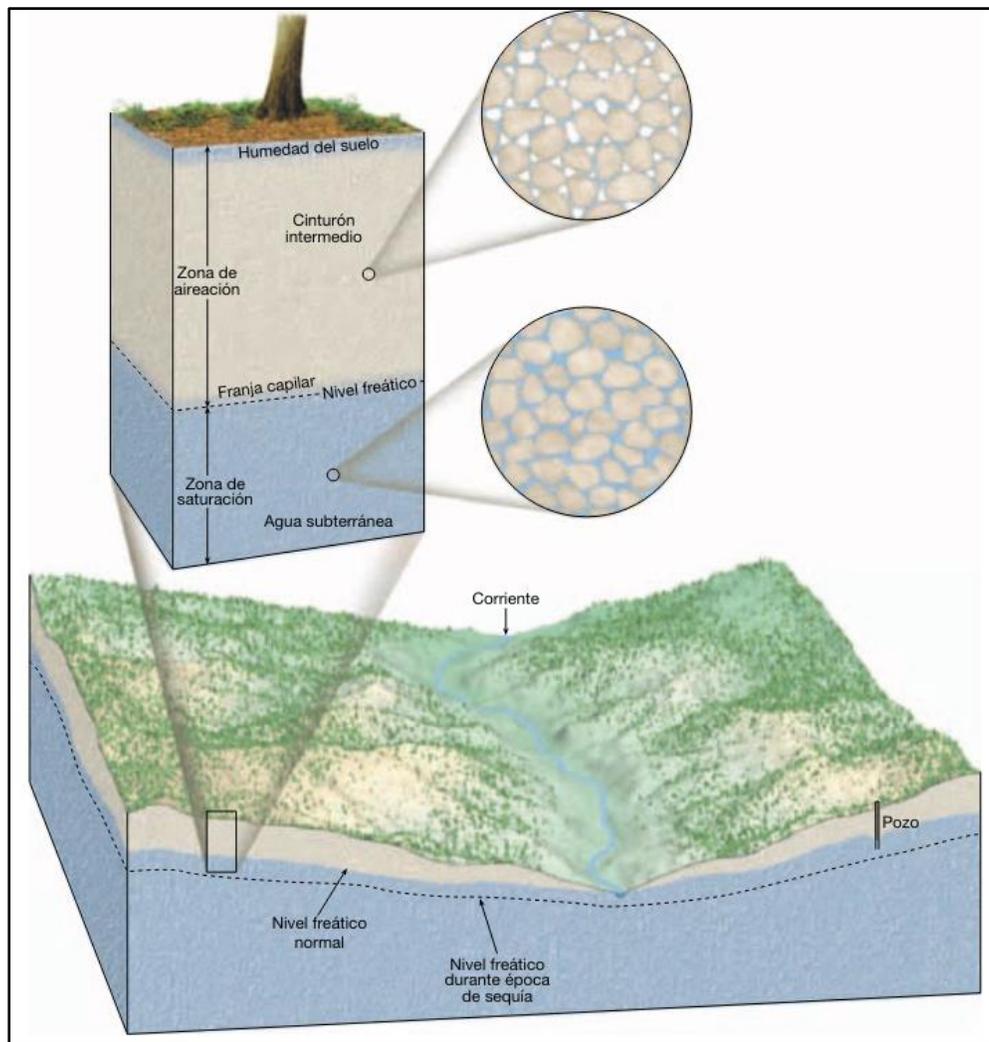
<b>LONGITUD DE ONDA</b>	<b>COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ESPECTRAL PERMISIBLE</b>	<b>UNIDADES</b>
<b>436 nm</b>	7.0	m <sup>-1</sup>
<b>525 nm</b>	5.0	m <sup>-1</sup>
<b>620 nm</b>	3.0	m <sup>-1</sup>

## MARCO CONCEPTUAL

### 1.9 AGUA SUBTERRÁNEA

El agua subterránea es aquella que está contenida o que fluye en el subsuelo, se define como el agua que hay debajo de la superficie terrestre. En concreto, es aquella situada bajo el nivel freático y que está saturando completamente los poros y fisuras del terreno (López, 2001).

El nivel freático es la altura del agua que nivela la presión del agua que contiene el acuífero en cierto punto (Geta *et al.*, 2009). Los materiales geológicos se identifican respecto al nivel freático, diferenciando una zona no saturada (zona de aireación) y una zona saturada (U.S. Geological Survey, 2018) (Figura 11).



**Figura 11.** Zona no saturada (de aireación) y zona saturada de un material geológico. Fuente: Tarbuck *et al.*, 2005.

Un acuífero es aquella formación geológica que da paso al agua por medio de sus poros o grietas y su medio permite intercambio geoquímico (Custodio y Llamas, 1976; Viessman y Lewis, 2003). Según su medio rocoso, se conocen tres tipos de acuíferos; libres o no confinados, en donde la zona no saturada es permeable lo que hace que se encuentre en contacto directo con el aire y permite que circule agua de recarga a la zona saturada, la cual se encuentra a la misma presión atmosférica de la superficie; confinados o a presión, en los que la zona saturada está cerrada entre dos capas impermeables, es por ello que se encuentra a una presión superior a la atmosférica (Custodio y Llamas, 1976); y semiconfinados, es de tipo confinado pero su parte superior se encuentra limitada por una formación geológica poco permeable, aun así tiene recargas (Geta *et al.*, 2009).

El agua subterránea se desplaza al acuífero a una velocidad media de centímetros a centenas de metros por año (López, 2001). En acuíferos kársticos se puede dar la presencia de fracturas las cuales ayuden al agua a desplazarse a una alta velocidad.

Es importante mencionar que la calidad de agua subterránea depende en gran medida de la composición litológica de las rocas y de los procesos geoquímicos. En regiones en las que el clima es húmedo, el agua subterránea tiene recargas continuas y resulta ser de buena calidad. Otro ejemplo de una buena calidad de agua subterránea son los acuíferos confinados, pues se encuentran protegidos y no logran ser contaminados (Geta *et al.*, 2009).

#### 1.10 CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE DE AGUA: HIDROGEOQUÍMICA

En el agua, la presencia de componentes disueltos indica que los elementos se encuentran en forma iónica. Los minerales que se disuelven con mayor facilidad son la calcita, la dolomita, el yeso y la halita, los cuales contribuyen a los iones mayoritarios. Por otro lado, los silicatos y las rocas insolubles contribuyen a los iones minoritarios o elementos traza (Tóth, 1999).

De acuerdo con Godoy (2019) las principales fuentes naturales de los cationes mayoritarios en el agua subterránea son:

- Ion  $\text{Ca}^{+2}$ : abunda en todo tipo de roca, ya sea de tipo sedimentaria, metamórfica o ígnea y en agua subterránea depende de la precipitación-disolución de rocas carbonatadas y bicarbonatadas. Su concentración va de 10 a 250 mg/l en agua dulce y de 400 mg/l en agua de mar. En la península de Yucatán se han reportado concentraciones de  $\text{Ca}^{+2}$  que van de los 22 a los 646 mg/l (Carmona-Esquivel, 2019; Ortiz-Flores *et al.*, 2019; Gutiérrez-Reveles, 2022) en agua subterránea.

- Ion  $\text{Na}^+$ : se da mediante la meteorización de rocas silicatadas, es muy soluble y difícilmente precipita. Suele ir asociado al ion cloruro. Su concentración va de 1 a 150 mg/l en agua dulce y de 10,000 mg/l en agua de mar. Ávila *et al.* (2004), Carmona-Esquivel (2019), Ortiz-Flores *et al.* (2019) y Gutiérrez-Reveles (2022) registraron concentraciones de 9 mg/l y superando hasta los 410 mg/l en agua subterránea de la península de Yucatán.
- Ion  $\text{Mg}^{+2}$ : proviene de la disolución de dolomías y evaporitas, difícilmente precipita. Su concentración va de 1 a 100 mg/l en agua dulce y de 1,200 mg/l en agua de mar. En los estudios de Carmona-Esquivel, (2019), Ortiz-Flores *et al.* (2019) y Gutiérrez-Reveles (2022) se obtienen muestras de agua subterránea con concentraciones de  $\text{Mg}^{+2}$  que van de los 2 hasta los 93 mg/l.
- Ion  $\text{K}^+$ : se da por procesos de meteorización de feldespatos y mediante la disolución de las evaporitas, difícilmente precipita. Su concentración va de 0.1 a 10 mg/l en agua dulce y de 400 mg/l en agua de mar. Diversos autores señalan que el agua subterránea de la península de Yucatán contiene concentraciones de  $\text{K}^+$  que oscilan entre los 0.78 a los 19 mg/l (Carmona-Esquivel, 2019; Ortiz-Flores *et al.*, 2019; Gutiérrez-Reveles, 2022).

Y las principales fuentes naturales de los aniones mayoritarios en el agua subterránea son:

- Ion  $\text{HCO}_3^-$ : proviene de la disolución de rocas carbonatadas como lo son las calizas, dolomías y por el  $\text{CO}_2$  en el agua. Su concentración va de 50 a 350 mg/l en agua dulce y de 100 mg/l en agua de mar. En el agua subterránea de la península de Yucatán se han encontrado concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$  de 106 a los 470 mg/l (Leal-Bautista *et al.*, 2011; Carmona-Esquivel, 2019; Ortiz-Flores *et al.*, 2019; Gutiérrez-Reveles, 2022).
- Ion  $\text{Cl}^-$ : proviene de la disolución de minerales sedimentarios como la halita. Suele ir asociado al ion sodio en aguas salinas. Su concentración va de 10 a 250 mg/l en agua dulce y de 18,000 a 21,000 mg/l en agua de mar. Las concentraciones de cloruro  $\text{Cl}^-$  que se han registrado en el agua subterránea de la península de Yucatán van de los 7 a los 665 mg/l (Ávila *et al.*, 2004; Carmona-Esquivel, 2019; Ortiz-Flores *et al.*, 2019; Gutiérrez-Reveles, 2022).
- Ion  $\text{SO}_4^-$ : proviene de la disolución de los yesos, así como de la anhidrita (Árcega, 2010). Su concentración va de 2 a 150 mg/l en agua dulce y de 5,000 a 200,000 mg/l en agua de mar. Carmona-Esquivel (2019), Ortiz-Flores *et al.* (2019) y Gutiérrez-Reveles (2022) muestran en sus estudios las concentraciones de  $\text{SO}_4^-$  que van desde los 4 hasta los 1,660 mg/l en el agua subterránea de la península de Yucatán.

### 1.11 FORMAS DEL NITRÓGENO (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> Y N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

Los compuestos nitrogenados en aguas naturales están relacionados con el ciclo del nitrógeno. El 78% del nitrógeno en la atmósfera se encuentra en forma gaseosa, en los suelos y sustancias orgánicas se encuentra en forma oxidada y en las rocas es minoritario. El nitrógeno puede encontrarse como NH<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, siendo NO<sub>3</sub><sup>-</sup> la forma más estable (De Miguel, 1999). Los procesos biológicos de oxidación-reducción influyen en estas especies, y la presencia de amonio y nitrito puede ser un indicador de contaminación reciente. Los NO<sub>2</sub><sup>-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en agua subterránea pueden tener un origen químico, proveniente de vertidos industriales y fertilizantes. Estos compuestos impactan la calidad del agua potable, siendo el NO<sub>2</sub><sup>-</sup> el más nocivo (De Miguel-Fernández y Vázquez-Taset, 2006).

Los nitratos en el agua subterránea son móviles y no son adsorbidos por los materiales del acuífero ni precipitan como minerales, esto facilita su transporte a largas distancias (Freeze y Cherry, 1979). La contaminación puntual es originada de tanques sépticos y depósitos de excretas, mientras que la no puntual se distribuye en áreas grandes como campos fertilizados (Hurlburt, 1988). La contaminación en los acuíferos es lenta pero difícilmente se autodepuran; por lo que, el manejo adecuado del uso del suelo es importante para prevenir futuras contaminaciones por nitratos en acuíferos susceptibles (Hendry, 1988).

Fuentes naturales:

Los nitritos son originados por la oxidación bacteriana incompleta del nitrógeno o por la reducción bacteriana del nitrato, siendo menos solubles y estables que los nitratos, lo que señala una posible contaminación reciente (García *et al.*, 1994). Los nitratos en aguas naturales son originados por la descomposición de materiales orgánicos, el amonio resultante se oxida a nitritos y luego a nitratos a través de la nitrificación en dos fases mediadas por las bacterias *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*.

Los nitritos suelen encontrarse en concentraciones muy bajas (OPS, OMS., 1980).

Fuentes artificiales:

- Fertilizantes: los suelos necesitan fertilizantes naturales y químicos para una fertilidad adecuada. Los fertilizantes nitrogenados son fundamentales para el desarrollo de las plantas, estos a su vez incrementan la concentración de nitratos en el medio ambiente.
- Excretas animales: contienen compuestos nitrogenados que pueden convertirse en nitritos y nitratos.

- Riego con desechos de animales: el riego con desechos de animales puede contaminar el agua subterránea, provocando problemas de salud como la metahemoglobinemia y el cáncer gástrico.
- Desechos municipales, industriales y del transporte: las descargas de desechos son fuentes con compuestos de nitrógeno concentrados. Aún tratadas, las aguas residuales continúan contaminando significativamente, eliminando únicamente el 20% del nitrógeno. El amonio en efluentes de tanques sépticos y residuos sólidos pueden transformarse en nitratos, contaminando el agua (Ávila y Sansores, 2003)

El uso del suelo en la península de Yucatán es principalmente agropecuario, habitacional y recreativo. La contaminación del agua subterránea se da principalmente debido al uso no controlado de agroquímicos y el mal manejo de desechos y aguas residuales (Famiglietti, 2014). Las aguas residuales se infiltran, transportando principalmente nitrógeno en forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (Menció *et al.*, 2011; Schmitter-Soto *et al.*, 2002). El uso de fertilizantes y desechos domésticos y pecuarios aumentan la concentración de nitrógeno en agua subterránea, en especial durante la temporada de lluvias (Pacheco *et al.*, 2000; Torres, 2023).

#### 1.12 CAPTADORES DE AGUA DE LLUVIA

La captación de agua de lluvia es una manera sencilla y accesible de obtener agua tanto para consumo humano como para actividades productivas. En algunas regiones del mundo con precipitaciones altas o medias, donde la cantidad de agua no es suficiente y de calidad no adecuada para uso y consumo humano, se recurre a la captación de agua de lluvia como fuente de abastecimiento. Para ello, el agua de lluvia es capturada, recolectada y almacenada en depósitos específicos para su uso posterior (Pedroza *et al.*, 2014).

Existen distintos sistemas para la captación de agua de lluvia destinados al uso y consumo humano, entre ellos se encuentran los sistemas cubiertos, como los aljibes. Estos consisten generalmente en una cavidad de forma rectangular que es excavada en el suelo la cual tiene como propósito almacenar el agua de lluvia que procede de las escorrentías del terreno. Este depósito se encuentra protegido con una cubierta con forma de una bóveda de cañón o ligeramente apuntada, la cual ayuda a mantener el agua limpia y fresca por más tiempo en comparación con los depósitos al aire libre (Albero *et al.*, 2011).

En el municipio de Calakmul se puede observar que la capa superficial de roca en la zona ha sido fuertemente erosionada por el clima y la disolución, lo que provoca que el agua de lluvia se infiltre

y recargue el acuífero a través de los pozos naturales de recarga, cuyas profundidades oscilan entre los 30 y 150 metros. Esto indica que el área es adecuada para el almacenamiento de agua. Sin embargo, se ha verificado que la composición química del agua la hace inapropiada para el consumo humano ya que se tienen altas concentraciones de sulfatos debido a la disolución de la matriz rocosa, por lo tanto, se ha generalizado el uso de aljibes para la captación de agua de lluvia y el aprovechamiento de aguadas y lagunas, a pesar de los problemas de contaminación orgánica causados mayormente por el fecalismo al aire libre. La captación de agua de lluvia se lleva a cabo tanto a nivel de vivienda como comunitario. Los contenedores de captación de agua de lluvia comunitarios, como los aljibes, complementan los captadores que agrupan de 3 a 4 familias, con una capacidad de almacenamiento de entre 10 mil y 12 mil litros, así como los tinacos de 1,100 litros que algunas viviendas poseen. (Ortiz-Flores *et al.*, 2019).

### 1.13 MEGAPROYECTO

Un proyecto se considera como “megaproyecto” no solo por su escala o inversión, sino por cómo se define su objetivo, el impacto que podría tener en la parte social, política, económica y ambiental y el posible conflicto que podría crear entre el Estado, la Sociedad y la Industria Privada (Neri, 2019).

Por lo tanto, un megaproyecto puede generar conflictos entre quienes lo promueven y aquellos que prevén las consecuencias en su vida cotidiana con la implementación del megaproyecto. Aunque el Estado actúa de manera reguladora a través de la creación y legalización de normativas que den formalidad administrativa. Sin embargo, en algunas ocasiones, estas legislaciones no prevén los posibles impactos sociales, lo que lleva a que la sociedad intervenga cuando el megaproyecto está en proceso de construcción. De esta forma, estos tres elementos interactúan constantemente y bajo facultades específicas que les son innatas; los conflictos socioambientales han permitido, con el tiempo, a que la legislación se ajuste para incluir estos aspectos, creando requisitos específicos que los promotores de megaproyectos deben cumplir para obtener los permisos necesarios (Neri, 2021).

### 1.14 LÍNEA BASE

Burga (2011) menciona que una línea base es una investigación en donde se tiene como objetivo principal describir la situación inicial tanto de la población objetivo de un proyecto como del contexto circundante antes de la ejecución del proyecto. Este estudio proporciona puntos de referencia necesarios para evaluar la efectividad y el impacto de la intervención al recopilar datos relevantes que permiten comparaciones de esta información con mediciones futuras, lo que

facilita una evaluación imparcial de los cambios logrados como resultado de la ejecución del proyecto.

La línea de salida, que muestran los indicadores al finalizar la intervención, es lo opuesto a la línea de base. La comparación entre ambas líneas proporciona una medida clara del éxito o fracaso de la intervención, y es esencial para calcular el impacto del proyecto (Burga, 2011).

Además, actúa como una herramienta importante para mejorar los procesos de gestión del conocimiento y la toma de decisiones tanto a nivel institucional como nacional, dentro del ámbito del desarrollo y promoción del país en su totalidad.

### **JUSTIFICACIÓN**

Este proyecto está enfocado en caracterizar el agua de uso y consumo humano, en diferentes temporadas climáticas, en tramos del trazo del megaproyecto Tren Maya que varían en geología, densidad poblacional y sistemas de drenaje. Esto se realizará con el fin de obtener una línea base y poder evaluar, en investigaciones futuras, el impacto del megaproyecto en el recurso hídrico.

Es de suma importancia conocer las modificaciones en las características del agua, ya que el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento para todas las actividades de las poblaciones en prácticamente toda la península de Yucatán, especialmente en perspectiva del desarrollo turístico de las zonas estudiadas.

Además, es fundamental establecer una línea base para conocer la situación inicial de la población y las características químicas y calidad del agua antes de la construcción y operación de un proyecto de esta magnitud en un sistema kárstico y ambiental importante, pues el Tren Maya pasará cerca de zonas arqueológicas y de espacios naturales protegidos mexicanos, como la Reserva de la Biósfera de Calakmul en Campeche.

### **HIPÓTESIS**

Los análisis fisicoquímicos, las formas de nitrógeno y la bacteriología permitirán evaluar las condiciones del agua destinada al uso y consumo humano en tres tramos del Tren Maya, se esperan condiciones no aptas para este fin debido a las características de la región (a la geología del sur, vulnerabilidad del acuífero al noreste y al uso de suelo al norte de la península de Yucatán). Además, se espera obtener una línea base que permitirá conocer los impactos que traerá consigo el megaproyecto Tren Maya a largo plazo a las poblaciones evaluadas.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Caracterizar el agua destinada al uso y consumo humano y su relación con indicadores sociales de tramos que se encuentran dentro del trazo del megaproyecto Tren Maya para obtener una línea base.

### **ESPECÍFICOS**

1. Caracterizar la fisicoquímica, formas del nitrógeno y bacteriología del agua destinada al uso y consumo humano para conocer sus condiciones.
2. Comparar la calidad del agua para uso y consumo humano con las normativas vigentes.
3. Relacionar los indicadores sociales (número de población, población en pobreza, viviendas y viviendas sin drenaje) de cada tramo con las condiciones del recurso hídrico.

## CAPÍTULO 2

### METODOLOGÍA

#### 2.1 IMPORTANCIA DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

En este proyecto es de interés conocer la incidencia del Tren Maya sobre la región, para ello se tomó en cuenta el trazo comprendido para la construcción del megaproyecto (Figura 12), en este caso se eligieron los tramos 4 (Este y Oeste) y 7.



**Figura 12.** Trayecto del Tren Maya. Tomado de: FONATUR, 2022.

Los tramos seleccionados nos permitirán realizar comparaciones entre zonas con diferentes características.

En el Tramo 4 Este se encuentran los municipios: Lázaro Cárdenas y Puerto Morelos en el estado de Quintana Roo, ubicados al noreste de la península de Yucatán, los cuales cuentan con una población total de 56,092 habitantes (INEGI,2020) entre los dos municipios. Dicho tramo abarca una región que se ubica cerca de la costa en la que existe gran actividad turística (Marín *et al.*, 2022).

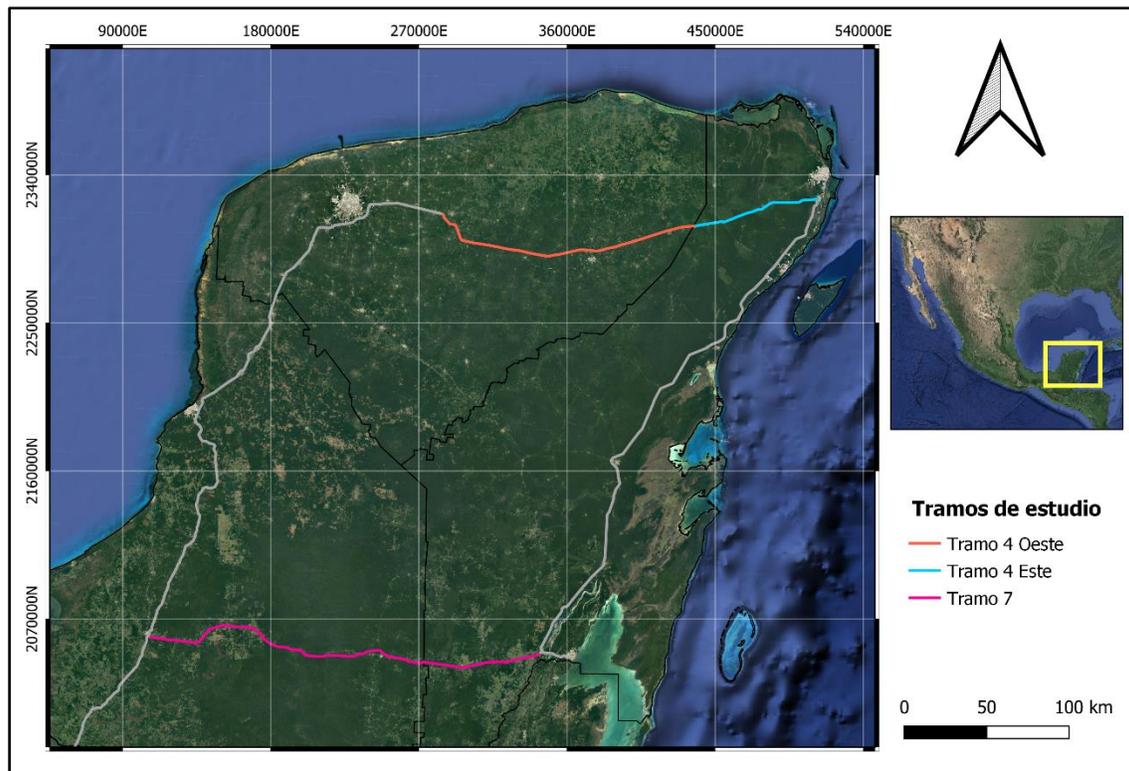
En el Tramo 4 Oeste se encuentran los municipios: Tinum, Uayma y Valladolid en el estado de Yucatán, ubicados en la parte norte-central de la península de Yucatán, entre los tres municipios

hay una población total de 102,351 habitantes (INEGI, 2020). En esta zona se considera que no hay un turismo desarrollado (Aguilar *et al.*, 2021).

Dentro del Tramo 7 se ubican los municipios: Escárcega y Calakmul en el estado de Campeche, ubicados en el sur de la península de Yucatán, entre los dos municipios cuentan con una población total de 91,637 habitantes (INEGI, 2020). En esta zona se encuentra la Reserva de la Biosfera Calakmul, una de las reservas de la biósfera más importantes del país y de América, cuenta con 723 mil hectáreas.

## 2.2 MUESTREO DE AGUA SUBTERRÁNEA

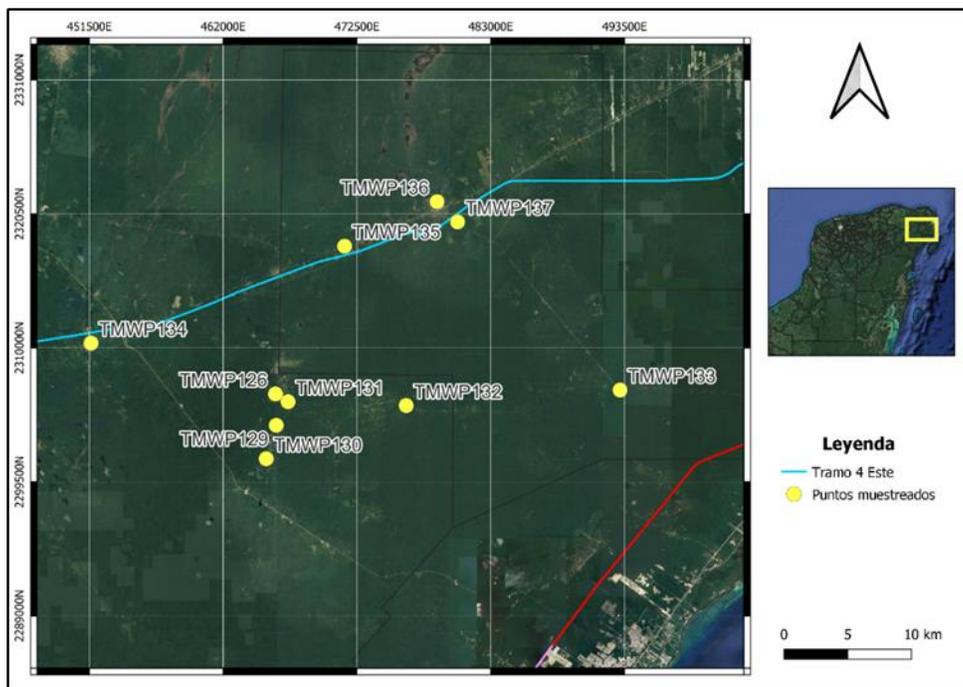
Las muestras de agua colectadas comprenden distintos reservorios de agua subterránea (cenotes, pozos artesianos, pozos de distribución, cárcamos de bombeo) y captadores de agua de lluvia de los tramos de estudio (Figura 13).



**Figura 13.** Ubicación de los tramos de muestreo. Elaboración propia.

Las coordenadas fueron obtenidas con el GPS diferencial Trimble R8 GNSS, el cual permitió tener la ubicación de las muestras con alta precisión (ver anexos, Tabla 20) para posteriormente registrarlas en un sistema de información geográfica (QGis).

Se colectaron 10 muestras de agua para cada uno de los tramos (Figura 14-16) en los meses de octubre y diciembre del 2022, representativos de la temporada de lluvias-nortes y en los meses de marzo y abril del 2023, representativos de la temporada de secas. A cada muestra se le midieron parámetros *in situ* (pH, temperatura y conductividad eléctrica), y se le realizaron análisis en laboratorio para obtener los parámetros de *Escherichia coli* (*E. coli*), color verdadero, alcalinidad ( $\text{HCO}_3^-$ ), nitrógeno en forma amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ), nitritos ( $\text{N-NO}_2^-$ ), nitratos ( $\text{N-NO}_3^-$ ) e iones mayoritarios ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ); para esto, las muestras tomadas fueron preservadas a una temperatura menor a los 4°C para su conservación durante el trayecto al laboratorio.



**Figura 14.** Puntos de muestreo del Tramo 4 Este. Elaboración propia.

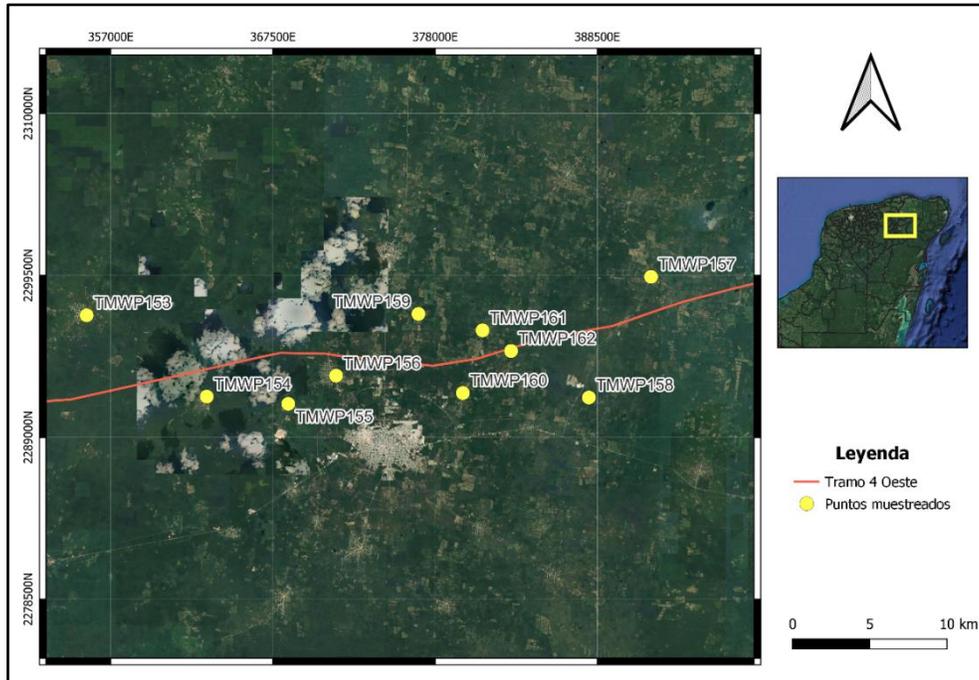


Figura 15. Puntos de muestreo del Tramo 4 Oeste. Elaboración propia.

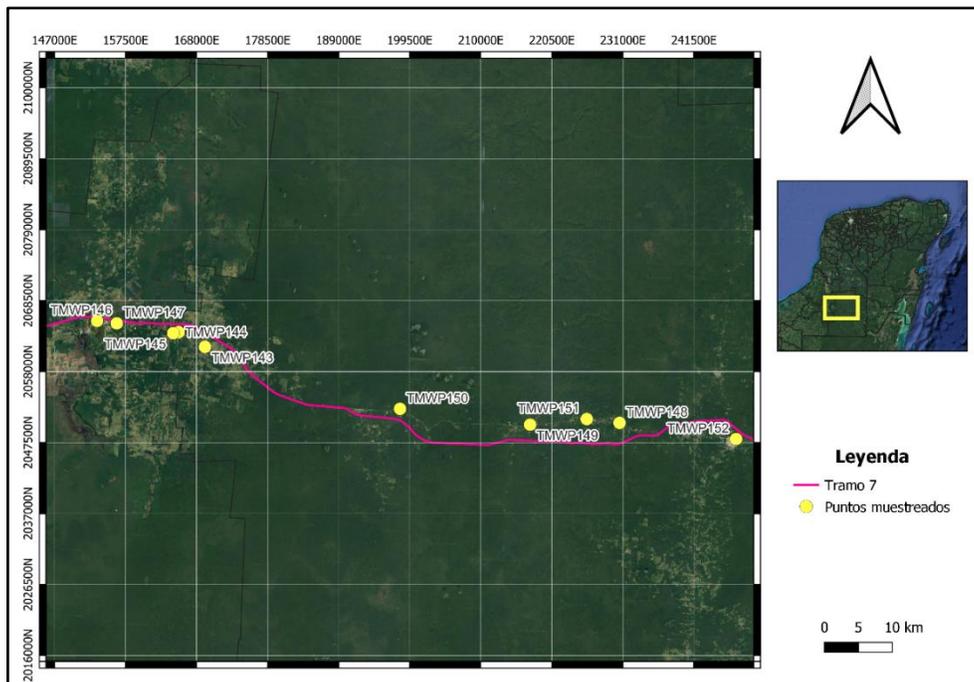


Figura 16. Puntos de muestreo del Tramo 7. Elaboración propia.

## 2.3 FUENTES DE SUMINISTRO PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA

Las muestras de agua fueron tomadas de diferentes fuentes de suministro (Figura 17-19), en la Tabla 4 se muestran las fuentes que utilizan en cada una de las localidades para abastecerse de agua. Se puede observar que en el caso del Tramo 7 se tomaron muestras de agua en captadores de agua de lluvia, lugares donde se tenían mezcla de aguas (subterránea con agua de lluvia).

**Tabla 4.** Fuentes de abastecimiento de agua de las localidades.

TRAMO	ID	MUNICIPIO	LOCALIDAD	FUENTE DE ABASTECIMIENTO	ORIGEN DE AGUA
<b>Tramo 4 Este</b>	TMWP126	Lázaro Cárdenas	Agua Azul	Cenote	Agua subterránea
	TMWP129	Lázaro Cárdenas	Juárez	Cenote Nak Tunich	Agua subterránea
	TMWP130	Lázaro Cárdenas	Juárez	Cenote	Agua subterránea
	TMWP131	Lázaro Cárdenas	Agua Azul	Cenote Campamento	Agua subterránea
	TMWP132	Lázaro Cárdenas	Tres Marías	Pozo artesiano	Agua subterránea
	TMWP133	Puerto Morelos	Puerto Morelos-Leona Vicario	Cenote Verde Lucero	Agua subterránea
	TMWP134	Lázaro Cárdenas	El Tintal	Pozo de distribución	Agua subterránea
	TMWP135	Puerto Morelos	Leona Vicario	Cenote Corchalito	Agua subterránea
	TMWP136	Puerto Morelos	Leona Vicario	Cenote	Agua subterránea
	TMWP137	Puerto Morelos	Leona Vicario	Pozo Agrícola	Agua subterránea
<b>Tramo 4 Oeste</b>	TMWP153	Tinum	Tinum	Pozo de distribución	Agua subterránea
	TMWP154	Uayma	Uayma	Pozo artesiano	Agua subterránea
	TMWP155	Valladolid	Pixoy	Pozo artesiano	Agua subterránea
	TMWP156	Valladolid	Popolá	Pozo artesiano	Agua subterránea
	TMWP157	Valladolid	Yalcobá	Pozo artesiano	Agua subterránea
	TMWP158	Valladolid	Tikuch	Cenote Chukum	Agua subterránea

	TMWP159	Valladolid	Yohalal Tres	Pozo de distribución	Agua subterránea
	TMWP160	Valladolid	Tesoco	Pozo de distribución	Agua subterránea
	TMWP161	Valladolid	Tahmuy	Pozo de distribución	Agua subterránea
	TMWP162	Valladolid	Zodzilhén	Pozo de distribución	Agua subterránea
<b>Tramo 7</b>	TMWP143	Calakmul	Concepción	Pozo de distribución	Agua subterránea
	TMWP144	Calakmul	Xbonil	Pozo de distribución	Agua subterránea
	TMWP145	Calakmul	Santa Lucía	Pozo de distribución	Agua subterránea
	TMWP146	Escárcega	Centenario	Pozo de distribución	Agua subterránea
	TMWP147	Escárcega	Silvituc	Pozo de distribución	Agua subterránea
	TMWP148	Calakmul	El Chichonal	Cárcamo de bombeo	Mezcla de agua subterránea
	TMWP149	Calakmul	Puebla de Morelia	Captador de agua de lluvia	Agua de lluvia
	TMWP150	Calakmul	Conhuás	Cárcamo de bombeo	Mezcla de agua subterránea
	TMWP151	Calakmul	Ingeniero Eugenio Echeverría Castellot (Ing. EEC)	Captador de agua de lluvia	Agua de lluvia
	TMWP152	Calakmul	Xpujil	Cárcamo de bombeo	Mezcla de agua subterránea



**Figura 17.** Fuentes de abastecimiento; a) Pozo de distribución en Centenario, b) Pozo artesiano en Yalcobá, c) Cárcamo de bombeo en El Chichonal. Fotografías de Héctor Rumaldo García Castillo.



**Figura 18.** Fuentes de abastecimiento; a) Captador de agua de lluvia en Ing. EEC, b) Cenote Chuckum en Tikuch, c) Cenote Verde Lucero en Puerto Morelos. Fotografías de Héctor Rumaldo García Castillo y Gilberto Acosta González.



**Figura 19.** Fuentes de abastecimiento; Cenote Campamento en Agua Azul. Fotografía de Gilberto Acosta González.

## 2.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL AGUA

### 2.4.1 APORTE DE LOS PARÁMETROS RESPECTO A LA CALIDAD Y COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA

El manejo adecuado de aguas residuales y el tratamiento eficaz del agua son esenciales para proteger la salud pública y garantizar el acceso a agua potable segura. En la Tabla 5 se detallan los aportes de los parámetros para su decisión de uso.

**Tabla 5.** Aporte de los parámetros para su decisión de uso.

	DECISIÓN DE USO INMEDIATO	PARÁMETRO	APORTE	REFERENCIA / NORMATIVA
Calidad del agua	Corto plazo	<i>Escherichia coli</i>	Las heces contienen una diversidad de microorganismos, patógenos como: bacterias, virus y parásitos, los cuales al estar en contacto con el agua contaminada representan un riesgo para la salud pública. Pueden provocar enfermedades como la diarrea, fiebre tifoidea, hepatitis A y otras infecciones gastrointestinales.	NMX-AA-186-SCFI-2021
		Color verdadero	La presencia de materiales húmicos en el agua potable puede tener implicaciones para la salud pública, siendo precursores en la formación de subproductos de desinfección que se generan cuando se desinfecta el agua con cloro u otros desinfectantes. Algunos de ellos pueden ser carcinogénicos o tener efectos desfavorables para la salud a largo plazo.	NMX-AA-017-SCFI-2021
		N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Altas concentraciones de nitrógeno de amonio pueden ser tóxicas para la vida acuática y favorecer el crecimiento excesivo de algas, causando problemas como la eutrofización y la formación de subproductos dañinos. Es importante monitorear y controlar estos niveles para proteger los ecosistemas acuáticos y garantizar el agua para uso y consumo humano.	Parsons <i>et al.</i> , 1984
		N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Para garantizar la calidad del agua para uso y consumo humano es importante monitorear y controlar la descarga del nitrógeno de nitrito al medio ambiente, procedente del uso para inhibir la corrosión de metales por el agua. Las altas concentraciones de nitrógeno de nitrito representan un riesgo para la salud pública y contribuyen a la degradación del ambiente.	NMX-AA-099-SCFI-2021

		N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	La contaminación por nitrógeno de nitratos afecta la calidad del agua potable, en especial en áreas agrícolas donde suelen utilizar grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados. Lo que puede requerir medidas de tratamiento adicionales para que el agua sea apta para uso y consumo humano.	N/A
	Mediano plazo	Alcalinidad (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Afecta el pH del agua, los procesos de tratamiento y la seguridad para el consumo humano. Niveles inconvenientes de alcalinidad impactan en la corrosión de las tuberías y equipos, así como en el sabor del agua. Sus cambios repentinos pueden indicar problemas en la calidad del agua.	Gran, 1988
<b>Condiciones del agua</b>	Largo plazo	Iones mayoritarios	La geología local contribuye los iones mayoritarios en el agua subterránea. La composición mineral de las rocas en el acuífero determina la concentración de iones en el agua. Lo que afecta sus propiedades como el pH, la capacidad de precipitados y la conductividad eléctrica. Entender la geología local es fundamental para evaluar la calidad del agua destinada al uso y consumo humano.	N/A

### 2.4.2 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS *IN SITU*

Los parámetros de pH, temperatura (°C) y conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) fueron obtenidos en campo con la sonda multiparamétrica marca Hanna HI 98129 (Figura 20).



**Figura 20.** Sonda multiparamétrica, marca Hanna HI 98129.

### 2.4.3 PARÁMETROS EN LABORATORIO

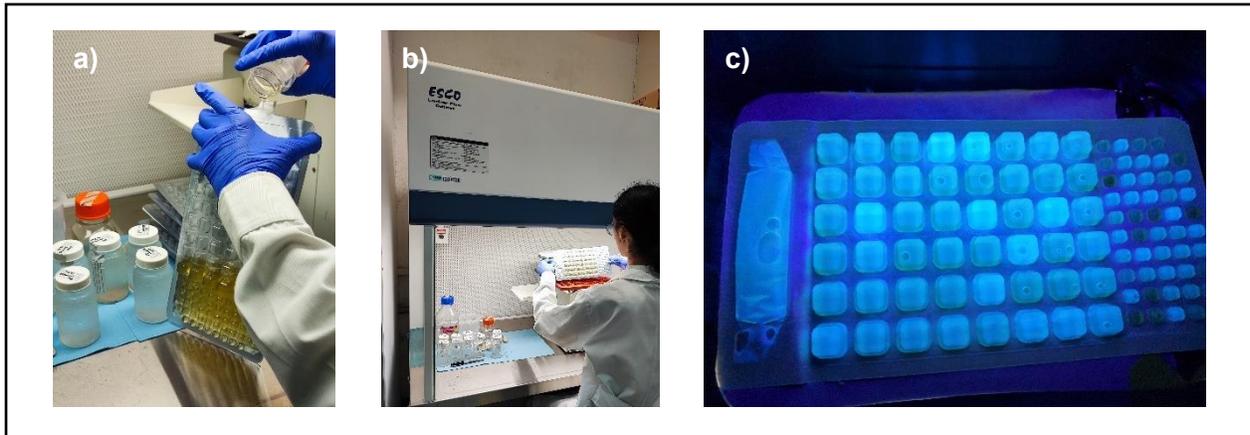
Para la toma de muestras, se colectó agua con ayuda de una soga y una cubeta, a la que previamente se le realizó el triple lavado con el agua adquirida de cada sitio. Para cada parámetro se utilizó una metodología distinta, estas son especificadas en los siguientes apartados.

#### 2.4.3.1 *ESCHERICHIA COLI*

Para el análisis bacteriológico fue necesario coleccionar 100 ml de agua en envases transparentes esterilizados y conservar las muestras a una temperatura aproximada a los 4°C.

En laboratorio se trabajó con el kit Colilert de IDEXX en donde se cuantificaron los coliformes con el método cromogénico (Figura 21). El análisis se llevó a cabo dentro de las 24 horas de haber coleccionado las muestras. Se trabajó en la campana de flujo laminar (para evitar cualquier contaminación) en donde se vaciaron los 100 ml de las muestras en las placas del kit, las cuales fueron selladas con la selladora Quanty-Tray, después se introdujeron a la incubadora a una

temperatura de 37°C durante 24 horas. Transcurrido el tiempo se contaron los pocillos, para la cuantificación de coliformes fecales (*Escherichia coli*) se contaron los pocillos amarillos fluorescentes bajo luz UV. Todos los resultados se consultaron en la Tabla de Número Más Probable (ver anexos, Tabla 17 y Tabla 18) y se llevaron a una tabla de Excel.



**Figura 21.** Procedimiento del análisis bacteriológico: a) Vaciado de muestra en la placa, b) Sellado de placa, c) Conteo de pocillos fluorescentes. Fotografías de Héctor Rumaldo García Castillo.

#### 2.4.3.2 COLOR VERDADERO

Se colectaron 100 ml de agua, las muestras fueron preservadas en oscuridad total a una temperatura de 4°C para su trayecto a laboratorio. El análisis se llevó a cabo dentro de los 5 días de haber colectado las muestras.

En laboratorio se midió el color verdadero utilizando la metodología de la NMX-AA-017-SCFI-2021, la cual indica la medición del color del agua en distintas escalas de colores por medio del coeficiente de absorción espectral. Para el análisis, las muestras pasaron por un filtrado de 0.45 µm, se le midió el pH con el potenciómetro y se midieron las absorbancias con el espectrofotómetro (Figura 22) en celdas de 10 mm en tres longitudes de onda; 436 nm, 525 nm y 620 nm. Los resultados obtenidos se registraron en una hoja prediseñada de Excel para calcular los coeficientes de absorción espectral de cada longitud de onda, en donde se utilizó la siguiente fórmula:

$$\alpha(\lambda) = \left( \frac{A}{d} * f \right)$$

En donde:

$A$  = absorbancia de la muestra de agua a la longitud de onda ( $\lambda$ ) determinada;

$\lambda$  = longitud de onda a la que se realizó la medición de absorbancia;

$d$  = paso de luz de la celda, en milímetros; y

$f$  = factor utilizado para obtener el coeficiente espectral, en  $m^{-1}$  ( $f=1000$ ).



**Figura 22.** Espectrofotómetro Eppendorf.

#### 2.4.3.3 ALCALINIDAD ( $HCO_3^-$ )

Para el análisis de alcalinidad fue necesario coleccionar 60 ml de muestra con sello de agua y conservarlas a una temperatura de 4°C para su trayecto al laboratorio.

Una vez en laboratorio, las muestras fueron filtradas con un filtro de 0.45  $\mu m$ . Para la determinación de alcalinidad se llevó a cabo el método de Gran, de acuerdo con la USGS (2018), se agregaron unidades de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4^{2-}$ ) 0.1600  $\pm$  0.0008 N con un titulador digital marca HACH modelo AL-DT y se midió el pH con el potenciómetro Accumet XL600 (Figura 23). Los resultados fueron registrados en una hoja prediseñada de Excel, en donde se obtuvo la alcalinidad en bicarbonato ( $HCO_3^-$ ).

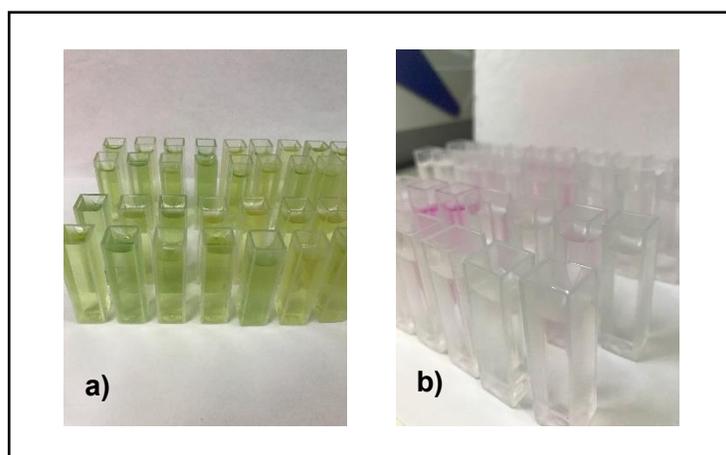


**Figura 23.** Potenciómetro Accumet XL 600.

#### 2.4.3.4 FORMAS DEL NITRÓGENO ( $\text{N-NH}_4^+$ , $\text{N-NO}_2^-$ Y $\text{N-NO}_3^-$ )

Se colectaron 125 ml de agua para los análisis de las formas del nitrógeno, amonio ( $\text{N-NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{N-NO}_2^-$ ) y nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ), los cuales fueron preservados a una temperatura aproximada a los  $4^\circ\text{C}$ .

En laboratorio, las muestras pasaron por un filtrado de  $0.45\ \mu\text{m}$ . El nitrógeno de amonio se determinó mediante el método colorimétrico de salicilato (Bower y Holm-Hansen, 1980), el nitrógeno de nitrito por el método colorimétrico de sulfanilamida, tomando de referencia la norma NMX-AA-099-SCFI-2006 (Figura 24), se realizaron las curvas de calibración de ambos análisis (ver Anexos, Figura 43 y Figura 44) y el nitrato fue analizado por el método de cromatografía iónica.



**Figura 24.** Análisis de las formas del nitrógeno: a) Muestras analizadas de nitrógeno de amonio, b) Muestras analizadas de nitrógeno de nitritos.

#### 2.4.3.5 CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE DE AGUA: HIDROGEOQUÍMICA

Se colectaron 125 ml de agua para los análisis de los iones mayoritarios y fueron preservados a una temperatura aproximada a los 4°C.

Después de pasar por el filtrado de 0.45 µm, se utilizó el método de cromatografía iónica, el cual consiste en la evaluación de cationes ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{K}^{+}$ ) y de aniones ( $\text{NO}_3^{-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , y  $\text{Cl}^{-}$ ) por medio del cromatógrafo iónico 882 Compact IC Plus de Metrohm (Figura 25).



**Figura 25.** Cromatógrafo de iones 882 Compact IC Plus de Metrohm.

#### 2.5 TOPOGRAFÍA

Para el levantamiento topográfico en cada punto de interés se usó el GPS diferencial marca Trimble R8s GNSS (Figura 26), utilizando el método estático (RStatic). Al llegar al punto de medición, el receptor móvil se posicionó en un punto despejado (para tener una lectura confiable del equipo) durante 25 a 40 minutos y así capturar datos de mínimo 8 satélites, el método utilizado cuenta con una precisión de 3 mm + 0.1 ppm RMS en la horizontal y 3.5 mm + 0.4 ppm RMS en la vertical.



**Figura 26.** GPS diferencial marca Trimble R8s GNSS.

## 2.6 ANÁLISIS DE DATOS

Se realizaron diversos análisis estadísticos descriptivos como herramienta fundamental para ordenar y comprender los resultados obtenidos de los parámetros analizados. Lo que permitió llevar a cabo una revisión a detalle de la distribución de los datos y la variabilidad entre temporadas y tramos. Para ello se realizaron diferentes formas de representación gráfica, como las gráficas de barras, diagrama de radar y diagramas de caja (boxplot), con los cuales se obtuvieron representaciones claras de las tendencias presentes en los datos analizados.

El Análisis Multivariado Permutado de la Varianza (PERMANOVA) se utilizó para determinar las diferencias significativas en las muestras en función de la matriz de distancia de Bray-Curtis, la cual permite medir la similitud entre muestras y saber cuáles son los factores que influyen en ellas.

También se utilizó el análisis clúster con el índice de similitud de Bray-Curtis para obtener grupos y el grado de similitudes que hay entre las muestras. Se aplicó la técnica de Análisis de Escalamiento Multidimensional (MDS), del cual se obtuvieron las similitudes o diferencias entre las muestras proyectadas como puntos en un mapa de 2D, de manera que la proximidad entre los puntos representa la relación entre ellos. Esto permite una visualización más clara de los datos y ayuda a identificar patrones o agrupamientos que pueden no ser evidentes en la representación original.

Se realizó una matriz de correlación de Spearman considerando todos los parámetros evaluados en este estudio para obtener las correlaciones estadísticamente significativas entre las variables.

Además, se elaboraron mapas de la bacteriología del agua con el software QGIS 3.28.6. Estos mapas fueron elaborados para mostrar los sitios donde se colectó el agua, visualizar y analizar la distribución geográfica de los datos.

También se realizó un diagrama de radar con base en datos del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) y del CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social) en donde se analizaron los indicadores sociales de cada tramo de estudio (población total, viviendas totales, viviendas con drenaje y población en situación de pobreza).

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS

Los resultados obtenidos presentan las condiciones de los tramos 4 Este, 4 Oeste y 7 en la temporada de lluvias-nortes de 2022 y secas de 2023. En las Tablas 6 y 7 se puede observar que la mayoría de los tramos mantienen sus características con los valores más altos en ambas temporadas, estos son: el Tramo 4 Este con el pH y *E. coli*, el Tramo 4 Oeste con el nitrógeno de nitrito, nitrógeno de nitrato y alcalinidad y el Tramo 7 con la temperatura y el nitrógeno de amonio. Mientras que los valores de la conductividad eléctrica resultaron más altos en el Tramo 4 Oeste en temporada de lluvias-nortes y en el Tramo 7 en temporada de secas, los resultados de color verdadero fueron más altos en el Tramo 4 Este en temporada de lluvias-nortes y en el Tramo 7 en temporada de secas.

**Tabla 6.** Promedio más alto de las características del agua en temporada de lluvias-nortes 2022. Tramo señalado con “x” presenta el valor más alto.

Tramo	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	<i>E. Coli</i> (NMP/100ml)	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/l)	Color verdadero ( $\text{m}^{-1}$ )		
									436nm	525nm	620nm
4 Este	x			x					x	x	x
4 Oeste		x				x	x	X			
7			x		x						

Nota: CE = Conductividad eléctrica, Temp = Temperatura.

**Tabla 7.** Promedio más alto de las características del agua en temporada de secas 2023. Tramo señalado con “x” presenta el valor más alto.

Tramo	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	<i>E. Coli</i> (NMP/100ml)	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/l)	Color verdadero ( $\text{m}^{-1}$ )		
									436nm	525nm	620nm
4 Este	x			x							
4 Oeste						x	x	x			
7		x	x		x				x	x	x

Nota: CE = Conductividad eléctrica, Temp = Temperatura.

### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL AGUA

#### 3.1.1 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS *IN SITU*

Para observar de manera concisa los resultados de los sitios muestreados, se presentan gráficos boxplot de cada uno de los parámetros *in situ* (pH, conductividad eléctrica [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] y temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]) de las muestras en ambas temporadas (lluvias-nortes y secas).

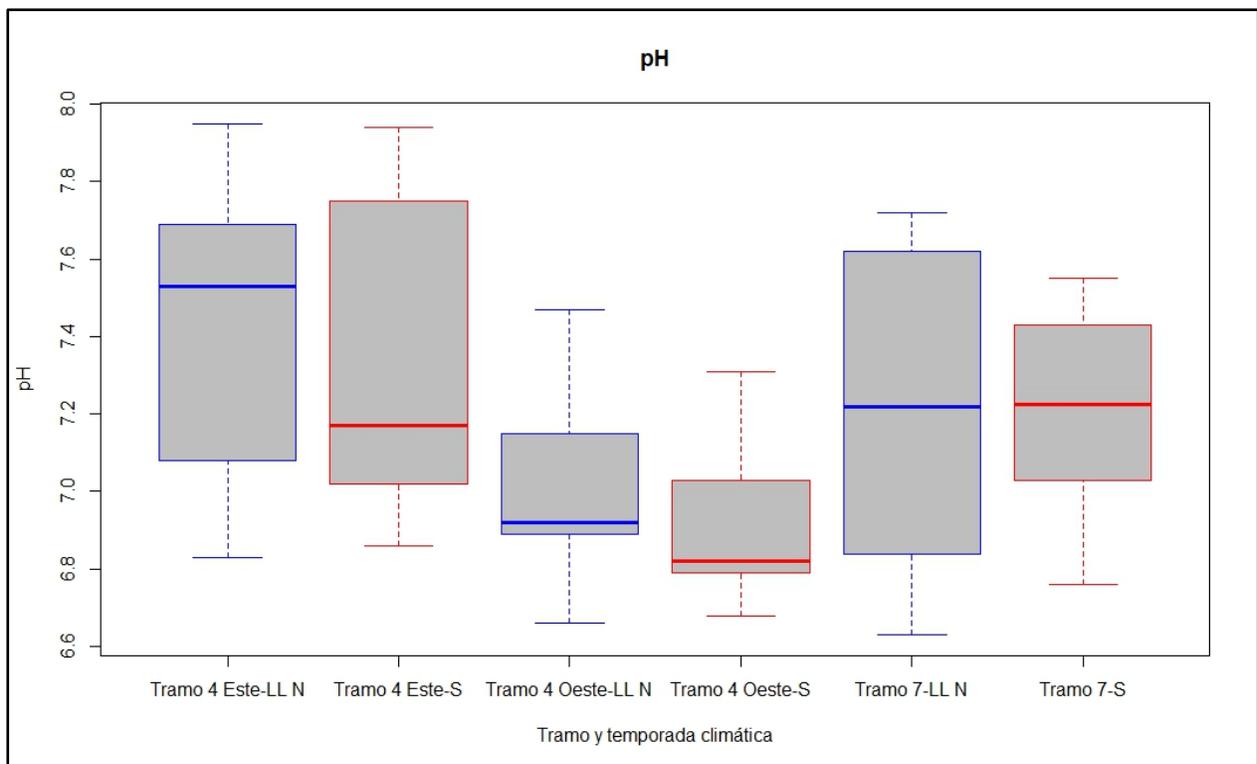
Los valores obtenidos de cada una de las muestras representan los promedios de las 10 lecturas realizadas *in situ* (ver Anexos, Tabla 19).

### 3.1.1.1 pH

De los valores obtenidos del pH, el Tramo 4 Este presenta como valor mínimo 6.83 y como valor máximo 7.95, en el Tramo 4 Oeste se tiene como valor mínimo 6.66 y como valor máximo 7.47 y en el Tramo 7 se presenta como valor mínimo 6.63 y como valor máximo 7.72.

En general, el valor de pH más bajo fue de 6.63 de la muestra TMWP147 tomada del pozo de distribución en Silvituc perteneciente al Tramo 7 en temporada de lluvias-nortes, mientras que el valor de pH más alto que se obtuvo fue de 7.95 correspondiente a la muestra TMWP129 del cenote Naj Tunich en Juárez, ubicado en el Tramo 4 Este, tomada en temporada de lluvias-nortes. Sin embargo, todos los valores obtenidos están dentro del intervalo aceptado por la NOM-127-SSA1-2021 para agua de uso y consumo humano; que va de 6.5 a 8.5.

En el boxplot del pH (Figura 27) se puede observar que no hay variabilidad entre temporadas, pero se muestra variabilidad entre tramos, en especial haciendo comparación con el Tramo 4 Oeste.



**Figura 27.** Gráfica de pH en los tramos de estudio. LL N: Lluvias-Nortes 2022, S: Secas 2023.

Lo cual se observó en los resultados del pH del análisis multivariado permutado de la varianza (PERMANOVA) en donde no mostraron diferencias significativas entre temporadas, pero las hubo entre tramos, específicamente entre el Tramo 4 Este con Tramo 4 Oeste y Tramo 7 con Tramo 4 Oeste (Tabla 8).

**Tabla 8.** Resultados de pH del PERMANOVA basado en el análisis de similitud de Bray-Curtis. Los valores de p significativos ( $\alpha=0.05$ ) son indicados en negrita.

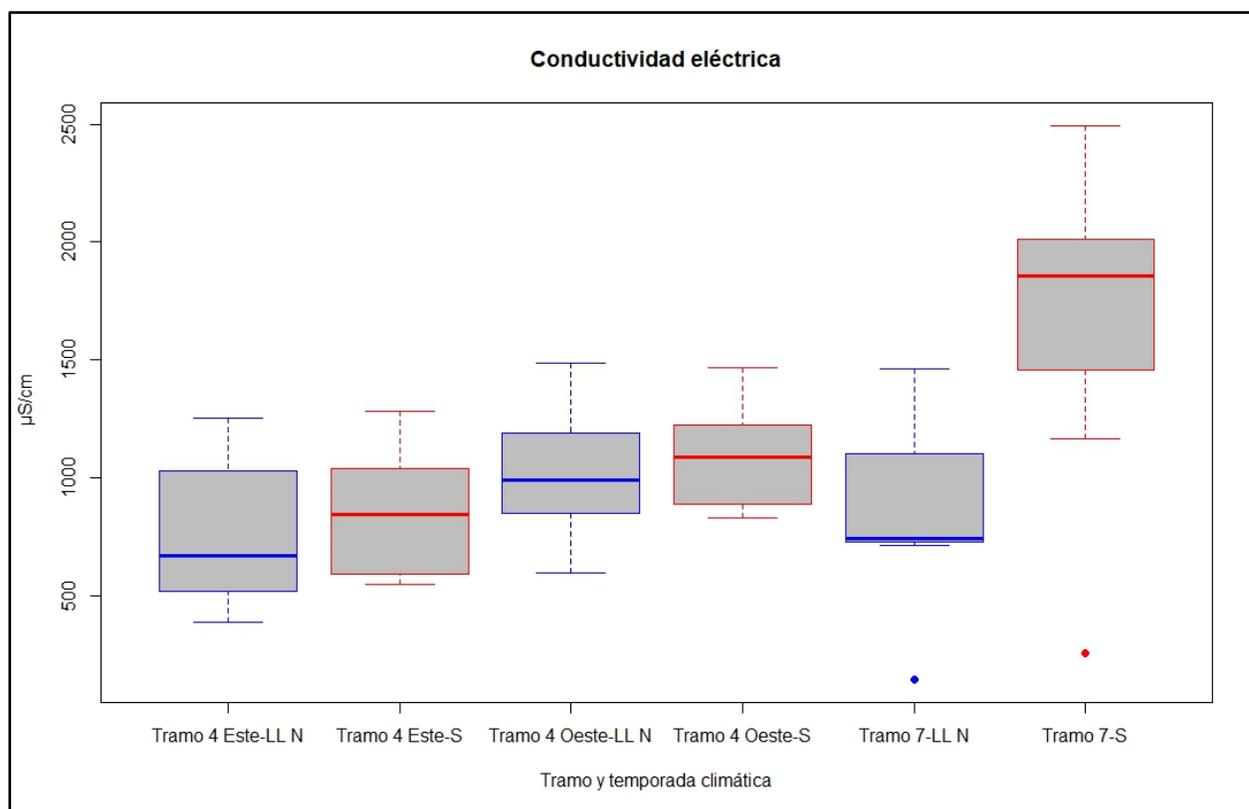
VALORES DE P					
VARIABLE	TEMPORADAS	TRAMOS	PAIR-WISE TESTS PARA TRAMO		
			Tramo 4 Este, Tramo 7	Tramo 4 Este, Tramo 4 Oeste	Tramo 7, Tramo 4 Oeste
pH	0.4100	<b>0.0006</b>	0.1053	<b>0.0001</b>	<b>0.0159</b>

### 3.1.1.2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

En el Tramo 4 Este el valor más bajo de conductividad eléctrica registrado fue de 387.60  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y el valor más alto fue de 1,283.40  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en el Tramo 4 Oeste se obtuvo como valor mínimo 596.53  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y como valor máximo 1488.73  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y en el Tramo 7 se registró como valor mínimo 144.00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y como valor máximo 2,495.30  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

De manera general, el valor más bajo que se obtuvo fue de 144.00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el Tramo 7 en temporada de lluvias-nortes, correspondiente a la muestra TMWP151 tomada de un captador de agua de lluvias en la localidad Ing. EEC, siendo uno de los dos valores atípicos registrados y el valor más alto se obtuvo en el Tramo 7 en temporada de secas, siendo este de 2,495.30  $\mu\text{S}/\text{cm}$  correspondiente a la muestra TMWP143 tomada de un pozo de distribución ubicado en Concepción.

En la Figura 28 se muestra la variabilidad que hay entre temporadas y entre tramos, en el boxplot se observa que el conjunto de datos que presenta una mayor variabilidad es el del Tramo 7.



**Figura 28.** Gráfica de conductividad eléctrica de los tramos de estudio. LL N: Lluvias-Nortes 2022, S: Secas 2023.

Lo que coincide con los resultados obtenidos del PERMANOVA, los cuales arrojaron diferencias significativas entre temporadas y entre el Tramo 4 Este con Tramo 7 y Tramo 4 Este con Tramo 4 Oeste (Tabla 9).

**Tabla 9.** Resultados de conductividad eléctrica de PERMANOVA basado en el análisis de similitud de Bray-Curtis. Los valores de p significativos ( $\alpha=0.05$ ) son indicados en negra.

VALORES DE P					
VARIABLE	TEMPORADAS	TRAMOS	PAIR-WISE TESTS PARA TRAMO		
			Tramo 4 Este, Tramo 7	Tramo 4 Este, Tramo 4 Oeste	Tramo 7, Tramo 4 Oeste
Conductividad eléctrica	<b>0.0070</b>	<b>0.0016</b>	<b>0.0059</b>	<b>0.0030</b>	0.0930

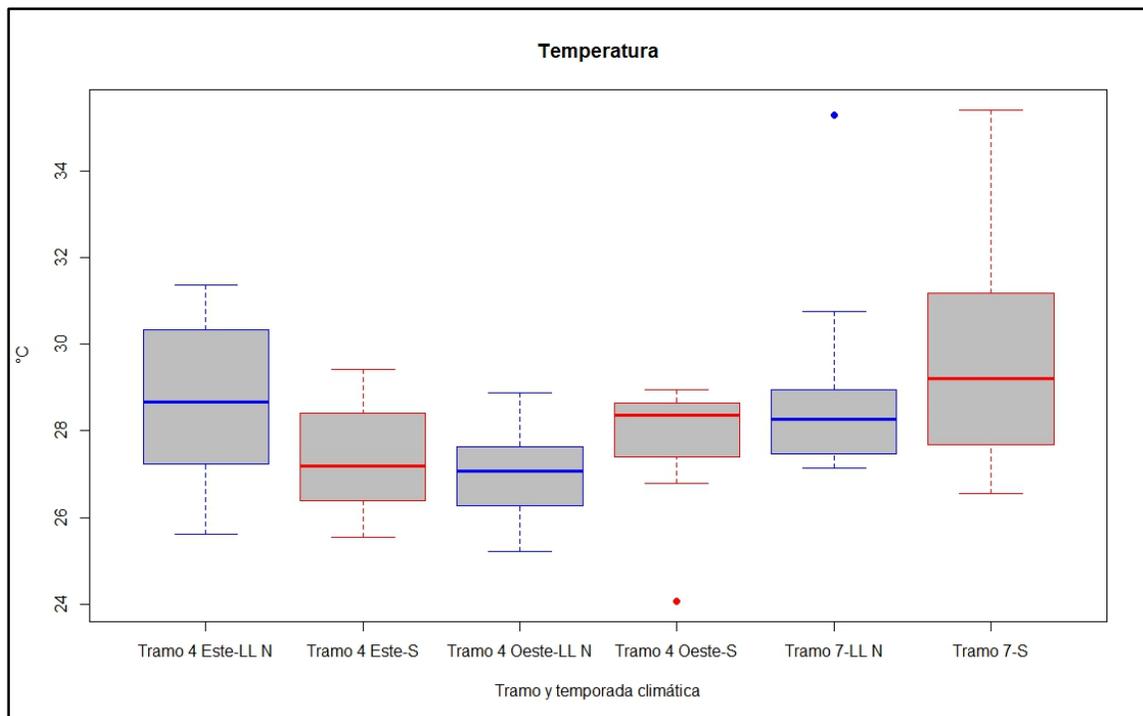
### 3.1.1.3 TEMPERATURA

La temperatura en el Tramo 4 Este muestra datos que van de los 25.55 °C a los 31.38 °C, en el Tramo 4 Oeste presenta temperaturas desde 24.06 °C hasta 28.96 °C y en el Tramo 7 se observan valores desde los 26.56 °C hasta los 35.42 °C.

Englobando los puntos, la temperatura más baja fue de 24.06 °C de la muestra TMWP158 tomada del cenote Chukum en Tikuch perteneciente al Tramo 4 Oeste en temporada de secas y la temperatura más alta que se registró fue de 35.42 °C de la muestra TMWP144 del pozo de distribución en Xbonil ubicado en el Tramo 7 en temporada de secas.

De los valores obtenidos las muestras TMWP145 en temporada de lluvias-nortes y TMWP144 en temporada de secas del Tramo 7 tienen temperaturas de 35.30 y 35.42°C, siendo las únicas muestras que exceden la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, en donde el límite de temperatura es de 35°C.

La Figura 29 muestra un ligero aumento en temporada de secas en el Tramo 7 y en el Tramo 4 Oeste, mientras que en el Tramo 4 Este ocurre de manera contraria, se observa una ligera disminución de temperatura en temporada de secas.



**Figura 29.** Gráfica de temperatura de los tramos de estudio. LL N: Lluvias-Nortes 2022, S: Secas 2023.

El boxplot muestra que no hay variabilidad entre temporadas, pero se logra observar variabilidad entre tramos. Los resultados obtenidos del PERMANOVA indican diferencias significativas entre tramos, en donde arrojan diferencias entre el Tramo 7 y Tramo 4 Oeste (Tabla 10).

**Tabla 10.** Resultados de temperatura de PERMANOVA basado en el análisis de similitud de Bray-Curtis. Los valores de p significativos ( $\alpha=0.05$ ) son indicados en negrita.

VALORES DE P					
VARIABLE	TEMPORADAS	TRAMOS	PAIR-WISE TESTS PARA TRAMO		
			Tramo 4 Este, Tramo 7	Tramo 4 Este, Tramo 4 Oeste	Tramo 7, Tramo 4 Oeste
Temperatura	0.8894	<b>0.0074</b>	0.0533	0.2269	<b>0.0039</b>

### 3.1.2 PARÁMETROS EN LABORATORIO

#### 3.1.2.1 ESCHERICHIA COLI

Los resultados de coliformes fecales, expresados en NMP/100ml, evidencian la presencia de *E. coli* en la mayoría de las muestras de agua analizadas en ambas temporadas.

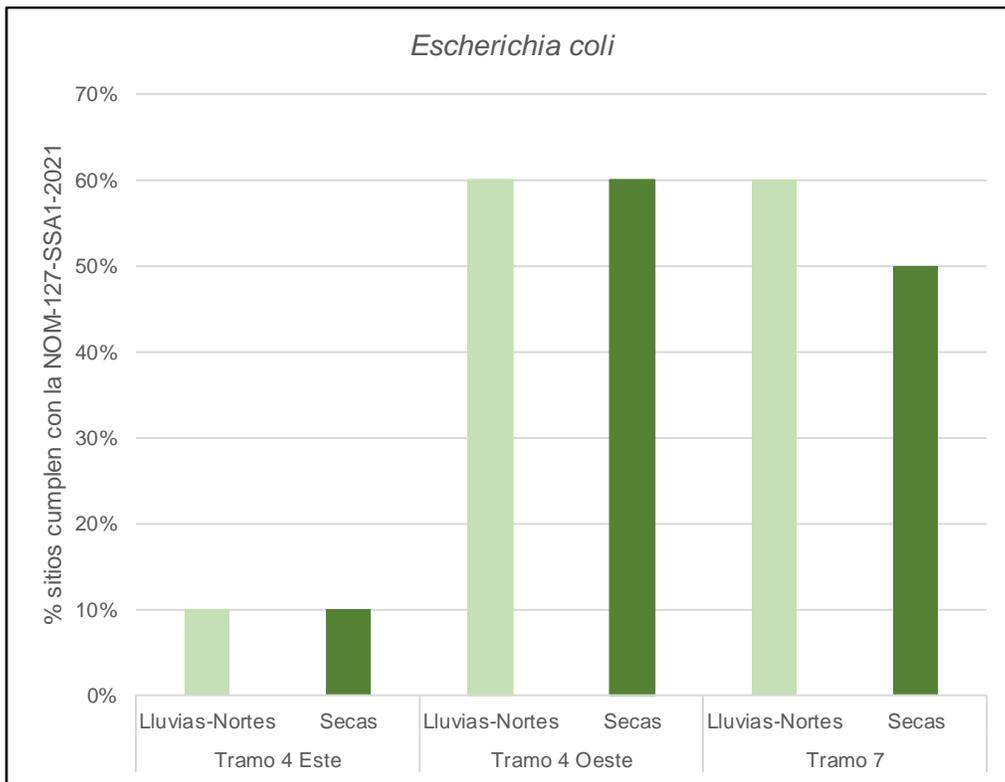
En los resultados obtenidos (Tabla 11) se muestra que el valor más alto de *E. coli* en el Tramo 4 Este es >2,419.60 NMP/100ml en el sitio TMWP132 en temporada de lluvias-nortes, muestra de agua tomada del pozo artesiano en una vivienda en Tres Marías, el resultado más alto que se obtuvo en el Tramo 4 Oeste es de 47.90 NMP/100ml en el sitio TMWP157 en temporada de secas, perteneciente al pozo artesiano en Yalcobá y en el Tramo 7 el valor más alto es de 51.20 NMP/100ml perteneciente al sitio TMWP149 en temporada de lluvias-nortes, muestra tomada de un captador de agua de lluvia en Puebla de Morelia.

**Tabla 11.** Resultados de bacteriología de los puntos muestreados en temporada de lluvias-nortes 2022 y secas 2023.

TRAMO	ID	<i>E. Coli</i> (NMP/100ml)
-------	----	----------------------------

		<b>LLUVIAS- NORTES</b>	<b>SECAS</b>
<b>Tramo 4 Este</b>	TMWP126	387.30	21.30
	TMWP129	4.10	20
	TMWP130	3.10	10
	TMWP131	<1.00	1.00
	TMWP132	>2419.60	61.30
	TMWP133	261.30	31.20
	TMWP134	16.80	<1.00
	TMWP135	55.40	5.20
	TMWP136	191.80	14.50
	TMWP137	65.70	98.70
<b>Tramo 4 Oeste</b>	TMWP153	1.00	<1.00
	TMWP154	2.00	28.80
	TMWP155	<1.00	<1.00
	TMWP156	24.30	<1.00
	TMWP157	<1.00	47.90
	TMWP158	<1.00	3.00
	TMWP159	<1.00	<1.00
	TMWP160	<1.00	<1.00
	TMWP161	1.00	<1.00
	TMWP162	<1.00	1.00
<b>Tramo 7</b>	TMWP143	<1.00	<1.00
	TMWP144	<1.00	<1.00
	TMWP145	<1.00	<1.00
	TMWP146	<1.00	<1.00
	TMWP147	2.00	2.00
	TMWP148	<1.00	5.20
	TMWP149	51.20	17.10
	TMWP150	<1.00	1.00
	TMWP151	5.20	7.10
	TMWP152	1.00	<1.00

En la Figura 30 se presenta el porcentaje de sitios que cumplen con la NOM-127-SSA1-2021, en el Tramo 4 Este se reporta el 10% de los sitios en temporada de lluvias-nortes y el porcentaje se mantiene en temporada de secas, asimismo, el Tramo 4 Oeste se mantiene en ambas temporadas teniendo el 60% de los sitios que cumplen con la norma, mientras que en el Tramo 7 el porcentaje en temporada de lluvias-nortes es de 60% y disminuye en 10% en temporada de secas. El Tramo 4 Este tiene una mayor concentración de coliformes fecales de tipo *E. coli* a comparación del Tramo 4 Oeste y Tramo 7, los cuales muestran resultados muy similares entre ellos.



**Figura 30.** Porcentaje de los sitios que cumplen con la NOM-127-SSA1-2021.

Lo anterior se observó en lo obtenido con el PERMANOVA, en donde las diferencias significativas fueron entre el Tramo 4 Este con Tramo 7 y Tramo 4 Este con Tramo 4 Oeste (Tabla 12).

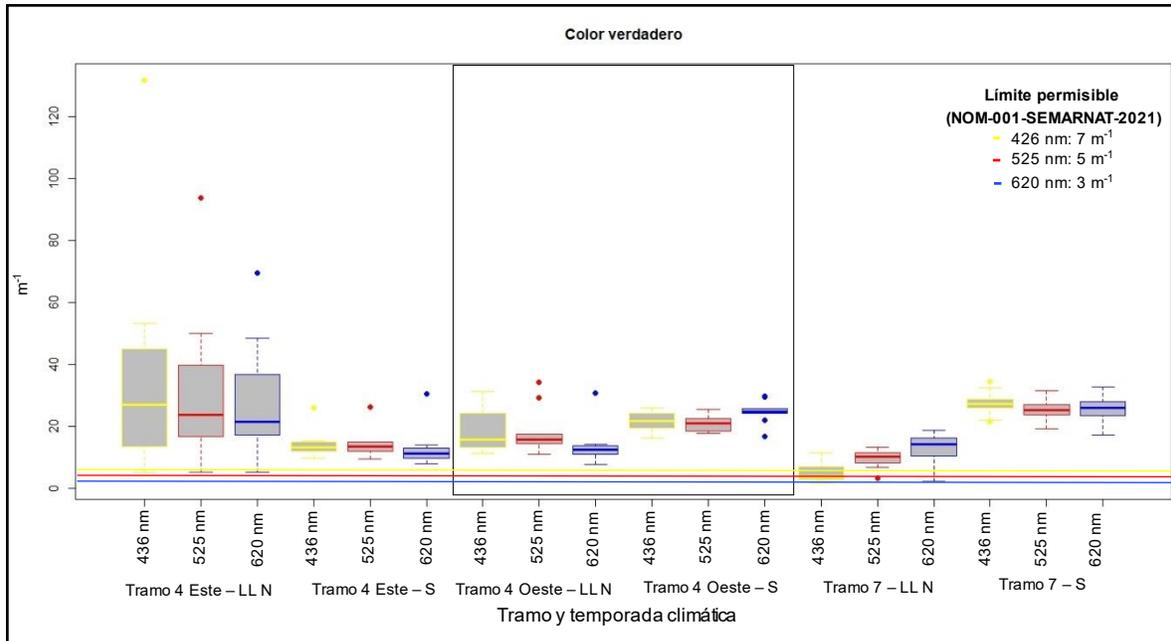
**Tabla 12.** Resultados de E. coli de PERMANOVA basado en el análisis de similitud de Bray-Curtis. Los valores de p significativos ( $\alpha=0.05$ ) son indicados en negrita.

VALORES DE P					
VARIABLE	TEMPORADAS	TRAMOS	PAIR-WISE TESTS PARA TRAMO		
			Tramo 4 Este, Tramo 7	Tramo 4 Este, Tramo 4 Oeste	Tramo 7, Tramo 4 Oeste
<i>E. coli</i>	0.5115	<b>0.0003</b>	<b>0.0010</b>	<b>0.0007</b>	0.6873

### 3.1.2.2 COLOR VERDADERO

De los valores obtenidos en los coeficientes de absorción espectral (Anexos, Tabla 21), en el Tramo 4 Este van desde los 5.3 a los 131.8  $m^{-1}$ , 5.3 a los 83.8  $m^{-1}$  y 5.3 a los 69.5  $m^{-1}$ , en el Tramo 4 Oeste se registraron cifras que van desde los 11.3 a los 31.3  $m^{-1}$ , 11.0 a los 34.3  $m^{-1}$  y 7.8 a los 30.8  $m^{-1}$  y en el Tramo 7 los datos registrados oscilan entre 1.8 a los 34.5  $m^{-1}$ , 3.3 a los 31.5  $m^{-1}$  y 2.3 a los 32.8  $m^{-1}$ , en las longitudes de onda 436 nm, 525 nm y 620 nm respectivamente, considerando ambas temporadas climáticas.

En la Figura 31 se muestran los boxplot y algunos valores atípicos registrados, las líneas marcadas pertenecen a los límites permisibles para cada longitud de onda que establece la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, en donde la mayoría de los datos sobrepasan los límites.



**Figura 31.** Boxplot de color verdadero de los tramos de estudio. LL N: Lluvias-Nortes 2022, S: Secas 2023.

Además, se puede apreciar variabilidad entre temporadas y tramos, en el PERMANOVA se observa lo siguiente: en la longitud de onda 436 nm se tiene diferencia significativa entre temporadas y tramos, en donde existe diferencia entre el Tramo 4 Este con el Tramo 7 y entre el Tramo 7 con el Tramo 4 Oeste; en la longitud de onda 525 nm se tienen diferencias significativas entre temporadas y entre el Tramo 7 con el Tramo 4 Oeste; y en la longitud de onda 620 solamente arroja diferencias significativas entre temporadas (Tabla 13).

**Tabla 13.** Resultados de color verdadero de PERMANOVA basado en el análisis de similitud de Bray-Curtis.

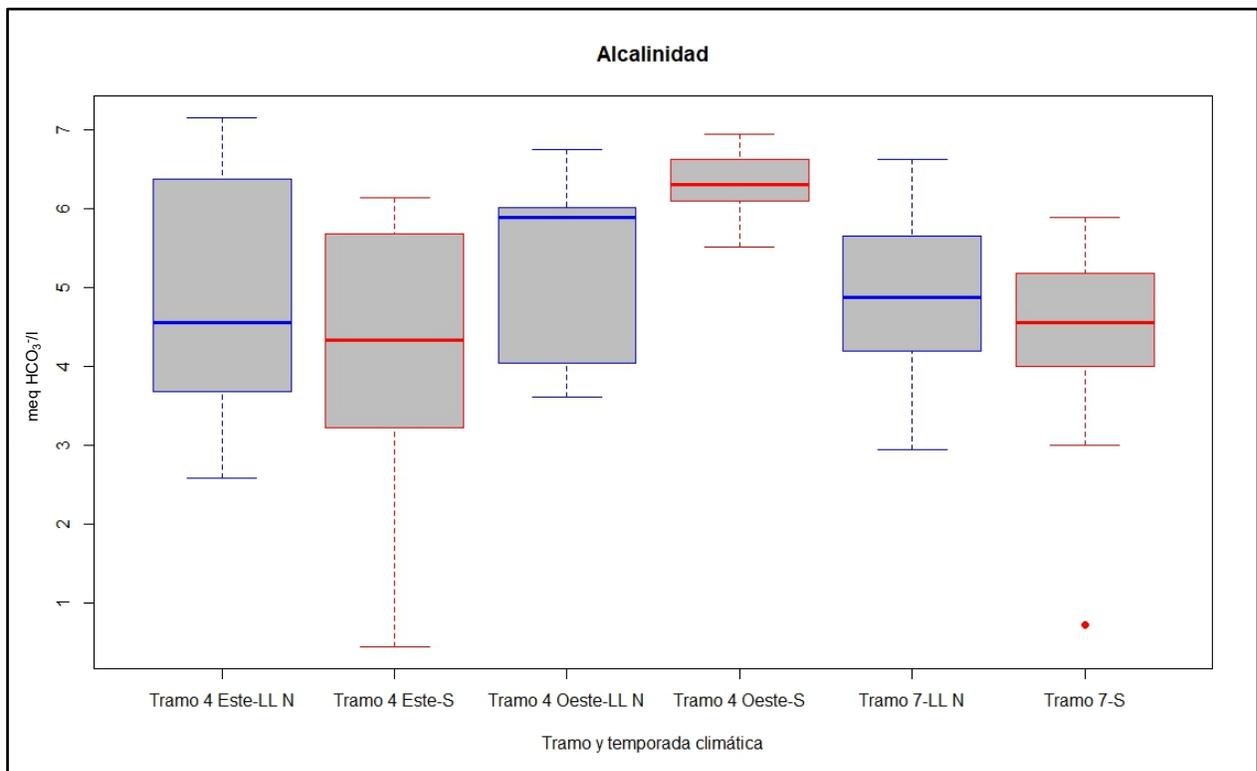
VALORES DE P					
VARIABLE	TEMPORADAS	TRAMOS	PAIR-WISE TESTS PARA TRAMO		
			Tramo 4 Este, Tramo 7	Tramo 4 Este, Tramo 4 Oeste	Tramo 7, Tramo 4 Oeste
436 nm	0.00001	0.00008	0.0083	0.1137	0.00001
525 nm	0.0022	0.0672	0.5258	0.1134	0.0056
620 nm	0.0088	0.3083	0.2622	0.2067	0.6975

Nota: Los valores de p significativos ( $\alpha=0.05$ ) son indicados en negrita. 436 nm = amarillo, 525 nm = rojo y 620 nm = azul.

### 3.1.2.3 ALCALINIDAD

Los resultados de alcalinidad (ver Anexos, Tabla 22) en el Tramo 4 Este oscilan entre los 0.44 a los 7.16 meq  $\text{HCO}_3^-/\text{l}$ , en el Tramo 4 Oeste los resultados van de los 3.62 a los 6.95 meq  $\text{HCO}_3^-/\text{l}$  y en el Tramo 7 va desde los 0.73 a los 6.63 meq  $\text{HCO}_3^-/\text{l}$ .

En el boxplot (Figura 32) se puede observar la alcalinidad, en donde también existe variabilidad de datos entre los tramos.



**Figura 32.** Gráfica de alcalinidad de los tramos de estudio. LL N: Lluvias-Nortes 2022, S: Secas 2023.

Esto se confirma con los resultados obtenidos del PERMANOVA en donde arrojan diferencias significativas entre el Tramo 4 Oeste con Tramo 4 Este y Tramo 4 Oeste con Tramo 7 (Tabla 14).

**Tabla 14.** Resultados de alcalinidad de PERMANOVA basado en el análisis de similitud de Bray-Curtis. Los valores de p significativos ( $\alpha=0.05$ ) son indicados en negrita.

VALORES DE P					
VARIABLE	TEMPORADAS	TRAMOS	PAIR-WISE TESTS PARA TRAMO		
			Tramo 4 Este, Tramo 7	Tramo 4 Este, Tramo 4 Oeste	Tramo 7, Tramo 4 Oeste
Alcalinidad	0.3885	<b>0.0195</b>	0.9334	<b>0.0084</b>	<b>0.0046</b>

### 3.1.2.4 FORMAS DEL NITRÓGENO ( $N-NH_4^+$ , $N-NO_2^-$ Y $N-NO_3^-$ )

En el Tramo 4 Este los valores van de los -0.15 a los 0.25 mg  $N-NH_4^+$ /l, de los -0.03 a los 0.01 mg  $N-NO_2^-$ /l y de los 0.01 a los 3.25 mg  $N-NO_3^-$ /l, en el Tramo 4 Oeste se obtuvieron valores que fluctúan entre los -0.25 a los 0.19 mg  $N-NH_4^+$ /l, de los -0.03 a los 0.67 mg  $N-NO_2^-$ /l y de los 0.35 a los 32.79 mg  $N-NO_3^-$ /l y en el Tramo 7 los datos arrojan valores de -0.13 a 1.19 mg  $N-NH_4^+$ /l, de -0.02 a -0.01 mg  $N-NO_2^-$ /l y de 0.07 a 14.13 mg  $N-NO_3^-$ /l, considerando ambas temporadas. En la Tabla 15 se muestran los resultados de nitrógeno de amonio, nitritos y nitratos expresados en mg/l, en donde se puede observar que la mayoría está por debajo del límite de detección del método (<LDM) debido a que se encuentran en concentraciones muy bajas.

En el Tramo 4 Este en temporada de lluvias-nortes no se detectó nitrógeno de amonio y nitritos, únicamente nitrógeno de nitratos, en temporada de secas tampoco se detectó nitrógeno de amonio y nitritos, el nitrógeno de nitratos fue detectado en todas las muestras a excepción de las muestras TMWP131 y TMWP135.

En temporada de lluvias-nortes del Tramo 4 Oeste no se detectó nitrógeno de amonio, solamente se detectó nitrógeno de nitritos en la muestra TMWP156 con una concentración de 0.27 mg/l, y se detectó nitrógeno de nitratos en todas las muestras, obteniendo concentraciones altas en algunas de ellas las cuales fluctúan entre los 12.27 a los 32.79 mg/l. En temporada de secas no se detectó nitrógeno de amonio, únicamente se detectó nitrógeno de nitritos con una concentración de 0.67 mg/l en la muestra TMWP154 y se detectaron altas concentraciones de nitrógeno de nitratos en algunas de las muestras, obteniendo valores que van de los 11.35 a los 30.96 mg/l.

En el Tramo 7 en temporada de lluvias-nortes se detectó una concentración alta de nitrógeno de amonio en la muestra TMWP143 con 1.19 mg/l, no se detectó nitrógeno de nitritos y el nitrógeno de nitratos fue detectable en todas las muestras, una de ellas con alta concentración, TMWP143

con 14.13 mg/l. En temporada de secas el nitrógeno de amonio fue detectable en las muestras TMWP147 y TMWP150 con 0.34 y 0.25 mg/l respectivamente, no se detectó nitrógeno de nitritos y se detectó nitrógeno de nitratos en la mayoría de las muestras, a excepción de las muestras TMWP147, TMWP148 y TMWP150.

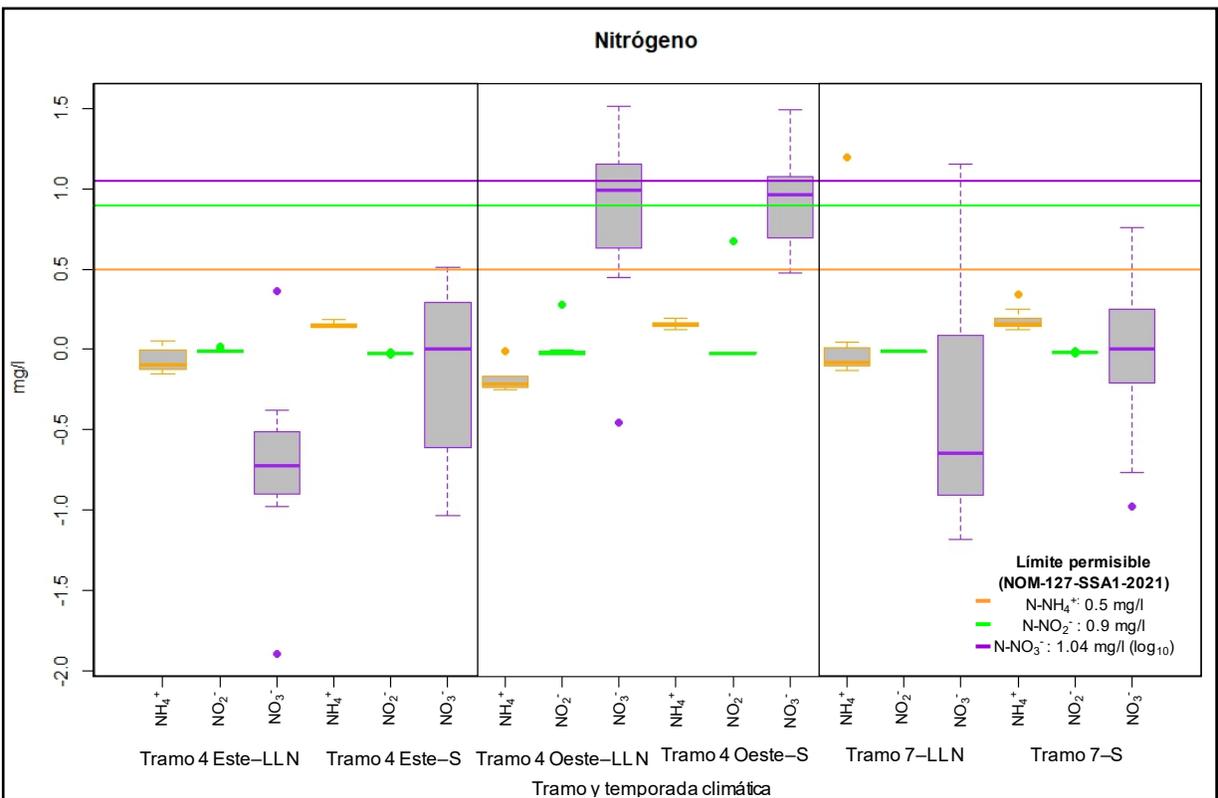
**Tabla 15.** Concentraciones de nitrógeno de amonio, nitritos y nitratos en temporada de lluvias-nortes 2022 y secas 2023, en los tramos estudiados.

TRAMO	MUESTRA	LLUVIAS-NORTES			SECAS		
		mg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /l	mg N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /l	mg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l	mg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /l	mg N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /l	mg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l
Tramo 4 Este	TMWP126	<LDM	<LDM	0.42	<LDM	<LDM	1.17
	TMWP129	<LDM	<LDM	0.13	<LDM	<LDM	0.09
	TMWP130	<LDM	<LDM	0.01	<LDM	<LDM	0.10
	TMWP131	<LDM	<LDM	0.16	<LDM	<LDM	<LDM
	TMWP132	<LDM	<LDM	0.28	<LDM	<LDM	3.25
	TMWP133	<LDM	<LDM	0.22	<LDM	<LDM	0.98
	TMWP134	<LDM	<LDM	2.31	<LDM	<LDM	2.33
	TMWP135	<LDM	<LDM	0.15	<LDM	<LDM	<LDM
	TMWP136	<LDM	<LDM	0.10	<LDM	<LDM	0.24
	TMWP137	<LDM	<LDM	0.31	<LDM	<LDM	1.95
Tramo 4 Oeste	TMWP153	<LDM	<LDM	12.27	<LDM	<LDM	11.35
	TMWP154	<LDM	<LDM	15.05	<LDM	0.67	4.64
	TMWP155	<LDM	<LDM	9.92	<LDM	<LDM	9.32
	TMWP156	<LDM	0.27	0.35	<LDM	<LDM	11.81
	TMWP157	<LDM	<LDM	32.79	<LDM	<LDM	30.96
	TMWP158	<LDM	<LDM	2.82	<LDM	<LDM	3.00
	TMWP159	<LDM	<LDM	9.51	<LDM	<LDM	9.08
	TMWP160	<LDM	<LDM	4.30	<LDM	<LDM	5.03
	TMWP161	<LDM	<LDM	14.19	<LDM	<LDM	12.82
	TMWP162	<LDM	<LDM	5.33	<LDM	<LDM	4.91
Tramo 7	TMWP143	1.19	<LDM	14.13	<LDM	<LDM	5.77
	TMWP144	<LDM	<LDM	1.23	<LDM	<LDM	1.77
	TMWP145	<LDM	<LDM	1.13	<LDM	<LDM	1.10
	TMWP146	<LDM	<LDM	3.61	<LDM	<LDM	4.12
	TMWP147	<LDM	<LDM	0.07	0.34	<LDM	<LDM
	TMWP148	<LDM	<LDM	0.12	<LDM	<LDM	<LDM
	TMWP149	<LDM	<LDM	0.13	<LDM	<LDM	0.10
	TMWP150	<LDM	<LDM	0.13	0.25	<LDM	<LDM
	TMWP151	<LDM	<LDM	0.38	<LDM	<LDM	0.61
	TMWP152	<LDM	<LDM	0.10	<LDM	<LDM	0.17

Nota: <LDM = valor por debajo del límite de detección del método. Valores en rojo exceden los límites de la NOM-127-SSA1-2021.

Se realizó un gráfico boxplot para observar la variabilidad de los datos entre temporadas climáticas y entre tramos. De manera general, las concentraciones de nitrógeno de amonio incrementaron en temporada de secas y sucede lo contrario con el nitrógeno de nitritos, en donde hubo un decremento en temporada de secas, mientras que las concentraciones de nitrógeno de nitratos muestran variación entre tramos y temporadas, esto se observa en la Figura 33, en donde se muestran valores atípicos y delimitaciones para visualizar los límites permisibles que establece la NOM-127-SSA1-2021 para cada una de las formas del nitrógeno ( $N-NH_4^+$ ,  $N-NO_2^-$  y  $N-NO_3^-$ ).

Se detectó una presencia alta de nitrógeno de nitratos, en específico en el Tramo 4 Oeste en la época de secas en donde el intervalo es de 3.00 a 30.96 mg/l. Cabe hacer notar que el valor más alto reportado para  $N-NO_3^-$  corresponde al mismo tramo, pero en temporada de lluvias-nortes, destacando el mismo sitio con una concentración de 32.79 mg/l.



**Figura 33.** Boxplot de las formas del nitrógeno en ambas temporadas climáticas. LL N: Lluvias-Nortes 2022, S: Secas 2023. Nota: se aplicó log<sub>10</sub> a los valores correspondientes al análisis de nitrógeno de nitratos.

El PERMANOVA arroja diferencias significativas temporales y espaciales: nitrógeno de amonio entre temporadas y entre el Tramo 4 Este con Tramo 4 Oeste; nitrógeno de nitritos entre temporadas y entre el Tramo 4 Este con Tramo 7 y Tramo 7 con Tramo 4 Oeste; y nitrógeno de

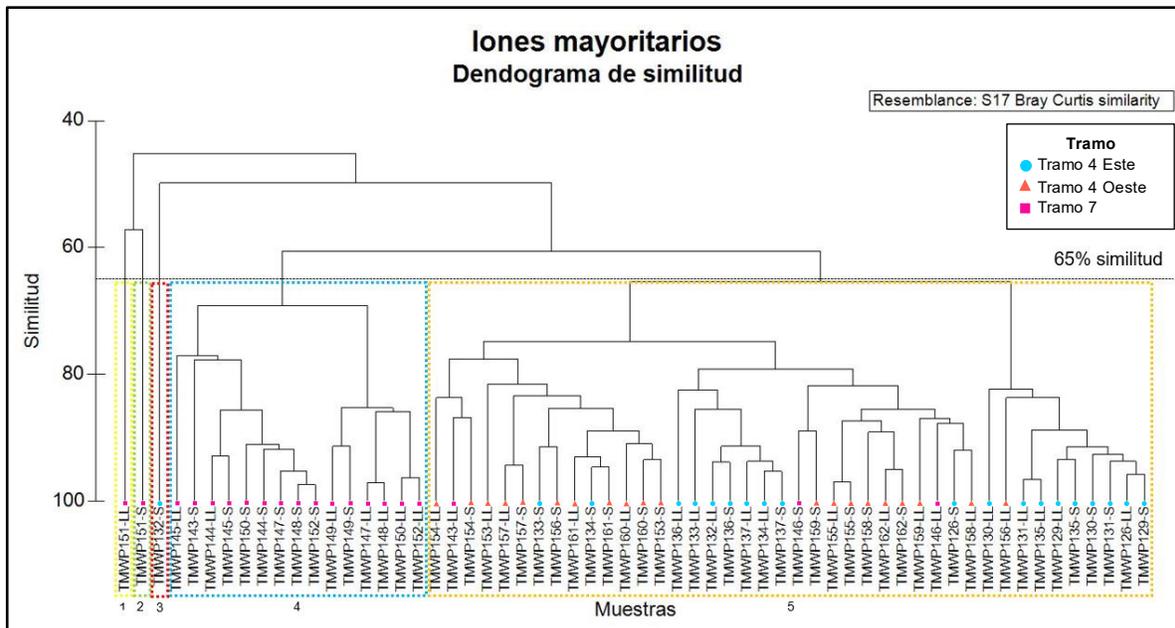
nitratos entre temporadas y entre el Tramo 4 Este con Tramo 4 Oeste y Tramo 7 con Tramo 4 Oeste (Tabla 16).

**Tabla 16.** Resultados de las formas del nitrógeno de PERMANOVA basado en el análisis de similitud de Bray-Curtis. Los valores de p significativos ( $\alpha=0.05$ ) son indicados en negrita.

VALORES DE P					
VARIABLE	TEMPORADAS	TRAMOS	PAIR-WISE TESTS PARA TRAMO		
			Tramo 4 Este, Tramo 7	Tramo 4 Este, Tramo 4 Oeste	Tramo 7, Tramo 4 Oeste
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<b>0.0007</b>	<b>0.0479</b>	0.6483	<b>0.0157</b>	0.0679
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<b>0.0024</b>	<b>0.0032</b>	<b>0.0428</b>	0.095	<b>0.0037</b>
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0.0303</b>	<b>0.00001</b>	0.6283	<b>0.00001</b>	<b>0.00001</b>

### 3.1.2.5 CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE DE AGUA: HIDROGEOQUÍMICA

Para el análisis estadístico se realizó un coeficiente de asociación mediante el análisis de similitud de Bray-Curtis, con una similitud de 65%, obteniendo como resultado el dendograma o clúster de la Figura 34.

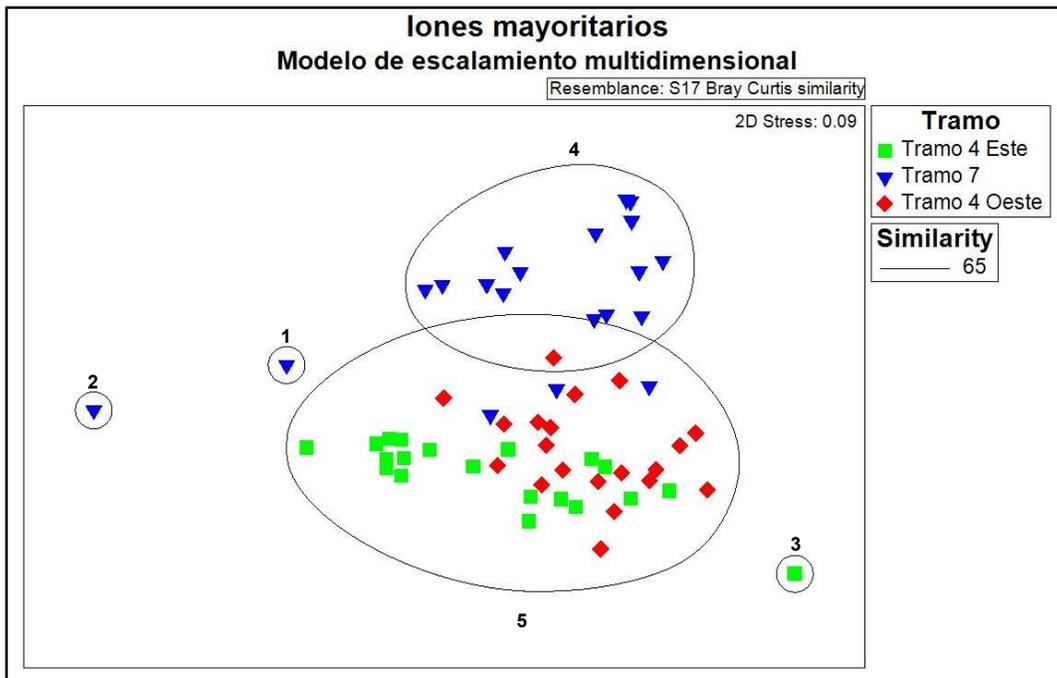


**Figura 34.** Clúster de las muestras colectadas en ambas temporadas. LL N: Lluvias-Nortes 2022, S: Secas 2023.

La línea fenotípica (línea punteada horizontal superior) es utilizada para delimitar la similitud de las muestras y definir los grupos (Cloutier *et al.*, 2008) una vez definida, el clúster muestra 5 grupos, en los que dos de ellos son relativamente homogéneos en cuanto a la concentración de los iones mayoritarios. Los grupos 1, 2 y 3 se componen de una muestra cada uno mientras que el grupo 4 son agrupadas 15 muestras y finalmente, el grupo 5 es conformado por 42 muestras.

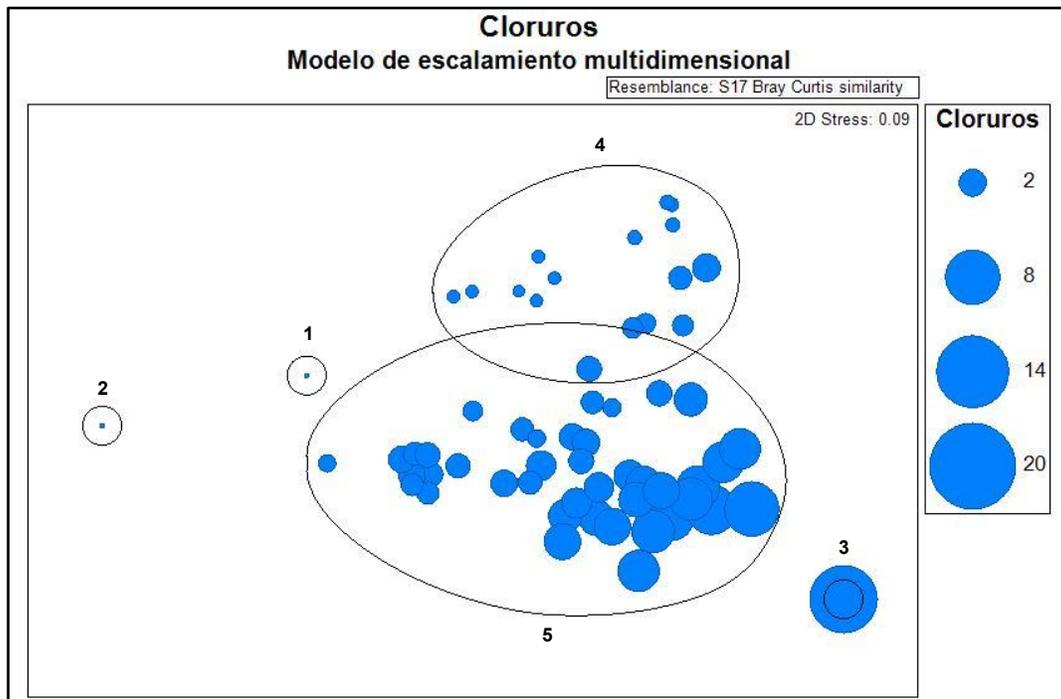
En los grupos 1 y 2 se encuentra la muestra TMWP151 en temporada de lluvias-nortes y secas respectivamente, pertenecientes a un captador de agua de lluvia en la localidad de Ing. EEC, ubicado en el Tramo 7. En el grupo 3 está la muestra TMWP132 de temporada de secas correspondiente al pozo artesiano en Tres Marías, en el Tramo 4 Este. En el grupo 4 se encuentran todas las muestras pertenecientes al Tramo 7 a excepción de las muestras: TMWP143 de la temporada de lluvias-nortes y TMWP151 y TMWP146 de ambas temporadas. Por último, en el grupo 5 están todas las muestras del Tramo 4 Oeste y del Tramo 4 Este a excepción de la muestra TMWP132 en temporada de lluvias-nortes.

En la Figura 35, el Modelo de Escalamiento Multidimensional (MDS) muestra la proximidad que se percibe entre las 60 muestras en un gráfico 2D. En el MDS se pueden observar los 5 grupos obtenidos con una similitud de 65%, en donde el stress arrojado es de 0.09, siendo un valor aceptable.

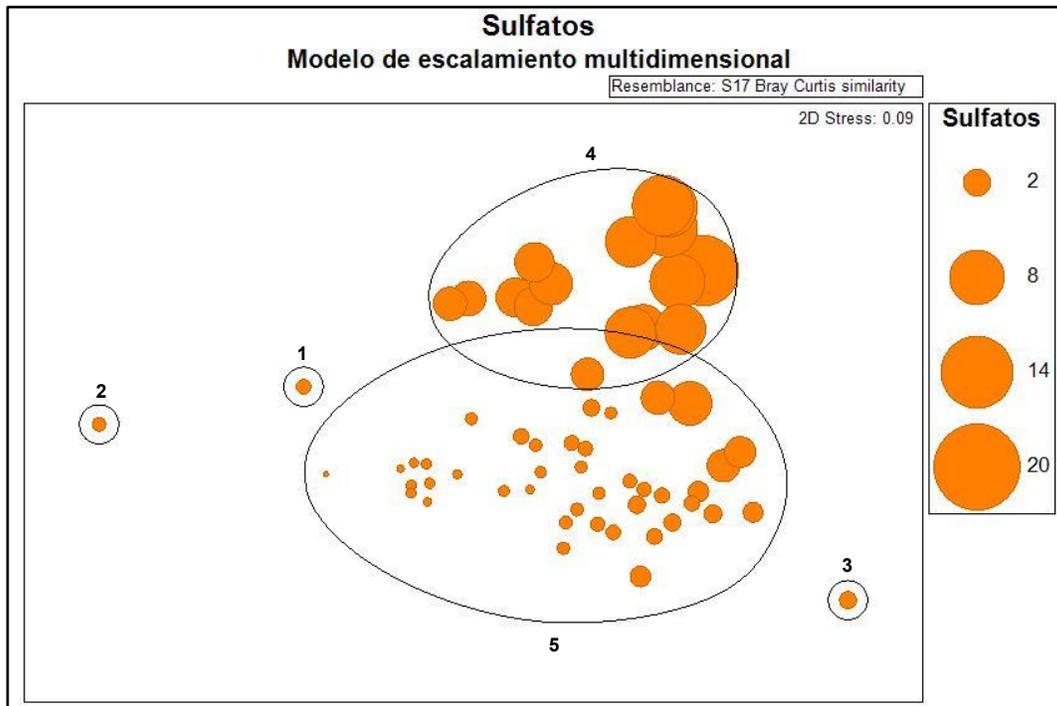


**Figura 35.** Modelo de Escalamiento Multidimensional (MDS) de iones mayoritarios.

Se realizaron MDS de burbujas de cada uno de los iones mayoritarios analizados para observar su comportamiento en los grupos obtenidos, donde los cloruros y los sulfatos fueron los iones que marcaron una diferencia notoria entre los grupos. En la Figura 36 se muestra una mayor concentración en cloruros de las muestras de los grupos 3 y 5 mientras que en la Figura 37 se observa una alta concentración de sulfatos en las muestras del grupo 4.



**Figura 36.** MDS 2D burbuja de cloruros.

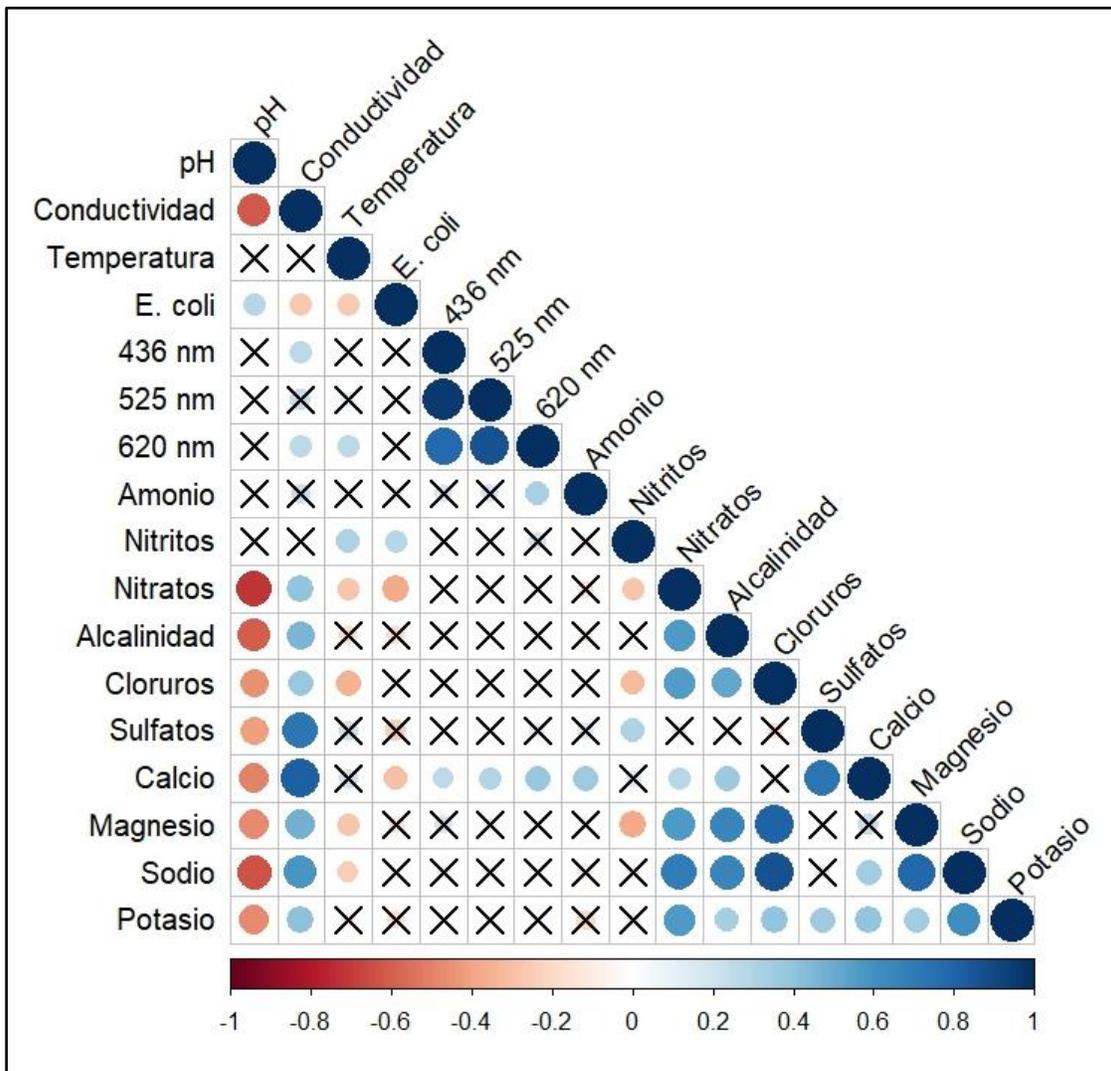


**Figura 37.** MDS 2D burbuja de sulfatos.

### 3.2 CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES FÍSICOQUÍMICAS Y BACTERIOLÓGICAS

En la Figura 38 se observa la matriz de correlación resultante de los 17 parámetros físicoquímicos y bacteriológicos analizados en las 60 muestras de este estudio, en donde se obtuvieron 64 correlaciones significativas de 136 posibles correlaciones, de las cuales los coeficientes de correlación (positivos y negativos) fueron; muy alto para 1 relación (0.90 - 1.00), alto para 9 relaciones (0.70 - 0.90), moderada para 13 relaciones (0.50 - 0.70), bajo para 27 relaciones (0.30 - 0.50) e insignificante para 14 relaciones (0.00 - 0.30) (Mukaka, 2012).

Los parámetros que se destacan en la matriz de correlación son: la longitud de onda 525 nm tiene una correlación muy alta positiva de 0.95 con la longitud de onda 436 nm, la longitud de onda 620 nm tiene una correlación alta positiva de 0.77 con la longitud de onda 436 nm y 0.86 con la longitud de onda 525 nm, el nitrato se relaciona con el pH obteniendo una correlación alta negativa de -0.72, al igual que el sulfato con la conductividad eléctrica, pero de manera positiva (0.72) y el sulfato con el calcio (0.72) y el calcio con la conductividad eléctrica tiene una correlación alta positiva de 0.81, el magnesio se relaciona alta y positivamente con el cloruro (0.80) y con el sodio (0.78), y por último, el cloruro también mantiene una correlación alta positiva de 0.86 con el sodio.



**Figura 38.** Matriz de correlación de Spearman de los parámetros analizados. Nota: Las cruces indican que no existe significancia estadística.

### 3.3 INDICADORES SOCIALES

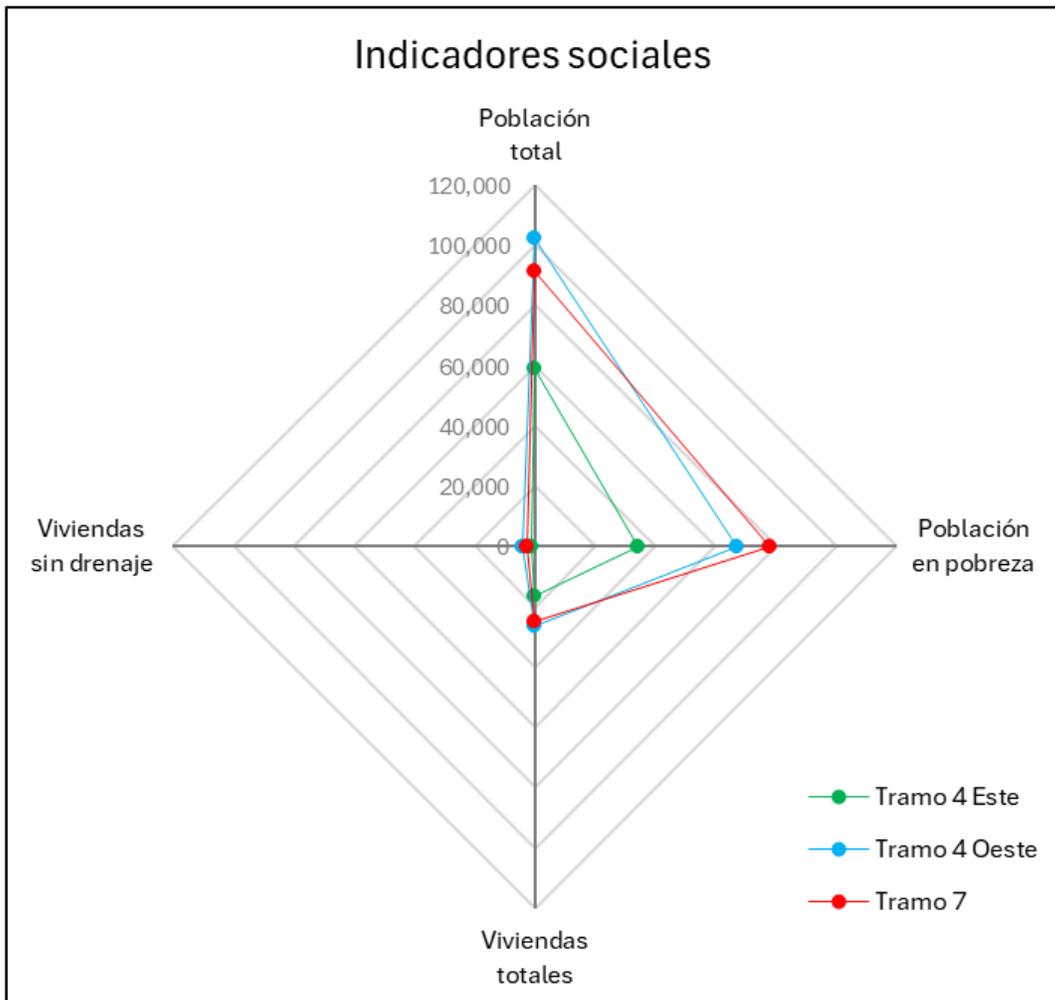
Del Tramo 4 Este se obtuvo información de los municipios de Lázaro Cárdenas y Puerto Morelos, los cuales se tratan en conjunto en este análisis, ya que el muestreo fue realizado en ambos municipios. Se tiene una población total de 56,092 habitantes, de los cuales 34,421 viven en condiciones de pobreza. El tramo tiene un total de 16,618 viviendas particulares habitadas, de las cuales solo 1,060 no tienen acceso al drenaje (INEGI, 2020; CONEVAL, 2020).

El Tramo 4 Oeste se tomaron en cuenta los municipios de Valladolid, Tinum y Uayma, en los que alberga una población total de 102,351 personas, de las cuales 66,831 se encuentran en situación

de pobreza. Este tramo cuenta con 26,208 viviendas particulares habitadas, de las que 4,160 viviendas no tienen acceso al drenaje (INEGI, 2020; CONEVAL, 2020).

Por otro lado, en el Tramo 7 se recopilieron datos de los municipios de Calakmul y Escárcega, en donde en conjunto se tiene una población total de 91,637 habitantes, de los que 77,846 están en situación de pobreza. Se registran 24,753 viviendas particulares habitadas, de las cuales 2,523 son viviendas sin drenaje (INEGI, 2020; CONEVAL, 2020).

Los indicadores sociales descritos anteriormente se visualizan en el diagrama de radar, en donde se comparan los tramos en un plano bidimensional (Figura 39).



**Figura 39.** Diagrama de radar, se muestran los indicadores sociales medidos por el INEGI (2020) y CONEVAL (2020).

## DISCUSIÓN

### 3.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL AGUA

#### 3.4.1 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS *IN SITU*

##### 3.4.1.1 pH

Los valores de pH obtenidos en el Tramo 4 Este alcanzan valores que van desde 6.83 hasta 7.95, coincidiendo con Leal-Bautista *et al.* (2011) quienes reportaron valores que van desde 6.71 a 7.20 en agua subterránea en la ruta de los cenotes en Puerto Morelos y con Gutiérrez-Reveles (2022) quien reportó un pH que va desde 7.33 a 6.58 en cenotes de Puerto Morelos.

El comportamiento del pH en el Tramo 4 Oeste es desde 6.66 a 7.47, los datos son semejantes a los valores de pH de cenotes en Valladolid reportados por Torres *et al.* (2022) los cuales oscilaron entre 6.70 a 6.80.

En el Tramo 7 el pH va de 6.63 a 7.72, mientras que el pH registrado por Ortiz-Flores *et al.* (2019) en el acuífero de Xpujil fluctúa de 7.07 a 7.40, también reporta puntos cercanos a la laguna Silvituc los cuales fluctúan de 7.03 a 7.23, aun teniendo dos resultados pertenecientes a captadores de agua de lluvia, los valores de pH son similares a los obtenidos en este estudio, las cuales presentan una proximidad espacial con los puntos registrados por Ortiz-Flores *et al.* (2019).

Con los resultados obtenidos no se observaron diferencias significativas entre temporadas, éstos arrojaron diferencias espaciales entre tramos. Los acuíferos costeros en zonas kársticas están hidráulicamente interconectados con las aguas costeras (Parra *et al.*, 2015) en donde el pH promedio es de 8.10 (Gutiérrez-Reveles, 2022). Los valores de pH obtenidos en el Tramo 4 Este tienden a ser ligeramente alcalinos, alcanzando valores de hasta 7.95, esto puede deberse a que son cenotes y pozos muestreados cercanos a la costa a diferencia de los puntos muestreados del Tramo 4 Oeste y Tramo 7.

##### 3.4.1.2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Los resultados de conductividad eléctrica en el Tramo 4 Este tienen como valor mínimo de 387.60  $\mu\text{S/cm}$  y como máximo el valor de 1,283.40  $\mu\text{S/cm}$ , los datos son similares a los obtenidos por Carmona-Esquivel (2019) quien reportó valores que van de los 470.00  $\mu\text{S/cm}$  a los 1,400.00  $\mu\text{S/cm}$  en agua subterránea de cenotes y pozos dentro del área de estudio y a los datos de Gutiérrez-Reveles (2022) quien obtuvo valores que van desde 595.00  $\mu\text{S/cm}$  a 1,205.67  $\mu\text{S/cm}$  en agua subterránea de cenotes de Puerto Morelos.

En el Tramo 4 Oeste se obtuvieron datos que van de los 596.53  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a los 1,488.73  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , los valores reportados por Torres *et al.* (2022), de cenotes en Valladolid, oscilaron entre 1,070.00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 1,210.00  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , los cuales están dentro de los valores reportados en este estudio.

Para el Tramo 7 se registraron valores que van de los 144.00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a los 1,874.05  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , los cuales coinciden con los valores del estudio realizado por Ortiz-Flores *et al.* (2019), en donde se reporta una conductividad eléctrica de 1,440.00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el acuífero de Xpujil, y de 437.00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 1,005.00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en puntos cercanos a la laguna Silvituc, a excepción de un captador de agua de lluvia de Ing. EEC (TMWP151), en donde se muestran los valores más bajos de conductividad eléctrica en ambas temporadas, 144.00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en temporada de lluvias-nortes y 258.80  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en temporada de secas, a diferencia del punto TMWP149 el cual arroja valores de 750.80  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en lluvias-nortes y 1,166.80  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , que también fue muestreado en un captador de agua de lluvia en Puebla de Morelia, esta alta conductividad eléctrica en el captador de agua de lluvia puede deberse a que las pipas de agua abastecen el captador y ocurre una mezcla de agua de lluvia con agua subterránea.

Los resultados arrojaron diferencias significativas entre temporadas y entre tramos. Exceptuando el resultado de un captador de agua de lluvia (TMWP151), los resultados de conductividad eléctrica están por debajo de los 2,500.00  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por lo que están dentro de los resultados previamente publicados del agua subterránea de acuíferos costeros (Rocha *et al.*, 2015).

### 3.4.1.3 TEMPERATURA

Las temperaturas obtenidas en el Tramo 4 Este alcanzan valores desde los 25.55  $^{\circ}\text{C}$  a los 31.38  $^{\circ}\text{C}$ , coincidiendo con los valores obtenidos por Gutiérrez-Reveles (2022) quien reporta temperaturas que van de los 25.38  $^{\circ}\text{C}$  a los 31.28  $^{\circ}\text{C}$  en agua de cenotes de Puerto Morelos y con otros estudios de la zona (Leal-Bautista *et al.*, 2011; Carmona-Esquivel, 2019). En la mayoría de las muestras se observó una disminución en la temperatura del agua en temporada de secas, esto puede deberse a que la temperatura del agua subterránea en esta zona mostró una respuesta atrasada con la temperatura media del aire (Gutiérrez-Reveles, 2022), ya que en los meses de febrero, marzo y abril la temperatura fue de 25.7, 26.9 y 27.6  $^{\circ}\text{C}$ .

En el Tramo 4 Oeste fueron reportadas temperaturas desde los 24.06  $^{\circ}\text{C}$  hasta los 28.96  $^{\circ}\text{C}$ , los cuales coinciden con las temperaturas registradas por Torres *et al.* (2022) que fluctúan entre los 23.00  $^{\circ}\text{C}$  y los 27.90  $^{\circ}\text{C}$ .

Los valores de temperatura registrados en el Tramo 7 oscilan entre los 26.56°C y los 35.42°C, Ortiz-Flores *et al.* (2019) reportan temperaturas desde 28.40°C a 28.60°C en puntos cercanos al Tramo 7. Los valores obtenidos de los captadores de agua de lluvia (TMWP149 y TMWP151), no registraron temperaturas superiores a los 27.27°C ni inferiores a los 26.56 °C.

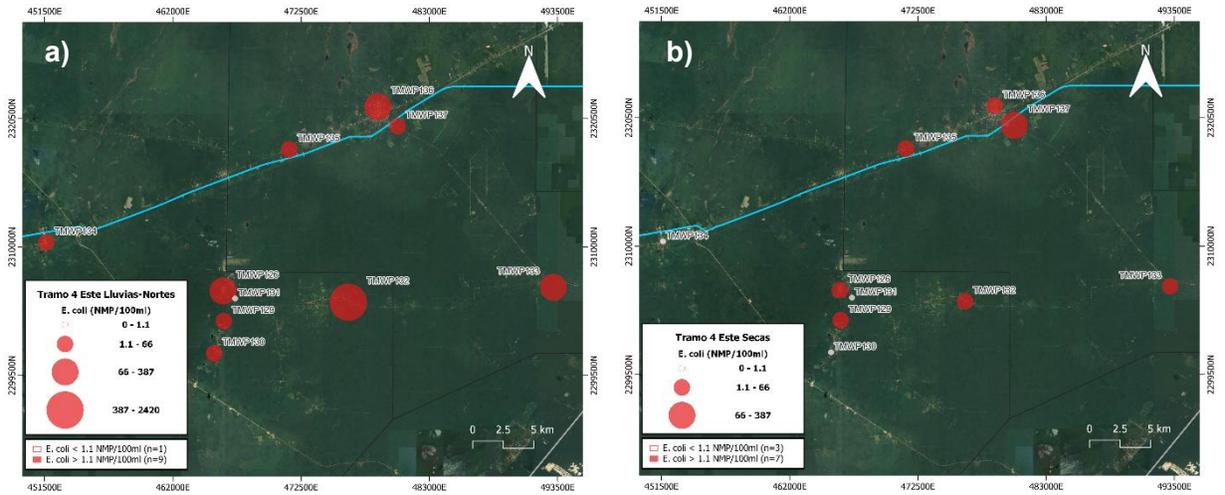
Las muestras de la temporada de lluvias-nortes fueron colectadas en el año 2022 en donde la temperatura media anual de las entidades federativas fue de 27.20°C en Quintana Roo, 26.80°C en Yucatán y 27.30°C en Campeche (CONAGUA, 2022), mientras que la temperatura media del agua colectada en los tramos fue de 28.60°C en el Tramo 4 Este, 27.00°C en el Tramo 4 Oeste y 28.90°C en el Tramo 7. Las diferencias van de los 0.20 a los 1.60°C entre el agua subterránea y la temperatura media anual atmosférica. Las muestras correspondientes a la temporada de secas fueron colectadas en el año 2023 en donde la temperatura media anual de las entidades federativas (hasta el mes de octubre) fue de 28.10°C en Quintana Roo, 28.40°C en Yucatán y 28.80°C en Campeche (CONAGUA, 2023), en cambio, la temperatura media del agua colectada en los tramos fue de 27.30°C en el Tramo 4 Este, 27.70°C en el Tramo 4 Oeste y 29.70°C en el Tramo 7. Las diferencias van de los 0.70 a los 1.90°C entre el agua subterránea y la temperatura media anual atmosférica.

La temperatura es un indicador de la calidad del agua para la preservación acuática y las fuentes de abastecimiento de agua potable, además la NOM-001-SEMARNAT-2021 la establece como límite máximo permitido en las descargas de aguas residuales (NMX-AA-007-SCFI-2013).

### 3.4.2 PARÁMETROS EN LABORATORIO

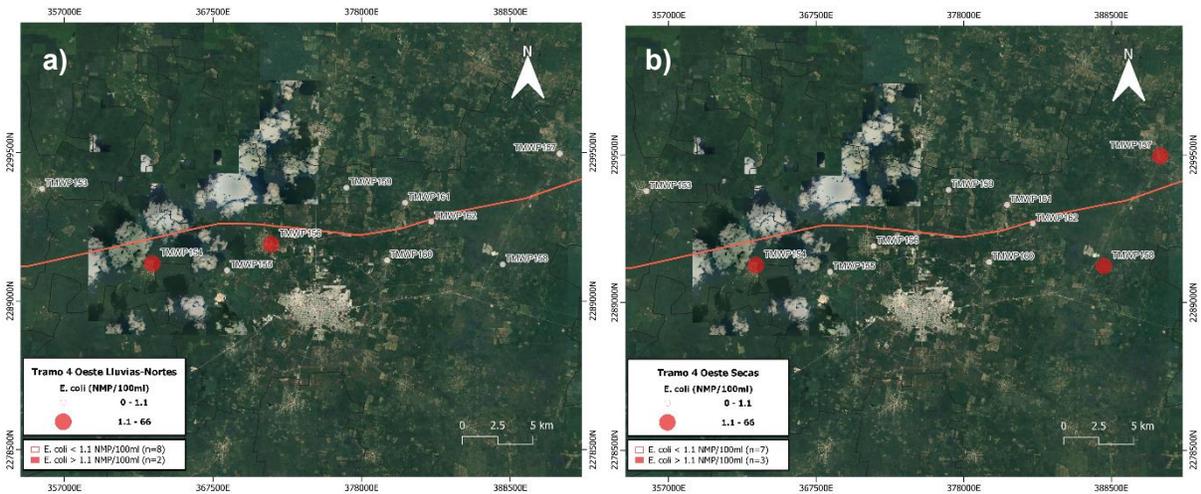
#### 3.4.2.1 *ESCHERICHIA COLI*

En el Tramo 4 Este los sitios con una presencia alta de *E. coli* son los pozos artesianos y cenotes que se encuentran ubicados dentro de los ejidos y cuya actividad turística (como Verde Lucero y Corchalito) es relevante, que en estudios anteriores también se reporta presencia de *E. coli*, en menor concentración, en los cenotes turísticos mencionados (Gutiérrez-Reveles, 2022; Leal-Bautista *et al.*, 2011). La presencia de coliformes fecales en dichos sitios puede deberse a la proximidad a áreas como los centros turísticos (Moore *et al.*, 2020) y a la existencia de fosas sépticas, letrinas o ausencia de drenaje (Cejudo *et al.*, 2023). En los mapas de la Figura 40 (inciso a) se observa una mayor concentración de *E. coli* en temporada de lluvias-nortes, lo que puede deberse al arrastre de contaminantes al agua subterránea y a la alta vulnerabilidad del acuífero (González-Herrera *et al.*, 2018).



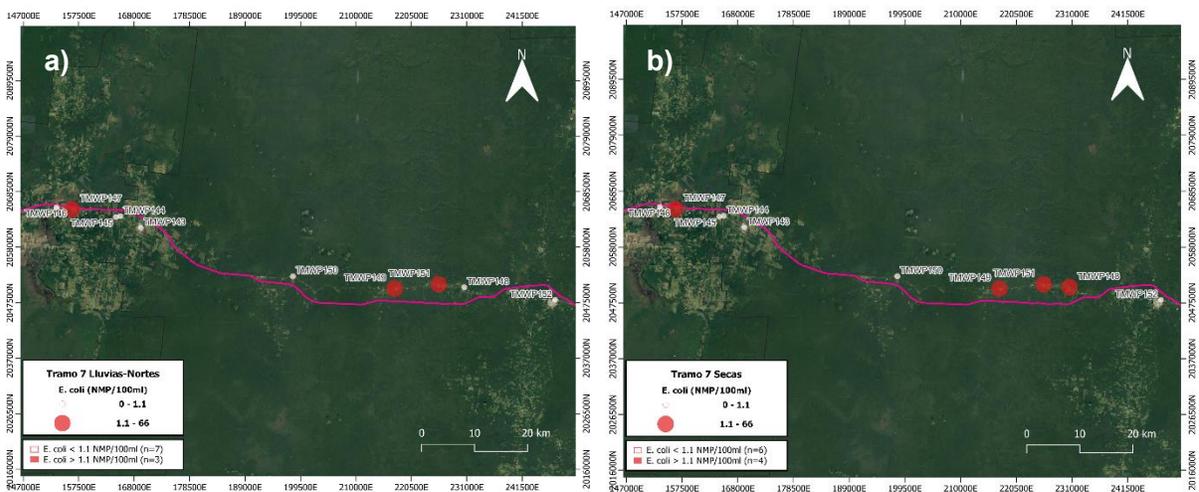
**Figura 40.** Mapas de *E. coli* en el Tramo 4 Este. a) Temporada de lluvias-nortes 2022 y b) Temporada de secas 2023.

Los sitios en el Tramo 4 Oeste con una superior concentración de *E. coli* pertenecen a pozos artesianos que se encuentran dentro de los ejidos, la mala calidad con respecto a la presencia de bacterias en el agua subterránea en estos sitios podría deberse al mal tratamiento de agua residual o existencia de fosas sépticas (Cejudo *et al.*, 2023). En la Figura 41 se observa que tres sitios cambiaron sus concentraciones de *E. coli* entre temporadas climáticas.



**Figura 41.** Mapas de *E. coli* en el Tramo 4 Oeste. a) Temporada de lluvias-nortes 2022 y b) Temporada de secas 2023.

De los sitios muestreados en el Tramo 7, los resultados que arrojaron mayor concentración de *E. coli* fueron de los captadores de agua de lluvia, los cuales están ubicados dentro de los ejidos, y son su principal fuente de abastecimiento (Ortiz-Flores *et al.*, 2019; Singaicho y Vergara, 2021), sus altas concentraciones podrían estar asociadas con las lluvias, que arrastran contaminantes de origen animal o humano, y a la falta de limpieza de los captadores en donde la contaminación fecal pasada las favorece (Ávila de Navia *et al.*, 2016). En la Figura 42 se observa muy poca diferencia entre las temporadas climáticas.



**Figura 42.** Mapas de *E. coli* en el Tramo 7. A) Temporada de lluvias-nortes 2022 y b) Temporada de secas 2023.

Existen diferencias significativas entre tramos, tomando en cuenta que los tramos 4 Este y Oeste tienen su origen de agua subterránea, el Tramo 4 Este es el que más destaca por su mayor presencia de coliformes fecales (*E. coli*), la alta concentración microbiana reportada en este tramo puede ser atribuida a que el acuífero en esa área se encuentra a menor profundidad, lo que lo clasifica como una zona más vulnerable a la contaminación (Duarte *et al.*, 2013). Por el contrario, el Tramo 7 presenta una variación en los valores encontrados entre aquellos colectados de cárcamos y de colectores de agua de lluvia lo cual puede deberse a la diferencia de contenedores y su apertura a la interacción con la atmósfera.

En general, el Tramo 4 Este es el que tiene menos sitios que cumplen con los límites permisibles de *E. coli* (<1.00) que establece la NOM-127-SSA1-2021, teniendo solamente un sitio cumpliendo con la normativa en cada temporada climática, lo que puede deberse a fosas sépticas defectuosas y a las actividades recreativas que se llevan a cabo en el área (Chan, 2019), el Tramo

4 Oeste también mantiene su cantidad de sitios que cumplen con la normativa en ambas temporadas, obteniendo 6 sitios con  $<1.00$  NMP/100ml, por otra parte, el Tramo 7 disminuye en sitios obteniendo 6 en temporada de lluvias-nortes y 5 en temporada de secas que cumplen con la normativa.

### 3.4.2.2 COLOR VERDADERO

Los resultados de color verdadero se compararon con la NOM-001-SEMARNAT-2021 la cual establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, debido a la metodología que se llevó a cabo para el análisis, ya que muestra los límites permisibles de las tres longitudes de onda del color verdadero a diferencia de la NOM-127-SSA1-2021, la cual muestra el límite permisible en unidades de color del color verdadero, por lo que no es posible compararla con el límite permisible para agua de la calidad del agua para uso y consumo humano.

El sitio que superó por mucho los límites permisibles de las tres longitudes de onda en ambas temporadas climáticas en el Tramo 4 Este, correspondiente a un pozo de distribución en El Tintal (TMWP134), el cual tiene una mayor absorbancia en la longitud de onda 436 nm, la cual corresponde al color amarillo, esto podría indicar que hay contaminación por parte de aguas residuales domésticas (Martínez y Osorio, 2018). Solamente el resultado del cenote en Agua Azul en temporada de lluvias-nortes (TMWP126), tiene un valor permisible en la longitud de onda 436 nm.

Los resultados con los valores más altos del Tramo 4 Oeste fueron en temporada de lluvias-nortes de los pozos artesianos de Pixoy (TMWP155) en la longitud de onda 436 nm y de Popolá (TMWP156) en las longitudes de onda 525 y 620 nm y en temporada de secas del pozo de distribución en Yohalal Tres (TMWP159) en las tres longitudes de onda, lo que pudo originarse por el vertimiento de desechos urbanos (Martins-Pinheiro *et al.*, 2019; Sánchez-Saez, 2013). En el Tramo 4 Oeste no hay resultados que cumplan con los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En el Tramo 7 los coeficientes de absorción espectral de las longitudes de onda 436 nm, 525 nm y 620 nm más altos en temporada de lluvias-nortes fueron registrados en pozos de distribución en Santa Lucía, Silvituc y Concepción (TMWP145, TMWP147 y TMWP143 respectivamente), y en temporada de secas del cárcamo de bombeo en Xpujil (TMWP152). Los resultados obtenidos del cárcamo de bombeo en Conhuás en temporada de lluvias-nortes (TMWP150) son los únicos que cumplen con la NOM-001-SEMARNAT-2021 en las tres longitudes de onda, además de los pozos de distribución TMWP143, TMWP146 y TMWP147, y de los cárcamos de bombeo

TMWP148 y TMWP152 pertenecientes a Concepción, Centenario, Silvituc, El Chichonal y Xpujil respectivamente, y de los captadores de agua de lluvia TMWP149 y TMWP151 obtenidas de Puebla de Morelia e Ing. EEC, tomadas en temporada de lluvias-nortes, que solamente cumplen con valores permisibles en la longitud de onda 436 nm.

De los 30 sitios, solo uno cumple con los límites permisibles en las tres longitudes de onda, en temporada de lluvias-nortes mientras que en la temporada de secas no cumple con lo establecido por la NOM-001-SEMARNAT-2021.

El color verdadero en cuerpos de agua naturales está relacionado fuertemente con la materia orgánica en degradación y húmica (PROY-NMX-AA-017-SCFI-2020), la presencia del color también puede originarse por la liberación de residuos urbanos, es decir, aguas contaminadas que provienen de desinfectantes y productos de limpieza, los cuales generan una elevada absorción en ciertas longitudes de onda (Martins-Pinheiro *et al.*, 2019; Sánchez-Saez, 2013). Respecto a los captadores de agua de lluvia, el agua se encuentra susceptible a diversas fuentes de contaminación, que, al mezclarse con agentes contaminantes se deteriora y aumenta su turbiedad, color y carga bacteriológica (Benavides y Silvana, 2017).

#### 3.4.2.3 ALCALINIDAD

En el Tramo 4 Este, los valores obtenidos coinciden con lo reportado por Leal-Bautista *et al.* (2011) y Gutiérrez-Reveles (2022), en donde obtienen alcalinidad que va de los 4.15 a los 6.47 meq  $\text{HCO}_3^-/\text{l}$ , mientras que en este estudio se obtuvieron alcalinidades que van de los 0.44 hasta los 7.16 meq  $\text{HCO}_3^-/\text{l}$ , el resultado con alcalinidad más baja fue en el pozo artesiano de Tres Marías (TMWP132) en temporada de secas y el resultado más alto de alcalinidad corresponde al pozo cultivo en Leona Vicario en temporada de lluvias-nortes, en temporada de secas también obtuvo el resultado más alto del tramo.

En el Tramo 4 Oeste, Morales (2021) reporta valores de alcalinidad de 2.70 meq  $\text{HCO}_3^-/\text{l}$ , en este estudio se detectaron valores más altos, en temporada de secas con valores que van desde los 5.51 a los 6.95 meq  $\text{HCO}_3^-/\text{l}$ , mientras que en temporada de lluvias-nortes se obtuvieron resultados que van de los 3.62 a los 6.76 meq  $\text{HCO}_3^-/\text{l}$ . El resultado más bajo se obtuvo en el pozo de distribución en Tinum (TMWP153) en temporada de lluvias-nortes, mientras que el resultado más alto fue en el pozo de distribución en Tesoco (TMWP160) en temporada de secas, en temporada de lluvias-nortes también obtuvo el resultado más alto del tramo.

Dentro del Tramo 7, coincidiendo con lo reportado por Ortiz-Flores *et al.* (2019), en donde registran valores de alcalinidad que van de los 4.44 a los 6.18 meq  $\text{HCO}_3^-/\text{l}$ . Mientras que en este

estudio se reportan valores que van desde los 0.73 hasta los 6.63 meq  $\text{HCO}_3^-/\text{l}$ , el resultado de alcalinidad más bajo fue en el captador de agua de lluvia en Ing. EEC (TMWP151) en temporada de secas y el resultado más alto fue del pozo de distribución de Concepción (TMWP143) en temporada de lluvias-nortes.

Una de las principales fuentes de enriquecimiento del agua subterránea (debido a la geología de la península de Yucatán) es la disolución de las rocas carbonatadas, que la enriquecen con minerales y aumentan la alcalinidad, dureza y pH (Villegas-Mendoza *et al.*, 2020).

#### 3.4.2.4 FORMAS DEL NITRÓGENO ( $\text{N-NH}_4^+$ , $\text{N-NO}_2^-$ Y $\text{N-NO}_3^-$ )

Los límites permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 para las formas del nitrógeno son 0.5 mg/l para nitrógeno de amonio, 0.9 mg/l para nitrógeno de nitritos y 11 mg/l para nitrógeno de nitratos.

Dentro del Tramo 4 Este, las concentraciones obtenidas en todas las formas del nitrógeno fueron similares a las reportadas en otros estudios, en donde el nitrógeno de amonio oscila entre los 0.02 a 0.13 mg/l, el nitrógeno de nitrito entre los 0.03 a los 1.50 mg/l y el nitrógeno de nitrato entre los 0.01 a los 3.25 mg/l (Leal-Bautista *et al.*, 2011; Gutiérrez-Reveles, 2022; Torres y Valenzuela, 2023).

Para el Tramo 4 Oeste se tienen concentraciones que coinciden con los resultados de Cervantes *et al.* (2021) quienes reportan rangos de 0.73 mg  $\text{N-NH}_4^+/\text{l}$  y de 0.004 mg  $\text{N-NO}_2^-/\text{l}$ , exceptuando los valores de nitrógeno de nitratos en donde mencionan que sus resultados fueron elevados obteniendo concentraciones hasta de 9.00 y 9.10 mg  $\text{N-NO}_3^-/\text{l}$ , que no superan el límite permisible que establece la norma; a diferencia de este estudio en donde se obtuvieron resultados que están por encima del límite permitido en nitrógeno de nitratos, similares a los obtenidos por Marín *et al.* (2004) quienes reportan concentraciones que van de los 45.01 a los 96.15 mg  $\text{N-NO}_3^-/\text{l}$  en Tinum y Uayma, de donde son los resultados de TMWP153 y TMWP154 respectivamente, de las que se obtuvieron valores que van de los 4.64 a los 15.05 mg  $\text{N-NO}_3^-/\text{l}$ ; mientras que para Valladolid reportan concentraciones que van de los 2.57 a los 25.00 mg  $\text{N-NO}_3^-/\text{l}$  que, a diferencia de este estudio, solamente tres resultados son los que entran en este rango los cuales pertenecen a localidades que están muy cercanas entre ellas, a diferencia de los demás que están al norte y este del municipio, el pozo artesiano en Yalcobá (TMWP157) fue el que obtuvo una mayor concentración de nitrógeno de nitratos con 32.79 y 30.96 mg/l en temporada de lluvias-nortes y secas respectivamente. Los pozos artesianos en Popolá y Uayma (TMWP156 y TMWP154) en temporada de lluvias-nortes y secas, respectivamente, muestran concentraciones de nitrógeno de nitritos de 0.27 y 0.67 mg/l en su respectivo orden, pertenecientes al Tramo 4 Oeste, siendo

una zona de uso de suelo agrícola, lo que permite filtración de agroquímicos y estiércol al acuífero perjudicando la calidad del agua subterránea en estos sitios (Smith *et al.*, 2020). La aplicación de insecticidas para controlar plagas en áreas agrícolas, domésticas y de jardinería, sin una supervisión adecuada de la cantidad utilizada y una disposición inapropiada de los residuos, son posibles causas de contaminación (Gíacomán-Vallejos *et al.*, 2017).

En el Tramo 7, Benítez *et al.* (2011) reportan concentraciones que van de 0 a los 0.16 mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/l, de 0 a los 0.01 mg N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l y de los 3.34 a los 6.66 mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l, lo que coincide con los valores obtenidos en este estudio, excluyendo un pozo de distribución en Concepción (TMWP143) en donde se obtuvieron 1.19 mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/l y 14.13 mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l en temporada de lluvias-nortes superando los límites permisibles que establece la NOM-127-SSA1-2021 para nitrógeno de amonio y nitratos, lo que coincide con lo reportado por Ortiz-Flores *et al.* (2019), quienes obtienen concentraciones de nitrógeno de nitratos de hasta 62.53 mg/l en esta zona de estudio. El pozo de distribución en Concepción (TMWP143) en temporada de lluvias-nortes es el único en superar el límite permisible de nitrógeno de amonio con una concentración de 1.19 mg/l, la presencia elevada de nitrógeno de amonio en pozos de agua potable es un indicador del impacto antropogénico, como la filtración de los lixiviados de los vertederos o la práctica agrícola, además de que puede ser resultado de la descomposición de material orgánico natural en agua subterránea (Lingle, 2013).

La especie de nitrógeno que predomina en los resultados es el nitrógeno de nitrato en cada uno de los tramos estudiados, obteniendo además valores que sobrepasan el límite permisible (NOM-127-SSA1-2021) como el pozo de distribución en Concepción (TMWP143) en temporada de lluvias-nortes mostrando una concentración de 14.13 mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l ubicado en el Tramo 7 y algunos resultados del Tramo 4 Oeste en donde se tienen concentraciones que fluctúan de los 11.35 a los 32.79 mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l. Los tramos 4 Este y 4 Oeste son cercanos entre sí pero logran ser distintos en cuanto a las características del agua, las notables concentraciones altas de nitrógeno de nitratos en el Tramo 4 Oeste pueden deberse a las excretas animales y al exceso de agroquímicos, ya que es el tramo más cercano a poblaciones como Valladolid, Uayma, Tinum, Tizimín, Panabá y Sucilá con zonas ganaderas y de agricultura, lo que genera una alta concentración de nutrientes que los cultivos no pueden absorber en su totalidad, que posteriormente se filtran al agua subterránea (Menció *et al.*, 2011; Smith *et al.*, 2020).

#### 3.4.2.5 CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE DE AGUA: HIDROGEOQUÍMICA

Carmona-Esquivel (2019) reporta tipos de agua Cálcidas-Cloruradas, Clorurada-Cálcidas, Cálcidas-Bicarbonatadas y Sódicas-Cloruradas en la zona noreste de la península de Yucatán.

Las altas concentraciones de  $\text{Cl}^-$  en este estudio se pueden atribuir a la interacción agua con rocas carbonatadas del Cuaternario (Carmona-Esquivel, 2019) y a la intrusión salina, presente en gran parte del norte de la península de Yucatán (Perry *et al.*, 2002).

Con el Modelo de escalamiento multidimensional (MDS) (Figura 36) se observa que la mayoría de los resultados muestran similitud entre ellos, por lo que forman parte del grupo 5 en donde uno de los iones mayoritarios que predominan es el  $\text{Cl}^-$  (Figura 36), agrupando los resultados del tramo 4 Este (a excepción de uno), 4 Oeste, y tres resultados del Tramo 7. De igual manera, en el grupo 3 el ion predominante es el  $\text{Cl}^-$ , a diferencia del grupo 5, el grupo 3 cuenta con un solo resultado y con la concentración más alta del anión, correspondiente al Tramo 4 Este.

Por otra parte, la caracterización del agua subterránea del Tramo 7 tiene una interacción agua-roca muy importante, en donde predomina la disolución de yesos de origen marino, compuestos de sulfato de calcio, carbonatos de calcio y magnesio, altas concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  es debido a la interacción del agua con rocas evaporitas compuestas de los minerales como la calcita, dolomita, halita y yeso. La Formación más antigua es la Icaiché del Paleoceno-Eoceno, la cual se encuentra aflorando en una extensa área con lechos masivos de yeso altamente soluble, caliza, arcillas y fragmentos de sílice, en donde el yeso disuelto aparece como iones de sulfato en aguas subterráneas (Servicio Geológico Mexicano, 2005; Servicio Geológico Mexicano, 2005a; Sánchez-Sánchez *et al.*, 2015; Ortiz-Flores *et al.*, 2019; Leal-Bautista *et al.*, 2021; Perry *et al.*, 2021). Además, en el Tramo 7 se tienen minas de yeso las cuales aportan las características toxicológicas al agua hasta alcanzar el punto de saturación de yeso del agua subterránea (Sadeghiamirshahidi y Vitton, 2019; He *et al.*, 2021). Las condiciones del agua subterránea se deben principalmente a la interacción agua-roca, independientemente de la profundidad o zonas de mezcla. Los tipos de agua predominantes registrados en esta zona son las Sulfatadas-Cálcicas y Magnésicas, Bicarbonatadas-Cálcicas y Magnésicas y Cloruradas-Cálcicas (Ortiz-Flores, *et al.*, 2019). Los resultados del grupo 4 (Figura 36) tienen similitud en concentraciones del ion  $\text{SO}_4^{2-}$  en relación con los demás grupos (Figura 38), este grupo corresponde al Tramo 7.

Los resultados que corresponden a los captadores de agua de lluvia del Tramo 7 (TMWP149 y TMWP151) de la localidad Puebla de Morelia e Ing. EEC respectivamente, indican que podría haber mezcla de agua ya que predominan los iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{+2}$  en ambas temporadas (grupos 1, 2 y 4) (Figura 36). Los resultados obtenidos de las características del agua pueden deberse a la recarga que realizan las pipas con agua subterránea para abastecer a las localidades (información verbal, obtenida de los operarios) y a la interacción agua de lluvia-atmósfera, ya que el agua atmosférica suele tener concentraciones bajas de sales y un pH que tiende a ser ácido

(Zetina-Moguel *et al.*, 2018), lo anterior tiene relación con los resultados obtenidos de la conductividad eléctrica en donde se registraron valores característicos de agua de lluvia, 144.00 y 258.80  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los resultados de los captadores de agua de lluvia son relevantes ya que hasta el momento no se tienen antecedentes del agua de lluvia esta zona.

Los resultados con mayor concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  que sobrepasan el límite permisible de 400.00 mg/l, establecido por la NOM-127-SSA1-2021, son de los pozos de distribución: TMWP143 en Concepción con 635.04 mg/l, TMWP147 en Silvituc con 427.20 mg/l, y de los cárcamos de bombeo: TMWP148 en El Chichonal con 463.20 mg/l y TMWP152 en Xpujil con 482.88 mg/l, en temporada de secas.

### 3.5 CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES FISICOQUÍMICAS Y BACTERIOLÓGICAS

En las correlaciones se muestran algunos patrones, las tres longitudes de onda correspondientes al análisis de color verdadero (436 nm, 525 nm y 620 nm) muestran una muy alta y alta correlación positiva entre ellas, se mueven en la misma dirección, cuando una de las longitudes aumenta o disminuye, las otras longitudes también lo hacen.

El  $\text{N-NO}_3^-$  y el pH tienen una correlación alta negativa, los niveles altos de  $\text{N-NO}_3^-$  en el agua subterránea se deben a la descomposición de material orgánico que contiene nitrógeno, el cual se convierte en nitrógeno de amonio y después en nitrógeno de nitrato mediante un proceso llamado nitrificación, que ocurre en presencia de oxígeno en el suelo (en condiciones aerobias), especialmente en las zonas no saturadas de agua. Además, este proceso libera protones, lo que acidifica el entorno, esto explica la correlación inversa entre el  $\text{N-NO}_3^-$  y el pH, cuando aumenta la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  en el agua, el pH disminuye (Cellone *et al.*, 2018).

El  $\text{SO}_4^{2-}$ , la conductividad eléctrica y el  $\text{Ca}^{+2}$  muestran correlaciones altas positivas, el agua conduce electricidad a través de los iones disueltos que se originan de la disolución de sales, a mayor concentración de sales disueltas, se forman más iones, lo que incrementa la capacidad del agua para conducir electricidad (Solís-Castro *et al.*, 2018).

Y el  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  tienen correlaciones altas positivas, en los acuíferos costeros es común que las concentraciones de sales aumenten debido a la intrusión del agua de mar, las sales presentes en el mar están compuestas por diez elementos principales, siendo el ion  $\text{Cl}^-$  el soluto más abundante, y las sales más abundantes son las sales de  $\text{Na}^+$  ( $\text{NaCl}$ ) y de  $\text{Mg}^{+2}$  ( $\text{MgCl}_2$ ) (Davis y Wiest, 1971). Esto implica que la alta concentración de iones de  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  proviene de las sales asociadas a la intrusión del agua de mar (Cruz *et al.*, 2018).

### 3.6 INDICADORES SOCIALES

El sistema de drenaje es una infraestructura esencial para prevenir la contaminación del agua subterránea. En el Tramo 4 Este, 1,060 viviendas carecen de este sistema, lo que obliga a los residentes a desechar las aguas residuales de otro modo, la mayoría depende de sistemas sépticos cuyas descargas están próximas al nivel freático. El efluente liberado de estas tuberías inmediatamente se reintroduce al acuífero, que es utilizado como fuente de agua potable (Aguilar y De Fuentes, 2007; Kane, 2016), esto se observa en los resultados bacteriológicos en donde hay una alta presencia de *E. coli*.

En el Tramo 4 Oeste, 4,160 viviendas carecen de sistema de drenaje, el tratamiento de desechos a través de un alcantarillado es poco frecuente, ya que la mayoría suele utilizar fosas como una supuesta solución de saneamiento *in situ* en áreas donde no hay drenaje disponible (Jiménez *et al.*, 2022). Además, Valladolid cuenta con 26,999.15 hectáreas de superficie agrícola, Tinum con 4,902.78 hectáreas y Uayma con 3,308.24 hectáreas, debido al uso del suelo en esta área recurren a fertilizantes, herbicidas e insecticidas químicos, abonos naturales y herbicidas orgánicos (INEGI, 2007), por ello los resultados del Tramo 4 Oeste arrojaron altas concentraciones de nitrógeno de nitratos, que al infiltrarse al agua subterránea se movilizan, lo que facilita su transporte a largas distancias (Freeze y Cherry, 1979). Es fundamental hacer un manejo adecuado de uso del suelo para evitar contaminaciones por nitrógeno de nitratos en acuíferos con alta susceptibilidad (Hendry, 1988).

En el Tramo 7, 2,523 viviendas carecen de sistemas de drenaje para las aguas residuales y carecen de plantas de tratamiento de aguas residuales (Ortiz Flores *et al.*, 2019), aunque no se presentan muchos sitios con presencia de *E. coli* y nitrógeno de nitratos, no deja de ser preocupante que el crecimiento acelerado de la población representa una de las principales amenazas para la contaminación del acuífero debido a la ausencia de sistemas de drenaje y tratamiento de aguas residuales, así como a una disposición inadecuada de fosas sépticas, fugas en sistemas de alcantarillado, entre otros factores (Ortiz Flores *et al.*, 2019).

## CONCLUSIONES

Se llevaron a cabo análisis detallados sobre muestras de agua subterránea en varios tramos del trazo del Tren Maya, revelando diferencias significativas entre tramos y entre temporadas climáticas en diversos parámetros. Los resultados indican que las condiciones fisicoquímicas del agua subterránea, incluyendo pH, conductividad eléctrica, temperatura, alcalinidad e iones mayoritarios, varían entre tramos y muestran características distintivas.

La predominancia de ciertos iones sugiere interacciones con diferentes tipos de rocas características de las zonas en los tramos estudiados, con implicaciones en la calidad del agua en algunas muestras del Tramo 7 por sus altas concentraciones de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Las características de las muestras pertenecientes a los captadores de agua de lluvia muestran diferencias entre ellas, lo que lleva a la conclusión que un sitio tiene mezcla de agua de lluvia con agua subterránea y el otro sitio solamente contiene agua de lluvia.

El análisis de correlación manifestó 64 correlaciones significativas entre las variables de color verdadero (436 nm, 525 nm y 620 nm),  $\text{N-NO}_3^-$ , pH,  $\text{SO}_4^{2-}$ , conductividad eléctrica,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ , debido a la descomposición de material orgánico, disolución de sales y la intrusión del agua de mar.

La presencia de *E. coli* es preocupante en algunos sitios, especialmente los que se encuentran en el Tramo 4 Este el cual cuenta con un mayor porcentaje de sitios que exceden los límites permisibles de *E. coli* establecidos por la NOM-127-SSA1-2021. En cuanto al color verdadero, los tramos evidenciaron en la mayoría de sus muestras valores que superaron los límites permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021. La especie de nitrógeno que predomina en las muestras es el nitrógeno de nitrato en cada uno de los tramos estudiados especialmente en el Tramo 4 Oeste, en donde se encontraron concentraciones elevadas de hasta 32.79 mg  $\text{N-NO}_3^-/\text{l}$ , siendo hasta 2.98 veces más alto que lo establecido por la NOM-127-SSA1-2021 (11 mg  $\text{N-NO}_3^-/\text{l}$ ), lo que plantea preocupaciones sobre la calidad del agua para uso y consumo humano.

Los resultados revelan que ninguno de los tramos estudiados cumple con los estándares que establece la normativa para uso y consumo humano. Además, el Tramo 4 Este es motivo de preocupación debido a las altas concentraciones de *E. coli* detectadas en la mayoría de los sitios. En cuanto al Tramo 4 Oeste, se encontraron las concentraciones más elevadas de nitrógeno de nitratos a comparación de los tramos restantes, lo que indica una preocupación adicional sobre la calidad del agua en esta área. Esto resalta la importancia de abordar las deficiencias en los

sistemas de drenaje y el tratamiento de aguas residuales en estos tramos específicos para mitigar la contaminación al acuífero debido al crecimiento poblacional y los riesgos para la salud pública, y de esta manera garantizar la calidad del agua subterránea en la región, dada la importancia del abastecimiento de agua subterránea para la población en la península de Yucatán.

Este estudio evalúa las condiciones y características del agua de abastecimiento para uso y consumo humano y los indicadores sociales de las poblaciones cercanas al trazo del megaproyecto Tren Maya antes de su ejecución, lo que permite tener puntos de referencia para evaluar el impacto que pueda tener el megaproyecto Tren Maya en el agua subterránea y las poblaciones circundantes de la península de Yucatán a largo plazo.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABC Mundial. (2024). El turismo en Florida disminuyó ligeramente en 2023 en comparación con el año anterior. <https://abcmundial.com/2024/02/19/eeuu/turismo/el-turismo-en-florida-disminuyo-ligeramente-en-2023-en-comparacion-con-el-ano-anterior>
- Aguilar, J. A. Z., Díaz, O. L. C., Ignacio, E. C., y Rosado, C. A. C. (2021). Pueblo Mágico de Valladolid. *Revista GEON* Vol, 5(2). DOI:10.1177/0956247807076918.
- Aguilar, M. D., y De Fuentes, A. G. (2007). Barriers to achieving to water and sanitation-related Millennium Development goals in Cancun, Mexico at the beginning of the twenty-first century. *Environment and Urbanization* 19: 243-260. <https://doi.org/10.22579/23463910.307>.
- Aguirre, L. V. (1986). Aplicación de principios geoquímicos en la hidrología kárstica de la península de Yucatán. *Tecnología y ciencias del agua*, 21-29.
- Aguirre, L. V., y Ayala, A. O. (1992). Provincias hidrogeológicas de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 36-55.
- Albero, D. S., Calderón, M. D., Calvo, M. T., Gloaguen, E. M. (2011). Parte II: patrimonio cultural del municipio de Calvià. Volumen II. ResearchGate, pág. 489-502.
- Alcocer, J., Lugo, A., Marín, L. E., y Escobar, E. (1998). Hydrochemistry of waters from five cenotes and evaluation of their suitability for drinking-water supplies, northeastern Yucatan, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 6, 293-301.
- Alvarez, M. (1961). Provincias fisiográficas de la República Mexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 24(2), 3-20.
- Árcega Santillán, I. (2010). Caracterización hidrogeoquímica del acuífero del valle de Villa de Hidalgo, San Luis Potosí, México.
- Ávila de Navia, S. L., Estupiñán-Torres, S. M., & Díaz González, L. (2016). Calidad bacteriológica del agua Vereda El Charco, San Miguel de Sema, Boyacá-Colombia. *Nova*, 14(25), 139-145.
- Ávila, J. G. P., y Sansores, S. A. C. (2018). Hydrogeological Characteristics, Water Availability and Quality in Yucatán, Mexico. *The Quest for Jatropha Biodiesel and Sustainability in Yucatan*, 131.

- Ávila, J. P., Sansores, A. C., y Ceballos, R. P. (2004). Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. *Ingeniería*, 8(2), 165-179.
- Ávila, J. P., y Sansores, A. C. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. *Ingeniería*, 7(2), 47-54.
- Back, W., y Lesser, J. M. (1981). Chemical constraints of groundwater management in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Journal of Hydrology*, 51(1-4), 119-130.
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R. N., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., y Merediz-Alonso, G. (2011) Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeol J* 19(3):507–524. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0699-5>
- Benavides, G., y Silvana, M. (2017). Evaluación de la calidad de agua en sistemas familiares de geomembrana para almacenamiento de agua lluvia. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras.
- Benítez, J. A., Lara-Flores, M., Amábilis, L., Ben-Arie, J., Vidal-Maldonado, J. A., Cen-Poot, B. T., y Sonda-Santos, K. (2011). An assessment of water quality (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, TP, SO<sub>4</sub>, coliform bacteria and heavy metals) of the main water supplies in the state of Campeche. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(2), 187-197.
- Bower, C. E., y Holm-Hansen, T. (1980) A salicylate-hypochlorite method for determining ammonia in seawater. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37: 794-798.
- Burga, D. M. (2011). Metodología de estudios de línea de base. *Pensamiento crítico*, 15, 061-082.
- Butterlin, J., y Bonet, F. (1960). Formaciones Cenozoicas de la Parte Mexicana de la Península de Yucatán. Instituto de Geología, UNAM.
- Carmona-Esquivel, A. D. (2019). Caracterización Geoquímica del agua subterránea en el este de Quintana Roo, México. (Tesis de Maestría en Ciencias del Agua, Centro de Investigación Científica de Yucatán).
- Casagrande, G., Cucchi, F., y Zini, L. (2005). Hazard connected to railway tunnel construction in karstic area: applied geomorphological and hydrogeological surveys. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(2), 243-250.

- Cejudo, E., Acosta-González, G., y Ortega-Camacho, D. (2023). Cambios en la Calidad del Agua en Quintana Roo Haciendo Uso de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua. En Bautista, F., Ed, El karst de México; Asociación Mexicana de Estudios Sobre el Karst. Mérida, México. 74-98.
- Cellone, F. A., Córdoba, J., Pugliese, I., Carol, E. S., Butler, L., & Lamarche, L. (2018). Procesos hidroquímicos y deficiencias en la infraestructura que condicionan la calidad del agua en establecimientos tamberos del Partido de Punta Indio.
- Cervantes, G. A., Chan, C. G., Morales, N. J., y Cejudo, E. (2021). Physico-chemical quality and analysis of chlorination for water supply in Espita, Yucatan. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(1).
- Cevallos, Á. O., Mayorga, D. I. R., Arias, J. L. R., Chica, M. A. T., Loza, M. E. T., Campoverde, B. D. A. y Vinocunga, J. A. M. (2018). Megaproyectos de Infraestructura: La relación Estado-Ciudadanos. *Revista Facultad de Jurisprudencia*, (4).
- Chan Chan, R. A. (2019). Análisis de la calidad del agua (físicoquímicos y coliformes fecales) del anillo de cenotes del estado de Yucatán.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., y Savard, M. M. (2008). Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353(3-4), 294-313.
- CONAGUA, MEDIO AMBIENTE. (2022). Programa Hídrico Regional 2021-2024. Región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán. [https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/PNH/PHR\\_2021-2024\\_RHA\\_XII\\_Pen%C3%ADnsula\\_de\\_Yucat%C3%A1n.pdf](https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/PNH/PHR_2021-2024_RHA_XII_Pen%C3%ADnsula_de_Yucat%C3%A1n.pdf)
- CONAGUA. (2022). Resúmenes mensuales de temperaturas y lluvia. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- CONAGUA. (2023). Resúmenes mensuales de temperaturas y lluvia. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

- Cruz Falcón, A., Troyo Diéguez, E., Murillo Jiménez, J. M., García Hernández, J. L., y Murillo Amador, B. (2018). Familias de agua subterránea y distribución de sólidos totales disueltos en el acuífero de La Paz Baja California Sur, México. *Terra Latinoamericana*, 36(1), 39-48.
- Custodio, E., y Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea Tomo II*. Primera Edición ed. Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- Davis, S. N. y R. De Wiest. (1971). *Hidrogeología*. Ariel. Barcelona, España. ASIN: B00OF6KRTY.
- De Miguel, F. C. (1999). *Hidrogeología Aplicada*, Editorial Félix Varela, La Habana. 453 páginas.
- De Miguel-Fernández, C., y Vázquez-Taset, Y. M. (2006). Origen de los nitratos (NO<sub>3</sub>) y nitritos (NO<sub>2</sub>) y su influencia en la potabilidad de las aguas subterráneas. *Minería y Geología*, 22(3), 1-9.
- Duarte, Y. A., Bautista, F., Mendoza, M. E., y Delgado, C. (2013). Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 16(2), 243-263.
- Escolero, O., Marín, L. E., Steinich, B., Pacheco, J. A., Molina-Maldonado, A., y Anzaldo, J. M. (2005). Geochemistry of the hydrogeological reserve of Mérida, Yucatán, Mexico. *Geofísica internacional*, 44(3), 301-314.
- Famiglietti, J. S. (2014). The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 4(11), 945-948. <https://doi.org/10.1038/nclimate2425>
- FONATUR. (2022). Trazo. Tren Maya. <https://www.trenmaya.gob.mx/trazo/>
- Freeze, R. A. y Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Primera Edición ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- 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.
- Geta, J. A. L., Fornés Azcoiti, J. M., Ramos González, G., y Villarroja, F. (2009). Las aguas subterráneas: un recurso natural del subsuelo. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

- Giácoman Vallejos, G., Lizárraga Castro, I., Hernández Núñez, E., y Ponce Caballero, M. D. C. (2017). Presencia de plaguicidas en el acuífero cárstico entre los municipios de Mérida a Progreso, Yucatán, México. *Centro Azúcar*, 44(3), 1-13.
- Godoy Couchot, J. A. (2019). Modelamiento y caracterización de la intrusión salina en un acuífero costero Chile.
- González-Herrera, R. A., Sánchez y Pinto, I. A., Cervantes-Martínez, A., Osorio-Rodríguez, J. H. (2018). Calidad de agua en el acuífero de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Rev. RTP*. 69-89.
- Gran, G. (1988). Equivalence volumes in potentiometric titrations. *Analytica Chimica Acta*, 206, 111-123.
- Guía del Tren Maya. (2024). Mapas del Tren Maya. <https://guiadeltrenmaya.com/mapas-del-tren-maya/>
- Gutiérrez-Reveles, B. P. (2022). Conectividad entre la cuenca superficial y subterránea con el arrecife de la zona norte de Quintana Roo. (Tesis de Maestría en Ciencias del Agua, Centro de Investigación Científica de Yucatán).
- He, X., Yuan, T., Jiang, X., Yang, H., y Zheng, C. L. (2021). Effects of contaminated surface water and groundwater from a rare earth mining area on the biology and the physiology of Sprague-Dawley rats. *Science of the total environment*. 761, 144123.
- Hendry, J. (1988). The nitrate problem. *Water Well Journal*. Vol. 42, No. 8, pp. 4-5.
- Herrera-Silveira, J. A., Comín, F. A., y Capurro, L. (2005). Los usos y abusos de la zona costera en la Península de Yucatán.
- Hubp, J. L., Quesado, J. F. A., y Pereño, R. E. (1992). Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 10(2), 143-150.
- Hurlburt, S. (1988). *Water Well Journal*. Vol. 42, No. 8, pp. 37-42.
- INEGI. (2002a). Estudio hidrológico del estado de Quintana Roo. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2002b). Estudio hidrológico del estado de Yucatán. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

- INEGI. (2007). México en cifras. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=31#collapse-Tabulados>
- INEGI. (2020). México en cifras. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/#collapse-Resumen>
- INEGI. (2020). Subsistema de Información Demográfica y Social. [https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#datos\\_abiertos](https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#datos_abiertos)
- Jiménez, A. Y. R., Chi, L. G. P., Aguilar, L. N. P., González, J. E. G., Tejero, J. A. S., y Pacheco, R. A. G. (2022). Estudio de la contaminación del manto freático en Valladolid y sus repercusiones. In Congreso (Vol. 2, No. 1, pp. 353-359).
- Jones, W. K., y White, W. B. (2019). Karst. In Encyclopedia of caves (pp. 609-618). Academic Press.
- Kane, K. (2016). Impacts of tourism on water quality in Quintana Roo, Mexico. Northern Illinois University.
- Leal-Bautista, R. M., Hernández-Zárate, G., Jaime, N. A. M., Cuevas, G. R., y Velázquez, G. O. (2011). Pathogens and pharmaceuticals pollutants as indicators of contamination at the northeastern aquifer of Quintana Roo. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 13, 211-219.
- Leal-Bautista, R. M., Perry, E. C., Alvarado-Flores, J., Alzate-Gavira, L., Domínguez-Maldonado, J. A., y Tapia-Tussell, R. (2021). Karst drainage of lake Chakanbacán and its relation to Icaiche Formation. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 73(1).
- Lingle, D. (2013). Origin of high levels of ammonium in groundwater, Ottawa County, Michigan.
- López, E. (1973). Estudio Geológico de la península de Yucatán. Geología de México, 24-76.
- López, G. A. G. (2001). Las caras del agua subterránea (Vol. 1). IGME.
- Lugo, J., Quesado, J. F. A., y Pereño, R. E. (1992). Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán. Revista mexicana de ciencias geológicas, 10(2), 143-150.
- Manrique, C. E., Quintanilla, A. G., Gil, A. M., Santillán, Á. L., Díaz, R. P., García, C. R., y Jazmín, S. A. (2020). Perspectiva de los territorios del norte de la península de Yucatán de cara al Tren Maya: una visión integral de sus condiciones socioeconómicas, socioambientales y socioculturales al 2019.

- Marín Marín, A. I., Zizumbo Villarreal, L., y Hernández Lara, O. G. (2022). Conflictos ambientales del turismo en Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Ayana*, 2.
- Marín, L. E., y Perry, E. C. (1994). The hydrogeology and contamination potential of northwestern Yucatan, Mexico. *Geofísica internacional*, 33(4), 619-623.
- Marín, L., Pacheco, J., y Méndez., R. (2004). Hidrogeología de la Península de Yucatán. En B. Jiménez y L. Marín (Eds.), *El agua en México vista desde la Academia* (pp. 159-176). México: Academia Mexicana de Ciencias.
- Martínez, M., y Osorio, A. (2018). Validación de un método para el análisis de color real en agua. *Revista de la Facultad de Ciencias, Rev. Fac. Cienc. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*. Páginas 143 a 155. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v7n1.68086>
- Martins Pinheiro, A., Salla, M. R., y Bolanos Rojas, M. L. (2019). Tratamiento de aguas residuales provenientes de industria de productos de limpieza y desinfectantes por ozonización convencional y catalítica. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 27(2), 223-235.
- Massé Magaña, M. V., y Guzmán Hernández, C. (2015). El Estado y los megaproyectos turísticos. El caso de Cabo Pulmo, Baja California Sur, México.
- Menció, A., Boy, M., y Mas-Pla, J. (2011). Analysis of vulnerability factors that control nitrate occurrence in natural springs (Osona Region, NE Spain). *Science of the Total Environment*, 409(16), 3049-3058.
- Moore, A., Lenczewski, M., Leal-Bautista, R. M., y Duvall, M. (2020). Groundwater microbial diversity and antibiotic resistance linked to human population density in Yucatan Peninsula, Mexico. *Can J Microbiol* 66(1):46–58. <https://doi.org/10.1139/cjm-2019-0173> (Epub 2019 Oct 17 PMID: 31622563)
- Morales, D. M. (2021). Cuantificación de contaminantes y análisis de diversidad de zooplancton en agua subterránea de la Península de Yucatán.
- Mukaka, M. M. (2012). Statistics Corner: A Guide to Appropriate Use of Correlation Coefficient in Medical Research. *Malawi Med. J.* 24, 69–71.
- Neri, R. A. O. (2019). Análisis del marco normativo en los megaproyectos: la Evaluación de Impacto Social (EVIS). *Textual*, (73), 147-178.

- Neri, R. A. O. (2021). Megaproyectos y sustentabilidad en México: definición, legislación y consecuencias: Megaprojects and sustainability in Mexico: definition, legislation and consequences. *Revista NuestrAmérica*, 9(18), 8.
- Norma Mexicana. NMX-AA-007-SCFI-2013. Análisis de Agua – Medición de la Temperatura en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas - Método de Prueba (Cancela la NMX-AA-007-SCFI-2000). México.
- Norma Mexicana. NMX-AA-017-SCFI-2021. Análisis de Agua-Medición de color verdadero en aguas naturales, residuales, residuales tratadas y marinas-Medición coeficiente de absorción espectral- Método de prueba (cancela a la NMX-AA017-1980). México.
- Norma Mexicana. NMX-AA-099-SCFI-2021. Análisis de Agua – Medición de Nitrógeno de Nitritos en Aguas Naturales, Residuales, Residuales Tratadas y Marinas – Método de Prueba (Cancela a la NMX-AA-099-SCFI-2006). México.
- Norma Mexicana. NMX-AA-186-SCFI-2021. Análisis de Agua-Enumeración de *Escherichia coli*, bacterias coliformes totales y bacterias coliformes fecales. Método del número más probable (NMP) “Enzima-Sustrato”. México.
- Norma Oficial Mexicana. (2021). NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. México.
- Norma Oficial Mexicana. (2022). NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. México.
- OPS, OMS. (1980). Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. Nitratos, nitritos y compuestos de N-nitroso. *Criterios de salud ambiental* 5. pp. 21-25.
- Ordóñez, E. (1941). Las Provincias Fisiográficas de México. *Revista Geográfica*, 1(2/3), 133-181.
- Ortiz-Flores, G., González-Hita, L., y Gutiérrez-Ojeda, C. (2019). Estudio hidrogeológico en el acuífero Xpujil en el estado de Campeche.
- Pacheco, J., Cabrera, A., y Marín, L. E. (2000). Bacteriological contamination in the karstic aquifer of Yucatán, Mexico. *Geofísica Internacional*, 39(3), 285-291.

- Parra, S. M., Valle-Levinson, A., Mariño-Tapia, I., y Enriquez, C. (2015). Salt intrusion at a submarine spring in a fringing reef lagoon. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(4), 2736-2750.
- Parsons, T.R., Y. Maita y C.M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Elmsford, N.Y.
- Pedroza, A. S., Chávez J., A. R., Trejo, R. C., y Ruiz, J. T. (2014). Sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) y bioproductividad en comunidades. *ResearchGate*, núm. 25, noviembre.
- Pérez Medina, S. (2011). Políticas públicas de combate a la pobreza en Yucatán, 1990-2006. *Gestión y política pública*, 20(2), 291-329.
- Perry, E. C., Leal-Bautista, R. M., Velázquez-Olimán, G., Sánchez-Sánchez, J. A., y Wagner, N. (2021). Aspects of the hydrogeology of southern Campeche and Quintana Roo, Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73(1).
- Perry, E., Marin, L., McClain, J., y Velazquez, G. (1995). Ring of cenotes (sinkholes), northwest Yucatan, Mexico: its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater. *Geology*, 23(1), 17-20.
- Perry, E., Paytan A., Pedersen, B., and Velazquez-Oliman, G.V. (2009). Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on stratigraphy and hydrogeology. *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V., 367(1-2), pp. 27-40. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.12.026.
- Perry, E., Velazquez-Oliman, G., y Marin, L. (2002). The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico. *International Geology Review*, 44(3), 191-221.
- Pope, K. O., Ocampo, A. C., Kinsland, G. L., y Smith, R. (1996). Surface expression of the Chicxulub crater. *Geology*, 24(6), 527-530.
- Proyecto de Norma Mexicana. (2020). PROY-NMX-AA-017-SCFI-2020. Análisis de Agua-Medición de color verdadero en aguas naturales, residuales, residuales tratadas y marinas-Medición coeficiente de absorción espectral- Método de prueba (cancelará a la NMX-AA-017-1980). México.

- Ramos, E. L. (1975). Geological summary of the Yucatan Peninsula. In *The Gulf of Mexico and the Caribbean* (pp. 257-282). Boston, MA: Springer US.
- Richards, D., y Richards, S. (2007). Overview of the geology and hydrology of coastal Quintana Roo. *AMCS Activities Newsletter*, 30, 104-108.
- Rocha, H., Cardona, A., Graniel, E., Alfaro, C., Castro, J., Rde, T., y Heise, L. (2015). Interfases de agua dulce y agua salobre en la región Mérida-Progreso, Yucatán. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(6), 89-112.
- Rowan, S. K. (2023). Estos son los diez parques temáticos más visitados del mundo. <https://forbes.es/lifestyle/296870/estos-son-los-diez-parques-tematicos-mas-visitados-del-mundo/>
- Sadeghiamirshahidi, M., y Vitton, S. J. (2019). Laboratory study of gypsum dissolution rates for an abandoned underground mine. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 52, 2053-2066.
- Sánchez-Sáez, M. G. (2013). Coagulación-floculación y separación de sólidos disueltos y suspendidos en un lixiviado estabilizado de vertedero (Tesis de maestría).
- Sánchez-Sánchez, J. A., lvarez-Legorreta, T., Pacheco-Ávila, J., González-Herrera R.A., y Carrillo-Briebiezca L. (2015). Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterneas del sur del Estado de Quintana Roo, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(1), 62-76.
- Schmitter-Soto, J. J., Comn, F. A., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., y Steinich, B. (2002). Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia*, 467(1), 215-228.
- Servicio Geológico Mexicano. (2005a). Carta Geológico-Minera, Chetumal E16-4-7, escala 1:250,000. Servicio Geológico Mexicano.
- Servicio Geológico Mexicano. (2005b). Carta Geológico-Minera, Ciudad del Carmen E15-6, escala 1:250,000. Servicio Geológico Mexicano.
- Servicio Geológico Mexicano. (2006a). Carta Geológico-Minera, Cozumel F16-11, escala 1:250,000. Servicio Geológico Mexicano.
- Servicio Geológico Mexicano. (2006b). Carta Geológico-Minera, Mérida F16-10, escala 1:250,000. Servicio Geológico Mexicano.

- Singaucho-Chasiluisa, D. P., y Vergara-Pacheco, A. P. (2021). Modelo de cosecha de agua y optimización de su uso aplicado a entornos domiciliarios rurales en la parroquia Once de Noviembre, período 2020-2021 (Bachelor's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)).
- Smith, D. N., Ortega-Camacho, D., Acosta-González, G., Leal-Bautista, R. M., Fox, W. E., y Cejudo, E. (2020). A multi-approach assessment of land use effects on groundwater quality in a karstic aquifer. *Heliyon*, 6(5).
- Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., & Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 35-46. 10.18845/tm.v31i1.3495
- Talledos Sánchez, E. (2018), "Que es un megaproyecto", *Planes geoestratégicos, secularización y resistencia en las Américas*, Macapá, Universidad Federal de Amapá, pp. 21-41.
- Tarbutck, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., y Cientificas, A. T. (2005). *Ciencias de la Tierra* (Vol. 1). Madrid: Pearson Educación.
- Torres, G. Á. (2023). Detección de secuencias que codifican enzimas productoras de cianotoxinas, su expresión y relación con las características del agua en cenotes del noreste de la Península de Yucatán (Doctoral dissertation, Centro de Investigación Científica de Yucatán).
- Torres, L. N. P., Cocom, G. A. C., y Ceh, C. G. C. (2022). Propuesta para la determinación de metales y parámetros fisicoquímicos en aguas subterráneas de Valladolid, Yucatán. In *Congreso* (Vol. 2, No. 1, pp. 103-107).
- Tóth, J. (1999). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín geológico y minero*, 111(4), 9-26
- Tulaczyk, S. M., Perry, E. C., Duller, C. E., y Villasuso, M. (1993). Influence of the Holbox fracture zone on the karst geomorphology and hydrogeology of northern Quintana Roo, Yucatan Peninsula, Mexico. In *Multidisciplinary conference on sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst* (pp. 181-188).
- U.S. Geological Survey. (2018). <https://www.usgs.gov>
- Viessman, W. J., y Lewis, G. L. (2003). *Introduction to Hydrology*. Quinta Edición ed. Florida: Pearson.

- Villasuso, M., y R. Méndez. (2000). A Conceptual Model of the Aquifer of the Yucatán Peninsula. En W. Lutz, L. Prieto, y W. Sanderson (Eds.), Population, Development, and Environment on the Yucatán Peninsula: From Ancient Maya to 2030. Vienna: International Institute for Applied Systems Analysis.
- Villegas-Mendoza, I. E., Piña-Soberanis, M., Alvillo-Rivera, A. J., Silva-Luna, C. D. y Linares-Ocampo, J. J. (2020). Remineralización de agua osmotizada mediante un contactor de calcita de flujo continuo ascendente. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (pp. 277-308). 10.24850/j-tyca-2020-03-08.
- Ward, W. C., Weidie, A. E., y Back, W. (1985). Geology and hydrogeology of the Yucatan and Quaternary geology of the northeastern Yucatan Peninsula: New Orleans, LA. New Orleans Geological Society Publications, New Orleans.
- Weidie, A. E. (1978) Lineaments of the Yucatán Peninsula and fractures of the central Quintana Roo coast. In: Field trip no. 10-Yucatan, road log and supplement to 1978 Guidebook, 1982 GSA Annual Meeting, New Orleans, LA, pp 21–25
- Weidie, A. E. (1985). Part I: geology of Yucatan platform.
- Xcaret. (2024). <https://www.xcaret.com/es/afiliados/>
- Zamora-Luria, J. C., Perera-Burgos, J. A., González-Calderón, A., Marin-Stillman, L. E., y Leal-Bautista, R. M. (2020). Control of fracture networks on a coastal karstic aquifer: a case study from northeastern Yucatán Peninsula (Mexico). Hydrogeology Journal, 28(8), 2765-2777.
- Zetina-Moguel, C., Vázquez-Montalvo, J., Ordóñez-López, E. E., Sánchez, I. A., Méndez-Novelo, R. I., y González-Herrera, R. A. (2018). Caracterización del agua destilada obtenida durante el uso de aires acondicionados. Ingeniería, 22(1), 1-8.

## ANEXOS

**Tabla 17. Número más probable, parte 1.**

**IDEXX Quanti-Tray®/2000 MPN Table (per 100ml)**

**# Small Wells Positive**

# Large Wells Positive	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0	<1	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.1	15.1	16.1	17.1	18.1	19.1	20.2	21.2	22.2	23.3	24.3
1	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.1	8.1	9.1	10.1	11.1	12.1	13.2	14.2	15.2	16.2	17.3	18.3	19.3	20.4	21.4	22.4	23.5	24.5	25.6
2	2.0	3.0	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1	9.2	10.2	11.2	12.2	13.3	14.3	15.4	16.4	17.4	18.5	19.5	20.6	21.6	22.7	23.7	24.8	25.8	26.9
3	3.1	4.1	5.1	6.1	7.2	8.2	9.2	10.3	11.3	12.4	13.4	14.5	15.5	16.5	17.6	18.6	19.7	20.8	21.8	22.9	23.9	25.0	26.1	27.1	28.2
4	4.1	5.2	6.2	7.2	8.3	9.3	10.4	11.4	12.5	13.5	14.6	15.6	16.7	17.8	18.8	19.9	21.0	22.0	23.1	24.2	25.3	26.3	27.4	28.5	29.6
5	5.2	6.3	7.3	8.4	9.4	10.5	11.5	12.6	13.7	14.7	15.8	16.9	17.9	19.0	20.1	21.2	22.2	23.3	24.4	25.5	26.6	27.7	28.8	29.9	31.0
6	6.3	7.4	8.4	9.5	10.6	11.6	12.7	13.8	14.9	16.0	17.0	18.1	19.2	20.3	21.4	22.5	23.6	24.7	25.8	26.9	28.0	29.1	30.2	31.3	32.4
7	7.5	8.5	9.6	10.7	11.8	12.8	13.9	15.0	16.1	17.2	18.3	19.4	20.5	21.6	22.7	23.8	24.9	26.0	27.1	28.3	29.4	30.5	31.6	32.8	33.9
8	8.6	9.7	10.8	11.9	13.0	14.1	15.2	16.3	17.4	18.5	19.6	20.7	21.8	22.9	24.1	25.2	26.3	27.4	28.6	29.7	30.8	32.0	33.1	34.3	35.4
9	9.8	10.9	12.0	13.1	14.2	15.3	16.4	17.6	18.7	19.8	20.9	22.0	23.2	24.3	25.4	26.6	27.7	28.9	30.0	31.2	32.3	33.5	34.6	35.8	37.0
10	11.0	12.1	13.2	14.4	15.5	16.6	17.7	18.9	20.0	21.1	22.3	23.4	24.6	25.7	26.9	28.0	29.2	30.3	31.5	32.7	33.8	35.0	36.2	37.4	38.6
11	12.2	13.4	14.5	15.6	16.8	17.9	19.1	20.2	21.4	22.5	23.7	24.8	26.0	27.2	28.3	29.5	30.7	31.9	33.0	34.2	35.4	36.6	37.8	39.0	40.2
12	13.5	14.6	15.8	16.9	18.1	19.3	20.4	21.6	22.8	23.9	25.1	26.3	27.5	28.6	29.8	31.0	32.2	33.4	34.6	35.8	37.0	38.2	39.5	40.7	41.9
13	14.8	16.0	17.1	18.3	19.5	20.6	21.8	23.0	24.2	25.4	26.6	27.8	29.0	30.2	31.4	32.6	33.8	35.0	36.2	37.5	38.7	39.9	41.2	42.4	43.6
14	16.1	17.3	18.5	19.7	20.9	22.1	23.3	24.5	25.7	26.9	28.1	29.3	30.5	31.7	33.0	34.2	35.4	36.7	37.9	39.1	40.4	41.6	42.9	44.2	45.4
15	17.5	18.7	19.9	21.1	22.3	23.5	24.7	25.9	27.2	28.4	29.6	30.9	32.1	33.3	34.6	35.8	37.1	38.4	39.6	40.9	42.2	43.4	44.7	46.0	47.3
16	18.9	20.1	21.3	22.6	23.8	25.0	26.2	27.5	28.7	30.0	31.2	32.5	33.7	35.0	36.3	37.5	38.8	40.1	41.4	42.7	44.0	45.3	46.6	47.9	49.2
17	20.3	21.6	22.8	24.1	25.3	26.6	27.8	29.1	30.3	31.6	32.9	34.1	35.4	36.7	38.0	39.3	40.6	41.9	43.2	44.5	45.9	47.2	48.5	49.8	51.2
18	21.8	23.1	24.3	25.6	26.9	28.1	29.4	30.7	32.0	33.3	34.6	35.9	37.2	38.5	39.8	41.1	42.4	43.8	45.1	46.5	47.8	49.2	50.5	51.9	53.2
19	23.3	24.6	25.9	27.2	28.5	29.8	31.1	32.4	33.7	35.0	36.3	37.6	39.0	40.3	41.6	43.0	44.3	45.7	47.1	48.4	49.8	51.2	52.6	54.0	55.4
20	24.9	26.2	27.5	28.8	30.1	31.5	32.8	34.1	35.4	36.8	38.1	39.5	40.8	42.2	43.6	44.9	46.3	47.7	49.1	50.5	51.9	53.3	54.7	56.1	57.6
21	26.5	27.9	29.2	30.5	31.8	33.2	34.5	35.9	37.3	38.6	40.0	41.4	42.8	44.1	45.5	46.9	48.4	49.8	51.2	52.6	54.1	55.5	56.9	58.4	59.9
22	28.2	29.5	30.9	32.3	33.6	35.0	36.4	37.7	39.1	40.5	41.9	43.3	44.8	46.2	47.6	49.0	50.5	51.9	53.4	54.8	56.3	57.8	59.3	60.8	62.3
23	29.9	31.3	32.7	34.1	35.5	36.8	38.3	39.7	41.1	42.5	43.9	45.4	46.8	48.3	49.7	51.2	52.7	54.2	55.6	57.1	58.6	60.2	61.7	63.2	64.7
24	31.7	33.1	34.5	35.9	37.3	38.8	40.2	41.7	43.1	44.6	46.0	47.5	49.0	50.5	52.0	53.5	55.0	56.5	58.0	59.5	61.1	62.6	64.2	65.8	67.3
25	33.6	35.0	36.4	37.9	39.3	40.8	42.2	43.7	45.2	46.7	48.2	49.7	51.2	52.7	54.3	55.8	57.3	58.9	60.5	62.0	63.6	65.2	66.8	68.4	70.0
26	35.5	36.9	38.4	39.9	41.4	42.8	44.3	45.9	47.4	48.9	50.4	52.0	53.5	55.1	56.7	58.2	59.8	61.4	63.0	64.7	66.3	67.9	69.6	71.2	72.9
27	37.4	38.9	40.4	42.0	43.5	45.0	46.5	48.1	49.6	51.2	52.8	54.4	56.0	57.6	59.2	60.8	62.4	64.1	65.7	67.4	69.1	70.8	72.5	74.2	75.9
28	39.5	41.0	42.6	44.1	45.7	47.3	48.8	50.4	52.0	53.6	55.2	56.9	58.5	60.2	61.8	63.5	65.2	66.9	68.6	70.3	72.0	73.7	75.5	77.3	79.0
29	41.7	43.2	44.8	46.4	48.0	49.6	51.2	52.8	54.5	56.1	57.8	59.5	61.2	62.9	64.6	66.3	68.0	69.8	71.5	73.3	75.1	76.9	78.7	80.5	82.4
30	43.9	45.5	47.1	48.7	50.4	52.0	53.7	55.4	57.1	58.8	60.5	62.2	64.0	65.7	67.5	69.3	71.0	72.9	74.7	76.5	78.3	80.2	82.1	84.0	85.9
31	46.2	47.9	49.5	51.2	52.9	54.6	56.3	58.1	59.8	61.6	63.3	65.1	66.9	68.7	70.5	72.4	74.2	76.1	78.0	79.9	81.8	83.7	85.7	87.6	89.6
32	48.7	50.4	52.1	53.8	55.6	57.3	59.1	60.9	62.7	64.5	66.3	68.2	70.0	71.9	73.8	75.7	77.6	79.5	81.5	83.5	85.4	87.5	89.5	91.5	93.6
33	51.2	53.0	54.8	56.5	58.3	60.2	62.0	63.8	65.7	67.6	69.5	71.4	73.3	75.2	77.2	79.2	81.2	83.2	85.2	87.3	89.3	91.4	93.6	95.7	97.8
34	53.9	55.7	57.6	59.4	61.3	63.1	65.0	67.0	68.9	70.8	72.8	74.8	76.8	78.8	80.8	82.9	85.0	87.1	89.2	91.4	93.5	95.7	97.9	100.2	102.4
35	56.8	58.6	60.5	62.4	64.4	66.3	68.3	70.3	72.3	74.3	76.3	78.4	80.5	82.6	84.7	86.9	89.1	91.3	93.5	95.7	98.0	100.3	102.6	105.0	107.3
36	59.8	61.7	63.7	65.7	67.7	69.7	71.7	73.8	75.9	78.0	80.1	82.3	84.5	86.7	88.9	91.2	93.5	95.8	98.1	100.5	102.9	105.3	107.7	110.2	112.7
37	62.9	65.0	67.0	69.1	71.2	73.3	75.4	77.6	79.8	82.0	84.2	86.5	88.8	91.1	93.4	95.8	98.2	100.6	103.1	105.6	108.1	110.7	113.3	115.9	118.6
38	66.3	68.4	70.6	72.7	74.9	77.1	79.4	81.6	83.9	86.2	88.6	91.0	93.4	95.8	98.3	100.8	103.4	105.9	108.6	111.2	113.9	116.6	119.4	122.2	125.0
39	70.0	72.2	74.4	76.7	78.9	81.3	83.6	86.0	88.4	90.9	93.4	95.9	98.4	101.0	103.6	106.3	109.0	111.8	114.6	117.4	120.3	123.2	126.1	129.2	132.2
40	73.8	76.2	78.5	80.9	83.3	85.7	88.2	90.8	93.3	95.9	98.5	101.2	103.9	106.7	109.5	112.4	115.3	118.2	121.2	124.3	127.4	130.5	133.7	137.0	140.3
41	78.0	80.5	83.0	85.5	88.0	90.6	93.3	95.9	98.7	101.4	104.3	107.1	110.0	113.0	116.0	119.1	122.2	125.4	128.7	132.0	135.4	138.8	142.3	145.9	149.5
42	82.6	85.2	87.8	90.5	93.2	96.0	98.8	101.7	104.6	107.6	110.6	113.7	116.9	120.1	123.4	126.7	130.1	133.6	137.2	140.8	144.5	148.3	152.2	156.1	160.2
43	87.6	90.4	93.2	96.0	99.0	101.9	105.0	108.1	111.2	114.5	117.8	121.1	124.6	128.1	131.7	135.4	139.1	143.0	147.0	151.0	155.2	159.4	163.8	168.2	172.8
44	93.1	96.1	99.1	102.2	105.4	108.6	111.9	115.3	118.7	122.3	125.9	129.6	133.4	137.4	141.4	145.5	149.7	154.1	158.5	163.1	167.9	172.7	177.7	182.9	188.2
45	99.3	102.5	105.8	109.2	112.6	116.2	119.8	123.6	127.4	131.4	135.4	139.6	143.9	148.3	152.9	157.6	162.4	167.4	172.6	178.0	183.5	189.2	195.1	201.2	207.5
46	106.3	109.8	113.4	117.2	121.0	125.0	129.1	133.3	137.6	142.1	146.7	151.5	156.5	161.6	167.0	172.5	178.2	184.2	190.4	196.8	203.5	210.5	217.8	225.4	233.3
47	114.3	118.3	122.4	126.6	130.9	135.4	140.1	145.0	150.0	155.3	160.7	166.4	172.3	178.5	185.0	191.8	198.9	206.4	214.2	222.4	231.0	240.0	249.5	259.5	270.0
48	123.9	128.4	133.1	137.9	143.0	148.3	153.9	159.7	165.8	172.1	178.9	186.0	193.5	201.4	209.8	218.7	228.2	238.2	248.9	260.3	272.3	285.1	298.7	313.0	328.2
49	135.5	140.8	146.4	152.3	158.5	165.0	172.0	179.3	187.2	195.6	204.6	214.3	224.7	235.9	248.1	261.3	275.5	290.9</							

Tabla 18. Número más probable, parte 2.

# Large Wells Positive	IDEXX Quanti-Tray®/2000 MPN Table (per 100ml)																							
	# Small Wells Positive																							
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
0	25.3	26.4	27.4	28.4	29.5	30.5	31.5	32.6	33.6	34.7	35.7	36.8	37.8	38.9	40.0	41.0	42.1	43.1	44.2	45.3	46.3	47.4	48.5	49.5
1	26.6	27.7	28.7	29.8	30.8	31.9	32.9	34.0	35.0	36.1	37.2	38.2	39.3	40.4	41.4	42.5	43.6	44.7	45.7	46.8	47.9	49.0	50.1	51.2
2	27.9	29.0	30.0	31.1	32.2	33.2	34.3	35.4	36.5	37.5	38.6	39.7	40.8	41.9	43.0	44.0	45.1	46.2	47.3	48.4	49.5	50.6	51.7	52.8
3	29.3	30.4	31.4	32.5	33.6	34.7	35.8	36.8	37.9	39.0	40.1	41.2	42.3	43.4	44.5	45.6	46.7	47.8	48.9	50.0	51.2	52.3	53.4	54.5
4	30.7	31.8	32.8	33.9	35.0	36.1	37.2	38.3	39.4	40.5	41.6	42.8	43.9	45.0	46.1	47.2	48.3	49.5	50.6	51.7	52.9	54.0	55.1	56.3
5	32.1	33.2	34.3	35.4	36.5	37.6	38.7	39.9	41.0	42.1	43.2	44.4	45.5	46.6	47.7	48.9	50.0	51.2	52.3	53.5	54.6	55.8	56.9	58.1
6	33.5	34.7	35.8	36.9	38.0	39.2	40.3	41.4	42.6	43.7	44.8	46.0	47.1	48.3	49.4	50.6	51.7	52.9	54.1	55.2	56.4	57.6	58.7	59.9
7	35.0	36.2	37.3	38.4	39.6	40.7	41.9	43.0	44.2	45.3	46.5	47.7	48.8	50.0	51.2	52.3	53.5	54.7	55.9	57.1	58.3	59.4	60.6	61.8
8	36.6	37.7	38.9	40.0	41.2	42.3	43.5	44.7	45.9	47.0	48.2	49.4	50.6	51.8	53.0	54.1	55.3	56.5	57.7	59.0	60.2	61.4	62.6	63.8
9	38.1	39.3	40.5	41.6	42.8	44.0	45.2	46.4	47.6	48.8	50.0	51.2	52.4	53.6	54.8	56.0	57.2	58.4	59.7	60.9	62.1	63.4	64.6	65.8
10	39.7	40.9	42.1	43.3	44.5	45.7	46.9	48.1	49.3	50.6	51.8	53.0	54.2	55.5	56.7	57.9	59.2	60.4	61.7	62.9	64.2	65.4	66.7	67.9
11	41.4	42.6	43.8	45.0	46.3	47.5	48.7	49.9	51.2	52.4	53.7	54.9	56.1	57.4	58.6	59.9	61.2	62.4	63.7	65.0	66.3	67.5	68.8	70.1
12	43.1	44.3	45.6	46.8	48.1	49.3	50.6	51.8	53.1	54.3	55.6	56.8	58.1	59.4	60.7	62.0	63.2	64.5	65.8	67.1	68.4	69.7	71.0	72.4
13	44.9	46.1	47.4	48.6	49.9	51.2	52.5	53.7	55.0	56.3	57.6	58.9	60.2	61.5	62.8	64.1	65.4	66.7	68.0	69.3	70.7	72.0	73.3	74.7
14	46.7	48.0	49.3	50.5	51.8	53.1	54.4	55.7	57.0	58.3	59.6	60.9	62.3	63.6	64.9	66.3	67.6	68.9	70.3	71.6	73.0	74.4	75.7	77.1
15	48.6	49.9	51.2	52.5	53.8	55.1	56.4	57.8	59.1	60.4	61.8	63.1	64.5	65.8	67.2	68.5	69.9	71.3	72.6	74.0	75.4	76.8	78.2	79.6
16	50.5	51.8	53.2	54.5	55.8	57.2	58.5	59.9	61.2	62.6	64.0	65.3	66.7	68.1	69.5	70.9	72.3	73.7	75.1	76.5	77.9	79.3	80.8	82.2
17	52.5	53.9	55.2	56.6	58.0	59.3	60.7	62.1	63.5	64.9	66.3	67.7	69.1	70.5	71.9	73.3	74.8	76.2	77.6	79.1	80.5	82.0	83.5	84.9
18	54.6	56.0	57.4	58.8	60.2	61.6	63.0	64.4	65.8	67.2	68.6	70.1	71.5	73.0	74.4	75.9	77.3	78.8	80.3	81.8	83.3	84.8	86.3	87.8
19	56.8	58.2	59.6	61.0	62.4	63.9	65.3	66.8	68.2	69.7	71.1	72.6	74.1	75.5	77.0	78.5	80.0	81.5	83.1	84.6	86.1	87.6	89.2	90.7
20	59.0	60.4	61.9	63.3	64.8	66.3	67.7	69.2	70.7	72.2	73.7	75.2	76.7	78.2	79.8	81.3	82.8	84.4	85.9	87.5	89.1	90.7	92.2	93.8
21	61.3	62.8	64.3	65.8	67.3	68.8	70.3	71.8	73.3	74.9	76.4	77.9	79.5	81.1	82.6	84.2	85.8	87.4	89.0	90.6	92.2	93.8	95.4	97.1
22	63.8	65.3	66.8	68.3	69.8	71.4	72.9	74.5	76.1	77.6	79.2	80.8	82.4	84.0	85.6	87.2	88.9	90.5	92.1	93.8	95.5	97.1	98.8	100.5
23	66.3	67.8	69.4	71.0	72.5	74.1	75.7	77.3	78.9	80.5	82.2	83.8	85.4	87.1	88.7	90.4	92.1	93.8	95.5	97.2	98.9	100.6	102.4	104.1
24	68.9	70.5	72.1	73.7	75.3	77.0	78.6	80.3	81.9	83.6	85.2	86.9	88.6	90.3	92.0	93.8	95.5	97.2	99.0	100.7	102.5	104.3	106.1	107.9
25	71.7	73.3	75.0	76.6	78.3	80.0	81.7	83.3	85.1	86.8	88.5	90.2	92.0	93.7	95.5	97.3	99.1	100.9	102.7	104.5	106.3	108.2	110.0	111.9
26	74.6	76.3	78.0	79.7	81.4	83.1	84.8	86.6	88.4	90.1	91.9	93.7	95.5	97.3	99.2	101.0	102.9	104.7	106.6	108.5	110.4	112.3	114.2	116.2
27	77.6	79.4	81.1	82.9	84.6	86.4	88.2	90.0	91.9	93.7	95.5	97.4	99.3	101.2	103.1	105.0	106.9	108.8	110.8	112.7	114.7	116.7	118.7	120.7
28	80.8	82.6	84.4	86.3	88.1	89.9	91.8	93.7	95.6	97.5	99.4	101.3	103.3	105.2	107.2	109.2	111.2	113.2	115.2	117.3	119.3	121.4	123.5	125.6
29	84.2	86.1	87.9	89.8	91.7	93.7	95.6	97.5	99.5	101.5	103.5	105.5	107.5	109.5	111.6	113.7	115.7	117.8	120.0	122.1	124.2	126.4	128.6	130.8
30	87.8	89.7	91.7	93.6	95.6	97.6	99.6	101.6	103.7	105.7	107.8	109.9	112.0	114.2	116.3	118.5	120.6	122.8	125.1	127.3	129.5	131.8	134.1	136.4
31	91.6	93.6	95.6	97.7	99.7	101.8	103.9	106.0	108.2	110.3	112.5	114.7	116.9	119.1	121.4	123.6	125.9	128.2	130.5	132.9	135.3	137.7	140.1	142.5
32	95.7	97.8	99.9	102.0	104.2	106.3	108.5	110.7	113.0	115.2	117.5	119.8	122.1	124.5	126.8	129.2	131.6	134.0	136.5	139.0	141.5	144.0	146.6	149.1
33	100.0	102.2	104.4	106.6	108.9	111.2	113.5	115.8	118.2	120.5	122.9	125.4	127.8	130.3	132.8	135.3	137.8	140.4	143.0	145.6	148.3	150.9	153.7	156.4
34	104.7	107.0	109.3	111.7	114.0	116.4	118.9	121.3	123.8	126.3	128.8	131.4	134.0	136.6	139.2	141.9	144.6	147.4	150.1	152.9	155.7	158.6	161.5	164.4
35	109.7	112.2	114.6	117.1	119.6	122.2	124.7	127.3	129.9	132.6	135.3	138.0	140.8	143.6	146.4	149.2	152.1	155.0	158.0	161.0	164.0	167.1	170.2	173.3
36	115.2	117.8	120.4	123.0	125.7	128.4	131.1	133.9	136.7	139.5	142.4	145.3	148.3	151.3	154.3	157.3	160.5	163.6	166.8	170.0	173.3	176.6	179.9	183.3
37	121.3	124.0	126.8	129.6	132.4	135.3	138.2	141.2	144.2	147.3	150.3	153.5	156.7	159.9	163.1	166.5	169.8	173.2	176.7	180.2	183.7	187.3	191.0	194.7
38	127.9	130.8	133.8	136.8	139.9	143.0	146.2	149.4	152.6	155.9	159.2	162.6	166.1	169.6	173.2	176.8	180.4	184.2	188.0	191.8	195.7	199.7	203.7	207.7
39	135.3	138.5	141.7	145.0	148.3	151.7	155.1	158.6	162.1	165.7	169.4	173.1	176.9	180.7	184.7	188.7	192.7	196.8	201.0	205.3	209.6	214.0	218.5	223.0
40	143.7	147.1	150.6	154.2	157.8	161.5	165.3	169.1	173.0	177.0	181.1	185.2	189.4	193.7	198.1	202.5	207.1	211.7	216.4	221.1	226.0	231.0	236.0	241.1
41	153.2	157.0	160.9	164.8	168.9	173.0	177.2	181.5	185.8	190.3	194.8	199.5	204.2	209.1	214.0	219.1	224.2	229.4	234.8	240.2	245.8	251.5	257.2	263.1
42	164.3	168.6	172.9	177.3	181.9	186.5	191.3	196.1	201.1	206.2	211.4	216.7	222.2	227.7	233.4	239.2	245.2	251.3	257.5	263.8	270.3	276.9	283.6	290.5
43	177.5	182.3	187.3	192.4	197.6	202.9	208.4	214.0	219.8	225.8	231.8	238.1	244.5	251.0	257.7	264.6	271.7	278.9	286.3	293.8	301.5	309.4	317.4	325.7
44	193.6	199.3	205.1	211.0	217.2	223.5	230.0	236.7	243.6	250.8	258.1	265.6	273.3	281.2	289.4	297.8	306.3	315.1	324.1	333.3	342.8	352.4	362.3	372.4
45	214.1	220.9	227.9	235.2	242.7	250.4	258.4	266.7	275.3	284.1	293.3	302.6	312.3	322.3	332.5	343.0	353.8	364.9	376.2	387.9	399.8	412.0	424.5	437.4
46	241.5	250.0	258.9	268.2	277.8	287.8	298.1	308.8	319.9	331.4	343.3	355.5	368.1	381.1	394.5	408.3	422.5	437.1	452.0	467.4	483.3	499.6	516.3	533.5
47	280.9	292.4	304.4	316.9	330.0	343.6	357.8	372.5	387.7	403.4	419.8	436.6	454.1	472.1	490.7	509.9	529.8	550.4	571.7	593.8	616.7	640.5	665.3	691.0
48	344.1	360.9	378.4	396.8	416.0	436.0	456.9	478.6	501.2	524.7	549.3	574.8	601.5	629.4	658.6	689.3	721.5	755.6	791.5	829.7	870.4	913.9	960.6	1011.2
49	461.1	488.4	517.2	547.5	579.4	613.1	648.8	686.7	727.0	770.1	816.4	866.4	920.8	980.4	1046.2	1119.9	1203.3	1299.7	1413.6	1553.1	1732.9	1986.3	2419.6	>2419.6

09-63235-01

**Tabla 19.** Promedios de los parámetros in situ de los sitios, muestreadas en temporada de lluvias-nortes 2022 y secas 2023.

TRAMOS	ID	LLUVIAS-NORTES			SECAS		
		pH	Conductividad eléctrica (μS/cm)	Temperatura (°C)	pH	Conductividad eléctrica (μS/cm)	Temperatura (°C)
Tramo 4 Este	TMWP126	7.64	490.10	27.24	7.05	773.15	25.61
	TMWP129	7.95	530.50	28.57	7.83	617.75	29.09
	TMWP130	7.59	387.60	29.56	7.75	590.60	29.42
	TMWP131	7.69	535.70	30.34	7.75	587.35	28.42
	TMWP132	6.83	1092.40	31.38	6.86	1044.85	26.68
	TMWP133	7.08	1251.90	25.61	6.99	1283.40	25.55
	TMWP134	7.08	1031.30	26.57	7.14	1039.50	28.27
	TMWP135	7.84	518.10	30.73	7.94	550.30	27.47
	TMWP136	7.47	807.50	28.77	7.20	913.30	26.40
	TMWP137	7.18	1026.00	27.77	7.02	1012.95	26.91

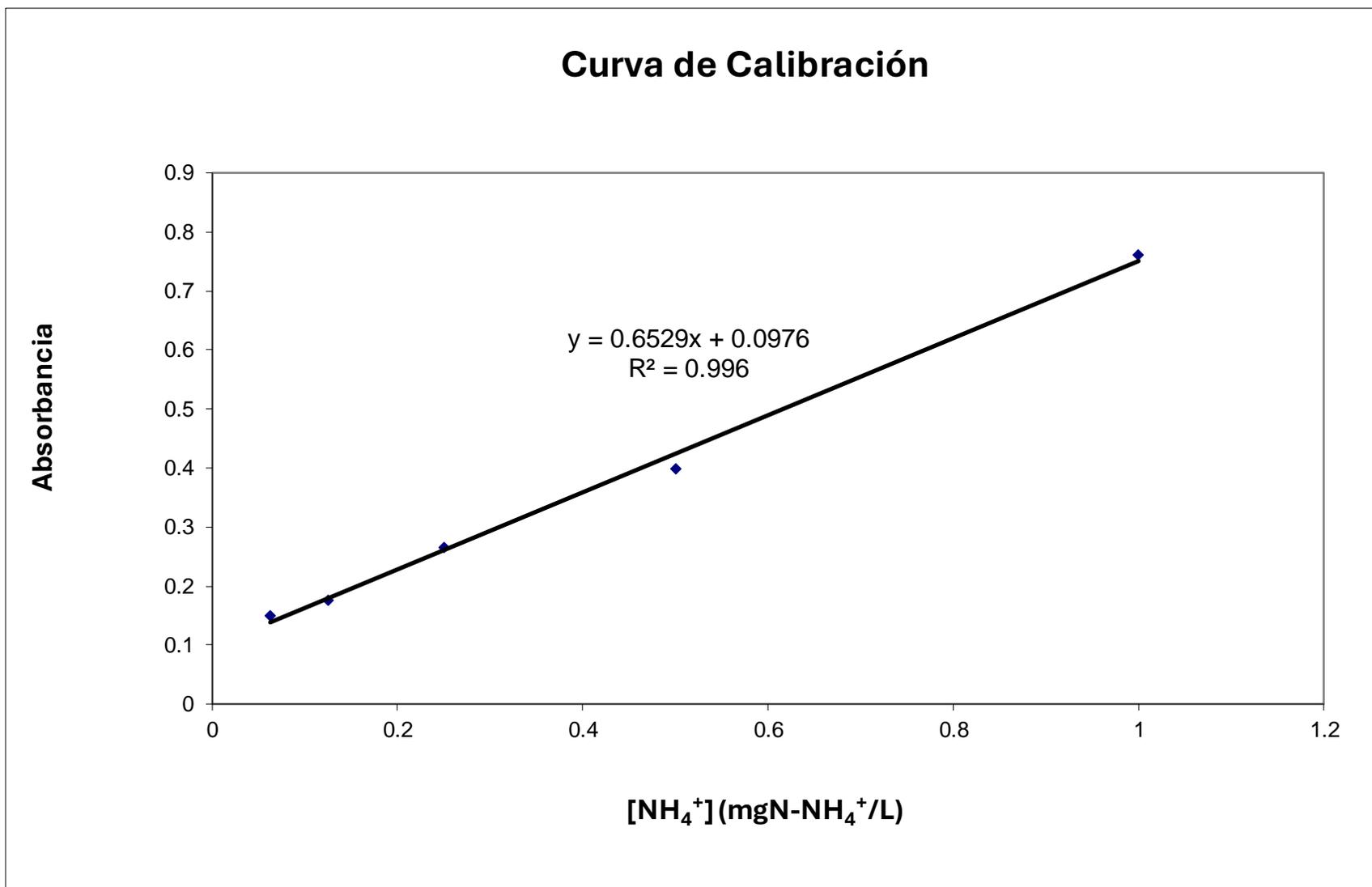
<b>Tramo 4 Oeste</b>	TMWP153	7.03	1210.13	27.64	6.82	1197.15	26.80
	TMWP154	6.93	1049.00	28.89	6.79	1041.75	28.65
	TMWP155	7.15	890.90	26.99	7.03	890.10	28.96
	TMWP156	7.47	596.53	25.95	6.82	1469.35	28.26
	TMWP157	6.66	1488.73	27.56	6.79	1459.10	27.40
	TMWP158	7.33	838.76	25.21	7.31	829.45	24.06
	TMWP159	6.85	848.60	28.06	6.95	848.90	28.95
	TMWP160	6.91	1190.70	26.73	6.68	1223.65	27.81
	TMWP161	6.89	1159.66	27.16	6.75	1131.85	28.50
	TMWP162	6.91	932.06	26.28	7.11	927.60	28.47
<b>Tramo 7</b>	TMWP143	6.67	1465.00	27.76	6.76	2495.30	28.68
	TMWP144	7.07	1105.10	27.97	6.76	2026.00	35.42
	TMWP145	7.07	1117.93	35.30	7.04	2011.15	29.04
	TMWP146	6.84	812.10	28.94	7.08	1455.45	27.68
	TMWP147	6.63	736.97	27.46	7.03	1874.05	30.35
	TMWP148	7.72	737.30	28.59	7.55	1862.40	29.36
	TMWP149	7.67	750.80	27.14	7.44	1166.80	26.93

	TMWP150	7.62	730.30	28.56	7.43	1686.90	31.19
	TMWP151	7.42	144.00	27.27	7.37	258.80	26.56
	TMWP152	7.37	713.90	30.77	7.38	1854.75	32.55

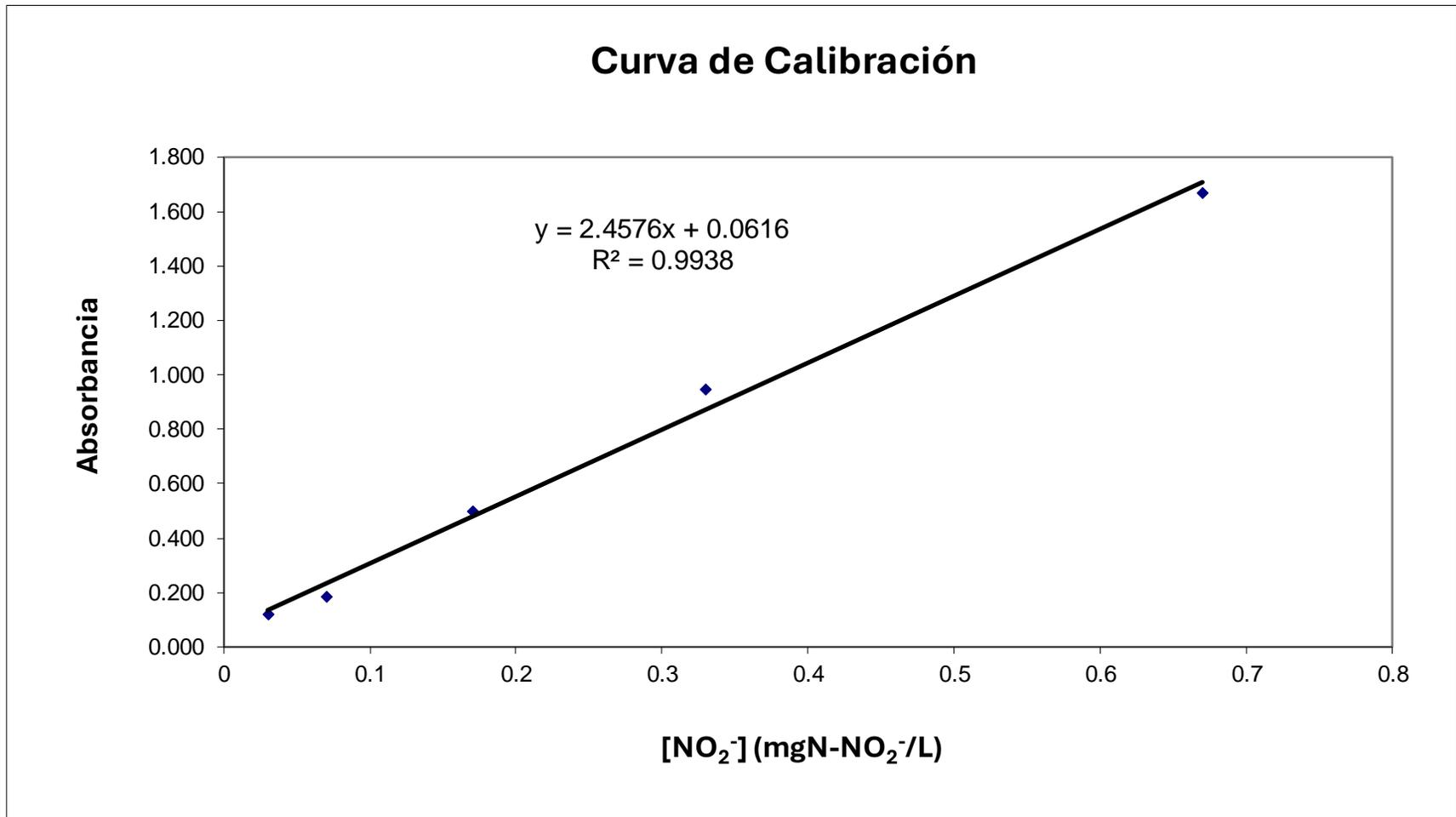
**Tabla 20.** Nombres, posición geográfica y altitud de los sitios muestreados.

TRAMO	ID	MUNICIPIO	LOCALIDAD	FUENTE DE ABASTECIMIENTO	NORTE (UTM)	ESTE (UTM)	ELEVACIÓN (M)
<b>Tramo 4 Este</b>	TMWP126	Lázaro Cárdenas	Agua Azul	Cenote	2306402.16	466103.927	22.75
	TMWP129	Lázaro Cárdenas	Juárez	Cenote Nak Tunich	2303944.22	466161.248	31.829
	TMWP130	Lázaro Cárdenas	Juárez	Cenote	2301322.42	465373.727	14.884
	TMWP131	Lázaro Cárdenas	Agua Azul	Cenote Campamento	2305789.59	467090.199	26.336
	TMWP132	Lázaro Cárdenas	Tres Marías	Pozo artesiano	2305489.25	476359.493	24.659
	TMWP133	Puerto Morelos	Puerto Morelos-Leona Vicario	Cenote Verde Lucero	2306706.15	493140.364	14.912
	TMWP134	Lázaro Cárdenas	El Tintal	Pozo de distribución	2310385.12	451625.237	22.175
	TMWP135	Puerto Morelos	Leona Vicario	Cenote Corchalito	2317978.49	471521.025	15.658
	TMWP136	Puerto Morelos	Leona Vicario	Cenote	2321469.72	478779.652	19.934
	TMWP137	Puerto Morelos	Leona Vicario	Pozo Cultivo	2319885.33	480386.803	26.886
<b>Tramo 4 Oeste</b>	TMWP153	Tinum	Tinum	Pozo de distribución	2296920.02	355433.949	46.781
	TMWP154	Uayma	Uayma	Pozo artesiano	2291652.3	363212.989	41.761
	TMWP155	Valladolid	Pixoy	Pozo artesiano	2291179.42	368492.297	40.899

	TMWP156	Valladolid	Popolá	Pozo artesiano	2293008.53	371592.321	40.573
	TMWP157	Valladolid	Yalcobá	Pozo artesiano	2299419.75	391987.194	34.028
	TMWP158	Valladolid	Tikuch	Cenote Chukum	2291590.43	387963.401	33.817
	TMWP159	Valladolid	Yohalal Tres	Pozo de distribución	2297010.42	376923.687	38.738
	TMWP160	Valladolid	Tesoco	Pozo de distribución	2291884.82	379800.917	36.617
	TMWP161	Valladolid	Tahmuy	Pozo de distribución	2295945.34	381078.623	43.408
	TMWP162	Valladolid	Zodzilchén	Pozo de distribución	2294610.1	382920.752	34.413
<b>Tramo 7</b>	TMWP143	Calakmul	Concepción	Pozo de distribución	2061671.15	169243.522	97.526
	TMWP144	Calakmul	Xbonil	Pozo de distribución	2063853.63	165351.338	79.119
	TMWP145	Calakmul	Santa Lucía	Pozo de distribución	2063697.87	164536.97	82.818
	TMWP146	Escárcega	Centenario	Pozo de distribución	2065521.34	153294.35	94.261
	TMWP147	Escárcega	Silvituc	Pozo de distribución	2065162.26	156201.55	72.056
	TMWP148	Calakmul	El Chichonal	Cárcamo de bombeo	2050432.45	230518	238.433
	TMWP149	Calakmul	Puebla de Morelia	Captador de agua de lluvia	2050158.19	217301.765	199.39
	TMWP150	Calakmul	Conhuás	Cárcamo de bombeo	2052501.36	198069.447	166.446
	TMWP151	Calakmul	Ingeniero Eugenio Echeverría Castellot (Ing. EEC)	Captador de agua de lluvia	2050991.16	225665.611	222.66
	TMWP152	Calakmul	Xpujil	Cárcamo de bombeo	2048041.27	247739.704	254.235



**Figura 43.** Curva de calibración para análisis de amonio.



**Figura 44.** Curva de calibración para análisis de nitritos.

**Tabla 21.** Resultados de color verdadero de los puntos muestreados en temporada de lluvias-nortes 2022 y secas 2023.

TRAMO	ID	LLUVIAS-NORTES				SECAS			
		pH	Promedio final $\alpha$ (m <sup>-1</sup> )			pH	Promedio final $\alpha$ (m <sup>-1</sup> )		
			436 nm	525 nm	620 nm		436 nm	525 nm	620 nm
<b>Tramo 4 Este</b>	TMWP126	7.78	5.3	5.3	5.3	7.73	12.8	11.8	11.5
	TMWP129	7.98	53.3	50.0	48.5	7.96	9.8	9.5	8.0
	TMWP130	7.80	18.3	17.0	18.3	7.94	15.3	15.0	13.0
	TMWP131	7.84	28.3	25.3	24.3	8.07	12.0	12.0	10.0
	TMWP132	7.75	25.5	22.3	18.5	6.00	14.5	14.5	11.5
	TMWP133	7.65	45.0	39.8	36.8	7.62	12.5	12.8	9.3
	TMWP134	7.80	131.8	93.8	69.5	7.72	26.0	26.3	30.5
	TMWP135	7.86	43.8	39.5	35.3	7.82	15.0	15.0	14.0
	TMWP136	7.81	13.5	16.8	17.3	7.76	13.8	14.0	11.0
	TMWP137	7.77	8.3	6.3	7.5	7.76	11.5	12.5	9.8
<b>Tramo 4 Oeste</b>	TMWP153	7.93	13.3	16.3	12.3	7.58	16.3	18.5	24.3
	TMWP154	7.97	15.3	17.5	14.3	7.52	16.5	17.8	24.5
	TMWP155	8.01	31.3	29.3	11.0	7.38	24.5	24.8	29.5
	TMWP156	8.05	29.8	34.3	30.8	7.35	20.5	20.5	25.8
	TMWP157	8.09	13.3	14.5	13.8	7.35	21.3	20.0	22.0
	TMWP158	8.13	16.3	17.5	12.3	7.78	24.3	22.0	24.5
	TMWP159	8.17	12.8	15.0	12.5	7.60	26.0	25.5	29.8
	TMWP160	8.21	24.3	15.0	9.5	7.45	19.5	18.0	16.8
	TMWP161	8.25	11.3	14.0	12.5	7.53	22.0	21.5	24.8

	TMWP162	8.29	17.3	11.0	7.8	8.23	24.3	22.5	25.8
<b>Tramo 7</b>	TMWP143	7.20	5.5	9.8	18.8	7.56	27.0	25.3	26.0
	TMWP144	7.50	7.5	8.5	16.3	7.54	28.5	25.3	25.8
	TMWP145	7.55	11.5	6.8	15.5	7.32	27.0	23.8	23.5
	TMWP146	7.46	2.5	12.3	16.5	7.61	22.0	19.3	17.3
	TMWP147	7.45	1.8	13.3	16.3	7.53	21.5	19.5	19.3
	TMWP148	7.98	7.0	8.3	8.5	8.02	32.5	29.8	31.5
	TMWP149	7.95	3.3	11.5	13.0	7.86	26.0	23.8	25.8
	TMWP150	7.94	3.0	3.3	2.3	7.96	27.3	25.8	27.8
	TMWP151	7.85	4.3	10.8	10.5	7.54	28.8	27.0	28.0
	TMWP152	7.89	3.0	10.5	11.3	7.84	34.5	31.5	32.8

**Tabla 22.** Resultados de alcalinidad de los puntos muestreados en temporada de lluvias-nortes 2022 y secas 2023.

TRAMO	ID	Lluvias-Nortes	Secas
		meq HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l	meq HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l
<b>Tramo 4 Este</b>	TMWP126	3.68	5.10
	TMWP129	3.66	3.26
	TMWP130	2.58	3.23
	TMWP131	3.91	3.57
	TMWP132	6.70	0.44
	TMWP133	6.24	5.52
	TMWP134	6.38	5.82
	TMWP135	3.71	3.01
	TMWP136	5.20	5.69
	TMWP137	7.16	6.15
<b>Tramo 4 Oeste</b>	TMWP153	3.62	6.11
	TMWP154	4.05	6.26
	TMWP155	5.18	5.51
	TMWP156	3.97	6.35
	TMWP157	6.02	6.01
	TMWP158	5.97	6.63
	TMWP159	6.02	6.62
	TMWP160	6.76	6.95
	TMWP161	6.23	6.80

	TMWP162	5.81	6.21
<b>Tramo 7</b>	TMWP143	6.63	4.73
	TMWP144	5.66	4.99
	TMWP145	6.11	5.89
	TMWP146	5.33	5.58
	TMWP147	4.50	5.18
	TMWP148	4.84	4.29
	TMWP149	4.19	3.07
	TMWP150	2.99	4.40
	TMWP151	4.92	0.73
	TMWP152	2.95	4.00