



**El Colegio  
de la Frontera  
Norte**

Reuso urbano de agua residual tratada: análisis de algunas  
ciudades del noreste de México

Tesis presentada por

**Lariza Fernanda González Nieto**

para obtener el grado de

**MAESTRA EN GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA**

Monterrey, N. L., México  
2022

## CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Directora de Tesis: Dra. Ana Córdova y Vázquez

Aprobada por el Jurado Examinador:

1. Dra. Patricia Rivera Castañeda, lectora interna
2. Dra. María Socorro Espino Valdés, lectora externa

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT), que por medio de ellos me concedieron los medios para acceder a realizar mis estudios de maestría y trabajo de investigación de esta tesis. De igual manera gracias al Colegio de la Frontera Norte (COLEF) y en especial agradecimiento a la Sede de Monterrey programa de Gestión Integral del Agua (MaGIA), que estuvo a mi lado guiándome para lograr culminar mis estudios, que debido a las complicaciones que se tuvieron, nunca dejaron de persistir en brindarme tiempo y conocimiento.

Muchas gracias a la Dra. Ana Córdova y Vázquez, por su tiempo, paciencia, dedicación, comprensión, apoyo y guía en esta tesis. Reconozco y valoro el tiempo y esfuerzo dedicado para la culminación de esta tesis.

A la Dra. Patricia Rivera Castañeda, lectora interna de tesis, perteneciente al Departamento de Estudios Urbanos y del Medio Ambiente, que con su paciencia y amabilidad me transmitió sus conocimientos, para poder seguir avanzando en esta investigación.

A la Dra. María Socorro Espino Valdés, lectora externa de tesis, perteneciente a la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), que me brindo su tiempo y aportaciones que enriquecieron esta elaboración de tesis. Gracias por aceptar formar parte del jurado de esta presente tesis.

Gracias a la Dra. Blanca Cecilia García Quiroz, anterior coordinadora del programa MaGIA y profesora de este mismo, la cual siempre estuvo al pendiente de sus estudiantes, involucrándose con ellos en la medida de lo posible con las limitantes que se tuvieron en pandemia, le agradezco infinitamente por escucharnos y siempre estar al tanto de nuestro ánimo y conocimiento.

Agradezco a mis compañeros que cursaron conmigo esta maestría, Luis Ricardo Sarabia Sánchez, Carlos Gerardo Lomas Arvizu, Karina Bautista Tovar, Jaime Omar Flores Gaytán y Francisco Eduardo Hernández Díaz, que a pesar de las dificultades que se nos presentaron por la distancia, siempre se busco encontrar un contacto e involucramiento de unos con otros,

gracias por su amistad y apoyo en este equipo que formamos cursando este programa, que nos dejará recuerdos y enseñanzas para toda la vida.

Y por último pero no menos importante, le agradezco a mi familia infinitamente, por siempre estar conmigo y enseñarme que rendirme nunca es una opción, que mi esfuerzo, mis desveladas y mis días más agotadores, tarde o temprano rendirá frutos. En especial quiero agradecerles a mis papás María Mirtala Nieto Buentello y José Ramon Gonzalez Rodríguez, que siempre me recuerdan lo orgullosos que están de mi día a día, que se encargan de darme esos pequeños empujones que necesito en mi camino.

Lariza Fernanda Gonzalez Nieto

## **RESUMEN**

La importancia en el tratamiento y reuso de agua es vital en zonas urbanas como el caso de las ciudades del noreste de México considerando sus contextos naturales y sociales. Este análisis retoma como base la gestión integral del agua para explicar cómo en el metabolismo circular y en la sustentabilidad de las ciudades el tratamiento y reuso son elementos fundamentales para hablar de una economía del agua circular. El objetivo de este documento es dar a conocer los factores que influyen en el reuso de aguas residuales tratadas (ART) dentro de los organismos operadores de agua y saneamiento (OOAS) por parte de los grandes usuarios en algunas ciudades del noreste del país. La estrategia metodológica efectuada para este análisis fue una revisión de la literatura sobre el tema de estudio, la construcción de una base de datos comparativa con información elemental del reuso de la zona de estudio, visitas de campo y entrevistas a actores clave del reuso en los OOAS. Uno de los principales hallazgos encontrados es que el reuso es un factor común en cuatro de las cinco ciudades analizadas; sin embargo esta práctica aún es incipiente y los factores que lo limitan son, en su mayoría, técnicos y financieros. Destaca el factor de mayor cultura e interés diversificado para el reuso en Monterrey; Monclova y Piedras Negras tienen un alto porcentaje de reuso, pero éste es monopolizado por una o dos industrias; en Saltillo y Nuevo Laredo es importante la distribución de ART por medio de pipas y su uso principal es en los sectores de industria y riego de áreas verdes.

Palabras clave: Agua residual tratada, economía circular, metabolismo circular, ciudades noreste, reuso.

## **ABSTRACT**

The importance in the treatment and reuse of water is vital in urban areas such as the case of the cities of the Northeast of Mexico. This analysis takes as a basis the integral management of water in the search for circular metabolism and the sustainability of cities, as well as the implementation of the circular economy as a key element of reuse. The objective of this document is to present the factors that influence the reuse of treated wastewater within the water and wastewater utilities (WWU) by large users in the cities of the Northeast of the country. The methodological strategy conducted for this analysis was a review of the literature on the subject of study, the construction of a comparative database with elementary information on the reuse of the study area, field visits and interviews with key actors of reuse in the WWU. Among the main findings is that reuse is common in four of the five cities analyzed, however this practice is still incipient and the factors that limit it are mostly technical and financial. Some highlights are: greater culture and diversified interest for reuse in Monterrey; Monclova and Piedras Negras have a high percentage of reuse but is monopolized by one or two industries; in Saltillo and Nuevo Laredo the distribution of treated wastewater via water trucks is prominent and its main uses are in the construction and green space irrigation sectors.

Keywords: Treated wastewater, circular economy, circular metabolism, northeast cities, reuse.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO I. MARCO CONTEXTUAL DE LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA Y SU REUSO</b>	<b>4</b>
1.1 Contexto global, nacional y regional del agua y su reuso	4
1.2 Antecedentes de la zona de estudio	10
1.2.1 Población y extensión territorial	11
1.2.2 Clima	15
1.2.3 Actividad económica	17
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL</b>	<b>23</b>
2.1 Gestión integral del agua y sustentabilidad hídrica	23
2.2 Metabolismo circular en las aguas residuales	25
2.3 Economía circular con un enfoque en aguas residuales.	28
<b>CAPÍTULO III. DISEÑO METODOLÓGICO</b>	<b>32</b>
3.1 Tipo de investigación	32
3.2 Muestreo	32
3.3 Recolección de información – Técnicas de investigación	33
3.3.1 Investigación documental: Búsqueda, recopilación y revisión de literatura	33
3.3.2 Investigación de campo: entrevistas	34
3.3.3 Dificultades en la recolección de información	35
3.4 Sistematización y análisis de la información	35
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>38</b>
4.1 Contexto de las plantas tratadoras de los sitios de estudio	38
4.2 Contexto del reuso del agua residual tratada en los sitios de estudio	44
4.3 Dificultades y Oportunidades en la instrumentación del Reuso de ART	52
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>58</b>
5.1 Conclusiones	58
5.2 Recomendaciones	62
5.2.1 Algunas preguntas para futuras investigaciones	63
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>64</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1 Situación del estrés hídrico a nivel mundial.</b>	<b>8</b>
<b>Figura 1.2 Volúmenes concesionados en algunas regiones del noreste de México.</b>	<b>11</b>
<b>Figura 1.3 Ubicación de los sitios de estudio.</b>	<b>12</b>
<b>Figura 1.4 Población y extensión territorial de los sitios de estudio.</b>	<b>16</b>
<b>Figura 1.5 Rango de temperatura promedio en los sitios de estudio.</b>	<b>17</b>
<b>Figura 1.6 Precipitación promedio en los sitios de estudio.</b>	<b>17</b>
<b>Figura 1.7 PIB de los sitios de estudio.</b>	<b>20</b>
<b>Figura 2.1 Metabolismo circular del reuso del agua residual tratada</b>	<b>27</b>
<b>Figura 2.2 Metabolismo lineal del agua residual sin tratamiento</b>	<b>28</b>
<b>Figura 2.3. Metabolismo lineal tradicional del agua residual con tratamiento</b>	<b>29</b>
<b>Figura 4.1 Línea del tiempo del comienzo del tratamiento en los sitios de estudio.</b>	<b>46</b>
<b>Figura 4.2 Línea del tiempo del comienzo del reuso en los sitios de estudio.</b>	<b>53</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1 Fuentes de agua de los sitios de estudio</b>	<b>18</b>
<b>Tabla 1.2 Actividad económica de los sitios de estudio</b>	<b>19</b>
<b>Tabla 1.3 Variables de sitios estudiados</b>	<b>21</b>
<b>Tabla 3.1 Estructura de base de datos</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 4.1 Contexto de las plantas tratadoras de los sitios de estudio</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 4.2 Reuso del agua residual tratada en los sitios de estudio</b>	<b>50</b>

## LISTADO DE SIGLAS Y SÍMBOLOS

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
AGSAL	Aguas de Saltillo
AHMSA	Altos Hornos de México
AREMA	Agua, Residuos y Medio Ambiente
ART	Agua Residual Tratada
BDAN/NADBANK	Banco de Desarrollo de América del Norte
CEAS	Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento
CFE	Comisión Federal de Electricidad
COCEF	Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza
COMAPA	Comisión Municipal de Agua Potable y Alcantarillado
DMA	Directiva del Marco de Agua
EPA	Environmental Protection Agency
GLA	Gestión Integral del Agua
GWP	Global Water Partnership
LM	Línea Morada
OOAS	Organismo Operador de Agua y Saneamiento
PITAR	Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales
PTAR	Planta Tratadora de Aguas Residuales
SADM	Sistema de Agua y Drenaje de Monterrey
SIMAS	Sistema Municipal de Agua y Saneamiento
ZMM	Zona Metropolitana de Monterrey

## INTRODUCCIÓN

México tiene a su disposición el 0.1% del agua dulce mundialmente (Maguey, 2018), debido a lo cual es considerado uno de los países con una disponibilidad baja, y sufre una crisis de escasez de agua en varias zonas del país. Existe poca disponibilidad de agua en regiones donde la precipitación pluvial es escasa, como es el caso de algunas zonas del norte y noreste de México, por ser en su mayoría zonas desérticas y semidesérticas.

A su vez, existen conflictos potenciales en estas zonas urbanas, como el excesivo consumo de agua potabilizada por parte de algunos sectores, así como también el desecho de sus aguas residuales sin reuso. Lo anterior representa un uso no sostenible del agua en las ciudades.

El estudio del reuso de agua residual tratada (ART) es vital dado que ésta es una de las fuentes de agua menos valoradas y de producción más constante en áreas verdes. A través del tratamiento del agua, el reuso permite visualizar a este recurso como una nueva fuente hídrica de buena calidad y accesible, ya que ayuda a reducir la extracción de agua de primer uso, fomenta los bajos costos de agua para la industria y otros grandes usuarios y abona a una sostenibilidad económica para los organismos operadores, a través de un ingreso que facilita los costos de tratamiento y de mantenimiento.

En vista del valor y la importancia del reuso de ART es notable la falta de atención general que recibe el tema en México y el poco avance de su implementación hasta el momento. Así pues la pregunta de investigación de esta tesis es:

¿Qué factores influyen en la reutilización de agua residual tratada por parte de grandes usuarios urbanos en algunas ciudades del noreste del país?

El objetivo general es:

Identificar y analizar los factores que influyen en el reuso de aguas residuales tratadas por parte de los diferentes grandes usuarios urbanos en algunas ciudades del noreste del país.

Los objetivos específicos son:

- Identificar los factores exitosos en el reuso urbano de ART en las ciudades de Monterrey, Saltillo, Nuevo Laredo, Monclova y Piedras Negras.
- Identificar dificultades encontradas en la promoción de implementación del reuso de ART en esas cinco ciudades.
- Reconocer el valor del reuso de ART en las cinco ciudades de estudio.
- Hacer un análisis comparativo entre las ciudades estudiadas permite proponer estrategias para alentar a otras ciudades con menor reuso de ART.

De esta manera, la presente investigación busca dar a conocer cuáles son los factores que han influido la instrumentalización del reuso de ART por parte de los organismos operadores y su adopción por los diversos usuarios de algunas ciudades del noreste de México. Resalta las dificultades y los éxitos que se han tenido en busca de la implementación del reuso de ART. Los hallazgos podrán brindar pautas para aumentar dicho reuso en otras ciudades y demuestran que es necesario promover que más organismos operadores estén dispuestos a esta implementación.

Este documento nos proporciona una visión que va más allá de un solo organismo, es decir una panorámica más amplia del reuso de ART que se vislumbra en la zona noreste de México, ya que se identifican y analizan los factores que influyen en el reuso de las ART en cinco organismos operadores de agua y saneamiento (OOAS).

El marco teórico conceptual base retoma la gestión integral del agua (GIA) donde el avance en el tratamiento y el reuso es un elemento indispensable para el manejo y aprovechamiento coordinado del recurso hídrico. El reuso es básico para completar el ciclo del agua que promueve la sustentabilidad en las ciudades, a través de un metabolismo circular de las entradas y salidas de agua a la ciudad. De esta manera, el agua residual en lugar de sólo salir del sistema, nuevamente se aprovecha en otras actividades productivas. Además se retoma la economía circular con un enfoque en aguas residuales, porque considera que para lograr la sustentabilidad económica del ciclo urbano del agua es necesario ver el agua residual como un insumo con valor que le imprime viabilidad en su funcionamiento en el mediano y largo plazo. Por lo tanto, al tener valor se deja de lado la percepción de que el agua residual es un problema de contaminación y solo representa un costo su tratamiento.

La metodología que se siguió para la investigación inició con la obtención de la información y las estrategias de su análisis con un enfoque cualitativo. Se buscó cumplir con los objetivos de la investigación y responder a la pregunta planteada a través de tres procedimientos: con una investigación documental mediante la búsqueda, recopilación y revisión de la literatura sobre el tema de estudio; la investigación de campo, con entrevistas a actores clave del reuso, que fueron contribuyendo a la construcción de una base de datos comparativa con información elemental del reuso de la zona de estudio; y finalmente se logró sistematizar y analizar la información para esta tesis.

Este trabajo se estructura en cinco capítulos. El primer capítulo presenta los antecedentes sobre el contexto global y nacional sobre el agua y el reuso, así como una discusión de los cinco sitios de estudio de esta investigación. En el capítulo dos se expone el marco teórico conceptual mostrando los conceptos clave utilizados en la investigación. El capítulo tres explica el marco metodológico y la estrategia desarrollada para sistematizar la información obtenida. El capítulo cuatro presenta los resultados y la discusión, abordando y profundizando en los sitios de estudio, haciendo una comparativa entre ellos, y analizando también las dificultades y oportunidades encontradas en cada sitio de estudio. El capítulo cinco da cuenta de las principales conclusiones y recomendaciones, donde se evidencian los aportes que esta tesis brindará a los organismos operadores y usuarios.

# **CAPÍTULO I. MARCO CONTEXTUAL DE LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA Y SU REUSO**

En este capítulo se presentan los resultados de la investigación documental. Se inicia con una descripción de la problemática que existe sobre el agua y su reuso a nivel global, nacional y regional. Enseguida se presentan las características físicas, demográficas y económicas de cada sitio de estudio y se realiza una comparativa entre sitios.

## **1.1 Contexto global, nacional y regional del agua y su reuso**

La escasez de agua es un problema de gran relevancia y común en ciertas zonas de nuestro país; se le conoce comúnmente como *estrés hídrico*, lo que sucede cuando la demanda de agua de primer uso es más alta que la cantidad que se tiene a disposición, generando conflictos entre los usuarios tanto actuales como potenciales. Esta situación provoca algunas veces sobreexplotación de acuíferos o dependencia de agua de otros sitios que implica directa o indirectamente un deterioro del recurso en cantidad y calidad.

La extracción excesiva de agua dulce de fuentes naturales en comparación con los recursos de agua dulce disponibles, pueden llegar a generar consecuencias catastróficas para el medio ambiente y obstaculizar o incluso revertir el desarrollo económico y social de un país o ciudad. (FAO, 2022)

Es de recalcar que una de las razones por las que el agua se está agotando es la demanda creciente, tanto por la población, el sector industrial, el sector agrícola, generación de energía, etc. Esta demanda es más aguda en los grandes y medianos centros urbanos, donde se concentran actividades productivas y de servicios, como el caso de nuestros sitios analizados.

La FAO da a conocer que mundialmente el estrés hídrico hoy en día está situado a un nivel de 18.4%, además de que el cambio climático traerá consigo graves consecuencias para diversas regiones.

Mundialmente se destina para uso agrícola e industrial el 80% del agua; la ONU confirma que el 22% de este recurso es destinado sólo para el sector industrial a nivel mundial. Este porcentaje incluye el agua que se destina para la generación de energía hidráulica y nuclear, así como la termoeléctrica (Maguey, 2018). El riego es la actividad con mayor uso de agua tanto a nivel mundial, como en la mayoría de las regiones (Salgado, 2021).

“El estrés hídrico se puede considerar una escasez que es impulsada por la demanda física, pero la escasez de agua puede también derivar de la mala gestión del recurso que se da por la población” (Salgado, 2021). Benítez comenta que “Latinoamérica es una región de alto riesgo a futuro porque existe un incremento de la demanda de agua y los riesgos en la oferta del líquido” Esto suele suceder porque en estas zonas, a pesar de que existe el recurso hídrico, la distribución que se tiene muchas veces es desigual (Rincón, 2017).

En “Latinoamérica” los mayores índices de estrés hídrico en 2019 se esperan con Chile 79.6%, México 77.2% y Guatemala 47.2% (Salgado, 2021). Sin embargo, según el World Resources Institute (2017), esta lista se incrementará para el 2023. La figura 1.1 muestra el estrés hídrico por país a nivel mundial.

Es importante resaltar que la mayor disponibilidad de agua a nivel nacional se encuentra en el sur, donde precipita aproximadamente la mitad de la lluvia total; sin embargo en el norte difícilmente se recibe el 25%. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) da a conocer que la disponibilidad de agua en el país varía por la temperatura, y que los organismos operadores deben hacer ajustes para tener una buena distribución del recurso (Enciso, 2019).

En México, debido al mal manejo y al notorio crecimiento poblacional el volumen de agua disponible per cápita ha disminuido significativamente, lo que nos lleva a dimensionar la condición de escasez que existirá si no buscamos nuevas alternativas, ya que el noreste se encuentra en las regiones que serán más afectadas (Gobierno de México, 2022).

El sobreconsumo de agua ha llevado al abatimiento de acuíferos derivados de la sobreexplotación, ríos secos, etc., y esta situación genera estrés hídrico. Por lo tanto es apremiante buscar una nueva percepción a través de un cambio de paradigma sobre la relación existente entre el humano y el agua. Un cambio que nos ayude a entender su uso y el reuso correcto que el agua puede tener consigo.

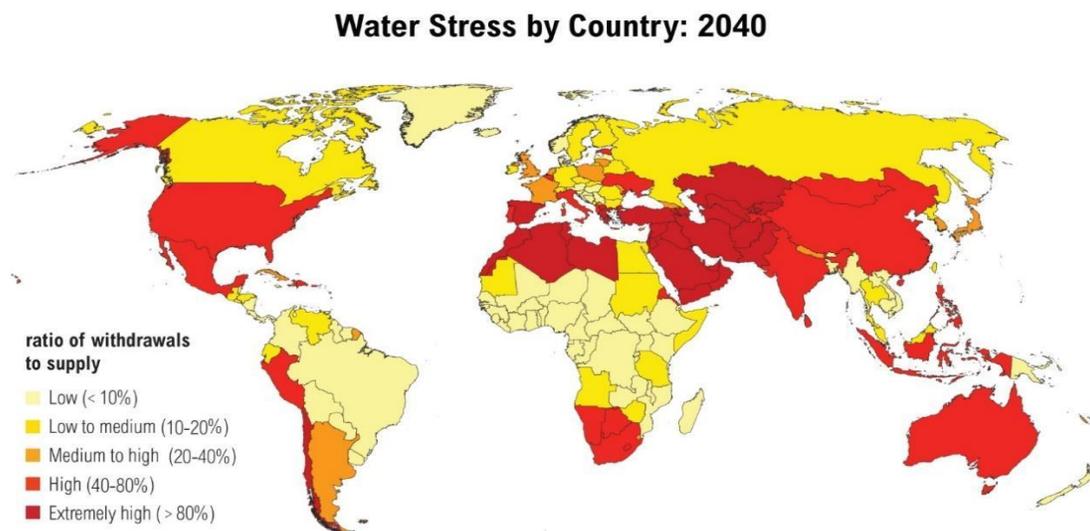
CONAGUA (2019) emitió un reporte donde revela que en el norte del país la dotación del recurso y las fugas en la red de agua potable es muy variable; ya que en las ciudades donde hay mayor distribución por persona al día es Chihuahua con 444 litros, seguida de Juárez con 411 litros y Gómez Palacio, Durango con 409 litros. En comparación por ejemplo con Saltillo, Coahuila, que recibe 181 litros (Enciso, 2019).

En la frontera norte, dos terceras partes del territorio son consideradas zonas áridas o semiáridas, con precipitaciones anuales menores a los 500mm (Comisión Nacional del Agua, 2019). Existe una discusión con relación a la satisfacción de necesidades de agua entre los diferentes sectores. La ley privilegia al sector doméstico por encima de satisfacer la necesidad del sector agrícola y demás a usuarios por igual. Destaca que nuestros sitios de análisis, en su mayoría forman parte de la frontera norte, donde el Río Bravo tiene una participación contundente en el ciclo hidrológico de la mayoría de los sitios de estudio (Figura 1.1).

La precipitación se ha reducido el 30% causando que las presas del noroeste del país ocasionen desabastos de agua en varias zonas metropolitanas, así como también causando incendios forestales esparcidos en el territorio, por causa de esta disminución; para marzo del 2021 se estimaba que el 70% o más del territorio nacional tendría sequía en el norte del país, siendo la región más afectada (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2021).

Es importante recalcar que la cuenca del Río Bravo es el quinto río más largo en América del Norte y el decimonoveno más largo del mundo. Inicia en las montañas cubiertas de nieve al Sur de Colorado, donde las aguas de varios arroyos se unen para formar el origen del también llamado Río Grande. La cuenca del Río Bravo está constituida por partes de tres Estados de la Unión Americana (Colorado, Nuevo México y Texas) y secciones de cuatro Estados Mexicanos (Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas).

Figura 1.1 Situación del estrés hídrico a nivel mundial.



Fuente: World Resources Institute, 2017

El saneamiento es un factor fundamental, con el cual se debe incorporar el tratamiento y el reuso como una opción factible para la falta del vital líquido, que constituye la base de desafíos de desarrollo en distintas zonas. Además, si existen deficiencias en el saneamiento se reflejan elementos de contaminación que derivan en problemas de salud pública, afectaciones al medio ambiente, etc.

Por tanto, el crecimiento del ser humano requiere de agua y de sistemas de saneamiento ya que ambos procesos son elementales. Mundialmente para 1.600 millones de personas es escaso el acceso a servicios de agua potable, y 2.800 millones de personas carecen de servicios de saneamiento gestionados de forma segura (UNICEF, OMS, 2021). Destaca además que más del 80% de las aguas residuales se vierten en los ríos o el mar sin ningún tratamiento previo, lo que provoca la contaminación de los cuerpos receptores (ONU, 2022).

En Latinoamérica millones de personas no cuentan con sistemas de saneamiento; este factor los coloca como zonas de mayor vulnerabilidad al cambio climático (CEPAL, 2020). Destaca también que solo el 30% del agua residual recolectada es tratada, lo que lleva a tener enormes impactos (Banco Mundial, 2020). Es decir, los vertidos que se realizan en Latinoamérica son un factor perjudicial, dado que, aunque exista un volumen amplio de agua disponible para reusar, no hay la calidad necesaria de agua para su reuso.

En México el 10% de la población no tiene acceso a agua de primer uso; de los que sí reciben el agua casi el 30% no lo tiene en cantidad y calidad adecuadas, pero en la zona centro y norte donde se concentra la mayor población y economía, hay menos por sus condiciones físicas, pero algunas veces las necesidades de infraestructura son la limitante (López, 2019).

Como se puede observar a nivel nacional los datos son más alarmantes, pero a pesar de ello, la frontera norte tiene niveles más altos de saneamiento que el resto de México esto derivado del apoyo de ciertas instituciones, por ejemplo el Tratado de aguas internacionales de 1944, donde se encuentra regulado como los dos países que forman parte del límite territorial deben repartirse el agua del río Bravo y Colorado, y cuáles son los lineamientos con los cuales deben de cumplir para el beneficio mutuo en materia de agua, saneamiento, distribución, cooperación para construcción, criterios de operación, etc., la fundación de COCEF/BDAN, el

financiamiento de EPA a la infraestructura de saneamiento fronterizo para evitar descargas de aguas negras en EE. UU los apoyos del NADBANK, etc.

Sin embargo, el 80 % de los sistemas de saneamiento de las poblaciones mexicanas en la frontera norte presentan algunas deficiencias en cuestión de infraestructura y en la forma en que se operan y mantienen (CILA, 2022). El cambio de paradigma se debe buscar con nuevas soluciones a la falta del recurso y aprovechamiento del agua que se utiliza y se vierte solo en los cuerpos receptores.

La constante escasez en las cuencas binacionales genera escenarios que requieren la ejecución de medidas creativas e innovadoras, como el reúso, para que el agua residual tratada deje de ser percibida como un desecho y se convierta en un activo en zonas de alta competencia por el recurso hídrico (CILA, 2022).

El reuso de ART puede ser de gran beneficio en las zonas donde existe escasez de agua debido a la lejanía de los ríos o lugares de extracción que implica grandes costos por infraestructura nueva para acceder al reuso. En gran medida el desabasto se debe al uso excesivo que se le da al agua de primer uso, y por el incremento constante de la población que se observa en las ciudades.

Los avances en el reuso son reconocidos y aún incipientes. Los países que ocupan los primeros lugares en el reuso de aguas residuales, por volumen total son China, México y Estados Unidos; por habitante Qatar, Israel y Kuwait y por total usada Kuwait, Israel y Singapur. Se estima que aproximadamente el 4% de toda el agua que se consume en el mundo es reutilizada (Cosin, 2017).

Para garantizar el agua a futuro se necesita disminuir el consumo del recurso y centrarse en la recuperación de este mismo a través de alternativas como el reuso de ART. Se debe buscar un cambio de paradigma para lograr los mejores beneficios tanto para la población, como para el medio ambiente.

Así las aguas residuales tratadas en las ciudades deben de considerarse como una fuente valiosa de extracción de energía y nutrientes, así como una fuente adicional de uso de agua. De acuerdo con el Banco Mundial en su investigación por el Proyecto Agua Residual: de residuo a recurso, “las aguas residuales pueden tratarse hasta lograr diversas calidades para

satisfacer la demanda de diferentes sectores, incluidos la industria y la agricultura” (Banco Mundial, 2020).

Mundialmente se habla de que el 80% de aguas residuales que se vierten al medio ambiente sin tratamiento, como se mencionó anteriormente, implican la pérdida de un recurso valioso en energía, nutrientes, y bajos costos de agua, etc. Con la reutilización y recuperación de recursos, se pretenden analizar proyectos de aguas residuales de manera integral en varias partes del mundo, estos buscan beneficios para la población, el medio ambiente y la economía (Banco Mundial, 2020).

El 40% de la población mundial es afectada por no tener este recurso tan escaso (Milne, 2021), por tanto el reuso puede contribuir como una solución en problemas de escasez y contaminación de los cuerpos receptores de agua, ya que se pueden utilizar para el reemplazo de agua de primer uso para riego permitidos, procesos con fines recreativos, flujo ambiental, generación de energía, etc.

En Latinoamérica y el Caribe solo han sabido implementar este reuso en un bajo por ciento, dado que solo se trata entre el 30% y el 40% del agua residual recolectada (Banco Mundial, 2020a).

Existen casos exitosos de reuso a nivel mundial y nacional. Por ejemplo en Perú una planta de tratamiento ha podido ahorrar 230,000 dólares al año en transporte y relleno de biosólidos, por la venta a un productor de composta. En Brasil se ha podido generar rendimiento en cultivos, teniendo mejor resultado que con fertilizantes (Banco Mundial, 2020a).

Otro caso de éxito es en México es San Luis Potosí, porque al reusar ART en su central eléctrica se redujo un 33% de costos de agua, implicando para ellos un ahorro de 18 millones de dólares. Por consiguiente para el organismo fue un ingreso vital para cubrir sus costos operativos y de mantenimiento (Banco Mundial, 2020a)

Resultados como éstos se pueden lograr cuando se planea en el mediano y largo plazo, y se buscan inversiones que facilitan su implementación con el gobierno nacional y las municipalidades, así como con organismo como el Banco Mundial, COCEF, EPA, NADBANK, BANCO DE MÉXICO, etc.

Entre las propuestas que se dan a conocer para aminorar los problemas de contaminación, está el aumentar la eficiencia de los organismos operadores, fortaleciendo su autosuficiencia financiera en el tratamiento de las aguas residuales y el reuso, buscando la manera de que sea sustentable en técnica y económicamente (Jiménez, *et. al.*, 2010).

Algunos datos sobre los volúmenes concesionados de los sitios de estudio para uso industrial y termoeléctricas se presentan en la figura 1.2.

Figura 1.2 Volúmenes concesionados en algunas regiones del noreste de México.

	Entidad federativa	Industria autoabastecida	Termoeléctrica
1	Coahuila	73.5	74.9
2	Nuevo León	79.9	4.4
3	Tamaulipas	103.7	54.0

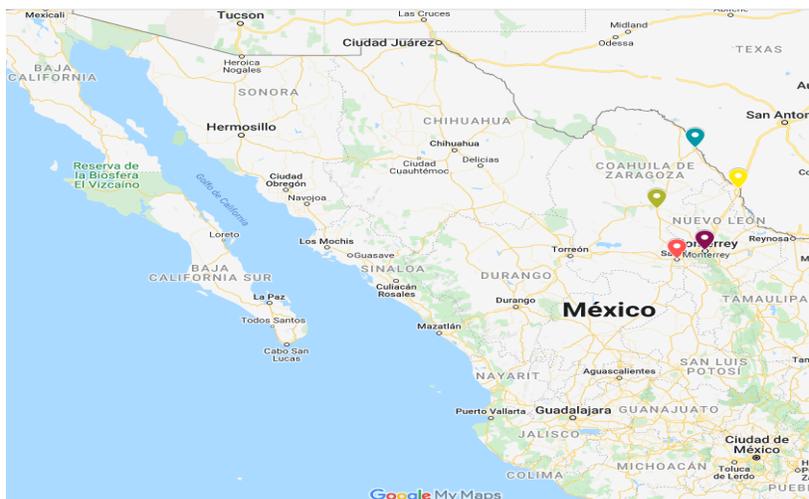
Fuente: Elaboración propia, con información del documento “El agua en México: Cauces y encauces” (Jiménez, *et. al.*, 2010).

Es importante mencionar que la región noreste reutiliza el 99% del agua residual industrial que es un porcentaje menor, si tomamos en cuenta al agua residual de la población en general. En la región en específico del Río Bravo el agua de reuso está dirigida en 85% a la agricultura, el 4% servicios urbanos y el 11% para la industria (Jiménez, *et. al.*, 2010).

### **1.2 Antecedentes de la zona de estudio**

Esta sección inicia con una descripción de cada sitio de estudio; se eligieron 5 ciudades del noreste del país para analizar y comparar sus avances en el reuso de agua residual tratada (ART): ZMM, Saltillo, Nuevo Laredo, Monclova, Piedras Negras (Figura 1.3).

Figura 1.3 Ubicación de los sitios de estudio.



Punto ubicación	Sitio de análisis	Estado
	ZMM	Nuevo León
	Nuevo Laredo	Tamaulipas
	Saltillo	Coahuila
	Monclova	
	Piedras Negras	

Fuente: Elaboración propia con datos Google Maps e INEGI (2022).

### 1.2.1 Población y extensión territorial

Se eligió una región del territorio mexicano con características climáticas y económicas similares, en donde hay comunicación y relación entre los organismos operadores de agua y saneamiento, buscando que coincidiera con la localización de la sede de El Colef en el que se desarrolla la Maestría cursada. La investigación dentro de la región noreste también se adecuó a la disponibilidad de tiempo y recursos con las que se contaba para el trabajo de campo de esta.

#### ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY, NUEVO LEÓN

Monterrey es la capital del estado de Nuevo León. Este estado cuenta con una población de alrededor de 5,784,442 habitantes. La zona metropolitana de Monterrey (ZMM) es la zona urbana más importante (Moreno, 2021); la zona conurbada cuenta con una población de

5,325,091 habitantes conformada por 18 municipios<sup>1</sup> (INEGI, 2020). Ubicado al Noreste de México, el estado cuenta con una extensión territorial de 64,156 km<sup>2</sup>, y la ZMM de 7,657 km<sup>2</sup> (INEGI, 2020) es decir la zona de estudio representa casi el 11% de extensión del estado, con una precipitación promedio escasa entre 300 y 600 mm al año (INAFED, 2019). La ciudad se caracteriza por un clima seco y semiseco, con una temperatura media anual de 5 a 32 grados centígrados. Su fuente principal de abastecimiento de agua superficial son las presas de la Boca, Cerro Prieto y El Cuchillo con 50% del abasto y el otro 50% es subterránea (SADM, 2022; Informante 2 y 3, 2021).

La ZMM tiene como principal actividad económica la industria manufacturera, representa la industria el 26% del PIB estatal; en un segundo lugar se encuentra el comercio con 20% y en tercer lugar la construcción con 10% del PIB (Gobierno de Nuevo León, 2022, INEGI, 2019). El PIB total de la ZMM equivale a 35,472 millones de dólares.

#### SALTILLO, COAHUILA

Saltillo forma parte del estado de Coahuila, que cuenta con una población de aproximadamente 879,958 habitantes (INEGI, 2020). Se ubica al sureste del estado de Coahuila, con una extensión territorial de 6,837 km<sup>2</sup> y representa el 3.72% de la superficie del estado. Con una precipitación promedio de 300 a 500 mm al año (INAFED, 2021), es un municipio con climas secos semicálidos, semisecos templados y semifríos, con una temperatura media anual de 5 grados centígrados a 29 grados centígrados. Su fuente principal de agua es del subsuelo, aguas de pozo, infiltrada en la sierra Zapalinamé que es la que rodea a Saltillo. Aproximadamente el 60% del agua la obtienen de esta sierra, el resto del agua es de San Lorenzo, Agua Nueva, Zona Urbana, Carneros y Loma Alta (Informante 1, 2021).

Este municipio tiene como principal actividad económica la industria de transformación y automotriz; en segundo lugar, el comercio; en tercer lugar los servicios y por último la construcción. Cuenta con un PIB equivalente a los 32 mil dólares (Gobierno de Saltillo, 2019).

---

<sup>1</sup> INEGI considera que la ZMM está conformada por 18 municipios, mientras que SADM toma en cuenta sólo 13 municipios y el Gobierno de Nuevo León considera 17, dada la variación de información en este caso, solo se considerara los 13 municipios que SADM toma en cuenta.

## NUEVO LAREDO, TAMAULIPAS

Nuevo Laredo es un municipio que cuenta con una población alrededor de los 425,058 habitantes (INEGI, 2020). Ubicado al Norte del estado de Tamaulipas, con una extensión territorial de 1,334.02 km<sup>2</sup>, representa aproximadamente el 2.08% de la superficie del estado de Tamaulipas (INAFED, 2022). En relación con sus características físicas este municipio tiene una precipitación promedio de 472.5 mm al año (Secretaría General de Gobierno, 2020); es uno de los municipios más secos del estado de Tamaulipas, con una temperatura que oscila desde -3 grados centígrados en invierno hasta los 46 grados centígrados en verano (Secretaría General de Gobierno, 2020). Su fuente principal de agua es el Río Bravo y cuenta con dos arroyos: El Coyote, al sur y Las Alazanas, al noreste.

Este municipio, tiene como principal actividad económica la industria manufacturera, que representa el 37% del PIB. En segundo lugar, se encuentran los transportes, correos y almacenamiento con 27% y en tercer lugar se encuentra el comercio con 11% del PIB. El municipio tiene un PIB equivalente de 29,036 (Secretaría General de Gobierno, 2020).

## MONCLOVA, COAHUILA

Monclova es un municipio que cuenta con una población de 237,951 habitantes (INEGI, 2010). Se ubica en la región centro este del estado de Coahuila, con una extensión territorial de 1,480.7 km<sup>2</sup>, representando el 0.83% de la superficie del estado (INAFED, 2021). Tiene una precipitación de 300 a 500 mm al año, con un clima seco semicálido y una temperatura media anual desde los 8 grados centígrados hasta los 36 grados centígrados. Su fuente principal de agua es subterránea de pozos artesianos.

Tiene como principal actividad económica la industria de la transformación automotriz, en segundo lugar, la siderurgia, en tercer lugar, el comercio, en cuarto lugar los servicios y por último la agricultura y ganadería. Sus actividades económicas representan de 30 mil 438 dólares del PIB (Rosales, 2019).

## PIEDRAS NEGRAS, COAHUILA

Piedras Negras es un municipio que tiene una población de 176,327 habitantes (INEGI, 2020). Ubicado al noreste del estado de Coahuila. Es frontera con Eagle Pass, TX, con una extensión territorial 914.2 km<sup>2</sup>, que representa el 0.31% de la superficie del estado (INAFED, 2020).

Con una precipitación de 450 mm al año, tiene un clima seco cálido y semiseco, con una temperatura media anual de 6 a 38 grados centígrados (Weather Spark, 2021). Su fuente principal de agua es el Río Bravo.

Su principal actividad económica es la industria manufacturera, en segundo lugar, el comercio y servicios. Tiene un PIB de 30,365 dólares.

## COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN

En el universo de estudio se observa un amplio rango de población y extensión territorial del noreste del país, desde los sitios de estudio más grandes en población como Monterrey o Saltillo, hasta los sitios de estudio medianos como Nuevo Laredo y Monclova y, pequeños como Piedras Negras. Territorialmente hablando, se observa que la zona metropolitana de Monterrey representa casi el 12% del estado, le siguen Saltillo y Nuevo Laredo en extensión (3.7 % y 2.8 %) y finalmente, Monclova y Piedras Negras son más pequeñas hablando de km<sup>2</sup> (0.83 % y 0.31 %).

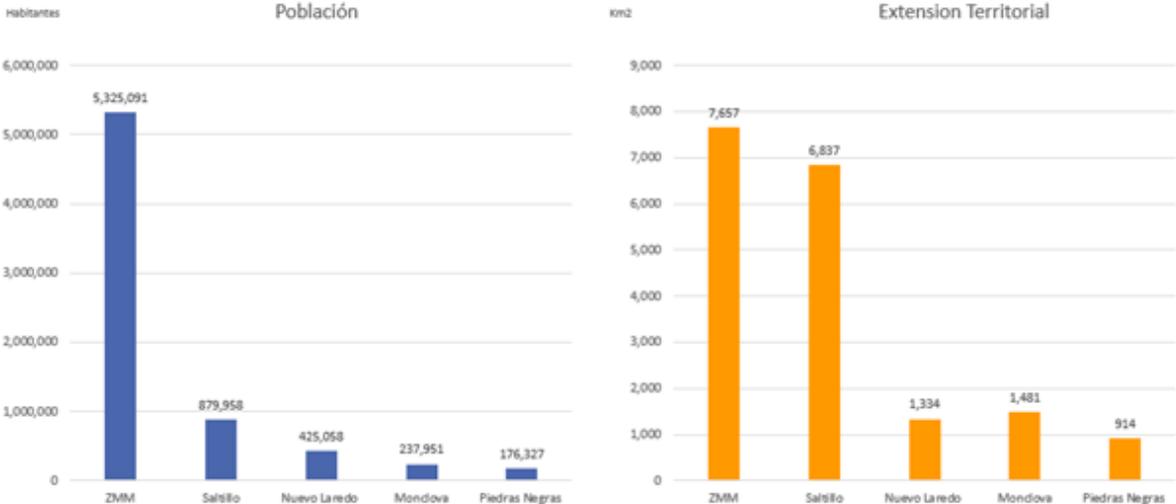
El sitio más grande incluido en la investigación es la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) con una población de 5,325,091 habitantes, asentada en una extensión territorial de 7,657 km<sup>2</sup>, muy por arriba del resto de las ciudades de análisis. Por ejemplo, el municipio de Saltillo Coahuila tiene también una extensión territorial representativa con 6,837 km<sup>2</sup>, siendo el más cercano también en población con 879,958, con una diferencia de 4,445,133 habitantes.

En cambio, Nuevo Laredo, Tamaulipas, que, si bien es un municipio que tiene una población moderada de 425,058 habitantes, su extensión territorial 1,334.02 km<sup>2</sup>, se observa que no supera ni a Monterrey ni a Saltillo en población ni territorio.

Prosiguiendo con otros sitios analizados de Coahuila, Monclova cuenta con una población de 237,951 habitantes, pero su extensión territorial es de 1,480.7 km<sup>2</sup>. Se observa una menor población que el resto de las áreas de análisis, pero supera en territorio a Nuevo Laredo. Piedras Negras, Coahuila es el municipio más pequeño en población, 176, 327 habitantes, y también en extensión territorial, es decir es el único sitio que está muy por debajo de los demás municipios, ya que su extensión territorial es de 914.2 km<sup>2</sup>.

Entonces se observa que Monterrey sigue sobresaliendo en población y territorio, Saltillo no se queda muy atrás, ya que cuenta con una extensión territorial mucho mayor que los demás municipios observados en la figura 2, pero no se equipara poblacionalmente.

Figura 1.4 Población y extensión territorial de los sitios de estudio.

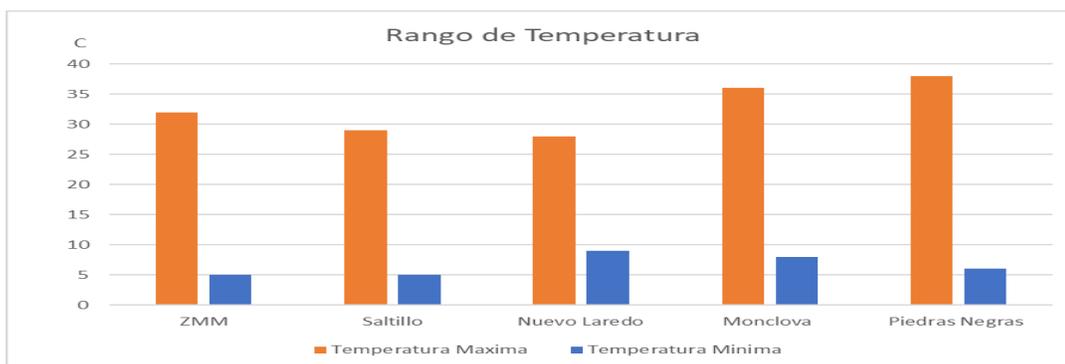


Fuente: Elaboración propia con información de INEGI (2020,2022), INAFED (2022), El Gobierno de NL, (2022).

**1.2.2 Clima**

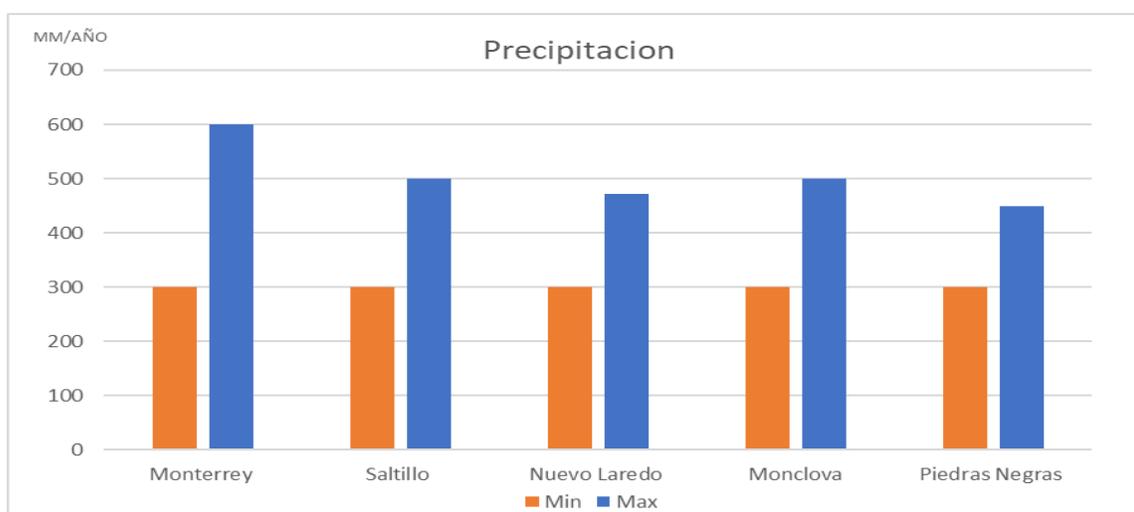
En lo relativo al clima, en general los sitios de estudio comparten rangos de temperatura y precipitación, desde los 5 grados centígrados hasta los 38 grados centígrados y de 300 a 500 mm de lluvia al año. Como se muestra en las figuras 3 y 4, estos sitios tienen en común sus climas, que son mayormente secos o semisecos con temperaturas como se mencionó de moderadas a altas.

Figura 1.5 Rango de temperatura promedio en los sitios de estudio.



Fuente: Elaboración propia con información de Weather Spark (2022), Secretaria General de Gobierno (2020).

Figura 1.6 Precipitación promedio en los sitios de estudio.



Fuente: Elaboración propia con información de Weather Spark (2022), Secretaria General de Gobierno (2020), INAFED (2022).

Un punto relevante por tomar en cuenta de los contextos de las ciudades seleccionadas es la baja precipitación que tienen los municipios, porque ésta se relaciona con las fuentes de agua y el abastecimiento para la población de cada municipio. Esto le imprime una mayor importancia al reuso.

La ZMM tiene la mayor cantidad de población a la cual tiene que suministrar agua potable. Su principal fuente son las presas y tiene una precipitación escasa, al igual que el resto de las

ciudades analizadas (Saltillo, Nuevo Laredo, Monclova y Piedras Negras). El rango de precipitación en la región de estudio oscila entre los 300 y los 600 mm al año. Saltillo y Monclova se suministran de agua subterránea, Monterrey como se mencionó de presas, y únicamente, Nuevo Laredo y Piedras Negras se abastecen del Río Bravo (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Fuentes de agua de los sitios de estudio

Zonas de estudio	Fuente de agua	Tipo de fuente
Monterrey (ZMM)	Presas: La Boca Cerro Prieto El Cuchillos	Superficial/Subterránea
Saltillo	Arroyos: La Encantada Ceballos El Chiquillo	Subterránea
Nuevo Laredo	Río Bravo	Superficial
Monclova	Pozo Artesiano	Subterránea
Piedras Negras	Río Bravo	Superficial

Elaboración propia con base en entrevistas

### 1.2.3 Actividad económica

La situación de aridez de la región, aunada a la fuerte actividad económica, genera una situación de estrés hídrico en las ciudades. Por esta razón es necesario analizar los requerimientos de agua de las actividades económicas, si cambian o disminuyen en su producción, porque determina y afecta el PIB.

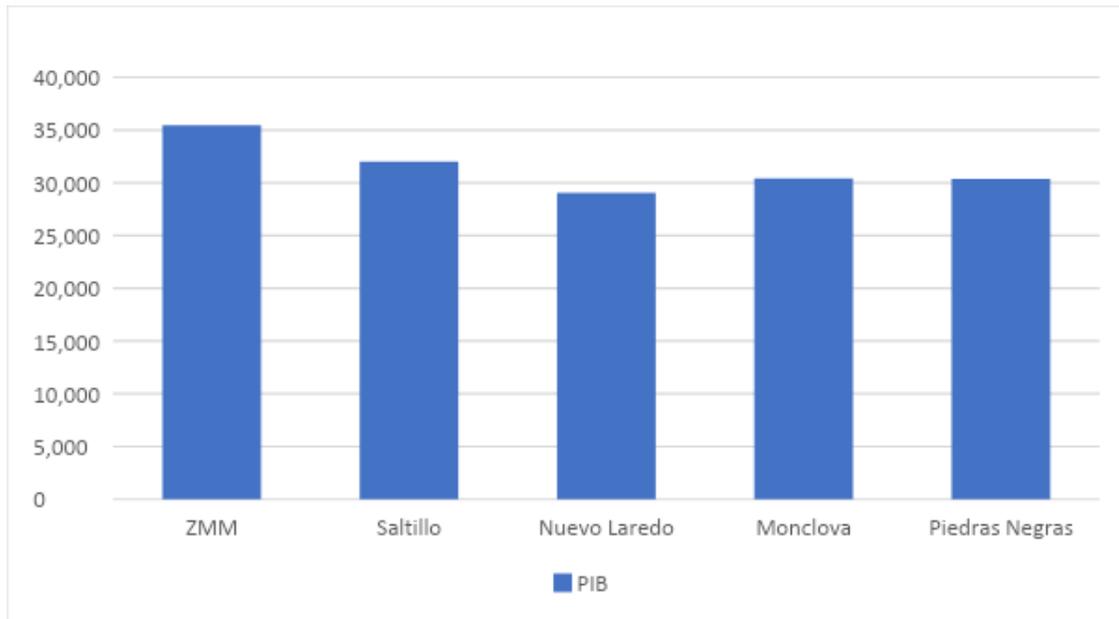
En todos los sitios de estudio la industria tiene una gran importancia, sobre todo la manufacturera, automotriz y de energía. Le siguen en importancia el comercio, la construcción y en menor medida la agricultura y ganadería (Tabla 1.2).

Tabla 1.2 Actividad económica de los sitios de estudio

Sitios de estudio	Actividad Económica predominante
Nuevo León	Industria manufacturera Construcción Servicios-Comercio
Saltillo	Industria de transformación Industria automotriz Construcción Servicios-Comercio
Nuevo Laredo	Industria de transformación Industria de siderurgia Servicios-Comercio Agricultura y Ganadería
Monclova	Industria manufacturera Servicios-Comercio
Piedras Negras	Industria manufacturera Servicios-Comercio

Fuente: Elaboración propia con base en entrevistas y revisión documental.

Figura 1.7 PIB de los sitios de estudio.



Fuente: Elaboración propia con información del Gobierno de Nuevo León (para ZMM, 2022), Gobierno de Saltillo (2022), Patiño (Nuevo Laredo, 2016) y Rosales (Monclova y Saltillo, 2019), Secretaría de Economía, (2022).

En la figura 1.7 que muestra los rangos de PIB de cada zona de análisis se observa que Monterrey se encuentra como líder. Le sigue Saltillo, que no difiere en gran medida de Monclova y Piedras Negras. Sólo Nuevo Laredo tiene una importancia económica mucho menor.

En la Tabla 1.3 se sintetizan las variables más importantes que conforman el contexto de cada sitio de estudio, como población, extensión territorial, precipitación, temperatura, fuente principal de agua, actividad económica y PIB.

Tabla 1.3 Variables de sitios estudiados

Sitio de estudio	Población (Hab)	Extensión Territorial (Km <sup>2</sup> )	Precipitación (mm/año)	Rango de Temperatura Min - Max (°C)	Fuente de agua	Actividad Económica	PIB (Millones Dlls/año)
ZMM	5,325,091	7,657	300 a 600	5 - 32	Presas La Boca, Cerro Prieto y El Cuchillo	Industria manufacturera, comercio, construcción	35,472
Saltillo	879,958	6,837	300 a 500	5 - 29	Subterránea o de los arroyos La Encantada, Ceballos y El Chiquillo.	Industria de transformación y automotriz, servicios y construcción	32,000

Nuevo Laredo	425,058	1,334.02	472.5	9 - 28	Rio Bravo	Industria manufacturera, transportes, correos y almacenamiento, comercio	29,036
Monclova	237,951	1,480.7	300 a 500	8 - 36	subterránea de pozo artesiano	Industria de transformación, siderurgia, comercio y servicios, agricultura y ganadería	30,438
Piedras Negras	176,327	914.2	450	6 - 38	Rio Bravo	Industria de manufacturera, comercio y servicios	30,365

Fuente: Elaboración propia con información de entrevistas, revisión documental, INEGI (2022), INAFED, Data México, Weather Spark, (2022), Secretaria General de Gobierno (2020), Gobierno de Nuevo León; INEGI (ZMM, 2022), Gobierno de Saltillo, Patiño (Nuevo Laredo) y Rosales (Monclova)

Este cuadro presenta una síntesis de las principales características de las ciudades analizadas. Éstas se ubican en el noreste del país, tienen una tendencia de aridez y una demanda de agua superior a la regeneración natural del recurso lo que indica situación de estrés hídrico de la zona. Además, sus actividades económicas tienen similitudes ya que son sitios predominantemente industriales. En otras palabras, se justifica con mayor intensidad para todas ellas la búsqueda de nuevas fuentes de agua, tal como el reuso de agua residual tratada (ART) (Aguilar, 2022; INFOBAE, 2022)

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL**

Esta sección aborda los conceptos clave que se utilizan para la investigación: gestión integral del agua, metabolismo circular en las ciudades y economía circular. La gestión integral nos permite visualizar el recurso agua como un proceso que tiene como paradigma la búsqueda de sustentabilidad hídrica. El metabolismo en las ciudades nos es útil porque nuestros casos analizados se desarrollan en ciudades fronterizas con características de aridez. Por último, el paradigma de economía circular nos permite con la visión cíclica, analizar el valor del agua de reuso con una visión de utilidad en los procesos productivos y verlo como un recurso disponible y de valor económico, más que un problema que genera contaminación.

### **2.1 Gestión integral del agua y sustentabilidad hídrica**

El concepto de gestión integral del agua nos es útil para evidenciar la importancia y utilidad del reuso, la solidaridad y la cooperación de todos los involucrados con distintos grados de participación en el ciclo urbano del agua (Ruiz, 2008). En este análisis se hace referencia a la implementación del reuso de agua residual tratada en diferentes ciudades del noreste del país, se busca con la comparativa abonar a generar información que permita el fomento de una cultura de reutilización del agua. Se propone que el conocimiento tangible de los beneficios abone tanto a disminuir la demanda o primer uso del agua como a aumentar la calidad del agua residual tratada y resolver los problemas de contaminación.

La Global Water Partnership (GWP, 2000) define gestión integral de recursos hídricos como “un proceso que promueve el manejo, la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales”. Además, Valdés (2018) le imprime importancia a la orientación de políticas públicas incorporando tanto el desarrollo de las áreas como la protección de los ecosistemas.

La gestión sustentable del agua está ligado al uso y estilo de la producción, renovación y movilización del agua, a través de incentivar la disminución de procesos de degradación del sistema. Los usos del agua impactan en el ciclo hidrológico, desde lo cualitativo con la calidad y el estado de condición del agua dulce, hasta lo cuantitativo con la velocidad de la circulación de flujos de agua y tasas de renovación (Achkar, 2022).

Buroz (1998) le incorpora a la definición de gestión integral la parte normativa, la define como el conjunto de instrumentos, normas, procesos, controles, etc. que procuran la defensa y el cuidado de la conservación, y mejoramiento de la calidad ambiental. Este autor también señala el beneficio de los bienes y servicios ambientales no determinados y su potencial como legado intergeneracional. En el caso del reuso de agua es necesario considerar las normas mexicanas que nos indican los niveles de cumplimiento de calidad.

Este concepto de gestión integral tiene como base la sustentabilidad que reconoce los límites y las potencialidades de la naturaleza, así como en la complejidad ambiental, inspirando una nueva comprensión del mundo para enfrentar los desafíos de la humanidad. (Gobierno de México, 2020). Es decir, “la habilidad de lograr una prosperidad económica sostenida en el tiempo protegiendo al mismo tiempo los sistemas naturales del planeta y proveyendo una alta calidad de vida para las personas” (Calvente, 2007).

Específicamente hablamos de sustentabilidad hídrica entendida como el involucramiento e interrelación de las tres aristas de análisis: económica, ambiental y social. Ante el incremento de problemas de escasez, desabasto y falta de recurso a nivel global (CONAGUA, 2019), esta tendencia hacia la sustentabilidad de acuerdo con Aparicio (2016) se funda en una nueva forma de comprender el mundo, reconociendo sus límites, y buscando alianzas entre economía, ciencia y nueva cultura política. Autores como Barton (2006) añaden al concepto sustentabilidad el tiempo de una planificación orientada con estrategias que tengan metas a corto y largo plazo, por ejemplo es necesario, señalar los aspectos económicos, para hacer más factibles acciones urgentes para revertir los impactos en el caso de la contaminación y la sobreexplotación del recurso hídrico. Esto es utilizar el agua tratada como un recurso con valor.

Además de los económicos hay dos aspectos vitales para retomar la gestión integral, con énfasis en el ciclo del agua. Primero el no centrarse solo en buscar alternativas de satisfacer las demandas en los diferentes usos de manera lineal sino fomentar el reuso. Y el segundo una búsqueda de equilibrio de los ecosistemas de los que se depende. De acuerdo con la Directiva Marco del Agua (DMA) estos dos elementos son básicos para establecer un plan de gestión (Ibarloza, 2015). Además se debe reducir con esto la carga del recurso poniendo en primer lugar a la ciudad como el principal beneficiario, en cuestión de salud, bienestar y

productividad de las poblaciones, preservando una serie de beneficios y servicios con los que deberían de gozar,

En síntesis, Del Almo (2022) menciona tres aspectos fundamentales de la gestión: primero garantizar el uso sostenible; proteger y recuperar la calidad del agua; y, evitar que la falta de agua sea una característica que limite el desarrollo social.

El garantizar un uso sostenible lo señala porque al centrarnos solo en el aumento de la demanda, no damos tiempo a los efluentes de regenerarse y de que el agua se purifica naturalmente por medio del ciclo hidrológico del agua, lo que limita su funcionamiento adecuado, se debe buscar reconocer el derecho básico de la población al acceso al agua, sustentando sus necesidades. El segundo elemento de la gestión que propone esta autora Del Almo se enfoca en la calidad, es necesario tanto proteger como recuperar la calidad del agua, tanto para el uso humano como a nivel de ecosistema. En el caso de las ciudades esto se logra monitoreando que se cumpla la calidad en los tratamientos.

Finalmente, el evitar que la falta de agua sea un freno para un desarrollo social razonable, se traduce en buscar alternativas de utilización y reutilización de agua para no depender de fuentes unitarias. Dado la escasez del recurso su demanda constante, y las implicaciones financieras para su uso se debe buscar implementar este recurso con el máximo cuidado y eficiencia posible. Este es el elemento fundamental para nuestro análisis considerando que nuestras ciudades tienen como característica común escasez del recurso y demandas crecientes.

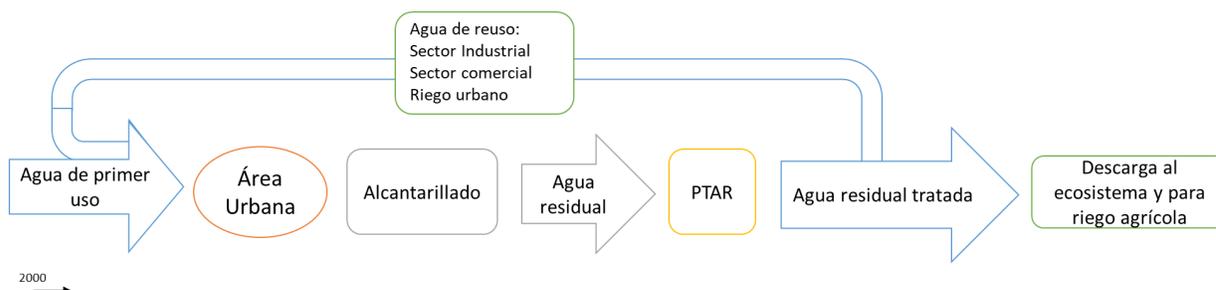
Estas definiciones y características de la GIRH evidencian la urgencia de alternativas de optimización de uso del recurso por medio del reuso. Los conceptos de gestión integral del agua y la sustentabilidad hídrica son la base de un mejor manejo del recurso agua, en específico en zonas con estrés, son modelos que fomentan una visión cíclica del recurso a través del ahorro de agua, inclinándose por el reuso de agua tratada, que garantiza la disminución y el control de la contaminación de la demanda (García, 2017).

## **2.2 Metabolismo circular en las aguas residuales**

Se retoma el concepto de metabolismo circular por ser un concepto que tiene como principal objetivo considerar tanto las entradas, como las salidas en el sistema urbano del agua. Un metabolismo circular tiene como propósito cerrar los ciclos del agua, antes de dejar que se

salga del sistema, considerando al agua residual como un recurso y no como un problema (Girardet, 2015).

Figura 2.1 Metabolismo circular del reuso del agua residual tratada



Fuente: Elaboración propia, 2022.

En este diagrama se explica claramente cómo el agua de primer uso después de su utilización se integra al alcantarillado, convirtiéndose en agua residual para ser dirigida a la PTAR para su debido tratamiento, para de esta manera poder ser considerada como una entrada al agua residual tratada, teniendo la opción de ser descargada al sistema, después de haber sido considerada y dándole importancia a la recuperación y fragmentación de los recursos, a través del reuso, capaces de integrarlos de nuevo al sistema productivo por medio del agua de reuso.

El metabolismo urbano circular toma en cuenta las posibilidades de gestionar los recursos a través de las ciudades, considerando las salidas como entradas, siendo capaces de volver al sistema productivo (Bioazul, 2015). Este proceso debe ser apropiado como un paradigma que va más allá de una dinámica doméstica donde llega el agua a nuestras casas y sale en el alcantarillado para tratarse. Debe incluir uso y desecho en todo el sistema urbano del agua dando énfasis al tratamiento del agua, su transporte y su entrada nuevamente a las zonas urbanas para usos industriales o agrícolas de acuerdo con las necesidades particulares de redistribución secundaria. Finalmente, una parte del agua tratada regresa al ecosistema ya sea a ríos o mares sin generar problemas de contaminación. En suma, este concepto nos brinda la alternativa necesaria tanto para que se deje de pensar de manera lineal con un enfoque en el consumo de agua, como para visualizarlo como un proceso de entradas y salidas con posibles reusos.

Esta gestión integral y circular cobra especial importancia en la analizada, ciudades fronterizas con importancia de uso industrial, coinciden en aridez, con necesidades evidentes de garantizar el consumo de agua. El desarrollo urbano futuro necesita enfoques que minimicen y enfatizan el consumo de recursos y que se centren en la recuperación del recurso, siguiendo los principios de la economía circular (Banco Mundial, 2020).

Los esquemas tradicionales de planificación y de diseño y operación se basan en una visión lineal como se muestra en la figura 2.2 y 2.3: la primera figura muestra el proceso anterior del agua, se extraía de la fuente, se dirigía a la ciudad, y se descargaba al cuerpo receptor sin tratar. Hoy en día se utiliza, pero el agua residual en su mayoría es dirigida a la PTAR para darle el tratamiento requerido a las aguas residuales y así cubrir las normativas de descarga al cuerpo receptor.

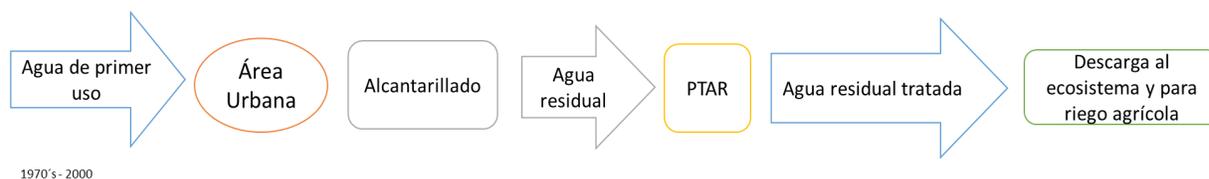
Figura 2.2 Metabolismo lineal del agua residual sin tratamiento



Fuente: Elaboración propia, 2022.

El diagrama presentado en la figura 1 busca una implementación circular, con la incorporación del reuso de agua residual tratada, donde se tiene el agua de primer uso o con su tratamiento de potabilización, se transporta y es dirigida al sistema urbano. Después de su proceso y utilización en actividades y con los diferentes usuarios, la calidad cambia de tal manera que es desechada, vertiéndose como agua residual a través del alcantarillado, llega al PTAR correspondiente en caso del agua de uso doméstico, la industrial conlleva un proceso igual, cuando se efectúa en colaboración con OOA hay un segundo enfoque a través de los permisos de CONAGUA otorgados a través del REPDA (Registro Público de Derechos de Agua) se trata y vuelve a ser utilizada en algunos procesos y parte de ella se descarga en los ecosistemas directamente.

Figura 2.3. Metabolismo lineal tradicional del agua residual con tratamiento



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Aquí es donde comienza la búsqueda de considerar el agua residual como una entrada, en lugar de dejar que se escape del sistema. Se pudiera tener un uso secundario relevante para riego agrícola, en los cultivos permitidos por la cantidad de nutrientes con la que cuenta, pero también existen otros usos de esta agua residual tratada que cumplan estándares establecidos para este reuso. Por ejemplo, el reuso urbano en parques y jardines; uso en el sector industrial para ser utilizada en algunos de sus procesos con costos más accesibles que el agua de primer uso. También puede utilizarse en procesos de transformación de energía, mitigación de polvos, etc.

Pardo (2019) nos habla de las ciudades del futuro y de la importancia de considerarlas en la conformación del entorno natural. Estas deben diseñarse con la misión de mejorar el día a día de sus habitantes, es decir su funcionalidad, sin olvidar la transición hacia un modelo más sostenible; para ello “la adopción de un sistema de medidas que imite el comportamiento de un organismo vivo será la clave para conseguirlo” (Pardo, 2019).

### **2.3 Economía circular con un enfoque en aguas residuales.**

Boulding & Kenneth (1996) fueron uno de los autores de la economía circular. Propone analizar el sistema económico como parte de un sistema natural más amplio. El ambiente como un abastecedor de recursos limitados, e incorpora un giro en el flujo de los recursos y residuos. Buscando dominarse en la sociedad del futuro, donde se convierta en un sistema ecológico cíclico que sea capaz de una reproducción continua de flujos de recursos-residuos encontrando el éxito de la economía.

Los problemas medioambientales son las consecuencias de actuar como una economía lineal, simple, perjudicial, con procesos rápidos, e insostenibles. La economía circular tiene como

objetivo reducir el uso de los recursos, buscando preservar el recurso el mayor tiempo posible (Briones, *et. al.*, 2022).

El uso de aguas residuales tratadas, puede ser una fuente segura de agua reduciendo impactos negativos, con beneficios económicos, sociales y ambientales, que son importantes para la implementación en los programas de planificación del agua (Cervantes *et al.*, 2009). En la actualidad este recurso no convencional se ha convertido en una de las estrategias básicas para la gestión hídrica y un activo clave del concepto de Economía Circular (Netjet, 2021).

La economía circular es un enfoque de corte económico, que se interrelaciona con la sostenibilidad, y cuyo objetivo es otorgar valor a través de la reutilización del recurso (Melgarejo, 2018). Su objetivo es que se mantenga la economía circular el mayor tiempo posible y que se reduzca en este caso el uso de agua potable, basando sus principios de ir cerrando el ciclo. La fundación Ellen MacArthur es una organización líder en la promoción de este concepto. Esta fundación propone tres principios básicos: eliminar los desechos y la contaminación, mantener los productos y materiales en uso, y por último regenerar los sistemas naturales. El modelo económico actual es tomar-hacer-disponer, en contraparte a una economía circular, se centra en los beneficios positivos, en separar poco a poco la actividad económica del consumo final de recursos y eliminar los desechos (Ellen MacArthur, 2022).

Una de las principales ventajas de adoptar los principios de economía circular en la gestión de aguas residuales es que, según el Banco Mundial (2020), la recuperación de recursos podría transformar en gran parte el saneamiento de ser un servicio costoso, a uno que podría llegar a ser autosostenible y añadiría un valor a la economía.

La economía circular es restaurativa, y de bajo impacto ambiental. Se trata de llevar un proceso apoyado en el ecodiseño, ya que se preocupa por ser ecológico y eficiente, para que los recursos mantengan su utilidad y valor en todo momento, con el ciclo continuo (Briones, *et. al.*, 2022).

A pesar de los beneficios mencionados por los diferentes autores, es necesario señalar que la transición hacia la economía circular tendrá que enfrentar algunas barreras que requerirán de esfuerzo integrado de los diferentes actores relacionados con la transformación de los procesos de producción o con los diferentes usuarios donde sea viable. En el caso particular del análisis nos referimos a los Organismos Operadores de Agua (OOA) y los grandes usuarios del agua

(industria, energía, agrícola y público urbano). Para nuestros casos de análisis se retoma los modelos de ecología industrial y cradle to cradle por que nos son útiles para explicar los procesos de los sitios. Además se deberá tomar en cuenta la legislación y normativas, la factibilidad financiera, la educación y capacitación, la tecnología y los modelos de negocio (Morato, *et, al.*, 2017).

De acuerdo a Briones y colaboración (2022) la economía circular debe tomar en cuenta puntos principales: se vende el uso, por ello se puede comprar este uso como un servicio, dado que se está ofreciendo un producto para su venta y utilización, cuando este ya no sea útil se busca recuperar y renovar para que entre de nuevo en el ciclo, el segundo es tomar en cuenta el principio de reducir, reutilizar y reciclar, porque primero que nada se debe buscar que se disminuya el consumo del recurso, para después poder reutilizar y buscar que se recicle en el sistema y el tercero el modelo cíclico cambiando la manera de pensar y adaptarnos, a la nueva mentalidad del reuso.

Los 7 Pilares en los que se basa la economía circular de acuerdo con la fundación ECOLEC (2021) son: materias primas, diseño/ innovación, producción y reelaboración, distribución, consumo, utilización, reutilización, reparación, recolección y reciclado.

Con este modelo se quiere expresar que la mayoría de los elementos pueden ser aprovechados de manera continua. El principio de materia prima es visualizar en este caso al agua residual como un recurso.

Es una alternativa que busca la gestión de los recursos naturales, por la crisis ambiental y social que se vive hoy en día por la producción lineal, los fundamentos principales que se resaltan son la minimización de externalidades de la producción de bienes y servicios, el mantenimiento de los recursos en uso el mayor tiempo y contribución de capital natural (González, *et, al.*, 2019).

El diseño y la innovación son elementos clave para buscar alternativas asequibles en el reuso, adaptables a las características específicas de cada ciudad. La producción y reelaboración son elementos destacados al momento de buscar alternativas al reuso que puedan cerrar el ciclo, por ejemplo el uso del agua en la industria, el agua residual tratada como beneficio y aportación de nutrientes al sector agrícola y las áreas verdes, aquí se manifiesta también el elemento de reciclado y reuso de agua.

El elemento de distribución es uno de los elementos clave por que la infraestructura necesaria de viabilidad al reuso, se puede afirmar que este proceso ha sido una de las grandes limitantes para avanzar en esta visión crítica.

Primero que nada se debe recalcar que se necesita la disminución del consumo inmoderado por consumir el recurso, buscando la utilización de nuevas perspectivas como la economía circular, que busca la reparación y recolección del recurso dañado para evitar iniciar un nuevo ciclo lineal que acabe en desecho. Enfocándose también en la valorización del recurso para aprovechar hasta el más mínimo beneficio que nos puede brindar el recurso. En estos elementos de la economía circular la funcionalidad es vital, quiere decir que el recurso termina su función útil y vuelve a ser agua residual, para repetir su ciclo de reutilización.

Transitar a una economía circular en el sector hídrico es complicado, se requieren grandes cambios en el diseño de productos, modelos de negocios, gestión de los desechos, formulación de instrumentos económicos y en la formulación de políticas públicas (González, *et al.*, 2019).

Cabe señalar que el concepto de Economía Circular nos remite a la importancia a que el reuso de aguas residuales tratadas va a depender de la rentabilidad. Armenta (2019) cuestiona para qué se quiere reusar y en qué condiciones se da el reuso. Para ello señala: primero a pesar de que para su reuso el agua residual tratada necesita cumplir con una determinada calidad, dependiendo el usuario que la utilizará, segundo sigue teniendo menos costo, que el agua de primer uso o el de extracción del medio natural. Tercero, las aguas residuales traídas satisfacen las necesidades de quien las reusan.

En síntesis la economía circular es completamente eficiente en el largo plazo, tomando en cuenta los principios de Cerda y Khalilova (2019; 11-19) donde se hace resaltar tres puntos elementales: preservar (a través de la disminución de recursos) y mejorar el capital natural (usos consuntivos y no consuntivos), reutilizando (reuso) y obteniendo su máxima utilidad, en segundo optimizar el rendimiento de los recursos, con la circularidad buscando obtener la mayor utilidad de estos, y en tercero fomentar la eficiencia del sistema (Briones, *et al.*, 2022), (Fundación Ellen MacArthur, 2018).

El modelo de ecología industrial da a conocer que para poder ser aplicado necesita de un intercambio de aguas residuales tratadas entre los diferentes sectores, esto puede ser para uso

industrial como es el caso de algunos de nuestros sitios de estudio. Se debe buscar un nuevo uso de las aguas residuales tratadas, como en la creación de parques eco-industriales (González, *et. al.*, 2019), basándose en el modelo del autor (Mc Donough, *et. al.*, 2002).

Otro modelo que tiene medidas muy similares a las implementadas en los sitios de estudio es Cradle to Cradle, teniendo como aplicación la reutilización de aguas residuales tratadas, para la producción de bienes y servicios, teniendo los casos de los sitios como ejemplo, que sería el sector industrial (AHMSA, RASSINI) y el sector de energía (CFE), ayudando a la prevención de la contaminación de los cuerpos receptores (González, *et. al.*, 2019), basándose en el modelo del autor (Cervantes *et. al.* 2009).

## **CAPÍTULO III. DISEÑO METODOLÓGICO**

En este capítulo se abordará y explicará la estrategia metodológica utilizada para desarrollar este trabajo. Se describe el tipo de investigación, el muestreo de los sitios de estudio, las técnicas de investigación utilizadas y el proceso de sistematización y análisis de la información para cumplir con los objetivos y responder la pregunta de investigación.

### **3.1 Tipo de investigación**

La investigación buscó generar información acerca del reuso del agua residual tratada, así como las dificultades y oportunidades identificadas, en 5 sitios de estudio. No hay mucha información publicada sobre el reuso de agua tratada en ciudades mexicanas, y al tratarse de un número reducido de casos en donde era, además, importante conocer las opiniones y percepciones de los organismos encargados de este servicio, un enfoque cualitativo fue el más indicado. Dicho enfoque permite generar información a profundidad sobre un número reducido de casos a través de técnicas de investigación como la revisión de documentos, la entrevista y la observación (Hernández Sampieri, *et al.*, 2010)

### **3.2 Muestreo**

Para un estudio inicial de este tema, se definió una región discreta del territorio mexicano con características climáticas y económicas similares, en donde hay comunicación y relación entre los organismos operadores de agua y saneamiento, y que coincide con la localización de la sede de El Colef en el que se desarrolla la Maestría en Gestión Integral del Agua: el noreste de México. Trabajar dentro de una sola región también se adaptó a la disponibilidad de tiempo y de recursos para trabajo de campo para esta investigación.

Dentro de la región de estudio, el muestreo de los sitios específicos de estudio fue intencional y de casos-tipo, buscando maximizar el rango de experiencias y cubriendo diferentes tipos de caso (Hernández Sampieri, *et al.*, 2010). En este sentido se buscó abarcar un rango de tamaños de ciudad<sup>2</sup>, desde las más grandes como la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) y Saltillo, medianas como Reynosa, Nuevo Laredo y Monclova, y pequeñas como Ciudad

---

<sup>2</sup> Los sitios de estudio incluyen un área metropolitana de varios municipios (Área Metropolitana de Monterrey), así como cabeceras municipales de varios municipios (Saltillo, Monclova, Piedras Negras y Nuevo Laredo). En el texto nos referiremos a estas localidades como “sitios” de estudio y ocasionalmente como ciudades.

Piedras Negras<sup>3</sup>. También se logró incluir casos en que el organismo operador de agua operaba tanto los servicios de agua y drenaje como los de tratamiento de agua residual, como en el AMM y Saltillo, casos en que el tratamiento de agua residual es operado por otra empresa u organización como Monclova y Piedras Negras, y un caso híbrido como Nuevo Laredo. Finalmente, la muestra seleccionada cubre también una diversidad en fuentes de agua de los sitios de estudio, desde exclusivamente superficial como Piedras Negras y Nuevo Laredo, a exclusivamente subterránea como Monclova, y casos híbridos de fuentes tanto superficiales como subterráneas como AMM y Saltillo. Esta diversidad permitiría identificar similitudes y diferencias entre diferentes tipos de experiencias que resultaría informativo para una amplia gama de potenciales actores fuera de la muestra de estudio.

### **3.3 Recolección de información – Técnicas de investigación**

Se utilizaron mayormente dos técnicas de investigación: análisis de documentos y entrevistas. A continuación, se describe el desarrollo de cada una.

#### **3.3.1 Investigación documental: Búsqueda, recopilación y revisión de literatura**

Se realizó una revisión de documentos académicos, institucionales y hemerográficos que abordan el tema de reuso del agua residual tratada (ART). Se incluyó información en bases de datos; estadísticas mundiales, nacionales y locales; así como casos exitosos que permitieran identificar diferentes beneficios que puede representar el reuso de ART para ciudades del noreste de México. Estos documentos sustentaron y fueron de apoyo para el desarrollo de los antecedentes, el marco conceptual y el análisis.

La búsqueda de información se realizó en buscadores académicos, páginas web de los organismos operadores de agua y saneamiento, bibliotecas y periódicos en línea. Se sistematizó información de artículos, tesis, documentos institucionales, entre otros. Estos materiales contribuyeron a generar las fichas de información y afinar las guías de entrevista de cada sitio, así como comprender la importancia y la perspectiva que se tiene sobre este tema en los diferentes organismos operadores del noreste.

---

<sup>3</sup> A pesar de haber hecho varios intentos, no fue posible lograr entrevistas en Reynosa y Ciudad Acuña, por lo que no fueron incluidos estos sitios en la investigación. Monclova fue incluida ya iniciado el trabajo de campo por recomendación de entrevistados debido a su valor para la investigación.

### **3.3.2 Investigación de campo: entrevistas**

El trabajo de campo consistió principalmente de entrevistas y visitas a los organismos responsables del agua tratada y su reuso. Se realizó el trabajo de campo entre abril del 2021 y diciembre del 2022.

Las entrevistas fueron un instrumento importante para la recolección de información, porque permiten recabar datos directamente de los actores clave del contexto de cómo se maneja el reuso de ART en las ciudades analizadas.

Se eligió y buscó contactar a aquellos actores clave involucrados en los organismos encargados de darle tratamiento a las aguas residuales y de promover su reuso, así como a personas en el medio que tienen conocimiento sustancial sobre cómo se aborda el reuso de ART en los sitios de estudio.

El número de entrevistas realizadas fue de 8. En ellas se buscó complementar la información previamente recabada en la revisión documental, así como recoger las opiniones y percepciones respecto a las dificultades y oportunidades en la instrumentación del reuso de ART para tener una clave de apoyo para nuestro análisis e investigación. Las entrevistas se efectuaron por diferentes medios: por video llamada, por medio telefónico y otras en persona. Se distribuyeron como se enlista a continuación.

1. Monterrey, Nuevo León, 1 entrevista presencial con 2 funcionarios
2. Saltillo, Coahuila, 1 entrevista presencial con 1 funcionario
3. Piedras Negras, Coahuila, 2 entrevistas presenciales con 2 funcionarios
4. Monclova, Coahuila, 1 entrevista telefónica, 1 por medio escrito y 1 presencial
5. Nuevo Laredo, Tamaulipas, 1 entrevista virtual por video llamada

La duración aproximada osciló entre una hora y media y dos horas, de acuerdo con cada caso. Para tener un registro de las entrevistas y la información obtenida, se tomaron notas. La mayor parte de ellas fueron grabadas, cuando así consintieron los entrevistados.

Las entrevistas fueron semiestructuradas: basadas en guías de preguntas y donde el entrevistador tiene la libertad de introducir temas adicionales para aclaraciones y clarificación de información sobre el tema que se requiera (Hernández Sampieri, *et. al.*, 2010). Así pues, se elaboró un guión base para los entrevistados, mismo que se fue adaptando y modificando de

acuerdo con la información requerida para cada sitio de estudio. Se buscó, recabar y complementar la mayor cantidad de datos e información.

### **3.3.3 Dificultades en la recolección de información**

Las principales dificultades en la recolección de información fueron las siguientes. En general hay muy poca información publicada, ya sea impresa o en línea, sobre el reuso de ART en México, tanto de dependencias y organizaciones a nivel nacional como a nivel de los organismos operadores. Por otro lado, fue difícil conseguir entrevistas con el personal con conocimiento en los organismos responsables; la mayoría de las entrevistas se obtuvieron gracias a recomendaciones personales de conocidos de los entrevistados. También se dio el caso de informalidad en cita acordada, donde no se presentó el entrevistado.

### **3.4 Sistematización y análisis de la información**

La sistematización consistió en conjuntar la información de la revisión bibliográfica y aquella producto del trabajo de campo. Se inició con la generación de una ficha por ciudad a partir de la revisión de documentos, para recabar información relevante y tener un contexto más amplio sobre la ciudad y los aspectos que podían influir en el reuso del ART. Esto fue base para ajustar cada guión de entrevista, según fuera el caso y la información que se había obtenido de las fichas.

Ya realizada la entrevista, se transcribieron la grabación y las notas tomadas durante la misma a un documento Word. El objetivo fue rescatar todos los datos y detalles de cada entrevista. Después se procedió a la codificación, que consistió en identificar los conceptos clave obtenidos en las diferentes transcripciones. Posteriormente los códigos se agruparon en temas afines y se relacionaron lógicamente en un sistema de categorías. Las categorías pueden ser conceptos, experiencias, ideas, hechos o significados (Hernández Sampieri, *et. al.*, 2010).

Con esta información se procedió a construir una matriz en el programa Excel, vaciando toda información recabada en fichas, entrevistas y sistema de categorías, con el fin de que los datos se pudieran ordenar de una manera más sistemática. La base de datos que se construyó incluyó 27 variables, que se organizaron en 4 grandes temas como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Estructura de base de datos

Sitio de estudio	Grandes temas	Variables
Monterrey (ZMM) Saltillo Nuevo Laredo Monclova Piedras Negras	1. Contexto físico, climatológico, económico y demográfico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Población</li> <li>• Extensión territorial</li> <li>• Precipitación</li> <li>• Temperatura media anual</li> <li>• Fuente de Agua</li> <li>• Actividad Económica</li> <li>• PIB</li> </ul>
	2. Contexto de las plantas tratadoras de aguas residuales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• OO/Jurisdicción</li> <li>• PTAR's/Jurisdicción</li> <li>• No. De Plantas</li> <li>• Capacidad</li> <li>• Volumen ART</li> <li>• % Cobertura de saneamiento</li> <li>• Inicio PTAR</li> <li>• Cumplimiento NOM-003-SEMARNAT-1997</li> </ul>
	3. Reuso del agua residual tratada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antigüedad PTAR agua tratada</li> <li>• Número de líneas de agua tratada</li> <li>• Capacidad de línea de agua tratada</li> <li>• Volumen de línea de agua tratada</li> <li>• Km de línea de agua tratada</li> <li>• \$ por m<sup>3</sup> (El costo por m<sup>3</sup> en línea)</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de pipas para agua tratada</li> <li>• Volumen de pipas para agua tratada</li> <li>• \$ por m<sup>3</sup> (El costo por m<sup>3</sup> adquirido)</li> <li>• Usuarios de agua tratada</li> <li>• % De reuso agua residual tratada</li> </ul>
	4. Dificultades y beneficios presentados en los sitios de estudio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificultades</li> <li>• Éxitos/Beneficios</li> </ul>

La organización de información en esta matriz o base de datos facilitó la visualización e interpretación de los resultados, pudiendo encontrar mejor la relación y comparación de cada dato relevante de los sitios estudiados. Con base en la matriz construida se desarrolló el proceso de análisis comparativo de los sitios, identificación de similitudes y diferencias, y la identificación de los vínculos entre ellas (Hernández Sampieri, *et, al.*, 2010). El material del Tema 1 se incluyó en la sección de Antecedentes de la Zona de Estudio del Capítulo I. El material de los demás temas se presenta en el Capítulo IV. Resultados y Discusión.

## **CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se presentan y se discuten los resultados de la investigación documental y de campo. Se inicia con una descripción de la situación que guarda el tratamiento de agua residual en cada sitio y una discusión de las similitudes y diferencias relativas entre sitios. Enseguida se aborda el tema específico del reuso de agua residual tratada por sitio y la comparación entre ellos. Finalmente se presentan las dificultades y oportunidades que han encontrado los organismos operadores en la promoción e implementación del reuso de ART en la región de estudio. Este análisis representa una comparativa entre áreas urbanas que pudiera ser un punto de referencia útil y/o de apoyo para alentar el reuso en otros organismos operadores y autoridades de otras ciudades con condiciones similares.

### **4.1 Contexto de las plantas tratadoras de los sitios de estudio**

Esta sección presenta el panorama relativo a las plantas de tratamiento en la zona de estudio, con el objetivo de analizar el estado del agua residual tratada en los sitios de estudio. Se describen la jurisdicción, las capacidades, volúmenes tratados, cobertura de saneamiento, fecha de inicio de las PTAR y el cumplimiento normativo. Se inicia con recuento del contexto de cada sitio de estudio, seguido de un análisis comparativo.

#### **ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY, NUEVO LEÓN**

La ZMM tiene como organismo operador el Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM), que es un organismo público estatal; este mismo organismo es el encargado de tratar las aguas residuales. La primera PTAR se construyó en 1954. En la ZMM SADM tiene 4 principales plantas de tratamiento, con una capacidad desde 200 a 7,500 l/s cada una. La capacidad total diseñada de las PTAR en la ZMM es de 16,162 l/s y el promedio de tratamiento es de 12,281 l/s de agua residual (Informantes 2 y 3, 2021). El SADM reporta una cobertura de saneamiento del 100% de las aguas residuales de la ZMM, tratando sus aguas con lodos activados y cumpliendo con la NOM-003-SEMARNAT-1997 en todos sus parámetros.

#### **SALTILLO, COAHUILA**

Aguas de Saltillo es el organismo operador de los servicios de agua y drenaje y también el encargado de tratar las aguas residuales. Es una asociación público-privada entre el Municipio de Saltillo y la empresa Suez. Cuenta con 2 plantas de tratamiento llamadas la Principal y el Bosque Urbano. En la planta la Principal se tiene una capacidad de 1,200 l/s y trata

regularmente 960 l/s. Esta planta tiene un módulo de tratamiento adicional de 150 l/s (aproximadamente 16% del agua que trata). La planta Bosque Urbano es más pequeña, se encuentra al interior del parque con el mismo nombre, tiene una capacidad de 70 l/s y trata el máximo de su capacidad (Informante 1, 2021). La capacidad total en conjunto de las plantas es de 1,270 l/s, tratando un volumen de 1,030 l/s. La cobertura de saneamiento de las aguas residuales es del 94%.

Ambas plantas cuentan con un tipo de tratamiento de lodos activados. La planta Principal trata el 93% del agua residual de la ciudad, cumpliendo actualmente con la NOM-001-SEMARNAT-1997, exceptuando algunos problemas relacionados con los niveles de nitrógeno. Por su parte, la planta Bosque Urbano cumple con la NOM-003-SEMARNAT-1997 a cabalidad.

#### NUEVO LAREDO, TAMAULIPAS

En Nuevo Laredo existen 5 PTAR's, administradas por COMAPA (Comisión Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de la zona conurbada), que es un organismo municipal público. La primera PTAR se construyó en 1996. La planta binacional, PITAR (Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales), tiene una capacidad de 3,600 l/s, la PTAR Norponiente de 200 l/s, la PTAR Parque Industrial Oradel de 9 l/s, la PTAR Las Torres de 3 l/s y la PTAR Haciendas de San Agustín de 45 l/s. En conjunto cuentan con una capacidad de tratamiento de 3,857 l/s, sin embargo se tratan 1,094 l/s aproximadamente.

La cobertura de saneamiento de las aguas residuales es del 93.1% (Cooperación Ecológica Fronteriza, 2022), siguiendo un tipo de tratamiento de lodos activados. Se alcanzan los estándares requeridos para el reuso de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1997 (CILA, 2021).

#### MONCLOVA, COAHUILA

En Monclova la PTAR inició operaciones en 1965 (SIMAS, 2015). El Sistema Municipal de Aguas y Saneamiento (SIMAS) es el organismo público encargado de recolectar toda el agua residual de la ciudad, con una capacidad de recolección de 675 l/s. El SIMAS dirige las aguas residuales para su tratamiento a la PTAR de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (CEAS) que tiene una capacidad 650 l/s. El volumen de agua residual entregada oscila entre los 520-600 l/s (Informante 5, 2022). Existe una cobertura de saneamiento del 85% de las

aguas residuales, siguiendo un tratamiento de lodos activados, cumpliendo los estándares requeridos de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997.

#### PIEDRAS NEGRAS, COAHUILA

En Piedras Negras es el Sistema Municipal de Agua y Saneamiento (SIMAS) el organismo público encargado de dotar de agua potable y recolectar el agua residual desde 1994, mientras que AREMA (Agua, Residuos y Medio Ambiente) es la empresa privada concesionada para tratar el agua residual. La PTAR de AREMA, inició operaciones en el año 2000 y tiene una capacidad de 720 l/s, y efectúa el tratamiento de un rango de 635-650 l/s aproximadamente (Informante 4, 2021). Piedras Negras cumple con una cobertura de saneamiento del 100% en sus aguas residuales. El tratamiento en la PTAR es de lodos activados, cumpliendo los estándares establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Tabla 4.1 Contexto de las plantas tratadoras de los sitios de estudio

Sitio de estudio	OOAS Jurisdicción	PTAR's Jurisdicción	Año de inicio PTAR	No. de Plantas	Capacidad Total	Volumen Tratado	Cobertura de Saneamiento	Tipo de tratamiento	Calidad del Efluente
ZMM	SADM Estatal público	SADM Estatal	1954	4	16,162 l/s	12,281 l/s	100%	Lodos Activados	NOM-003-SEMARNAT-1997
Saltillo	Aguas de Saltillo Público-Privado Municipal	Aguas de Saltillo Público-Privado Municipal	1997	2	1,270 l/s	1,030 l/s	94%	Lodos Activados	Principal NOM 001, excepto el nivel de N Bosque Urbano NOM-003
Nuevo Laredo	COMAPA Municipal público	1 PITAR Binacional 4 PTAR COMAPA	1996	5	3,857 l/s	1,094 l/s	93.1%	Lodos Activados	NOM-001-SEMARNAT-1997

Monclova	SIMAS Municipal público	CEAS Estatal	1965	1	650 l/s	520 a 600 l/s	85%	Lodos Activados	NOM-003-SEMARNAT-1997
Piedras Negras	SIMAS Municipal público	AREMA Privado	1994	1	720 l/s	635-650 l/s	100%	Lodos Activados	NOM-003-SEMARNAT-1997

Fuente: Elaboración propia con información documental y de los entrevistados.

## **Discusión del tratamiento del agua**

Se observa que hay una variedad de jurisdicciones del organismo operador de agua y saneamiento en cada uno de los sitios de estudio, en algunos casos como Nuevo Laredo, Monclova y Piedras Negras, se tiene un sistema público-municipal, en el caso de la ZMM se tiene un sistema público-estatal y el caso de Saltillo, es el único en la zona de estudio que tiene un organismo público-privado de asociación de nivel municipal.

En lo que se refiere a la jurisdicción de las PTAR's se observa que en tres casos el mismo organismo que recolecta las aguas residuales es el que las trata: ZMM, Saltillo y Nuevo Laredo. En el caso de Monclova, el que opera la planta de tratamiento es otro organismo gubernamental, el CEAS estatal, y en el caso de Piedras Negras, es un organismo privado.

A pesar de que se tienen diferentes arreglos institucionales entre el organismo que recoge el agua residual y quien opera la planta, se observa que eso no ha sido una limitación para el buen tratamiento de las aguas. También se observa que hay dos sitios en donde hay una participación del sector privado en el tratamiento, estos son Piedras Negras, donde el sector privado se ocupa al 100% de la planta y Saltillo donde hay una asociación público-privada tanto del organismo como de la planta de tratamiento. Ninguna de estas diferencias afecta o ha limitado el buen tratamiento del agua, ni la cobertura de tratamiento.

En lo que se refiere al número de plantas y su capacidad total, se observa que el sitio con mayor número de plantas es Nuevo Laredo que cuenta con 5 plantas, seguido de la ZMM con 4, Saltillo con 2, Monclova y Piedras Negras con 1. En lo que se refiere a la capacidad de tratamiento el sitio con mayor capacidad de tratamiento es la ZMM con 16,162 l/s, seguido de Nuevo Laredo con 3,857 l/s, después Saltillo con 1,270 l/s, Piedras Negras con 720 l/s y Monclova con 650 l/s. Esto se correlaciona con el PIB en el caso de Saltillo y Nuevo Laredo, que aunque llama la atención que Saltillo a pesar de tener mayor PIB, tiene menor capacidad de tratamiento que Nuevo Laredo, esto podría ser al sector de rama industrial con la que cuenta Saltillo. En el caso de Monclova y Piedras Negras, Monclova tiene una diferencia de población mayor de 61,624 sobre Piedras Negras, se puede notar que a pesar de esto Monclova cuenta con una capacidad de tratamiento menor con una diferencia de 70 l/s.

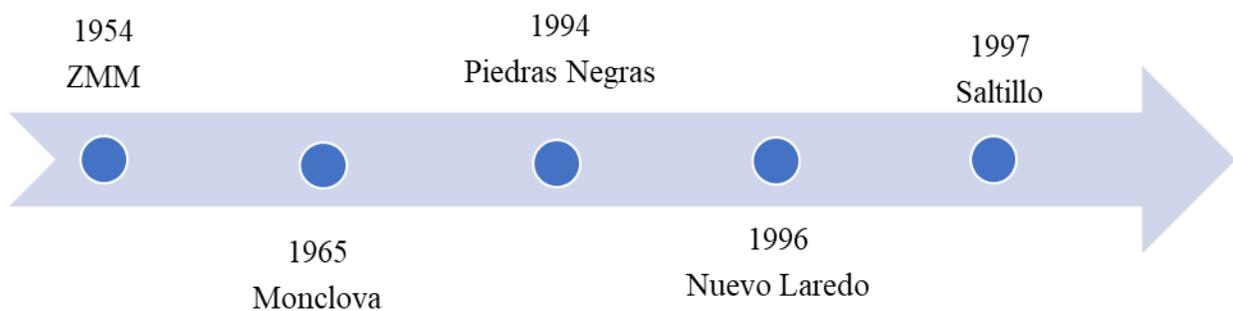
En lo que se refiere al volumen tratado se observa que ningún sitio está tratando su agua a la capacidad total diseñada de sus plantas. El que más se acerca es Monclova cubriendo el 92%

de su capacidad, siguiéndole Piedras Negras con 90%, después con Saltillo 81%, la ZMM con 75% y Nuevo Laredo con 28%.

En lo relativo a la cobertura de tratamiento la ZMM y Piedras Negras sobresalen por reportar un 100% de cobertura de saneamiento, seguidos de Saltillo con 94%, Nuevo Laredo con 93.1% y Monclova con 85%.

En lo que se refiere al año de inicio de las operaciones de las PTAR's en la zona de estudio, se tiene que la ZMM fue el primer sitio con la primera planta en 1954, seguido de Monclova en 1965, después Piedras Negras en 1994, Nuevo Laredo en 1996, Saltillo en 1997.

Figura 4.1 Línea del tiempo del comienzo del tratamiento en los sitios de estudio.



Fuente: Elaboración propia con información documental y de los entrevistados.

Finalmente, el tipo de tratamiento de todos los sitios de estudio es lodos activados, con una calidad del efluente con la que se cuenta en todos los sitios de estudio es de NOM-003-SEMARNAT-1997, excepto para Nuevo Laredo y Saltillo, en una de sus plantas, que cuentan hasta el momento con la NOM-001-SEMARNAT-1997.

#### **4.2 Contexto del reuso del agua residual tratada en los sitios de estudio**

En esta sección se describe la situación que guarda el reuso de agua residual tratada en la zona de estudio. Se describen la fecha de inicio del reuso de agua tratada, el número de líneas moradas, el volumen distribuido por la LM, los kilómetros de LM, el precio de ART en LM, el número de pipas para agua tratada, el volumen entregado por pipas, el precio de ART por pipas, así como los usuarios y el porcentaje del reuso que se tiene en cada sitio de estudio. Se comienza con un recuento del contexto del reuso de cada sitio de estudio, seguido de un análisis comparativo.

## ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY, NUEVO LEÓN

En la ZMM se comenzó el reuso del ART en 1994. SADM cuenta con 10 líneas moradas, que suman en total 310 km, para transportar el ART para su reuso a las diferentes locaciones. La capacidad de cada línea es variable, de acuerdo con el material con el que está construida la línea y su ubicación geográfica. En la ZMM, el SADM pudo aprovechar la infraestructura de varias líneas de Pemex en desuso, lo cual facilitó la creación de una red tan extendida de LM en esta localidad. Dicha red transporta hasta el momento un volumen de 2,751.52 l/s, que se vende en \$5. 50/m<sup>3</sup>. El organismo operador tiene 13 garzas, que son los puntos de carga para pipas, a través de las cuales entrega 1, 300 l/s, a pipas públicas y privadas con un costo de \$11/m<sup>3</sup> (Informante 2 y 3, 2021). Por el momento SADM no ofrece el servicio de entrega de ART en pipas propias.

SADM cuenta con un padrón de 121 usuarios a los cuales les brinda agua tratada. Los usuarios urbanos incluyen el riego de áreas verdes públicas y privadas, generación de energía, sector industrial y mitigación de polvos. Actualmente se reusa 33% del agua tratada aproximadamente, por lo que se tiene a disposición el resto del agua residual tratada que no ha podido ser acomodada para su reuso y venta, y que es destinada a riego agrícola y/o descargada al Río Pesquerías.

## SALTILLO, COAHUILA

En Saltillo se comenzó con el reuso de ART en 2005. Aguas de Saltillo cuenta con una línea morada de 8 km, con un volumen de la línea de 67 l/s. Como se comentó anteriormente, se tiene 2 plantas: la Principal y Bosque Urbano. De la Principal se reusa un volumen de 18 l/s que representa solo el 1% de lo que trata esa planta, mientras que en la planta Bosque Urbano se reusa 49 l/s que es el 70% de lo tratado allí. En conjunto reusan un total de 67 l/s que equivale al 6.5% de los 1030 l/s tratados en ambas plantas. Por el momento, el organismo no da servicio de pipas, sin embargo se brinda cerca de 1,000 cargas mensuales de 10 m<sup>3</sup> del agua tratada a pipas públicas o privadas en la planta Bosque Urbano (Informante 1, 2021).

Como el reuso se da en uso público, en especial en el riego de áreas verdes, éste por el momento no tiene un costo fijo, ya que no se cobra este recurso al gobierno. Sin embargo, cuando llegan a tener venta por pipas, que es muy incipiente, la ofrecen en \$7.6/m<sup>3</sup>.

Los usuarios a los cuales se les brinda agua tratada son las áreas verdes, terracerías y el sector industrial; el resto del agua que no se ha logrado reusar se descarga al arroyo La Encantada.

#### NUEVO LAREDO, TAMAULIPAS

Las 4 PTAR's y 1 PITAR de Nuevo Laredo que se encuentran a cargo de COMAPA tratan en conjunto un volumen de agua residual tratada de 1,094 l/s, como se mencionó anteriormente. La planta binacional, la PITAR (Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales) trata un volumen de 950 l/s. Las municipales tratan: PTAR Norponiente (125 l/s), PTAR Parque Industrial Oradel (7 l/s), PTAR Las Torres (3 l/s), PTAR Haciendas de San Agustín (9 l/s) (Cooperación Ecológica Fronteriza, 2022). Sin embargo no se encontró un costo fijo en la venta de ART.

El reuso de ART en Nuevo Laredo es poco, aproximadamente 6% del agua tratada. Su uso es público urbano en riego de áreas verdes, mitigación de polvos, construcción y también para generación de energía eléctrica. Algunas áreas verdes se riegan por la línea de agua tratada y el resto por medio de pipas. La PTAR Las Torres produce ART, específicamente para el riego de algunos parques. Aproximadamente el 94% del ART no se utiliza en el ámbito urbano y se vierte en el cauce del Río Bravo, incorporándose a los escurrimientos que van a dar a las presas Internacionales la Amistad y Falcón y que son la fuente de abastecimiento de los distritos de riego 050 Acuña-Falcón, con 286 usuarios, y 025 Bajo Río Bravo que tiene 15, 148 usuarios (Informante 6, 2022).

#### MONCLOVA, COAHUILA

Se comenzó con la implementación del reuso del agua tratada en 1995. CEAS cuenta con una infraestructura de reuso de dos líneas moradas paralelas en un trayecto de 7 km, de la PTAR a AHMSA (Altos Hornos de México). Estas líneas siguen la misma ruta ya que al ampliarse la PTAR en 2002 la primera línea se vio saturada y hubo que construir una segunda línea que sigue la misma ruta hacia la empresa. Actualmente entre las dos líneas se entregan 450 l/s a AHMSA, y esto representa el total de agua residual tratada vendida por CEAS a aproximadamente \$6.0/m<sup>3</sup>. Por el momento no dan servicio por medio de pipas. El reuso de ART en Monclova es de aproximadamente el 75-82%.

El uso que le dan al agua tratada en AMHSA es principalmente para lavar equipos, sistemas de enfriamiento y riego de áreas verdes.

## PIEDRAS NEGRAS, COAHUILA

En el 1998 se comenzó con la implementación del reuso del agua morada. AREMA cuenta con 1 línea morada de 3 km, con una capacidad de 10 l/s, que es dirigida hacia la empresa industrial Rassini. Actualmente conduce solo 6 l/s que le proporcionan entre 150 – 200 mil m<sup>3</sup> al año a dicha empresa. A CFE se le brinda 600 l/s aproximadamente, 91% de las aguas residuales tratadas, las cuales son enviadas a la empresa por medio del Río Bravo, por un acueducto que tienen por Guerrero.

El precio de venta es de \$9.8/m<sup>3</sup> (informante 4, 2021). Entre estas dos empresas que son las únicas usuarias de ART en Piedras Negras, se reusa el 100%, sin embargo hay un contrato de venta de agua del 93% del ART de la planta, de manera que si otras industrias quisieran consumir agua tratada habría 7% disponible, sin embargo a falta de más usuarios urbanos en Piedras Negras, generalmente el CFE compra el 7% excedente de la ART que produce la planta.

Tabla 4.2 Reuso del agua residual tratada en los sitios de estudio

Sitio de estudio	Fecha de inicio de reuso de ART	Núm. de Líneas Moradas	Volumen distribuido por línea morada	Km de línea morada	Precio de ART en LM (\$/m <sup>3</sup> )	Núm. de pipas para ART	Volumen entregado de ART por pipas	Precio de ART en Pipas (\$/m <sup>3</sup> )	Usuarios urbanos y usos de ART	% Reuso ART
ZMM	1994	10	2,751.52 l/s	310	\$5.50/m <sup>3</sup>	13 garzas, no da servicio de pipa	1, 300 l/s *	\$11/m <sup>3</sup>	121 Generar energía Industrial Áreas verdes Mitigación polvo	33%
Saltillo	2005	1	67 l/s	8	Uso Público no cobrado	3 pipas, pero no dan servicio	1,000 cargas de 10m <sup>3</sup> (10 mil m <sup>3</sup> )	\$7.6/m <sup>3</sup>	Uso municipal en áreas verdes Terracerías Industria 3	6.5%

Nuevo Laredo	ND*	1	ND	ND	ND	SI	64,126 m <sup>3</sup> /mes	ND	Servicio público Construcción 629 Usuarios con pipas	6% en construcción y riego de áreas verdes
Monclova	1995	2	450 l/s	14	6.0/m <sup>3</sup>	No dan servicio	No venta	No	Industrial AMHSA Lavar equipos Sistemas de enfriamiento Áreas verdes	75-85%
Piedras Negras	1998	1	6 l/s	3	\$9.8/m <sup>3</sup>	No dan servicio	No venta	No	2 Industrial Generar energía	93-100%

Fuente: Elaboración propia con datos de informantes y revisión documental.

Nota:

Sub-1 SADM reportó ese dato de volumen por pipas en l/s.

Sub-2 La LM en Nuevo Laredo se construyó en marzo 2022 (COMAPA, 2022), pero no se obtuvo la fecha de cuando inicio el reuso de ART por medio de pipas, aunque se sabe que es antes del 2020 (CILA,2020).

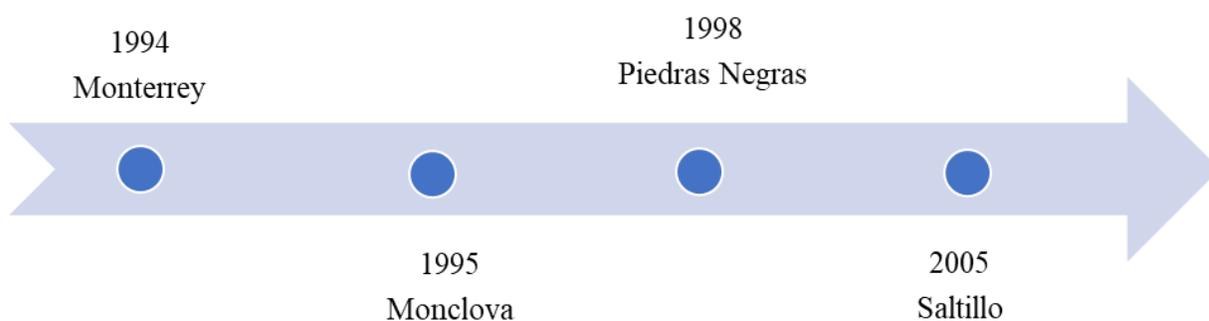
Sub-3 En Monclova el porcentaje depende del volumen total que trate la planta cada mes. Siempre se entregan 450 lts/s a AHMSA, pero la PTAR varía en el volumen tratado entre 520 y 600 lts/s.

Sub-4 En Piedras Negras en 1998 inició el reuso de ART por CFE, (conducida por el Río Bravo). En 2018 se construye la LM a la empresa Rassini y comienza el reuso de ART vía LM.

## Discusión sobre el reuso del ART

Se observa que las fechas en que empezó el reuso urbano y/o industrial de cada sitio son muy variadas. En referencia a la temporalidad de la práctica de su reuso, se observa que la ZMM encabeza el reuso, siguiendo Monclova y Piedras Negras, por reuso de AHMSA y CFE respectivamente y después Saltillo (Figura 4.2).

Figura 4.2 Línea del tiempo del comienzo del reuso en los sitios de estudio.



Fuente: Elaboración propia con información documental y de los entrevistados.<sup>4</sup>

Monterrey fue el primero en el reuso de agua residual tratada y después de 1 año, le siguió Monclova. Se esperaría que por ser los sitios más grandes Saltillo y Monterrey estarían a la cabeza del reuso, sin embargo no fue así. Seguido está Piedras Negras con una diferencia de 3 años de Monclova, después Saltillo con la diferencia de 7 años después de Piedras Negras. La diferencia de años del primer sitio al último es grande, de 11 años por lo que se vuelve más urgente abocarse a la innovación y alternativas de reuso por su mayor crecimiento y dinamismo poblacional (Figura 4.2).

El número de líneas moradas en cada sitio de estudio es variado. Destaca la ZMM con 10 líneas, después Monclova con 2 y Saltillo, Nuevo Laredo y Piedras Negras empatan con solo una línea morada. Probablemente este crecimiento de líneas se esté dando más en los sitios donde la actividad industrial es más grande, ya que la necesidad por el ART es mayor, con en el caso de la ZMM, aunque este sitio tuvo a su disposición ventajas como el reuso de la infraestructura de las líneas de PEMEX.

<sup>4</sup> No se obtuvo fecha del inicio de reuso de ART para Nuevo Laredo

En lo que se refiere al reuso de ART por medio de pipas, se observa que no todas las ciudades ofrecen esta entrega. La ZMM tiene garzas para que pipas privadas o públicas carguen ART; en Saltillo el organismo operador tiene 3 pipas, pero actualmente no dan servicio, solo se entrega ART si el usuario tiene su propia pipa. En Nuevo Laredo se usan pipas para riego de áreas verdes y para el sector de la construcción. En Monclova y Piedras Negras no se reportó el uso de pipas. Es claro que la distribución de ART por pipas es una estrategia muy variable por ciudad y en general no muy usada. Las excepciones pueden ser Nuevo Laredo y Saltillo que tiene un porcentaje relativamente alto de volumen entregado por pipas.

La línea morada, permite atender a un mayor número de usuarios. En la ZMM se atienden 121 usuarios, siendo el sitio con más usuarios a servir, después Saltillo con 4, Piedras Negras con 2, Monclova con 1 y de Nuevo Laredo no se pudo obtener el número de usuarios precisos. En los casos de Piedras Negras y Nuevo Laredo, se usa el Río Bravo para transporte de ART a CFE y a distritos de riego respectivamente (Tabla 4.2).

En cuanto al total de reuso de ART tenemos en primer lugar a Piedras Negras con 650 l/s que representa del 93-100% del ART, dado que en Piedras Negras, si se reusa el 100%, pero como se mencionó anteriormente hay un contrato de venta de agua del 93% del ART de la planta que generalmente el CFE compra ese 7% excedente de la ART por su demanda. Sigue Monclova con 450 l/s que representa 75% del ART, ZMM con 4,052 l/s que equivale al 33% del ART, seguido de Saltillo con 67 l/s equivalente al 6.5% y para finalizar Nuevo Laredo con el 6% del ART. En estos casos se puede notar que en los sitios donde la CFE compra ART, les genera un gran beneficio de venta, ya que consume una de las más grandes cantidades de agua, y aun así está en disposición de comprar más ART que tengan disponible.<sup>5</sup>

El precio del ART varía por sitio. En donde se entrega por LM el precio más bajo es en la ZMM (\$5.50/m<sup>3</sup>), seguido de Monclova (\$6.0/m<sup>3</sup>) y de Piedras negras (\$9.8/m<sup>3</sup>). En Saltillo no se cobra el ART por LM para uso urbano y en Nuevo Laredo no se cuenta con un dato preciso. En pipas el precio en la ZMM es de \$11/m<sup>3</sup> y en Saltillo de \$7.6/m<sup>3</sup>. En todos los casos el precio de ART es más económico que el agua potable de primer uso.

---

<sup>5</sup> No se tienen datos contundentes del % del reuso, solo es un aproximado

### **4.3 Dificultades y Oportunidades en la instrumentación del Reuso de ART**

En esta sección se describen las dificultades y oportunidades encontradas en los sitios de estudio con relación a la promoción del reuso y la entrega de ART. Estas observaciones sirven como base de lecciones aprendidas y temas a atender en la región y en su momento por consideración de ciudades fuera de la región que estén interesadas en promover el reuso de ART.

#### **ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY**

El agua residual tratada (ART) en la ZMM es una opción viable y accesible para los usuarios, dado que cuenta con buena calidad, y buen precio. El organismo buscó incentivar el reuso por medio de una tarifa decreciente, en la que si el usuario consume más agua el precio por metro cúbico será menor.

SADM tiene un excelente departamento administrativo, con una gerencia de ART, que tiene los contactos de los usuarios con los que cuentan. Mantiene una comunicación directa, para atender de maneras más ágil las bajas presiones, falta de surtimiento de ART o algún problema con la calidad en este proceso. Se les da seguimiento a las quejas, hasta encontrar la solución necesaria.

El reuso de ART significa diversificar el abasto del agua con beneficios tanto para el organismo como para los usuarios. Para el organismo les genera un ingreso importante y al usuario le genera un ahorro, lo que imprime beneficios económicos para ambas partes.

Al reusar ART, una empresa demuestra su interés en fortalecer el medio ambiente, y contribuye a la sostenibilidad; como beneficio ante la sociedad y en la ZMM se le reconoce con certificaciones. El SADM les otorga un certificado azul para demostrar que el usuario está reusando ART, lo cual fortalece su imagen ante la sociedad como una empresa socialmente responsable.

En SADM produce agua tratada de muy buena calidad, cumple con los estándares y lineamientos de NOM-003-SEMARNAT-1997. Tienen una excelente tecnología de tratamiento y monitoreo de las aguas, y brindan la calidad necesaria para sus usuarios (Informante 2 y 3, 2021).

Una de las grandes oportunidades para SADM fue que Pemex tenía oleoductos y gasoductos por la ciudad, mismos que por la normatividad habían cumplido su vida útil. Entonces, el organismo realizó negociaciones para obtener estas tuberías, y poder reusar su infraestructura en líneas moradas, ahorrando esa inversión y obteniendo el medio de transporte que ellos requerían.

En Monterrey existe un interés creciente en el reuso; se ha buscado dar difusión con los usuarios, para que se conozca esta fuente de agua. De igual manera han buscado que la sociedad esté al tanto de esta opción para que cada vez se utilice más. Este es el principal propósito que el organismo recalca, el sensibilizar a las personas. Por ser la ciudad con una mayor trayectoria en el reuso, la ZMM ya puede mencionar una cultura de reuso. Los usuarios industriales fueron los principales en buscar y pedir el reuso de ART.

Un punto débil de SADM en materia de reuso de ART es que no cuenta con pipas propias para distribución de ART. Esto representa un inconveniente para los usuarios, porque ellos necesitan tener o rentar pipa, para que se la puedan vender en el punto de carga.

Otra dificultad con la que se está lidiando en la ZMM, es el consumo relativamente bajo con pipa. Para atender esto SADM está buscando hacer nuevos puntos de carga (garzas), mejor ubicadas, para que las pipas privadas puedan acceder, ya que los puntos anteriores de carga para pipas quedaban muy lejos de los usuarios. De igual manera, se señala que un problema es controlar los puntos de carga y la manera en que se vende ahí el ART. SADM considera que se necesita tener un despachador. Están buscando implementar, en coordinación con los municipios, la instalación más amplia de garzas, y para mayor comodidad quieren otorgar una llave a cada usuario que tenga pipa y que con ella se haga una autodeclaración del consumo, mismo que SADM puede verificar con el medidor. Este reutilizaría medición y cobranza por parte del organismo.

En resumen, destaca que se diversifica el abasto, ya que cada litro de ART que se utiliza, es un litro de agua potable que se libera para otro fin, principalmente para el consumo humano. Existe una gran necesidad de agua en esta zona, está surgiendo una crisis por el agua, porque no hay suficiente, por eso se busca que los usuarios potenciales dejen el agua de primer uso para la población.

Además de los beneficios al sector doméstico es necesario considerar los impactos positivos para el medio ambiente, por ejemplo el buscar regar jardines, árboles, camellones, con esta agua de reuso y no descargarla sin darle un uso adicional. Monterrey implementa esta medida con la venta de ART al gobierno para el riego de áreas verdes públicas.

## SALTILLO

De acuerdo con un estudio de mercado elaborado por Aguas de Saltillo, existen industrias que están dispuestas a reusar ART, pero persiste el problema del financiamiento de la línea morada. En la búsqueda de dicho funcionamiento, se analizó la posibilidad de agua en asociación público-privada se construyera, invirtiera y operará la línea morada. También había probabilidad de apoyo de BANOBRAS a fondo perdido. Sin embargo, el funcionamiento potencial por estos medios no fue suficiente para un proyecto de esta magnitud. Se necesitan inversiones más grandes, para cubrir todas las necesidades de distribución de ART, ya sea por parte del usuario o del organismo.

Algo que no le favorece a Aguas de Saltillo es que el agua para uso público no se cobra, entonces ese ingreso que podrían tener se pierde. Se tiene que establecer tarifas de venta de ART en la Ley de Ingresos. El precio de extracción de agua de primer uso, por el que un usuario pagaría es mucho mayor al que el organismo cobra por el ART.

Otra dificultad en Saltillo es que la Planta Principal de tratamiento de agua residual ha tenido que enfrentar diversos problemas por la cantidad de nitrógeno que descarga y no cumple a cabalidad con la NOM-001-SEMARNAT-1997. Esto restringe las opciones para reuso urbano. Los únicos volúmenes que sí cumplen con la NOM-003- SEMARNAT-1997 son en el módulo de 150 l/s de la planta principal y la Planta del Bosque Urbano. Esto limita mucho la cantidad de ART disponible por reuso urbano.

Así pues, falta de infraestructura de distribución de ART es una gran limitante para muchos usuarios que buscan el reusar ART. Y dado que el organismo operador no cuenta con pipas, el usuario tiene que rentar o tener a su disposición de dichos vehículos, para la compra de ART.

Aguas de Saltillo ha buscado que su ciudad y la zona conurbada, por donde pasa el arroyo La Encantada se beneficien del agua de reuso y logren beneficios ambientales. En este sentido, el organismo llevó a cabo una consulta ciudadana, sobre la opinión o percepción respecto al

reuso de ART en algunos sectores urbanos. La respuesta fue positiva; la población está abierta a conocer y saber más al respecto sobre este tema.

#### NUEVO LAREDO

En Nuevo Laredo existe una sola línea morada construida en el mes de marzo, por donde se puede transportar el ART; esto es una limitante para distribuir el agua en el sector urbano. No se tiene mucha información sobre la línea excepto una nota en la página de Facebook de la COMAPA de Nuevo Laredo. Existen 629 usuarios del sector de la construcción y de riego de áreas verdes que reusan ART a través de pipas, pero en el mes de enero de 2022 se entregaron 64,126,080 de litros que es el 6% de agua tratada (CILA, 2020).

Otra limitante para el reuso urbano del ART en Nuevo Laredo es que las PTAR actualmente solo cumplen con la NOM-001-SEMARNAT-1997 que satisface los requerimientos de descarga a cuerpos superficiales de agua pero no aquellos para reuso urbano marcados en la NOM-003-SEMARNAT-1997. En este sentido, se descarga el ART al Río Bravo y reusa una importante cantidad de ART en los distritos de riego aguas abajo, siendo aprovechada por el sector agrícola.

Entre las oportunidades para Nuevo Laredo se encuentra que para su condición de ciudad fronteriza es elegible para recibir apoyos y financiamientos del NADBANK y otras fuentes binacionales.

#### MONCLOVA

El SIMAS vende agua residual al CEAS para su tratamiento, y el CEAS vende agua tratada a la empresa AHMSA, por lo que se tiene un ingreso tanto para el organismo que recolecta las aguas residuales, como para quien la trata. Y el sector industrial también ve el beneficio de comprar ART, ya que los derechos de extracción de agua de pozo para ellos generaban un gran gasto económico, mucho mayor al de la compra de ART.

En Monclova se encuentra una gran oportunidad, dado que la industria AHMSA ha dado a conocer su interés en comprar más ART, por lo cual SIMAS está en busca de fondos para la construcción de otra PTAR.

Una limitante para el SIMAS es que solo tiene 85% de cobertura de saneamiento; eso representa una pérdida de aguas residuales y del ingreso correspondiente tanto de agua

residual como ART. Dado que como se comentó anteriormente se planteó la construcción de una nueva PTAR, es necesario buscar la manera de aumentar la cobertura de saneamiento para poder buscar un beneficio tanto para el organismo como para su población.

## PIEDRAS NEGRAS

La primera inversión de una línea morada para transportar agua residual tratada en Piedras Negras fue financiada y construida por una empresa (RASSINI). La operación de la línea está a cargo de la empresa privada AREMA, pero el mantenimiento y cuidado de la línea morada está a cargo de SIMAS. Rassini financió el costo de \$7 millones por 3 km de línea morada y se le está pagando su inversión con ART. La línea que se financió por la empresa tiene la capacidad para buscar conexiones con otras industrias cercanas al área.

Piedras Negras por ser ciudad fronteriza también es elegible para apoyos por parte de NADBANK y otros fondos binacionales para el mejoramiento ambiental.

Se cumple con los lineamientos de la NOM-003-SEMARNAT-1997 y el proceso de tratamiento que llevan las aguas no ha tenido ningún problema. Sin embargo, es comentado que a esta planta en Piedras Negras le hace falta una expansión.

Entre las limitantes en Piedras Negras la falta de difusión para el reuso de ART tiene un peso importante, ya que si los potenciales usuarios urbanos no conocen esta opción viable, no se genera demanda del ART. El mismo gobierno municipal no ha considerado la opción de ART para el riego de sus áreas verdes y por ello no se ha materializado este uso en Piedras Negras.

### **Discusión sobre oportunidades y dificultades para la implementación del reuso**

De acuerdo con lo mencionado en las ciudades estudiadas se observó que sobresalen las siguientes dificultades:

- La falta de interés sobre el reuso de ART por algunos usuarios, mayormente del sector industrial, pero también del sector público municipal. Esta falta de interés puede estar relacionada con falta de conocimiento por parte de los usuarios sobre esta opción de agua y/o falta de promoción de uso por parte de los organismos operadores.
- Falta de infraestructura para distribuir ART en las ciudades. Este es quizás el obstáculo principal para el reuso de ART en la zona de estudio.

- Poco recurso económico para invertir en proyectos e infraestructura de esta magnitud. Esta dificultad influye directamente en la anterior.
  - En algunos casos, poco interés por parte del gobierno municipal en fomentar el reuso de ART. Así como problemas con la política pública, de establecer tarifas del ART.
  - Cambios frecuentes en la normatividad sobre el tratamiento de agua residual dificulta el cumplimiento para algunas PTAR y la disponibilidad de ART de la calidad requerida para uso urbano.
  - El sector agrícola en algunos casos acapara el agua residual, haciendo difícil canalizar ART a usuarios urbanos.

Los beneficios, éxitos o lecciones aprendidas que sobresalen en el universo de estudio son:

- Por lo general las tarifas del ART son accesibles para los usuarios, en comparación con el agua de primer uso o costos por extracción.
- Tarifas decrecientes del ART, que entre mayor sea el volumen por consumir, menor será el costo que se les brindará a los usuarios (como en el caso de Monterrey), son un incentivo adicional por el reuso de ART.
- Contar con ART de calidad que cumpla con la NOM-003-SEMARNAT-1997 para reuso urbano es uno de los factores que determinaría el potencial de reuso en una ciudad.
- Otro incentivo adicional del ART, aplicado también en Monterrey, es brindar certificaciones a los usuarios de ART con el de Empresas Socialmente Responsables.
- La venta de ART genera ingresos para el organismo con el cual pueden sustentar costos de tratamiento o invertir en nuevos proyectos, lo que le imprime una sustentabilidad financiera y un funcionamiento en el mediano y largo plazo.
- En algunas ciudades ha ido creciendo la cultura en torno al tema de reuso de ART. En Monclova y Piedras Negras la industria ha financiado la PTAR y/o la línea morada. Este esquema es muy atractivo sobre todo cuando se les paga con agua tratada.
- Encuestas de opinión entre la ciudadanía sobre el reuso de ART (como en Saltillo), puede ayudar a las demás ciudades a sensibilizar sobre el tema.

## **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

El ART es una de las fuentes más constantes de agua que se tiene en el ámbito urbano, dado que mientras se consume agua, se desaloja y va a existir el agua residual.

La tecnología de los organismos operadores para el tratamiento del agua residual y las normativas han evolucionado, desde situaciones de agua residual que se vertía directamente al cuerpo receptor a darle un tratamiento a esas aguas antes de ser vertidas. En todos los sitios de estudio presentados en esta tesis se lleva a cabo el tratamiento de lodos activados. Sin embargo, en otros lugares existen diferentes procesos de tratamiento secundarios y terciarios y se puede llegar incluso a obtener agua casi similar al agua de primer uso, por los estándares con los cuales se debe de cumplir.

Este trabajo se propuso identificar y analizar de manera comparativa los factores que influyen en el reuso de ART en algunas ciudades del noreste del país. Para ello se utilizó retoma el enfoque de gestión integral del agua y su sustentabilidad hídrica, porque a través de su tratamiento y reuso se busca: visualizar al ART como una nueva fuente hídrica de buena calidad y accesible; disminuir los problemas de contaminación al no descargar aguas residuales sin tratamiento; reducir costos de agua para grandes usuarios urbanos (industriales, agrícolas y riego de áreas verdes) y una sostenibilidad económica en el reuso por parte de los organismos operadores del agua.

Esta sostenibilidad le imprime viabilidad a la implementación del reuso, ayuda a la economía circular del ART, permite a los organismos operadores tener un ingreso por este medio, lo cual ayuda a solventar los costos de tratamiento, así como la construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura de distribución de ART.

En la zona de estudio, que comprende las áreas urbanas de la ZMM, Saltillo, Nuevo Laredo, Monclova, y Piedras Negras, se analizó el proceso de tratamiento y de aguas residuales y las experiencias de su reuso urbano. Destaca que las actividades económicas (industriales y comerciales) de la región buscan seguir creciendo, por lo tanto el reuso de ART es la opción más viable y accesible para ellos. En la mayoría de los casos estudiados el ART cuenta con buena calidad y buen precio ya que los organismos operadores buscan

incentivar su consumo por medio de una tarifa reducida. SADM, en específico, ha sido el más productivo en este sentido con la implementación de una tarifa decreciente, en la que a mayor consumo, menor el precio por m<sup>3</sup>.

Los factores que influyen positivamente en la reutilización urbana de ART fueron administrativos, económicos, técnicos y ambientales. Y en su mayoría las dificultades y beneficios, en las zonas de estudio fueron de naturaleza técnica y financiera.

La ZMM, a pesar de que se ubica en el tercer lugar en porcentaje de reuso con el 33% de su ART podría considerarse el caso más exitoso de las cinco ciudades analizadas. Esta ciudad reusa su ART de manera diversificada en el sector industrial, en la generación de energía, en sus áreas verdes, para la mitigación de polvo; y en menor cantidad en el sector agrícola.

La importancia de la ZMM radica en que al ser una ciudad mucho más grande que el resto de las ciudades estudiadas el agua que trata y reusa representa una mayor cantidad. En términos comparativos la ZMM es el organismo más exitoso en cuestión financiera, de calidad del ART y de infraestructura de distribución. Este organismo es casi autosostenible por la venta de ART y aún tiene en proceso la incorporación de más clientes de agua. La calidad del ART de la ZMM es muy buena por la tecnología que tienen en sus tratamientos, cumpliendo con las normas y lineamientos establecidos para su uso urbano. En infraestructura cuenta con una gran ventaja al poder reutilizar tuberías de Pemex ya existentes en la distribución de ART. Esta infraestructura representó un ahorro y facilitó su implementación, imprimiendo viabilidad, ya que este elemento de la infraestructura necesaria para distribuir el ART ha afectado a muchos organismos y en algunos casos incluso se ha detenido el reuso de ART.

Por otra parte, el SADM se caracterizó por tener monitorizado todo su sistema de aguas y mantener un contacto cercano y excelente atención a los clientes de ART.

Es importante recalcar que las industrias están dispuestas a invertir en tubería de línea morada y que se les pague con ART. En Monterrey, y en menor medida también en Piedras Negras, destaca que el impulso del reuso fue por parte de la industria, representando un beneficio para ellos, y este factor le imprime concientización y viabilidad al proceso.

Monclova y Piedras Negras en cuestión de porcentaje de reuso son los sobresalientes ya que tratan y reusan aproximadamente los mismos porcentajes de agua residual; se pueden

considerar dos ciudades exitosas Sin embargo, se observa un monopolio industrial de sus clientes, en especial en Monclova. Destaca, no obstante, que este interés industrial por reutilizar agua sigue latente ya que sus clientes manifiestan un interés por seguir comprando esa ART si se construyen más plantas de tratamiento o se amplían las plantas actuales.

A pesar de que cuentan con características similares en cuanto a tratamiento, Monclova cuenta con mayor cantidad de población y mayor número de m<sup>3</sup> de ART, poniendo a Piedras Negras en segundo lugar. Monclova reusa entre el 75% de su ART en el sector industrial, específicamente en la empresa Altos Hornos de México (AHMSA). Piedras Negras reusa el 92% de su ART en el sector de generación de energía con el caso de CFE y en el sector industrial con la empresa Rassini. El 8% restante, en caso de que no haya sido requerida, se desecha al cuerpo receptor, el Río Bravo.

En cuarto lugar se ubica a Saltillo, ya que cuenta con un reuso urbano de ART del 6.5%; está mayormente en áreas verdes, en menor medida en el sector industrial y el resto es descargado al arroyo por el momento. En cuestión de calidad está a un parámetro (N) de cumplir la NOM-001-SEMARNAT. Financieramente no recibe ingresos suficientes por el reuso de ART este medio dado que tiene pocos usuarios. Destaca que su principal cliente es el gobierno municipal del cual no reciben ingresos por el uso de estas aguas para riego de áreas verdes públicas. Para Saltillo la principal limitante ha sido la falta de infraestructura de distribución que ha limitado el reuso, sin embargo, cuentan con un potencial muy alto para el reuso de ART por el volumen que tiene a su disposición.

En quinto lugar se ubica Nuevo Laredo, que cumple con la NOM-003-SEMARNAT y tiene algunos usuarios para riego de áreas verdes y el sector de construcción, reusando solo el 6% a nivel urbano. La mayor parte de su ART se reusa en el sector agrícola; no se sabe con exactitud cuánto por ciento de agua se reusa, ya que el ART se vierte al Río Bravo, incorporándose al escurrimiento que va a dar a las presas que sirven a los sectores de riego 050 y 025 y no existe cobro por el uso de ella. Se observa que Nuevo Laredo no tiene incentivos suficientes para un proceso de reuso urbano más tangible.

A pesar de que se mencionaron de manera general algunos aspectos económicos al describir el reuso en las ciudades, es necesario acentuar en este factor, porque es vital en la

búsqueda de que un organismo operador llegue a ser autosostenible en el tratamiento y reuso. Por ejemplo, Saltillo no cobra el ART que usa el gobierno, por lo que no tiene viabilidad económica para pensar en la infraestructura de distribución que necesita. En contraparte la ZMM (SADM) sí cobra una tarifa en general a cualquier usuario del ART; ellos buscan justamente eso, ser autosostenibles con estos ingresos, lo que le da posibilidades de crecimiento en la venta de este recurso.

La ZMM es una de las zonas de estudio que mayor éxito ha tenido económicamente por la implementación de la venta de ART; SADM es un organismo que ha sabido manejar y tener provecho de este recurso. En esta ciudad ya se tiene una mentalidad de reuso, los usuarios industriales son los que buscan esta implementación y en algunos casos están dispuestos a apoyar con la infraestructura de distribución necesaria, pagándoles el organismo su inversión con ART.

Nuevo Laredo y Saltillo son los sitios de estudio que menos éxito económico han tenido en el reuso de ART, dado que ellos reusan y venden poco el ART en la zona urbana. En Saltillo el uso de ART se da sin cobro para riego de áreas verdes públicas. En Nuevo Laredo la mandan a riego agrícola en donde el ART no da un precio para su venta. Como se mencionó anteriormente, este factor no da beneficio directo al organismo operador.

La cultura del reuso y la promoción a las empresas es un elemento contundente para el impulso de los organismos operadores para iniciar con el reuso. La tarifa del ART es mucho menor que la de agua de primer uso y dado que la mayoría de los usuarios industriales la consumía en grandes cantidades, optaron por buscar una mejor opción. Las tarifas de ART son variables: Piedras Negras cobra \$9.8/m<sup>3</sup>, la ZMM \$5.50/m<sup>3</sup> en línea morada y por pipas un costo mayor de \$11/m<sup>3</sup>, Saltillo es el que vende a menor costo por pipas \$7.6/m<sup>3</sup>, pero destaca que su mayor reuso es a través de la línea morada exclusiva del Bosque Urbano y que esta venta por pipa es a mucho menor escala.

Se observa que las ciudades fronterizas tienen a su favor la cooperación de diferentes organizaciones como NADBANK, Fondos de la Agencia De Protección Ambiental de EE. UU., etc., que pueden apoyar con inversiones específicas por estas obras. En particular pueden apoyar aspectos ambientales, con la reducción de las fuentes de agua de primer uso, la disminución de impactos de contaminación en cuencas de agua, y cambiando la visión de

la sociedad hacia el ART y su aceptación en el reuso. También ha sido clave la alianza entre el sector público-privado en las ciudades. Para el impulso del reuso del ART en las 5 ciudades analizadas, Monterrey sí recibió apoyo por parte de algunas empresas; Piedras Negras tuvo el apoyo de NADBANK, que es una institución que ayuda a inversiones para ciudades fronterizas; en Saltillo se busca apoyo para infraestructura de reuso y Monclova se está buscando también ayuda institucional para la construcción de otra planta de tratamiento.

La práctica real de reuso va lenta, pero el análisis de las ciudades del noreste muestra cómo se está implementando la práctica. En materia discursiva ha habido cambios radicales sobre el reuso de ART, dado que anteriormente solo se tenía una visión de un metabolismo lineal con la búsqueda de más fuentes de agua para abastecer a las ciudades, pero es evidente que ya hay un reuso y se está buscando crecer y cambiar la perspectiva hacia un metabolismo circular.

El reuso del ART es un elemento importante de incluir para cerrar el ciclo urbano del agua. Contribuye igualmente a disminuir la escasez de agua ya que fue utilizada una vez puede reutilizarse varias veces más. Siempre y cuando se cumpla con las normas y lineamientos establecidos. El reuso es una alternativa más que definitiva que deben tener en cuenta los organismos operadores para un mejor manejo de su recurso.

La reutilización puede ayudar a las ciudades ante el cambio climático por representar una fuente de agua adicional y sostenible.

## **5.2 Recomendaciones**

Como se puede observar, los avances que se tienen con relación al tema del reuso de ART son aún incipientes. Queda un largo camino que recorrer en su investigación y es necesario acentuar en el análisis de diversos aspectos. A partir del análisis de los sitios de estudio se pueden derivar las siguientes recomendaciones:

- 1) Se necesita asegurar y estandarizar la calidad del ART, porque sin este punto cubierto no se puede buscar el reuso como una práctica aceptada.
- 2) Es importante lograr que las prácticas de las ciudades exitosas sean visibles y repercutan en las demás.

3) Hay que difundir los beneficios del reuso y hacer más consciente a la población de los impactos positivos que se tienen con estas prácticas, dándolas a conocer por diversos medios y promoviendo el involucramiento.

4) Es necesario hacer los planes conjuntos de tratamiento y reuso, en especial los convenios con clientes ya definidos y la búsqueda de nuevos usuarios.

5) Es necesario establecer un precio de cobro para todos los usuarios, incluyendo el sector gubernamental.

6) Hay que continuar con la búsqueda de apoyo financiero de instituciones binacionales, así como bancos públicos y privados. Se encontró que las ciudades analizadas han tenido apoyo de inversión en línea morada por parte de las industrias que reusan el ART. Es importante seguir promoviendo esa fuente de inversión también.

7) Sería muy valioso crear una página web del reuso de agua residual tratada en México, donde se dé a conocer todas las implementaciones novedosas, beneficios, certificaciones, inversiones, etc., para que unas ciudades aprendan de otras.

Estos elementos señalados son fundamentales para tener los impactos positivos necesarios para fomentar estas prácticas y lograr un crecimiento más continuo en el reuso de ART.

### **5.2.1 Algunas preguntas para futuras investigaciones**

Después de esta investigación puede haber muchas interrogantes para futuras investigaciones. Algunas de ellas se incluyen a continuación,

- 1) ¿Por qué en México no existe una ley que obligue a la industria a reusar un porcentaje de agua residual tratada en sus procesos? ¿Qué tan factible sería cumplir esta normatividad?
- 2) ¿Por qué el reuso de agua residual tratada no tiene suficiente peso en la industria? ¿Qué incentivos requiere la industria para reusar ART?
- 3) ¿Por qué ha faltado interés y promoción del reuso de ART por el sector gubernamental, sobre todo considerando los beneficios sociales, económicos y ambientales que tiene?
- 4) ¿Por qué hay tan poca investigación y difusión en torno a este tema de reuso de ART?
- 5) ¿Por qué es tan difícil obtener información sobre ART y su reuso de parte de los organismos operadores? ¿Por qué, si son organismos que dan servicio a la comunidad no tienen información disponible al público?

- 6) ¿Por qué no se han realizado o no se conocen estudios sobre el pensamiento u opinión de la población en cuanto al reuso de agua residual tratada en sus parques o áreas verdes comunes?

## BIBLIOGRAFÍA

Aparicio, R. (2016). *Aproximaciones conceptuales para un campo emergente*. SciELO.

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382018000100005](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000100005)

Ultima consulta febrero 2022

Armenta, H. (2019, 16 abril). *¿Por qué comenzar a adoptar el reúso del agua?* Humberto Armenta.

<https://humbertoarmenta.mx/por-que-comenzar-a-adoptar-el-reuso-del-agua/> Ultima

consulta abril 2022

Banco Mundial. (2020a, 20 marzo). *El agua residual puede generar beneficios para la gente, el medioambiente y las economías, según el Banco Mundial*. World Bank.

<https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-recurso-que-puede-pagar-dividendos-para-la-gente-el-medioambiente-y-las-economias-segun-el-banco-mundial>

[bank#::%7E:text=El%20agua%20residual%20del%20mundo,el%20D%C3%ADa%20Mundial%20del%20Agua](https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-recurso-que-puede-pagar-dividendos-para-la-gente-el-medioambiente-y-las-economias-segun-el-banco-mundial)

Última consulta junio 2022

Banco Mundial. (2020b, 4 agosto). *Agua Residual: De Residuo a Recurso*. World Bank.

<https://www.bancomundial.org/es/topic/water/publication/wastewater-initiative>

Ultima consulta mayo 2022

Banco Mundial. (2022). *Saneamiento: Panorama general*. World Bank.

<https://www.bancomundial.org/es/topic/sanitation> Ultima consulta junio 2022

Barton, J. R. (2006). *Sustentabilidad urbana como planificación estratégica*. SciELO.

[https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0250-7161200600020000](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-7161200600020000)

[3](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-7161200600020000) Ultima consulta junio 2022

BIOAZUL. (2019, 6 noviembre). *Metabolismo Urbano y Gestión de Recursos*.

<https://www.bioazul.com/metabolismo-urbano-y-gestion-de-recursos/>

Última consulta julio 2022

Boulding, Kenneth. E. (1996). *From the economics of the coming spaceship earth*

H. Jarret edits, Environmental Quality in a Growing Economy Baltimore, MD:

Resources for the Future/John Hopkins University Press, pp. 399

Última consulta junio 2022

Buroz C, Eduardo. (1998). *La gestión ambiental: Marco de referencia para las*

*evaluaciones de impacto ambiental*. [Caracas]: Fundación Polar.

Última consulta julio 2022

Calvente, A. M. y UAIS. (2007, junio). *El concepto moderno de sustentabilidad*

(UAIS-SDS-100-002).

<http://www.sustentabilidad.uai.edu.ar/pdf/sde/uais-sds-100-002%20-%20sustentabilidad.pdf> Última consulta julio 2022

CEPAL. (2020, 17 noviembre). *Día mundial del retrete 2020: Saneamiento sostenible y*

*cambio climático* | Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

NACIONES UNIDAS.

<https://www.cepal.org/es/notas/dia-mundial-retrete-2020-saneamiento-sostenible-cambio-climatico> Última consulta julio 2022

CILA. (2020, diciembre). *Formulación del programa de saneamiento de la frontera norte*

*a nivel gran visión* | Comisión Internacional de Límites y aguas entre México y

*Estados Unidos*

CONAGUA. (2019). *Sistema nacional de información del agua | SINA*. Sistema Nacional de Información Del Agua | SINA.

<http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?publicaciones=1>

Última consulta diciembre 2021

Cosín, C. (2017, 21 julio). *Reutilización, la gran asignatura pendiente a nivel mundial*. iAgua.

<https://www.iagua.es/blogs/carlos-cosin/reutilizacion-gran-asignatura-pendiente-niv-el-mundial> Última consulta diciembre 2021

Del Almo, C. (2022). *La Gestión del Agua y Eficiencia Hídrica*. ANAVAM

Última consulta junio 2022

Ecolec. (2021, 14 junio). *Economía circular. Especial Ecolec | Reciclaje y gestión de RAEE*. <https://ecolec.es/informacion-y-recursos/economia-circular/>

Última consulta febrero 2022

El Gobierno de Nuevo León. (2022). *Nuevo León*. [DATA NUEVO LEÓN | Datos económicos de Nuevo León \(nl.gob.mx\)](https://datos.gob.mx/explore/nuevo-leon) Última consulta enero 2022

Ellen MacArthur. (2022). *Economía Circular*. Ellen MacArthur Foundation.

<https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-circular/concepto>

Última consulta diciembre 2021

Enciso A. (2019, 14 octubre). *Periódico La Jornada*.

<https://www.jornada.com.mx/2019/10/14/sociedad/033n1soc>

Última consulta enero 2022

FAO. (2022). *6.4.2 Estrés hídrico* | [www.fao.org](http://www.fao.org). FAO.

<https://www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/642/es/> Última consulta junio 2022

FAO. (2022b). *Indicadores* | [www.fao.org](http://www.fao.org).

<https://www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/es/> Última consulta junio 2022

Gaceta UNAM.

<https://www.gaceta.unam.mx/sin-acceso-al-agua-potable-10-por-ciento-de-mexicanos/> Última consulta julio 2022

Girardet, H. (2015). *Creating Sustainable Cities (Schumacher Briefings Book 2) (English Edition)*. Green Brooks. Última consulta mayo 2022

Gobierno de México. (2020). *Manifestó por la vida, por una ética para la sustentabilidad* - El portal único del gobierno. | [gob.mx](http://gob.mx) ([www.gob.mx](http://www.gob.mx)) Última consulta julio 2022

Gobierno de México. (2022). *Informe del medio ambiente* - <https://www.gob.mx/> Última consulta junio 2022

Gobierno de Saltillo (2022). <https://saltillo.gob.mx/> Última consulta marzo 2022

GWP (Global Water Partnership. (2000). *Manejo integrado de los recursos hídricos* - GWP Sudamérica - GWP Última consulta junio 2022

Hernández Sampieri, R., C. Fernández Collado y P. Baptista Lucio (2010). *Metodología de la investigación* (5ta edición ed.). Mc Graw Hill educación.

Última consulta febrero 2022

Ibarloza Arrizabalaga, A., Malles Fernández, E., y Azkue Irigoien, I. (2015). La gestión del ciclo integral del agua: Los costes, su recuperación y las buenas prácticas. El caso de Gipuzkoa. *Revista de Estudios de la Administración Local y Autonómica*, 231–246. <https://www.redalyc.org/pdf/5764/576461207013.pdf>

Última consulta mayo 2022

- INAFED, (2022). *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*  
<http://www.inafed.gob.mx/> Ultima consulta julio 2022
- INEGI (2022). Cuéntame, INEGI. Clima anual Nuevo León.  
<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/nl/territorio/clima.aspx#:~:text=La%20temperatura%20media%20anual%20es,en%20el%20mes%20de%20enero>. Última consulta enero 2022
- INEGI. (2020). *Número de habitantes*.  
<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tam/poblacion/default.aspx?temaCuentame> Ultima consulta enero 2022
- INEGI. (2022). *Marco geoestadístico - Catálogo único de claves de áreas geoestadísticas estatales, municipales y localidades*. <https://www.inegi.org.mx/app/ageeml/>  
Ultima consulta enero 2022
- Jiménez Cisneros, B., Terragosa, M. L., y Aboites, L. (2010). *El agua en México: cauces y encauces* (Primera edición). Academia Mexicana de Ciencias  
Última consulta julio 2022
- López, R. (2022, 18 marzo). *México experimenta escasez de agua y falta de equidad en su distribución*. Gaceta UNAM.  
<https://www.gaceta.unam.mx/mexico-experimenta-escasez-de-agua-y-falta-de-equidad-en-su-distribucion/> Ultima consulta abril 2022
- Maddocks, A. (2015). *Ranking the World's Most Water-Stressed Countries in 2040* - World Resources Institute <https://www.wri.org/> Ultima consulta julio 2022
- Maguey, H. (2018, 29 octubre). *Más de 80% del agua se va en uso agrícola y de la industria*. Gaceta UNAM. <https://www.gaceta.unam.mx/crisis-agua-industria/>  
Ultima consulta mayo 2022

- Melgarejo, J., y Fernández, P. (2018). *Congreso nacional del agua Orihuela: Innovación y sostenibilidad*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6836389>  
Ultima consulta julio 2022
- Milne, S. (2021, 24 agosto). *Cómo la escasez de agua está provocando cada vez más guerras en el mundo (y dónde serán los próximos conflictos)*. BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/vert-fut> Ultima consulta junio 2022
- Morato, J., Jimenez, L., Tollin, N. (2017). *Situación y evolución de la economía circular en España -* <https://www.quimicaysociedad.org/libros/situacion-y-evolucion-de-la-economia-circular-en-espana/> Ultima consulta abril 2022
- Moreno, J. O. (2021, 29 enero). *Jorge O. Moreno: Zona Metropolitana de Monterrey*. El Financiero. <https://www.elfinanciero.com.mx/monterrey/jorge-o-moreno-zona-metropolitana-de-monterrey/> Ultima consulta enero 2022
- NETJET. (2021, 2 septiembre). *Claves de la reutilización de aguas residuales*. <https://www.netjet.es/claves-de-la-reutilizacion-de-aguas-residuales/>  
Ultima consulta abril 2022
- ONU. (2022). *Global Issues | Naciones Unidas*. United Nations. <https://www.un.org/es/global-issues> Ultima consulta julio 2022
- Zamora Padilla, V.H., y Córdova y Vázquez, A. (2018). *Metabolismo urbano de nutrientes: reuso y compostaje de residuos asociados con la porcicultura en Ciudad Juárez*.  
Última consulta junio 2022
- Pardo, D. (2019, 28 febrero). *Metabolismo urbano, cuando las ciudades se integran en el entorno natural*. TOMORROW CITY.

<https://tomorrow.city/a/proptech-marketplaces-and-virtual-reality-conquer-the-real-estate-industry>  
Ultima consulta junio 2022

Patiño, D. (2016, 24 mayo). *Éste es el municipio más rico del país, según S & P*. El Financiero.

<https://www.elfinanciero.com.mx/economia/este-es-el-municipio-mas-rico-del-pais/>

Ultima consulta abril 2022

Rincón, A. (2017, 7 octubre). *El estrés hídrico alerta al megadiverso continente de Latinoamérica*. EFE verde.

<https://efeverde.com/estres-hidrico-alerta-al-megadiverso-continente-latinoamerica/>

Ultima consulta junio 2022

Rosales, J. (2019, 31 julio). *Saltillo segundo lugar nacional con mayor PIB per cápita - MILENIO*.

<https://www.milenio.com/estados/saltillo-segundo-lugar-nacional-con-mayor-pib-per-capita>  
Ultima consulta abril 2022

Ruiz, S. A., y Gentes, I. G. (2008). Retos y perspectivas de la gobernanza del agua y gestión integral de recursos hídricos en Bolivia. *Europea Review of Latin American and Caribbean Studies | Revista Europea de Estudios Latinoamericanos y del Caribe*, 0(85), 41–59. <https://doi.org/10.18352/erlacs.9618>

SADM. (2022). *Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey I.P.D.*

<https://www.sadm.gob.mx/> Ultima consulta febrero 2022

Salgado, L. (2021, 7 diciembre). *Estrés hídrico (Water stress) en América Latina*.

CEMERI. <https://cemerri.org/mapas/estres-hidrico-en-america-latina/>

Ultima consulta mayo 2022

- Saporiti N., y E. Robins. (2021, 23 agosto). *Aumentar la reutilización del agua: por qué tiene sentido reciclar nuestras aguas residuales*. Blogs del Banco Mundial.  
<https://blogs.worldbank.org/es/voces/aumentar-reutilizacion-del-agua-reciclar-aguas-residuales> Ultima consulta abril 2022
- Secretaría de Economía. (2022). *México*. México. <https://datamexico.org/> Ultima consulta marzo 2022
- Secretaría General de Gobierno de Tamaulipas. (2020, septiembre). *Periódico oficial del estado de Tamaulipas* (N.º 109). <http://po.tamaulipas.gob.mx/wp-content/uploads/2020/09/cxlv-109-090920F-ANEXO.pdf>  
Última consulta julio 2022
- Twenergy. (2021). *Estrés Hídrico: ¿Qué es y Qué consecuencias tiene?*  
<https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/como-ahorrar-agua/estres-hidrico-situacion-mexico/> Ultima consulta abril 2022
- UNAM. (2021). *Estrés Hídrico: ¿nos estamos quedando sin agua?*  
<https://www.fundacionunam.org.mx/> Ultima consulta abril 2022
- UNICEF, OMS. (2021, 1 julio). *Miles de millones de personas se quedarán sin acceso a servicios de agua potable, saneamiento e higiene antes de 2030 a menos que el progreso se multiplique por cuatro, advierten la OMS y UNICEF*.  
<https://www.unicef.org/es/comunicados-prensa/miles-de-millones-de-personas-se-quedar%C3%A1n-sin-acceso-servicios-de-agua-potable> Ultima consulta junio 2022
- Valdés, M. Y., y Villalejo, V. M. (2018). *La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos*. SciELO.  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382018000100005](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000100005)  
Ultima consulta abril 2022

Weatherspark. (2022). *El tiempo durante todo el año en cualquier lugar del mundo* -

*Weather Spark*. <https://es.weatherspark.com/> Ultima consulta enero 2022

World Resources Institute (2017). *Water Stress is Helping Drive Conflict and Migration*.

World Resources Institute - <https://www.wri.org/> Ultima consulta abril 2022

Trabajo de campo

Comunicación personal, 2021 (Informante 1)

Comunicación personal, 2021 (Informante 2)

Comunicación personal, 2021 (Informante 3)

Comunicación personal, 2021 (Informante 4)

Comunicación personal, 2022 (Informante 5)

La autora es Ingeniera Industrial por el Tecnológico de Piedras Negras, Coahuila. Egresada de la Maestría en Gestión Integral del Agua de El Colegio de la Frontera Norte.

Correo electrónico: [lariza9727@gmail.com.mx](mailto:lariza9727@gmail.com.mx)

*© Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y difusión total y parcial por cualquier medio, indicando la fuente.*

Forma de citar:

Gonzalez Nieto, L. (2022) “Reuso urbano de agua residual tratada: análisis de algunas ciudades del noreste de México.” Tesis de Maestría en Gestión Integral del Agua. El Colegio de la Frontera Norte, A.C. México.