



UNIVERSIDAD
Panamericana

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CASO DE ESTUDIO, REUSO DE AGUA RESIDUAL
TRATADA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES (PTAR) VILLA SUR, PARA
RIEGO EN LA UNIVERSIDAD PANAMERICANA
CAMPUS AGUASCALIENTES**

TESINA

P R E S E N T A

MARÍA DE LOS ANGELES ARRIAGA MORENO

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN ECONOMÍA CIRCULAR**

CON RECONOCIMIENTO DE VALIDEZ OFICIAL DE ESTUDIOS DE LA
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA, SEGÚN ACUERDO CON EL No. 20181883
DE FECHA 01 DE JULIO 2019

DIRECTORES DE TESIS

DRA. PIA BERGER

DR. ISAÍ GERARDO REYES CEDEÑO

AGUASCALIENTES, AGS., ENERO 2024



Aguascalientes, Ags., 07 de enero del 2024

LIBERACIÓN DE TESINA

Por medio de la presente, certificamos en nuestra calidad de directores de tesis, que el trabajo de MARIA DE LOS ANGELES ARRIAGA MORENO que lleva como título: “CASO DE ESTUDIO, REUSO DE AGUA RESIDUAL TRATADA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) VILLA SUR, PARA RIEGO EN LA UNIVERSIDAD PANAMERICANA CAMPUS AGUASCALIENTES” cumple con los requisitos establecidos por el reglamento vigente de la Facultad de Ingeniería para presentarse en Examen de Titulación del programa de Maestría en Ingeniería en Economía Circular.

De resultar aprobado, podrá efectuar el trámite para la obtención del grado de Maestría en Ingeniería en Economía Circular.

Atentamente,

DRA. PIA BERGER
Director de tesis

DR. ISAÍ GERARDO REYES CEDEÑO
Director de tesis

A Dios gracias por Ser eternamente mi Padre, mi Amigo, mi Hermano.

A Luis Antonio por ser mi mejor amigo, esposo, padre de Tony y Marina, nuestro impulso, su amor.

A Jesús Antonio por su inteligente apoyo y cariño.

A Marina por regalarme su FE llena de ternura.

A mi padre Juan Manuel Arriaga Rivera QEPD, por ser faro y refugio seguro en mi vida, dejando tan alta la vara, que apenas inició el camino.

A mi madre María Guadalupe Moreno Franco, por ser una mamá que me enseñó a trabajar y no rendirme.

A Lupita, Juan Manuel, Isaac, Ale y Adry, crecer a su lado me lleno de alegrías y habilidades invaluableles.

A Pia Berger, por su sabia amistad,
sincera y amable exigencia.

A Elo, por ser ese instrumento fiel
de Dios que me dio el empujón
que necesitaba para terminar este
proyecto.

A todos y cada uno de los seres
humanos que Dios puso, pone y
pondrá en mi camino por la
sabiduría compartida.

Agradecimientos

A la Dra. Pia Berger,
por su contagiosa pasión por el cuidado del agua, por su invaluable y entrañable amistad, por su exigencia siempre amable y sincera.

Al Dr. Isaí Gerardo Reyes Cedeño,
por su apoyo certero, por su paciente y alegre seguimiento, por su amistad.

Al Mtro. Luis Alfonso Guerrero,
por su generosa y alegre colaboración, por mostrarme el camino en el mundo de la Física, por su sincera amistad y apoyo.

To Dr. Michael Knaus,
For being not only a professor, for being a Circular Economy Coach in each project.

To Dr. Felix Flesch,
For his contagious energy about the Industrial Material Flow Management, and water gestión.

A la Dra. Rosario Moreno Virgen,
Por compartir su conocimiento y pasión en el tratamiento de aguas residuales.

A los profesores de la MIEC, todos y cada uno de ellos fue un experto en su materia que me mostró con su ejemplo, entrega y generosidad el camino a seguir.:

Dr. Pedro Rodrigo - *Seminario de Sistemas Fotovoltaicos.*
Mtro. Guillermo Medina - *Sistemas Energéticos y Planeación de Negocios*
Dr. Nicolás Esparza Lara - *Ética y Responsabilidad Social Empresarial.*
Dr. Manuel I. Peña Cruz - *Energías Renovables y Eficiencia Energética*
Mtro. Arnulfo Ramos Valdéz - *Seminario de Dirección*
Mtro. Alfredo Alonso Ruiz Esparza - *Manejo de Residuos y Recursos.*
Dra. Julieta Domínguez Soberanes - *Análisis Ambiental*
Dra. Rosario Moreno Virgen - *Sistemas Hídricos Sostenibles.*
Dra. Nancy González Canché - *Seminario de Investigación.*
Dr. Felix Flesch - *Industrial Material Flow Management*
Dr. Michael Knaus - *Regional Material Flow Management*
Mtro. Luis Alfonso Guerrero - *Física del Medio Ambiente.*
Dr. Juan Jauregui Rincón QEPD. - *Química del Medio Ambiente.*

A los nueve profesores de nueve países diferentes (Alemania, Brazil, Oman, Canadá, Portugal, México, Marruecos, Japón, Taiwan) que compartieron su conocimiento acerca de las estrategias de cero emisiones en su país de residencia. - *International Zero Emission Policy Approaches*

Al Ing. José Manuel Esparza Reyes y a todo su equipo de Operaciones por las atenciones y facilidades otorgadas durante la etapa de investigación de Material Flow Management.

A Rosalba Torres Barcenas, por revisar con entusiasmo los resultados financieros del proyecto, pero sobre todo por su sincera amistad.

Al Mtro. Jose Pablo Idelfonso Hernández, amigo que me abrió las puertas a la posibilidad y realidad de la Maestría en Ingeniería en Economía Circular.

A María de Jesús Santoyo, gran amiga, aliento en el camino.

A Jonathan Arroyo Pilatowsky, por su amistad, por la oportunidad que me dió como jefe directo, de crecer en la Universidad Panamericana.

Al Ing. Alfredo Alemán, Mtro. Javier Macias, Mtro. Juan Carlos Balderas, Mtro. Edder Alvarado, Octavio García, por su amistad, paciencia y generosidad, un gran equipo de trabajo..

A Erika Hernández por su refrescante sinceridad y honesto apoyo.

Al Mtro. Alejandro Rodríguez Magaña, por compartir sus conocimientos financieros.

A Ricardo Macias Quijas, por su apoyo como Director de Posgrados Ingeniería.

A la Mtra. Beatriz Romero, por sus sabios consejos, por su amistad inquebrantable.

Al CP Francisco Javier González Cázarez por buscar la solución al problema del agua.

To Peter Reilly, my English Teacher, Friend, and Coach life.

Al Mtro. Juan Carlos García y al Mtro. Sergio Garcia por haber otorgado facilidades para la investigación del tema del agua.

Al Mtro. en Ingeniería Ambiental Jorge Hernández Sánchez, Coordinador General de la Unidad de Saneamiento y Calidad del Agua en CCAPAMA ahora MIAA, y a todo su equipo de trabajo, por su generosa colaboración, al transparentar los datos técnicos de la PTAR Villa Sur para la ejecución del presente proyecto.

Al Mtro. Jorge Hernández Sánchez por su generoso acompañamiento, su paciente colaboración y amable atención siempre.

Al Ing. Martín de Jesús Pérez, por compartir su conocimiento en relación a los trámites hidráulicos.

A la Universidad Panamericana, a todas y cada una de las personas que laboran en ella, de cada uno de ellos he recibido apoyo, compañía, empatía y espíritu de servicio.

“La Trascendencia, es la respuesta a la importancia de la Economía Circular, cada acto humano tiene eco en la eternidad, si nos decidimos hoy a actuar individual y colectivamente a favor de su implementación, seremos recordados como la generación que trascendió” Gely Arriaga, 2019.

Índice general

Índice general.....	11
Lista de figuras.....	13
Lista de tablas.....	14
Lista de fórmulas.....	15
Resumen.....	22
Abstract.....	23
Introducción.....	25
Capítulo I. Marco Contextual.....	27
STATUS QUO: UNIVERSIDAD PANAMERICANA CAMPUS AGUASCALIENTES.....	27
Capítulo II Marco Referencial.....	30
2.1. Caracterización del área de desarrollo del proyecto propuesto.....	30
2.2. Planteamiento del problema.....	33
2.3. Hipótesis.....	35
2.4. Justificación.....	36
2.5. Objetivos.....	37
2.6. Alcances.....	38
2.7. Limitaciones.....	39
2.8. Cronograma.....	40
Capítulo III Marco teórico.....	41
3.1. Naturaleza del Agua.....	41
3.2- Instrumentos de Gestión del Agua.....	46
3.3 Aguas residuales.....	48
Capítulo IV Metodología y Análisis.....	54
4.1. Caracterización del Agua Residual Tratada de la PTAR Villa Sur.....	55
4.2. Determinación de la cantidad necesaria de tiempo de exposición del agua residual tratada a la luz UV para eliminar patógenos, caudal de 20 Lps.....	64
4.3 Dimensionamiento del sistema de mejoramiento del agua residual con lámparas UV.....	67
4.4. Dimensionamiento y cotización de las instalaciones hidráulicas de la PTAR Villa Sur a la Universidad Panamericana campus Aguascalientes sur.....	70
4.5. Dimensionamiento de las turbinas generadoras de electricidad, así como su posición en el sistema hidráulico.....	73
4.6. Dimensionamiento y cotización de Almacenamiento de la Energía Eléctrica comparado con conexión a la CFE.....	76
4.7. Dimensionamiento del Tanque de Almacenamiento de Agua Residual Tratada	

para riego comparado con el uso de pipas para transportar el agua residual.....	77
4.8. Dimensionamiento de la bomba para transportar el agua residual tratada de la PTAR VillaSur al cuarto de máquinas en la Universidad Panamericana.....	82
4.9. Diseño hidráulico del sistema de riego con Agua Residual Tratada.....	85
4.10. Determinación de emisiones de Carbono del SISTEMA DE INGENIERÍA EN ECONOMÍA CIRCULAR.....	85
4.11. Determinación del Análisis Económico del Proyecto SISTEMA DE INGENIERÍA EN ECONOMÍA CIRCULAR.....	86
4.12. Aporte del SISTEMA DE INGENIERÍA EN ECONOMÍA CIRCULAR al cumplimiento de las NOM, ODS de la ONU y a rankings de sustentabilidad internacionales.....	92
4.13. Establecimiento de Estrategias Jurídicas de conservación de la Concesión del Título del pozo.....	93
Capítulo V Resultados.....	95
5.1. Resultados.....	95
5.2. Discusión.....	96
Conclusión.....	99
Bibliografía.....	102

Lista de figuras

Figura 1. Mapa del Estado de Aguascalientes Fuente: (Google Maps 2022).....	28
Figura 2. Imagen Satelital Universidad Panamericana campus Aguascalientes Sur y PTAR Villasur (Modificado de Google Earth, 2023).....	29
Figura 3. La Región Hidrológica Administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico. Fuente: (CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2020).....	30
Figura 4. Mapa de Acuíferos de Aguascalientes. Fuente: (Sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas & CONAGUA, 2021).....	31
Figura 5. Mapa de Acuífero 0101 Valle de Aguascalientes con acercamiento a Pozo Universidad Panamericana. Fuente: (Sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas & CONAGUA, 2021).....	32
Figura 6. Mapa de riesgo a la sequía por municipio. Fuente: (CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2020).....	34
Figura 7. Mapa de variación en la disponibilidad de los acuíferos de la Unidad de Planeación (UP) Río Santiago. Fuente: (CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2020).....	35
Figura 8. Cronograma propuesto para el desarrollo del proyecto.....	40
Figura 9. El ciclo del agua. Fuente: (Marquez & Marroquin, 2023) Crédito de imagen: El ciclo del agua de NOAA National Weather Service Jetstream.....	43
Figura 10. Mapa de disponibilidad en subcuencas hidrológicas de la Unidad de Planeación (UP) Río Santiago. Fuente: (CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2020).....	46
Figura 11. Rangos funcionales de diferentes turbinas hidráulicas. Fuente: (WWS-Wasserkraft, 2022).....	75
Figura 12. Status Quo 2020: Inventario de cisternas Universidad Panamericana.....	78
Figura 13. Objetivos de Desarrollo Sostenibles 6, 7 y 9 Fuente: (Naciones Unidas, 2019).....	93
Figura 14. Gráficas de resultados del Sistema de Ingeniería en Economía Circular.....	101

Lista de tablas

Tabla 1. Tiempo de residencia promedio de las moléculas de agua. Fuente: (Marquez & Marroquin, 2023).....	43
Tabla 2. Encabezado de resultados de laboratorio mensuales de la PTAR Villa Sur proporcionados por CCAPAMA 2020.....	57
Tabla 3. Encabezado de tabla de análisis de resultados de laboratorio mensuales de la PTAR Villa Sur contrastado con la NOM 003-SEMARNAT- 1997.....	57
Tabla 4. Encabezado de tabla Resumen Anual 2020 para evaluación de calidad del agua residual tratada.....	58
Tabla 5. Estándares para fuentes de aguas crudas. Fuente: (D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales et al., 2016, 12).....	58
Tabla 6. Análisis de resultados de laboratorio de la PTAR Villa Sur, elaboración propia.....	61
Tabla 7. Características técnicas para sistemas de desinfección de agua con radiación ultravioleta.....	65
Tabla 8. Análisis de elementos del sistemas de desinfección de agua con radiación ultravioleta..	66
Tabla 9. Equipos de desinfección UV para agua residual tratada.....	68
Tabla 10. Análisis de Cotización de Equipos de desinfección UV para agua residual tratada....	70
Tabla 11. Cotización de Obra Civil, Obra Hidráulica y Trámites de Laboratorio UV.....	71
Tabla 12. Cotización de Cisterna para almacenamiento diario de agua residual tratada con UV...	78
Tabla 13. Análisis de costos cisterna para almacenamiento diario de agua residual tratada con UV.....	81
Tabla 14. Datos del sistema de Transporte de agua residual tratada de la PTAR Villa Sur a la Universidad Panamericana campus sur.....	83
Tabla 15. Cálculo de las variables financieras para realizar la evaluación económica del proyecto.....	87
Tabla 16. Resultados financieros para la evaluación de Economía Circular del proyecto.....	91
Tabla 17. Resultados financieros para la evaluación de Economía Circular del proyecto.....	95
Tabla 18. Comparación de Tipos de Proyectos, Totex y Ahorros anuales.....	100

Lista de fórmulas

Fórmula 1 Potencia media de una central generadora de energía eléctrica.....	60
Fórmula 2 Potencia media en función de las características hidroenergéticas.....	60
Fórmula 3 Cálculo de la Velocidad del agua residual tratada.....	69

Glosario

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN	VALORES	OBSERVACIONES
$\mu\text{S/cm}$	microSiemens por centímetro		
1 Log	90% de efectividad		
2 Log	99% de efectividad		
B	Beneficios directos		
C	Costos directos		
CAPEX	Capital expenditure (en inglés), Gastos en capital (en español).		
CFE	Comisión Federal de Electricidad		
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua		
d	Tasa de descuento o costo de oportunidad del dinero	$d = i / (1 + i)$	
ECONOMÍA CIRCULAR	“Modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. De esta forma, el ciclo de vida de los productos se extiende.”		
f_c	fuerza del concreto		
FERROMEX	Ferrocarril Mexicano		
g/m^2	gramos por metro cuadrado		

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN	VALORES	OBSERVACIONES
Gmedia	Generación media anual		
GPS	Sistema de Posicionamiento Global		
h	hora / horas		
H	carga neta, altura, cabeza de agua o también llamado salto neto		
Huevos / L	huevos por litro		
i	tasa de interés		
I0	Inversión		
kgf /m ³	kilogramos fuerza por metro cúbico		
l	litro	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³	“Aunque l y L son símbolos aceptados internacionalmente para litro, para evitar el riesgo de confundir la letra l con el número 1, en Estados Unidos se utiliza el símbolo L.” (Pérez D’Gregorio, 2002).

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN	VALORES	OBSERVACIONES
L	litro	$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$	“Aunque l y L son símbolos aceptados internacionalmente para litro, para evitar el riesgo de confundir la letra l con el número 1, en Estados Unidos se utiliza el símbolo L.” (Pérez D’Gregorio, 2002).
LCOW	Levelized Cost of Water		
Log	Logaritmo		
lps o l/s	litros por segundo		
Lps o L/s	litros por segundo		
m ³ /h	metros cúbicos por hora		
m ³ /s	metros cúbicos por segundo		
mg/L	miligramos por litro		
mg/L SST	miligramos por litro de sólidos suspendidos totales		
ml	mililitros		
mL	mililitros		
mW/cm ²	milivatios por centímetro cuadrado		
MWh	Mega Watt hora		
mWs/cm ²	milivatios por segundo por centímetro cuadrado		

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN	VALORES	OBSERVACIONES
n	Número de años del horizonte de evaluación		
nm	nanómetros		
NMP/100 mL	Número más probable de unidades formadoras de colonias por cada 100 m L		
No h/año	Número de horas al año		
NOM 002	NOM 002-SEMARNAT-1996		
NOM 003	NOM 003-SEMARNAT-1997		
η	eficiencia total del conjunto turbogenerador		
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible		
off grid	fuera de la red eléctrica de CFE		
OPEX	Operating Expenses, Gastos operativos.		
PA	Promedio Anual		
PBP	Pay Back Period (inglés)		
PRI	Periodo de Retorno de Inversión (español)		
pH	medida de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa		
PM	Promedio Mensual		
Pmedia	Potencia media W (vatío)		
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales		

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN	VALORES	OBSERVACIONES
PTP	Packaged Treatment Plant		
PVC	Policloruro de Vinilo o PVC		
Q	Caudal m ³ /s		
Qm	gasto medio turbinado, m ³ /s		
RGNA	Red Geodésica Nacional Activa		
s	segundo		
SST	Sólidos Suspendedos Totales		
tCO ₂ e	toneladas de emisiones de Dióxido de Carbono		
tCO ₂ e / MWh	toneladas de emisiones de Dióxido de Carbono por Megawatt hora		
TOTEX	Total Expenditure (inglés), Gastos Totales (español)		
U de pH	Unidades de pH		
UV	radiación Ultravioleta / luz Ultravioleta		
UVA	Ultravioleta A	onda larga (320-400 nanómetros)	
UVB	Ultravioleta B	longitud de onda media (280-320 nanómetros)	
UVC	Ultravioleta C	onda corta (200 y 280 nanómetros)	

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN	VALORES	OBSERVACIONES
UVT	Transmisividad de la luz ultravioleta		
VPN	Valor Presente Neto		
W	Watts		
γ	peso volumétrico del agua, kgf /m ³	1000 kg/m ³	
ZE	Zero Emissions / Cero Emisiones		

Resumen

El aprovechamiento del agua residual tratada para el riego de cultivos y áreas verdes, es parte del Sistema de Ingeniería en Economía Circular (SIEC) que está ganando interés y es necesario en el mundo. El enfoque multidisciplinario de este SIEC permite desarrollar habilidades en diferentes áreas del conocimiento. El primer paso es determinar el Status Quo de la empresa, en el presente Caso de Estudio es el binomio Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Villa Sur y la Universidad Panamericana campus Aguascalientes sur. La colaboración de ambas entidades es el factor clave para que esta propuesta sea una posibilidad. La investigación inicia con el Material Flow Management del agua en ambas entidades, lo que permite conocer la caracterización de las variables relacionadas con la gestión del agua residual tratada en la PTAR Villa Sur y las necesidades de agua para riego en la Universidad Panamericana. Se elabora una propuesta de Ingeniería que cumpla con los objetivos del SIEC, que demuestre que, su aplicación generará ahorros económicos, ahorros de agua potable, mitigación de emisiones de carbono, cumplimiento de normas nacionales e internacionales, dará certeza jurídica a la Concesión de Título del pozo de la Universidad y aportará a la mitigación del riesgo de sequía del Municipio de Aguascalientes, a través de una adecuada gestión de los recursos hídricos y energéticos. El presente trabajo otorga una metodología para implementar un SIEC para aprovechamiento de aguas residuales, que se mantiene alineado a los elementos que hacen que un proyecto sea considerado circular: crecimiento económico, sostenibilidad, innovación en la aplicación de tecnologías existentes, ahorro de energía, reuso de materia prima, en este caso el agua, cumplimiento del marco legal nacional e internacional; todo esto con un enfoque humano y ético.

Palabras clave: Economía Circular, Tratamiento de agua residual, Ultravioleta, Concesión Título Pozo.

Abstract

The use of industrial wastewater for irrigation of crops and green areas is the basis of the Circular Economy Engineering System (SIEC) that is gaining interest around the world. The multidisciplinary approach of this SIEC allows the development of skills in different areas of knowledge. The first step is to determine the Status Quo of the company, in this Case Study it is the binomial of the Villa Sur Wastewater Treatment Plant (WWTP) and the Universidad Panamericana campus Aguascalientes Sur. The collaboration of both entities is the key factor for this proposal to be a possibility. The research begins with the Material Flow Management of water in both entities, which allows us to know the characterization of the variables related to the management of treated wastewater at the Villa Sur WWTP and the water needs for irrigation at the Universidad Panamericana. An Engineering proposal is prepared that meets the objectives of the SIEC, which demonstrates that its application will generate economic savings, savings in drinking water, mitigation of carbon emissions, compliance with national and international standards, and will give legal certainty to the Granting of Title from the University well and will contribute to mitigating the risk of drought in the Municipality of Aguascalientes, through adequate management of water and energy resources. An Engineering proposal is prepared that meets the objectives of the SIEC, which demonstrates that its application will generate economic savings, savings in drinking water, mitigation of carbon emissions, compliance with national and international standards, and will give legal certainty to the Granting of Title from the University well and will contribute to mitigating the risk of drought in the Municipality of Aguascalientes, through adequate management of water and energy resources. This work provides a methodology to implement a SIEC for the use of wastewater, which remains aligned with the elements that make a project considered circular: economic growth, sustainability, innovation in the application of existing technologies, energy savings, reuse of raw materials, in this case water, compliance with the national and international legal framework; all this with a human and ethical approach.

Keywords: Circular Economy, Wastewater Treatment, Ultraviolet, Well Title Concession.

Introducción

El Parlamento Europeo define a la Economía Circular como: “La economía circular es un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. De esta forma, el ciclo de vida de los productos se extiende.” (Parlamento Europeo, 2023).

La propuesta del REUSO DE AGUA RESIDUAL TRATADA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) VILLA SUR, PARA RIEGO EN LA UNIVERSIDAD PANAMERICANA CAMPUS AGUASCALIENTES consiste en un proceso metodológico, multidisciplinario, que tendrá varias etapas, la primera será la de INGENIERÍA, donde se diseñe el prototipo de las instalaciones UV-hidráulicas off grid¹ que permitirán obtener agua residual tratada con la calidad necesaria para ser usada en riego en contacto directo al público; la segunda etapa de desarrollo será obtener los datos ECONÓMICOS que justifiquen dicha propuesta: costos estimados de construcción del sistema, la inversión, los ahorros, costos de mantenimiento y la tasa de retorno de la inversión; la tercera etapa consistirá en realizar un inventario de emisiones de carbono del sistema, teniendo como objetivo que éste tienda a cero emisiones en todos los procesos que lo componen; en la cuarta etapa se hará una relación de los alcances del proyecto en relación a su aportación en la GESTIÓN DEL AGUA en los objetivos locales, estatales, nacionales e internacionales a través de las certificaciones, Objetivos de desarrollo sostenible de la ONU (ODS), cumplimiento de normas, marco legal, certificaciones, entre otros.

La problemática del consumo de agua potable, extraída de pozo, para riego de áreas verdes tiene un denominador común: los elevados costos, la poca eficiencia en el riego y el nulo reuso del agua. El proyecto propuesto es la aplicación de tecnologías y estrategias de Economía Circular aplicadas al uso de agua tratada mejorada con exposición a luz ultravioleta (UV), para riego de áreas verdes en contacto directo al público. La Universidad Panamericana tiene en su haber todas las variables del problema a resolver: una concesión de extracción de agua potable a través de un pozo propio, una amplia extensión de áreas verdes a ser regadas, una planta de tratamiento de agua residual municipal justo detrás de las instalaciones del campus, y la posibilidad de llevar a cabo dicho proyecto.

El objetivo de este proyecto es asegurar la CIRCULARIDAD del mismo, es decir, minimizar costos de consumo de agua potable, maximizar el aprovechamiento del recurso de valor, es decir

¹ Sistema desconectado de la red eléctrica, que utiliza baterías para almacenar la energía generada, que en este caso será generado a través de una microturbina hidráulica.

el agua residual tratada, mejorar la calidad de la misma para poder utilizarla en riego de áreas verdes en contacto directo al público, generar energía eléctrica limpia y minimizar las emisiones de carbono a la atmósfera.

La estructura de la Tesina se divide en cinco capítulos, en el primer capítulo se describe el Status Quo o Marco Contextual en la Universidad Panamericana campus Aguascalientes sur, su Misión, Visión, Valores y lo más importante para justificar este proyecto es, su realidad en relación a su ubicación geográfica e hidrológica.

En el segundo capítulo, el Marco Referencial, se establece la caracterización del área de desarrollo del proyecto propuesto, como fruto de la investigación realizada en el campus a través de observación, entrevistas y acceso a documentación que corrobora dicha caracterización; también se establece la problemática que tiene la Universidad Panamericana campus Aguascalientes sur, al utilizar agua potable de pozo para riego, los costos de extracción, energía eléctrica para bombeo, así como el costo por metro cúbico de agua extraída, entre otros. El objetivo general del proyecto y los objetivos específicos están alineados a la circularidad del mismo, por lo que los hay con enfoque económico, tecnológico, cumplimiento de normas, marco legal, certificaciones, objetivos de desarrollo sostenible; debido a esto el enfoque es transversal, es decir, sus alcances y limitaciones están en el ámbito local, estatal, nacional y global.

En el tercer capítulo se desarrolla en Marco Teórico, donde se sientan las bases para comprender al proyecto denominado REUSO DE AGUA RESIDUAL TRATADA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) VILLA SUR, PARA RIEGO EN LA UNIVERSIDAD PANAMERICANA CAMPUS AGUASCALIENTES, en este capítulo se describen conceptos que aparentemente son de dominio público, sin embargo es necesario comprenderlos profundamente para poder entender cómo suman al proyecto propuesto.

En el cuarto capítulo se describe de manera detallada el proceso del desarrollo del proyecto, las variables utilizadas, procesos, procedimientos y los diferentes escenarios de resolución del problema, a través de un análisis detallado del mismo.

Finalmente en el quinto capítulo se describirán los resultados esperados de la aplicación del REUSO DE AGUA RESIDUAL TRATADA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) VILLA SUR, PARA RIEGO EN LA UNIVERSIDAD PANAMERICANA CAMPUS AGUASCALIENTES.

Capítulo I. Marco Contextual

STATUS QUO: UNIVERSIDAD PANAMERICANA CAMPUS AGUASCALIENTES

1.1. Antecedentes históricos de la empresa

“La Universidad Panamericana se fundó en 1967 como una escuela de negocios. El grupo original de académicos y hombres de empresa que dieron vida en aquel año al Instituto Panamericano de Alta Dirección de Empresa (IPADE) se convirtió, poco más tarde, en promotor de lo que hoy es la Universidad Panamericana. El Instituto Panamericano de Humanidades (IPH) predecesor inmediato de la Universidad Panamericana, nació en 1968. En 1978, el IPH fue elevado al rango de Universidad, y tomó el nombre de Universidad Panamericana, aunque, de hecho, IPADE e IPH desde sus comienzos concibieron el saber de una manera unitaria y universal, es decir, universitaria. La Universidad Panamericana cuenta con tres campus y una sede que atienden a cerca de 12 mil alumnos en 33 carreras. El primer campus se inauguró en la ciudad de México en el año de 1968, después Guadalajara en 1981 y Aguascalientes en 1989. La sede Santa Fe, también en la ciudad de México, se inauguró en 2011. Además, cuenta con la Escuela de Administración de Instituciones ESDAI. Siendo una sola Universidad, con un mismo espíritu, la UP trabaja todos los días en tres pilares fundamentales: la docencia, la investigación y la difusión de la cultura. En virtud de un convenio establecido entre la Junta de Gobierno y la Prelatura del Opus Dei, la Universidad Panamericana ha confiado a dicha Prelatura la atención espiritual y la orientación doctrinal de sus actividades. La Universidad ha logrado situarse como una de las mejores en todo México, en sólo unas cuantas décadas.” (Universidad Panamericana, 2021).

1.2. Misión y Visión

Misión. “Educar personas que busquen la verdad y se comprometan con ella, promoviendo el humanismo cristiano que contribuya a la construcción de un mundo mejor.” (Universidad Panamericana, 2021).

Visión. “Ser una universidad de referencia global por su calidad académica, formación ética y visión cristiana de la vida. Ser la universidad cuyos egresados con responsabilidad social aspiren a la plenitud profesional y de vida”. (Universidad Panamericana, 2021).

1.3. Ubicación

La Universidad Panamericana campus Aguascalientes Sur (UPAGS) se encuentra en la Av. Josemaría Escrivá de Balaguer #101, Fracc. Villas Bonaterra C.P. 20296 Aguascalientes, Ags. México. En el mapa del estado de Aguascalientes en la Figura 1 se observan ambas sedes, Campus Norte y Campus Sur, siendo este último en el que se aplicará este proyecto.



Figura 1. Mapa del Estado de Aguascalientes Fuente: (Google Maps 2022)

En la imagen satelital de Google Earth, se puede observar todo el terreno del Campus Sur, con un perímetro aproximado de 2,985.12 m y una superficie total aproximada de 256,609.39 m².

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Villa Sur, se encuentra en la parte posterior del Campus Sur. Esta PTAR recibe agua residual de origen doméstico para su tratamiento (Véase Figura 2).



Figura 2. Imagen Satelital Universidad Panamericana campus Aguascalientes Sur y PTAR Villasur (Modificado de Google Earth, 2023).

Capítulo II Marco Referencial

2.1. Caracterización del área de desarrollo del proyecto propuesto.

Como Entidad Federal que gestiona recursos hídricos, el estado de Aguascalientes pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico, como se puede ver en la Figura 3, específicamente pertenece a la Unidad de Planeación Río Santiago en color azul.



Figura 3. La Región Hidrológica Administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico. Fuente: (CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2020)

La Región Hidrológica Administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico está ubicada en la zona centro-occidente del país; comprende una extensión territorial de 182,460.14 kilómetros cuadrados, en la que se localizan la totalidad de los estados de Aguascalientes y Colima, y parte de los estados de Guanajuato, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Nayarit, Querétaro y Zacatecas. Fuente: (CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2020)

El Registro Público de Derechos de Agua de la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) otorga un Título de Concesión a Bonaterra A.C. número 08AGS103017/12EMDL13 para

explotar, usar o aprovechar aguas nacionales del subsuelo por un volumen de 119,141.00 m³ anuales en los términos que el título establece. Cabe mencionar que, entre las cláusulas de dicho Título de Concesión, la DÉCIMO SEGUNDA establece que “Es causa de caducidad dejar de explotar, usar o aprovechar las aguas objeto de esta concesión en forma parcial o total durante 2 (dos) años consecutivos, sin mediar justificada explícita en la Ley de Aguas Nacionales y sus Reglamentos (CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN Secretaría General Secretaría de Servicios Parlamentarios, 1992). Si durante ese mismo lapso solamente se utilizó una parte del volumen de agua autorizada, la caducidad se declarará sobre el volumen que no se hubiese utilizado”. La cláusula antes mencionada, fue hasta inicios de 2019, la justificación para regar las áreas verdes de las instalaciones de la Universidad con agua de pozo.

El pozo de la Panamericana pertenece, según datos del INAGUA, al acuífero 0101 Valle de Aguascalientes (Ver Figura 4) siendo parte de la Región hidrológica administrativa Lerma Santiago Pacífico.

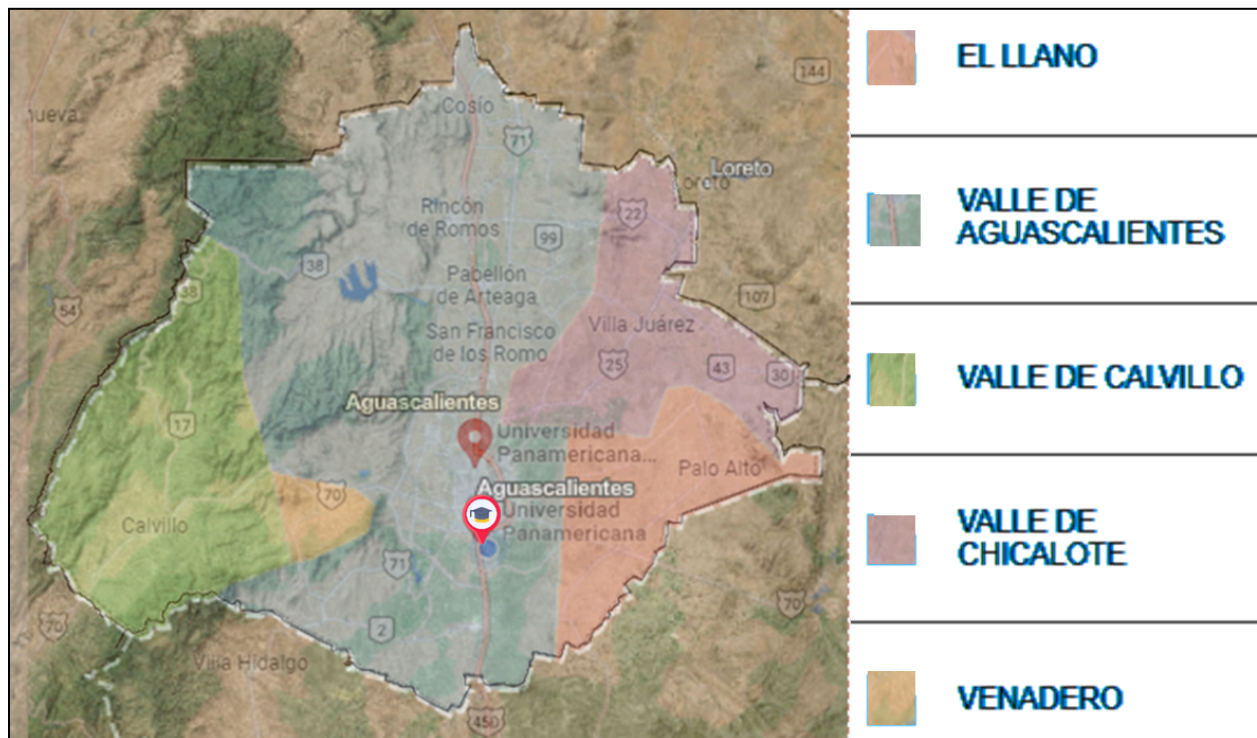


Figura 4. Mapa de Acuíferos de Aguascalientes. Fuente: (Sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas & CONAGUA, 2021)

En la Figura 5 se puede observar la ubicación del pozo de la Universidad Panamericana (Sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas (SIGACUA), 2021).

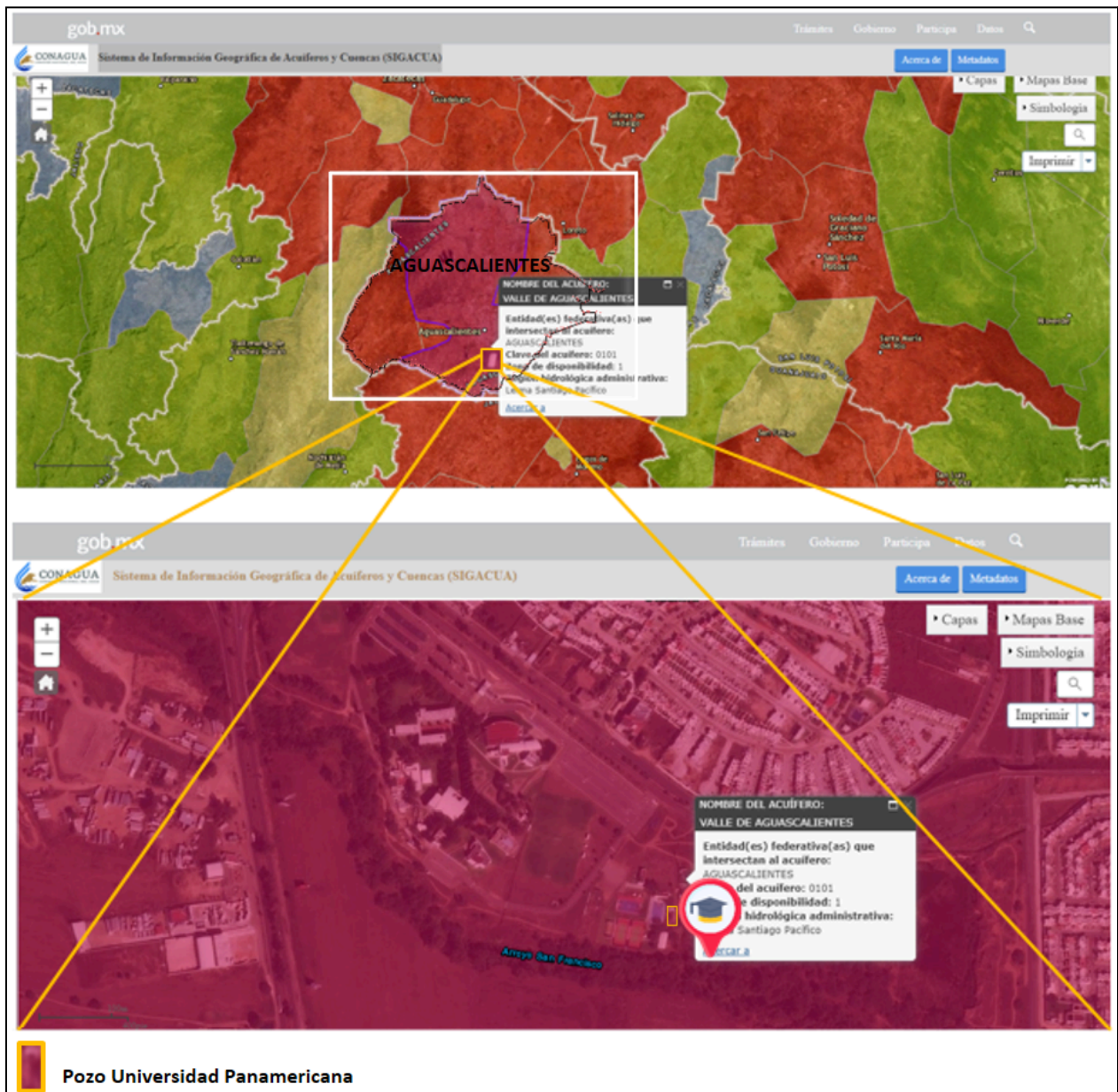


Figura 5. Mapa de Acuífero 0101 Valle de Aguascalientes con acercamiento a Pozo Universidad Panamericana. Fuente: (Sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas & CONAGUA, 2021)

La Universidad Panamericana campus Aguascalientes (Ver Figura 2) cuenta con un predio de aproximadamente 46,574 m² de áreas verdes de acuerdo a mediciones (Google Earth, 2021). De acuerdo con los datos proporcionados por la Panamericana de 2017 a 2022, se han utilizado para riego anualmente, un promedio de 43078 m³ de agua de pozo, que se extrae a través de bombeo,

para este fin se ocupa un promedio anual de $69,825.6 \text{ kWh}$ de energía eléctrica, con un tiempo promedio de operación anual de 1560 hrs. Como resultado de la energía eléctrica utilizada para el bombeo del agua se emitían a la atmósfera $19.6044 \text{ t CO}_2\text{e/a}$ tomando como base el Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional de $0.527 \text{ tCO}_2\text{e} / \text{MWh}$ (Comisión Reguladora de Energía CRE, 2019).

Cabe señalar que a partir de 2020 el gasto por consumo de energía eléctrica se ha cancelado, así como las emisiones de $\text{CO}_2\text{e/a}$ debido a que se han instalado paneles solares en la Panamericana campus Aguascalientes.

El agua del pozo se extrae a una profundidad de 250 m a través de una bomba sumergible de 8 pasos, motor sumergible BSD de 60 HP en 440 V con una eficiencia energética de 27.8%. (Fuente investigación propia con datos otorgados por el área de Operaciones de la Universidad Panamericana campus Aguascalientes sur, 2020).

El organismo MIAA Modelo Integral de Aguas de Aguascalientes a través de CCAPAMA Comisión Ciudadana de Agua Potable y Alcantarillado del municipio de Aguascalientes administra la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Villa Sur, la cual está ubicada justo en la parte posterior de los terrenos de la Universidad (Figura 2) y genera mensualmente un promedio de $18,000 \text{ m}^3$ de agua residual tratada, a una velocidad de 16 l/s (Litros por segundo). El agua residual tratada generada por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Villa Sur cumple la NOM-002-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

2.2. Planteamiento del problema.

El problema que actualmente tiene la Universidad Panamericana campus Aguascalientes Sur, son los costos derivados de utilizar agua potable de pozo para riego de áreas verdes, ya que el precio por m^3 es aproximadamente el 300% en relación al costo de agua residual tratada. Además La concesión del pozo 08AGS103017/12EMDL13 estipula cláusulas de extracción mínima de agua potable por un volumen de $119,143.00 \text{ m}^3$ anuales en los términos que el título establece, por lo que podría perder el derecho de extracción en caso de extraer menor cantidad de la misma.

En caso de que la Universidad Panamericana decidiera hacer uso de agua residual tratada para riego en sus instalaciones, deberá mejorar la calidad de la misma para que pueda ser utilizada en

servicios en contacto directo al público tal como lo establece la NOM-003-SEMARNAT-1997. Además la institución educativa tiene como objetivo ser un referente a nivel global en cuanto a sustentabilidad alineándose a los ODS de la ONU y a certificaciones internacionales.

A todo lo anterior deberá sumarse el problema de la sequía a la que se está enfrentando el Estado de Aguascalientes, se cita lo analizado en el Programa Hídrico Regional 2021-2024 de la Región Hidrológico-Administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico (CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2020), lo cual ayudará al lector del presente trabajo a entender que, la resolución de este problema tiene *escenarios mayores y actores en todos los sectores*, no solo en el académico, sino también en toda la sociedad. En la Figura 6 se observa que la Universidad Panamericana campus Aguascalientes se encuentra en el municipio de Aguascalientes, el cual tiene un Riesgo a la sequía alto y un déficit de entre -30% y -3% en la variación en disponibilidad de acuíferos (véase Figura 7).

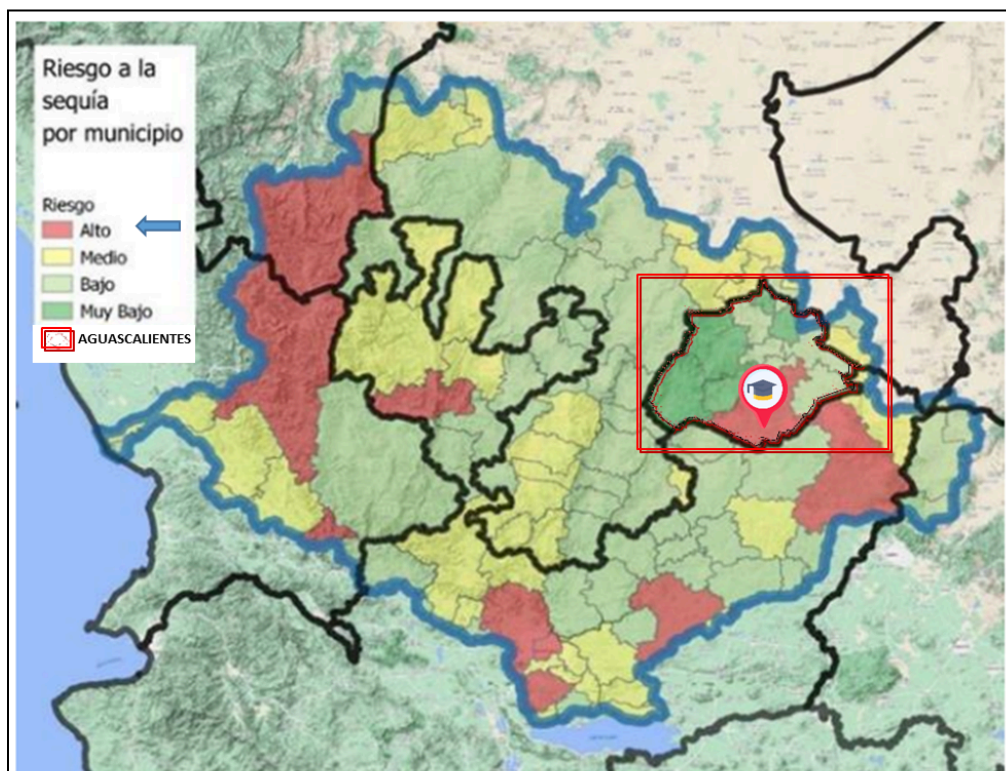


Figura 6. Mapa de riesgo a la sequía por municipio. Fuente: (CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2020)

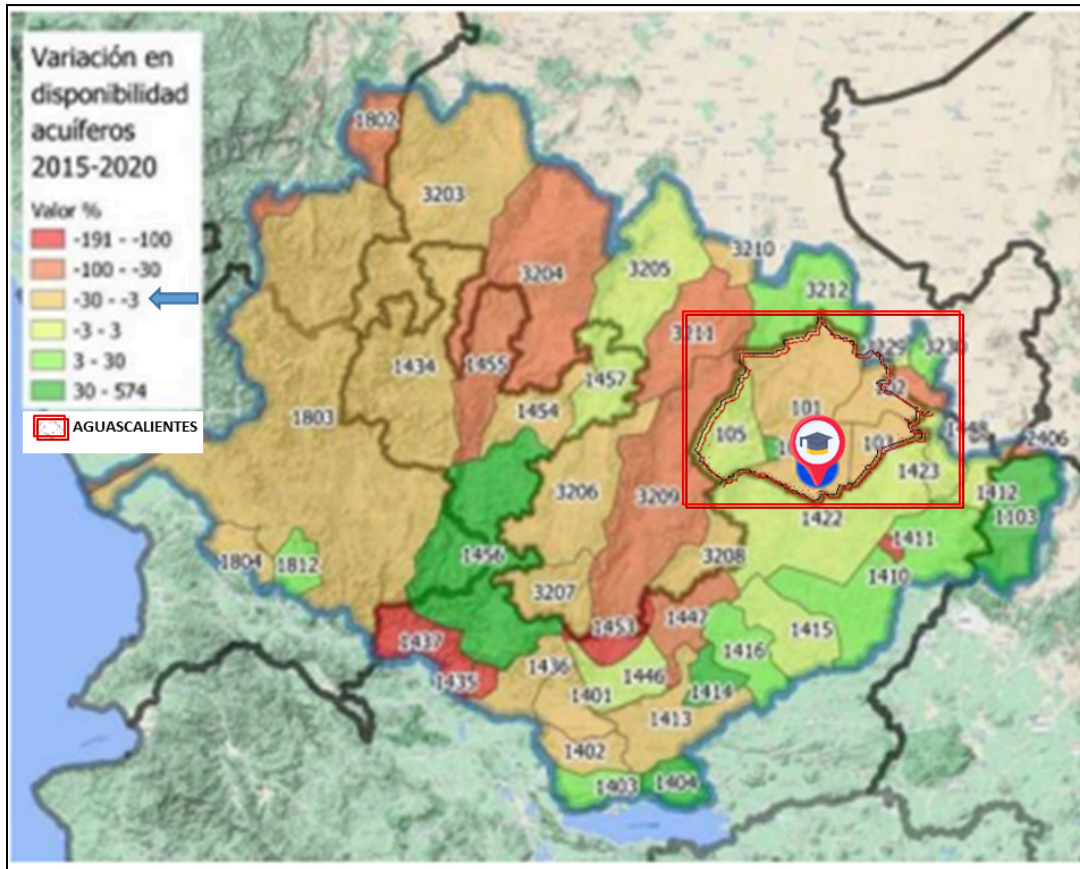


Figura 7. Mapa de variación en la disponibilidad de los acuíferos de la Unidad de Planeación (UP) Río Santiago. Fuente: (CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2020)

2.3. Hipótesis

El SISTEMA DE INGENIERÍA EN ECONOMÍA CIRCULAR de tratamiento de aguas residuales, tendrá como entrada Agua Residual de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Villa Sur, y como salidas Agua Residual Tratada con Luz ultravioleta (UV) y Energía Eléctrica.

El Agua Residual Tratada con luz UV cumplirá la NOM-003-SEMARNAT-1997, y al ser transportada solo por la fuerza de la gravedad, a la Universidad Panamericana campus Aguascalientes y sus destinos de riego, generará Energía Eléctrica en cantidad suficiente para alimentar el SISTEMA, con una huella de carbono que tienda a ZE Cero emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI'S).

El SISTEMA DE INGENIERÍA EN ECONOMÍA CIRCULAR generará ahorros económicos y ahorros de agua potable extraída de pozo, tendrá impacto positivo en la gestión y aprovechamiento del agua potable del acuífero 0101 Valle de Aguascalientes.

La implementación de este proyecto aportará al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 y 7 de la ONU, permitiendo a la Universidad cumplir con las certificaciones internacionales de sustentabilidad que se ha propuesto como meta institucional.

2.4. Justificación.

La Universidad Panamericana campus Aguascalientes Sur generará ahorros de sus gastos económicos por pago de concesión de extracción de agua, ya que está gastando dinero en la extracción y bombeo de agua potable para riego y consumo humano, cuando tiene la posibilidad real de utilizar agua residual tratada de la PTAR Villa Sur en el riego. La inversión en el proyecto REUSO DE AGUA RESIDUAL TRATADA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) VILLA SUR, PARA RIEGO EN LA UNIVERSIDAD PANAMERICANA CAMPUS AGUASCALIENTES, tendrá impacto positivo circularmente, es decir, se dejara de perder un producto de alto valor que es el agua potable, la inversión en el proyecto tendrá una tasa de retorno de inversión a corto plazo, las instalaciones servirán como laboratorio para los alumnos de la Universidad, se podrán abatir los costos del riego de áreas verdes, al mismo tiempo que se podrá comercializar el agua potable extraída del pozo, generando ganancias para la Universidad. El proyecto tendrá impactos positivos a nivel local, regional, nacional e internacional.

El proyecto se sumará a los objetivos académicos y de certificaciones en sustentabilidad que la Universidad Panamericana se ha propuesto. Aportará a la sociedad hidrocálida, ya que al dejar de consumir agua de pozo para riego mitigará porcentualmente el estrés hídrico. Se alineará al Plan Maestro del Agua del Municipio de Aguascalientes, así como al Convenio firmado por el Gobierno de Aguascalientes: *CONVENIO Marco de Coordinación que celebran la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, a través de la Comisión Nacional del Agua, y el Estado de Aguascalientes, con el objeto de establecer los lineamientos para conjuntar recursos y formalizar acciones en las materias de infraestructura hidroagrícola, agua potable, alcantarillado y saneamiento y cultura del agua en beneficio de la entidad* (SEGOB Secretaría de Gobernación & CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2023). A nivel Federal se alineará al Plan Nacional de Desarrollo que se publicó en el Diario Oficial de la Federación: Programa

Nacional Hídrico 2020 2024 ². A nivel global aportará al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas: ODS 6 Agua limpia y Saneamiento y ODS 7 Energía Asequible y No Contaminante.

2.5. Objetivos.

2.5.1 Objetivos generales.

Demostrar a través de un análisis comparativo de relación costo beneficio que es mejor el REUSO DE AGUA RESIDUAL TRATADA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) VILLA SUR, PARA RIEGO EN LA UNIVERSIDAD PANAMERICANA CAMPUS AGUASCALIENTES, su aplicación generará ahorros económicos, ahorros de agua potable, mitigación de emisiones de carbono, cumplimiento de NOM-003-SEMARNAT-1997, alineación a Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, certificaciones internacionales y aportará a la mitigación del riesgo de sequía del Municipio de Aguascalientes, a través de una adecuada gestión de los recursos hídricos y energéticos.

Demostrar a través de un análisis comparativo que el agua residual tratada que genera la PTAR Villasur tiene la calidad que la NOM-003-SEMARNAT-1997 establece para ser reusada en servicios al público con contacto directo dentro de la Universidad Panamericana campus Aguascalientes, a través de un sistema de Transporte de agua residual tratada con Cero emisiones de Carbono (ZE) , mejoramiento de la calidad del agua con Lámparas UV / UV Solar y generación de electricidad al transportar el agua convirtiendo la energía potencial del movimiento del agua en energía eléctrica.

² En congruencia con el Plan Nacional de Desarrollo, con fecha 30 de diciembre de 2020 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el Programa Nacional Hídrico 2020 2024, que establece los siguientes objetivos prioritarios:

- 1.- Garantizar progresivamente los derechos humanos al agua y al saneamiento, especialmente en la población más vulnerable.
- 2.- Aprovechar eficientemente el agua para contribuir al desarrollo sostenible de los sectores productivos.
- 3.- Reducir la vulnerabilidad de la población ante inundaciones y sequías, con énfasis en pueblos indígenas y afroamericanos.
- 4.- Preservar la integridad del ciclo del agua a fin de garantizar los servicios hidrológicos que brindan cuencas y acuíferos.
- 5.- Mejorar las condiciones para la gobernanza del agua a fin de fortalecer la toma de decisiones y combatir la corrupción. (SEGOB Secretaría de Gobernación & CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2023)

2.5.2 Objetivos Específicos.

- a) Determinar el monto de la inversión necesaria para implementar SISTEMA DE INGENIERÍA EN ECONOMÍA CIRCULAR en la conexión de la PTAR Villa Sur con la Universidad Panamericana campus Aguascaliente Sur.
- b) Verificar que las aguas tratadas de la PTAR Villa Sur cumplan la NOM-003-SEMARNAT-1997 para cumplir 1. Objetivo y campo de aplicación 3.11 Reúso en servicios al público con contacto directo a través de Luz UV para eliminar patógenos.
- c) Determinar la cantidad de agua potable susceptible de ser ahorrada en la Universidad anualmente, haciendo uso de aguas tratadas de la PTAR Villa Sur para servicios al público con contacto directo.
- d) Determinar la cantidad de Energía Eléctrica a ser generada por el SISTEMA DE INGENIERÍA EN ECONOMÍA CIRCULAR, así como la huella de carbono del sistema.
- e) Determinar el impacto económico anual en la Universidad, haciendo uso de aguas tratadas de la PTAR Villa Sur para servicios al público con contacto directo.
- f) Medir la trascendencia Internacional con el cumplimiento de los ODS de la ONU, en el ODS 6 Agua Limpia y Saneamiento y el ODS 7 Energía Asequible y no contaminante. (Naciones Unidas, 2022) y cumplir con el indicador 4. Water de UI GreenMetric en los puntos Water conservation program implementation y Consumption of treated water.
- g) Diseñar una estrategia alterna que permita a la Universidad Panamericana campus Aguascalientes, conservar la concesión del pozo y al mismo tiempo generar beneficios económicos y sociales.
- h) Diseñar una estrategia de Comunicación Digital que genere en la comunidad educativa Cultura Sustentable del Agua.

2.6. Alcances.

La aplicación del SISTEMA DE INGENIERÍA EN ECONOMÍA CIRCULAR, APLICADO AL REUSO DE AGUA TRATADA DE LA PTAR VILLA SUR, PARA RIEGO EN LA UNIVERSIDAD PANAMERICANA CAMPUS AGUASCALIENTES tendrá impacto positivo en la gestión del Agua y Energía:

Económico Universidad Panamericana: La Universidad Panamericana generará ahorros al utilizar agua residual tratada para el riego de áreas verdes y obtendrá ganancias por la adecuada gestión de la concesión del agua del pozo propio.

Local: El agua tratada de la PTAR Villasur al aplicar la operación unitaria de desinfección con luz ultravioleta (UV), tendrá la calidad necesaria para ser reusada, mitigando el riesgo para la salud humana en servicios al público con contacto directo, permitiendo así su uso en la Universidad Panamericana Campus Aguascalientes.

Entidad: Aportará a la sociedad hidrocálida, ya que al dejar de consumir agua de pozo para riego mitigará porcentualmente el estrés hídrico. Se alineará al Plan Maestro del Agua del Municipio de Aguascalientes, así como al Convenio firmado por el Gobierno de Aguascalientes: *CONVENIO Marco de Coordinación que celebran la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, a través de la Comisión Nacional del Agua, y el Estado de Aguascalientes, con el objeto de establecer los lineamientos para conjuntar recursos y formalizar acciones en las materias de infraestructura hidroagrícola, agua potable, alcantarillado y saneamiento y cultura del agua en beneficio de la entidad* (SEGOB Secretaría de Gobernación & CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2023)

Nacional: El Sistema de Ingeniería de Economía Circular propuesto, será susceptible de ser instalado en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales con las características técnicas de la PTAR Villa Sur, en todo el país.

Global: La propuesta se alinea al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas: ODS 6 Agua limpia y Saneamiento y ODS 7 Energía Asequible y No Contaminante.

2.7. *Limitaciones.*

El proyecto propuesto tiene las siguientes limitaciones:

- El agua residual tratada de la PTAR Villa Sur, aún cuando exceda la calidad de la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, y mejor aún, cumple la NOM-002-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, debe ser mejorada para que logre la NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.
- Se debe realizar obra civil para transportar el agua residual tratada de la PTAR Villa Sur al campus de la Universidad Panamericana campus sur, incluyendo la instalación del cuarto de máquinas para la instalación del equipo UV.

- Se deben de gestionar permisos para pasar la tubería bajo las vías del tren.
- Se debe contar en las instalaciones de la Universidad con un tanque de almacenamiento de Agua residual tratada para riego.
- Una vez que el agua se encuentre en las instalaciones de la Universidad, esta última asumirá la responsabilidad ante las autoridades competentes, respecto a la calidad y aplicación del agua residual tratada.
- La concesión de la extracción de agua potable del pozo se puede perder debido al cese de extracción de agua potable.
- Hay poca o nula cultura de consumo responsable y gestión de agua reutilizada.

2.8. Cronograma.



Figura 8. Cronograma propuesto para el desarrollo del proyecto.

Capítulo III Marco teórico

3.1. Naturaleza del Agua

El agua es el elemento más importante para la Vida en nuestro planeta, y para los seres humanos, según la OMS Organización Mundial de la Salud, el agua es un derecho que le permite disponer de forma continuada, suficiente, salubre, físicamente accesible, asequible y de una calidad aceptable para uso personal y doméstico.

Aún cuando el 70% de la superficie de la tierra está cubierta por agua, sabemos que del 100% del agua disponible, el 97.5% es agua salada y el 2.5 % es agua dulce. Parecería que entonces no tenemos un problema, sin embargo aún faltan cifras por analizar, ya que del total de agua dulce disponible en el mundo, aproximadamente el 68% es agua en estado sólido (glaciares, nieve o hielo), el 1.2% es agua superficial (ríos, lagos, lagunas, nubes) y poco menos del 29% son aguas subterráneas de difícil acceso, debido a lo anterior se estima que sólo alrededor del 0.77% del agua dulce, es agua disponible para consumo humano y ecosistemas.

3.1.1 Química del Agua

El agua es una molécula que contiene un átomo de Oxígeno y dos de Hidrógeno (H₂O) enlazados covalentemente; en una estructura no lineal, ya que los dos átomos de Hidrógeno se enlazan con el átomo de Oxígeno en un ángulo de 104.5° grados entre si. El agua es además una molécula con carácter dipolar, formada por el elemento electronegativo Oxígeno y por el Hidrógeno que es electropositivo. Se considera al agua como disolvente universal. (Chang, 2007, 120)

3.1.2- Ciclo del Agua

El agua tiene un ciclo natural y uno donde interviene el ser humano como modificador del mismo. Es importante conocerlos a ambos, ya que de la fuente de origen dependerá su calidad y aplicación. El ciclo natural se conoce como ciclo hidrológico y el intervenido por el humano ciclo hidrológico antrópico.

3.1.2.1 Ciclo hidrológico natural

El ciclo del agua, también conocido como el ciclo biogeoquímico hidrológico, es uno de los ciclos ³ más importantes para los seres vivos. El ser humano, al igual que todos los seres vivos, forman parte de este ciclo biogeoquímico, el cuerpo humano está compuesto por un 70% de agua. Las moléculas de agua se mueven a través del ciclo biogeoquímico hidrológico migrando de un estado del agua a otro (líquido, sólido, gaseoso) y de un sitio geográfico a otro, es decir de un ecosistema a otro.

El ciclo del agua, para su estudio, se considera que inicia en el estado líquido del agua en océanos, mares, ríos y lagos, el calor del medio ambiente evapora las moléculas superficiales de agua, pasando de líquido al vapor de agua que se transporta a la atmósfera formando nubes. Estas últimas son movidas por el viento y cuando la temperatura es lo suficientemente baja dentro de la misma, el vapor de agua se condensa dando como resultado la precipitación de las moléculas de agua adheridas a micro partículas de polvo, originando lluvia, nieve, aguanieve o granizo. También existe el proceso de sublimación, que en ambientes muy fríos, permite el paso del agua del estado sólido al vapor. Otro mecanismo natural del ciclo biogeoquímico del agua se realiza a través de los seres vivos, plantas y animales, los cuales transpiran moléculas de agua que al evaporarse se unen al proceso de generación de nubes.

Cuando sucede la precipitación de las moléculas de agua (lluvia, nieve, aguanieve o granizo), estas inician el proceso de escurrimiento, que puede ser superficial o de deshielo, teniendo como destino ríos, lagos, mares, océanos, absorción en el suelo, absorción de plantas, hidratación animal, percolación del agua no utilizada por los seres vivos, infiltración a través del suelo y mantos acuíferos subterráneos. El ciclo del agua se completa cuando las aguas superficiales o subterráneas retornan a los océanos. (véase Figura 9)

³ Ciclos biogeoquímicos:

- Ciclo hidrológico o del agua (H₂O)
- Ciclo del nitrógeno (N)
- Ciclo del carbono (C)
- Ciclo del azufre (S)
- Ciclo del oxígeno (O)
- Ciclo del fósforo (P)

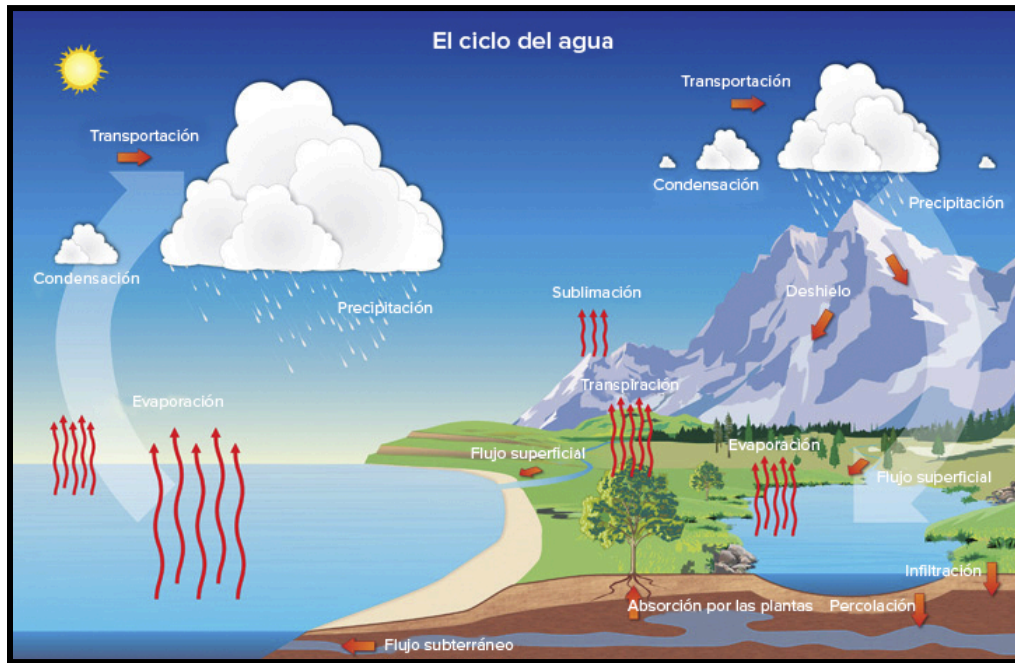


Figura 9. El ciclo del agua. Fuente: (Marquez & Marroquin, 2023) Crédito de imagen: El ciclo del agua de NOAA National Weather Service Jetstream.

Tabla 1. Tiempo de residencia promedio de las moléculas de agua. Fuente: (Marquez & Marroquin, 2023)

Biosférico (en los seres vivos)	1 semana
Atmosférico	1.5 semanas
Ríos	2 semanas
Humedad del suelo	2 semanas - 1 año
Pantanos	1 - 10 años
Lagos y depósitos	10 años
Océanos y mares	4000 años
Agua subterránea	2 semanas -10000 años
Glaciares y permafrost	1000 - 10000 años

Se ha estimado que las moléculas de agua, dentro de su ciclo biogeoquímico, tienen tiempos de residencia promedio, es decir, lo que tardan dichas moléculas en cambiar de estado y/o lugar. El tiempo de residencia promedio es un parámetro que nos permite valorar y aprovechar mejor el recurso. (véase Tabla 1)

Conocer el ciclo biogeoquímico del agua es de vital importancia para gestionar el recurso hídrico y para la toma de decisiones (Marquez & Marroquin, 2023).

3.1.2.3 Ciclo hidrológico antrópico (Humano)

El ciclo hidrológico antrópico, es decir causado por la actividad humana, es resultado de una serie de alteraciones al ciclo hidrológico natural del agua y a la calidad de la misma. El Estado, el sector privado y la sociedad civil son los actores principales del ciclo hidrológico antrópico. El patrimonio hidrológico de una nación lo componen las fuentes de agua naturales asociadas a ecosistemas acuáticos: océanos, ríos, mares, lagos, humedales, pantanos, glaciares, acuíferos, etc, de donde la población humana se abastece del preciado líquido. La gestión de dichos recursos, su extracción, administración y los sistemas artificiales que se generan para utilizarla en los procesos humanos (consumo humano, uso cotidiano, agricultura, ganadería, riego, industriales, recreación, etc.) son lo que llamamos *ciclo hidrológico antrópico*.

El Estado es el administrador del ciclo antrópico y el que regula la transmisión del agua a la población a través de concesiones, regulaciones y vigilancia. El sector privado y la sociedad son parte de la gestión de recursos hídricos por cuencas (gestión participativa de las intervenciones en las fuentes naturales de agua y sus cuencas). (Dourojeanni Ricordi & iagua, 2022)

En México la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es el órgano administrativo, consultivo y desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) que tiene la misión de preservar las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes para su administración sustentable, garantizando la seguridad hídrica con la responsabilidad de los órdenes de gobierno y la sociedad en general. (Gobierno de México, 2019)

Para su administración, el Gobierno de México, a través de la CONAGUA divide el patrimonio hidrológico nacional en Regiones Hidrológicas-Administrativas, estas a su vez se subdividen en Cuencas y estas últimas en Unidades de Planeación.

Tomando como ejemplo al Programa Hídrico Regional 2021-2024, Región Hidrológico-Administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico, se enumeran algunas de las

alteraciones que son fruto del ciclo hidrológico antrópico, en relación a los problemas de contaminación del agua:

Algunas de las causas relacionadas al problema de contaminación de ríos y cuerpos de agua de la Unidad de Planeación (Río Santiago), se deben a:

No aplicar el principio de “El que contamina, paga”.

No aplicar estrictamente la normatividad en materia de descargas.

No promover la economía circular del agua, que implica el reúso de las aguas tratadas.

No invertir en infraestructura para el tratamiento y reúso del agua.

No rescatar las plantas de tratamiento sin operar.

No rehabilitar las plantas que operan deficiente.

No dotar de recursos suficientes a las autoridades del agua para que ejerzan sus atribuciones adecuadamente.

No conceder el valor correcto al costo del agua de primer uso.

(CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2020)

3.1.3- Agua subterránea

Como se ha mencionado anteriormente, del total del agua del planeta solo el 2.5% es agua dulce y de este porcentaje el agua subterránea representa el 29%, esta proviene de la infiltración del agua de lluvia en grietas, poros, huecos en el subsuelo, la cual se deposita en acuíferos los cuales son regiones geológicas subterráneas donde el agua se almacena naturalmente, con un tiempo de residencia promedio de 2 semanas a 10,000 años. Los acuíferos generan cuencas hidrológicas, que es la unidad básica para la gestión de recursos hídricos, estas a su vez se dividen en subcuencas que unidas forman una Unidad de Planeación, como ejemplo, en el siguiente mapa puede observarse la Disponibilidad subcuencas⁴ 2020 en hectómetros cúbicos (véase Figura 10)

⁴ “La disponibilidad natural del agua depende fundamentalmente del balance entre el agua que entra al sistema por medio de la precipitación y de lo que se pierde por la evaporación en los cuerpos de agua y por la evapotranspiración vegetal. La diferencia entre lo que llueve y se evapora puede escurrir superficialmente (en arroyos y ríos), almacenarse en los cuerpos de agua superficiales, o bien, llegar al subsuelo y recargar los acuíferos.” (CONAGUA, 2014)

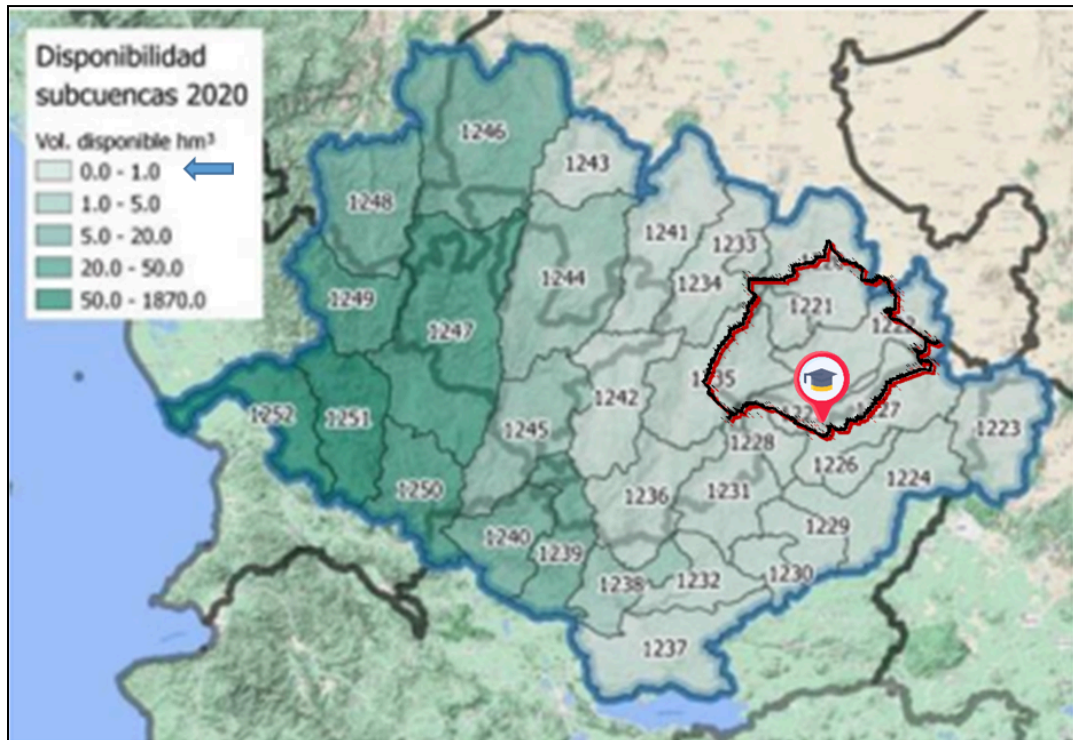


Figura 10. Mapa de disponibilidad en subcuencas hidrológicas de la Unidad de Planeación (UP) Río Santiago. Fuente: (CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2020)

3.1.4 Pozos

La explotación de aguas subterráneas, se lleva a cabo a través de la construcción de pozos, que utilizando la tecnología disponible al día de hoy, se espera sean eficientes, es decir que la relación entre la energía proporcionada al sistema y la que se recupera del mismo tienda al 100%. (D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales et al., 2016)

En la Figura 5 se observa pozo de la Panamericana pertenece, según datos del INAGUA, al acuífero 0101 Valle de Aguascalientes siendo parte de la Región hidrológica administrativa Lerma Santiago Pacífico (Sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas (SIGACUA), 2021).

3.2- Instrumentos de Gestión del Agua

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en su artículo 4º menciona que “ Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado

garantizará este derecho y la Ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios", así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines.

Para su administración, el Gobierno de México, a través de la CONAGUA divide el patrimonio hidrológico nacional en Regiones Hidrológicas-Administrativas, estas a su vez se subdividen en Cuencas y estas últimas en Unidades de Planeación. (Gobierno de México, 2019)

Es evidente que la gestión del agua es un reto que se debe afrontar global, nacional y localmente, ya que el impacto de cualquier estrategia implementada se verá reflejado en todos los niveles. Es importante utilizar la información recopilada en esta investigación y transformarla positivamente a través de una estrategia de aplicación del conocimiento adquirido, en la resolución del problema local, en este caso el desarrollo de un Sistema de Ingeniería en Economía Circular que tenga como *Entrada* agua residual tratada que cumpla la NOM-002-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal; un *Proceso de Mejoramiento de la Calidad del Agua Residual Tratada* para que cumpla la NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público; teniendo como *Salida del sistema* dos productos: la generación de energía eléctrica a través de microturbina hidráulica y agua de riego para áreas verdes en contacto humano.

3.2.1 La ONU: Desafío Global

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2015 aprobó 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), para ser alcanzados en 15 años, es decir en el 2030, es por esto que es llamada Agenda 2030 del Desarrollo Sostenible.

El Desafío Global al que nos enfrentamos como humanidad es a desarrollar estrategias y metodologías que nos permitan gestionar adecuadamente los recursos limitantes: agua, suelo, vegetación. Conocer los ODS, aportará en la adecuada toma de decisiones de los actores locales, regionales, nacionales y globales.

3.2.1.1 Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible

“La Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, es un plan de acción en favor de las personas, el planeta y la prosperidad. También tiene por objeto fortalecer la paz universal dentro de un concepto más amplio de la libertad. Reconocemos que la erradicación de la pobreza en todas sus formas y dimensiones, incluida la pobreza extrema, es el mayor desafío al que se enfrenta el mundo y constituye un requisito indispensable para el desarrollo sostenible.” (Naciones Unidas, 2019)

Los ODS en los que está enfocado el presente trabajo son:

- ODS6: “Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”
- ODS7: “Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna”

3.3 Aguas residuales

Sabemos que sólo alrededor del 0.77 % del agua dulce, es agua disponible para consumo humano y ecosistemas. Se conocen como aguas residuales, aquellas que no son aguas de primer uso, es decir, es agua que ha sido utilizada en el *ciclo hidrológico antrópico*, con intervención humana. De acuerdo al tipo de uso que se le dio al agua, ya sea cruda o potable, se pueden clasificar las aguas residuales de acuerdo a la fuente de origen (FO):

Aguas residuales domésticas, son aquellas producidas en las viviendas, pueden ser:

- aguas negras: contienen desechos orgánicos, alto contenido de material fecal y químicos.
- aguas grises: contienen desechos de detergentes, bajo contenido de materia fecal.
- aguas productos de limpieza: contienen exclusivamente productos de limpieza.

Aguas residuales industriales, son aquellas producidas por las empresas en sus procesos productivos.

Aguas residuales agrícolas, son las provenientes del riego, y están altamente contaminadas, según la FAO, con nitratos y químicos, fruto de la actividad agrícola, es el mayor contaminante de acuíferos subterráneos.

Aguas residuales urbanas, son las que provienen de calles y edificios en las ciudades.

También pueden ser clasificadas de acuerdo al tipo de sustancias químicas contenidas, materia en suspensión, materia disuelta, características bacteriológicas, demanda bioquímica de oxígeno, pH, entre otras.

En México, de acuerdo a cifras de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) en 2020 se estima que se generaron *8.82 billones de metros cúbicos de aguas residuales municipales*, de las cuales *6.801 billones de metros cúbicos de aguas residuales municipales no tratadas fueron vertidas a cuerpos de agua*. El porcentaje de *estrés hídrico(E)* fue de 44.82% , lo cual confirma que existe un déficit en la cantidad de agua potable disponible en nuestro país. De acuerdo a la ONU (Organización de las Naciones Unidas) el 80% de las aguas residuales retornan a los ecosistemas sin ser tratadas o reutilizadas.

Las problemáticas existentes, en relación a las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), en la Unidad de Planeación Santiago a la que pertenece el Estado de Aguascalientes, son las siguientes:

“...Además de esta referencia, existen problemáticas específicas relacionadas con la contaminación de fuentes de abastecimiento y cuerpos de agua en las principales zonas urbanas de la Unidad de Planeación. En la ciudad de Aguascalientes, el abatimiento del acuífero ha traído consigo mayor concentración de sales y minerales; y la presencia de elementos dañinos, entre ellos el flúor, el mercurio y el arsénico.” (CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2020).

“...En este aspecto, las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales son una infraestructura indispensable para lograr aumentar la cobertura de saneamiento en la Unidad de Planeación. Sin embargo, su construcción y su correcta operación a largo plazo requieren superar diversos obstáculos. En un inicio, su instalación requiere de una inversión significativa y una vez logrado este objetivo, mantener su operación requiere de un financiamiento constante; en particular, los sistemas de tratamiento intensivos conllevan altos costos de operación y mantenimiento que muchas veces superan la capacidad económica de los municipios (de Anda y Shear, 2016). De acuerdo con los censos económicos del 2019, el pago de energía eléctrica representó un 44.4% del gasto por consumo de bienes y servicios de los Organismos Operadores (OO) (INEGI, 2020a). Sumado a esto, los periodos cortos de las administraciones municipales y la falta de continuidad afectan su capacidad operativa y de planificación en materia de agua y saneamiento. Esta situación ha llevado al abandono de muchas de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales (PTARM) en la región (Noyola et al., 2013). Para poder establecer cuál es el nivel de cobertura de saneamiento actual en la Unidad de Planeación Río Santiago se revisó el inventario de PTARM que se presenta a nivel nacional por parte de la CONAGUA, con la información que se pudo obtener por parte de las dependencias estatales.” (CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2020).

“...En Aguascalientes se encuentran construidas 140 PTARM, de las cuales 120 se encuentran en operación y tienen un gasto de diseño total de 4,748.45 lps (litros por segundo) y un gasto de operación de 2,408.64 lps (litros por segundo) (DL CONAGUA Aguascalientes, 2021a). El Instituto del Agua del Estado (INAGUA), tiene a su cargo 35 de las principales PTARM del Estado, incluida la planta de Cd. Aguascalientes, lo que representa un 74% del volumen total saneado (INAGUA, 2021). El resto están a cargo de los organismos operadores municipales, muchas de estas se encuentran en poblaciones menores y utilizan sistemas pasivos de tratamiento como son los tanques sépticos, humedales artificiales y lagunas de estabilización; no obstante, gran parte de estas reportan deficiencias en su operación y requieren de una rehabilitación o mantenimiento (DL CONAGUA Aguascalientes, 2021). Por otra parte, también se tiene registro de 184 PTAR privadas, de las cuales operan 174, 75 de tipo industrial con una capacidad de diseño de 298.37 lps (litros por segundo) y 110 plantas en el sector de servicios con una capacidad de diseño de 235.1 lps (litros por segundo) (DL CONAGUA Aguascalientes, 2021a). Existen también PTAR particulares en fraccionamientos que operan sin un control y vigilancia de sus descargas (INAGUA, 2015). Las principales PTARM del estado aprovechan el agua tratada en diferentes usos agrícolas, urbanos y ambientales; directos e indirectos. Existen antecedentes de convenios establecidos con usuarios de unidades de riego para intercambiar el uso de aguas subterráneas por aguas residuales tratadas, sin embargo, estos convenios no fueron exitosos pues no se modificaron los títulos de concesión de los usuarios.” (CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2020).

3.3.1 Tipos de tratamientos de aguas residuales.

Las aguas residuales, si no son tratadas adecuadamente, son fuente de contaminación para el medio ambiente y de enfermedades para los seres vivos. Su vertido o filtración libera sustancias tóxicas y potencialmente dañinas para los seres vivos y los ecosistemas en los que estos últimos habitan. Es de vital importancia que, antes de retornar las aguas residuales al entorno natural o para poder ser reusadas, deben tratarse adecuadamente para remover aquellos residuos que las contaminaron. El tipo de tratamiento a aplicar, está directamente relacionado con sus características físico químicas y con el tipo de vertido a la naturaleza o el reuso que se le dará al producto final, el agua residual tratada.

Las PTAR reciben a través de tuberías las aguas residuales, donde se les someterá a los diferentes tratamientos para depurarles de los contaminantes, el tiempo promedio de permanencia esperado de las aguas residuales en la PTAR es de 24 a 48 horas, una vez que el

agua residual ha sido tratada, esta puede ser vertida a su destino final, ya sea natural (ríos, cauces, embalse, océano) o para su reuso en procesos industriales o agrícolas.

El primer paso es el Pretratamiento, que consiste en la eliminación de los sólidos suspendidos más grandes, así como arenas y aceites. Posteriormente, dependiendo del destino final del agua residual tratada, pueden aplicarse diferentes tipos de tratamientos y de operaciones unitarias, antes de reincorporarse al ciclo natural, industrial o agrícola. Los tipos de tratamiento son:

Tratamiento Primario

Son procesos físico-químicos que se aplican para reducir el contenido de partículas en suspensión, que pueden ser sedimentados o permanecer en el agua ya que son partículas menores de 10 micras. Las primeras llegan al fondo en un periodo de tiempo corto, mientras que las segundas, al no flotar ni sedimentar, deberán ser removidas con otro tipo de técnicas. Las operaciones unitarias típicas de este tipo de tratamiento son:

- Sedimentación.
- Flotación.
- Neutralización.
- Otros procesos.

Tratamiento Secundario

Consiste en un conjunto de procesos biológicos, cuyo objetivo es eliminar la materia orgánica del agua residual. El trabajo se realiza a través de bacterias y microorganismos que tiene la capacidad de transformar la materia orgánica en biomasa celular, gas, energía y agua. Las operaciones unitarias de este tipo de tratamiento son:

- Los procesos aerobios (en presencia de Oxígeno)
 - Lodos activos
 - Lechos bacterianos
 - Filtros verdes
- Los procesos anaerobios (sin presencia de Oxígeno)
 - Digestión anaeróbica
 - Otros

Tratamiento Terciario

Este tratamiento tiene como objetivo primordial la eliminación de agentes patógenos, susceptibles de provocar enfermedades como el Escherichia coli, bacterias fecales, virus, etc. Normalmente este tratamiento es opcional y solo se aplica si el agua residual tratada va a ser reutilizada o vertida en cuerpos de agua en áreas naturales protegidas (ANP) o con una excelente

calidad de agua. Las operaciones unitarias de este tipo de tratamiento son de alta especialización y se aplican de acuerdo al tipo de uso final del agua residual tratada:

- Radiación ultravioleta
- Intercambio iónico
- Ósmosis inversa
- Filtración
- Cloración

El principal producto obtenido del tratamiento de aguas residuales es agua residual tratada, el secundario son los lodos o fangos, que pueden ser reutilizados como fertilizantes.

3.3.2 México: Organismos Rectores y Gestores de Aguas Nacionales.

La Comisión Nacional del Agua (Conagua) es un órgano administrativo, normativo, técnico, consultivo y desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) con la misión de preservar las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes para su administración sustentable y garantizar la seguridad hídrica con la responsabilidad de los órdenes de gobierno y la sociedad en general.

Diversas instancias en los ámbitos federal, estatal y municipal, así como asociaciones de usuarios, empresas e instituciones del sector privado y social que trabajan en conjunto con la Conagua.

Constitucionalmente, la responsabilidad de la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento corresponde a los municipios, que generalmente cuentan con organismos operadores para desarrollar esa responsabilidad. (Gobierno de México, 2019)

3.3.3 Normas Oficiales Mexicanas

Las Normas Oficiales Mexicanas establecen los requisitos, plazos y procedimientos para la presentación y registro de los Programas para el cumplimiento de las siguientes normas relacionadas con el agua residual tratada:

NOM-001 Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. (Secretaría de Gobernación & Diario Oficial de la Federación, 2022).

NOM-002 NORMA Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. (Secretaría de Gobernación & Diario Oficial de la Federación, 1998)

NOM-003 NORMA Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.(Secretaría de Gobernación & Diario Oficial de la Federación, 1998)

Capítulo IV Metodología y Análisis

En este capítulo establecemos las metodologías para desarrollar el proyecto :REUSO DE AGUA RESIDUAL TRATADA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) VILLA SUR, PARA RIEGO EN LA UNIVERSIDAD PANAMERICANA CAMPUS AGUASCALIENTES.

Al ser este proyecto un Sistema de Ingeniería en Economía Circular, se analizan todos y cada uno de los aspectos que componen esta metodología, se abordan los tópicos de Material Flow Management que permiten establecer el Status Quo de la problemática del agua en la Universidad Panamericana, así como el de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Villa Sur.

Posteriormente se desarrollan todos los aspectos teóricos y técnicos de Ingeniería necesarios para el desarrollo del proyecto, en este caso se aplicaron conceptos de Física, Química, Mecánica y Electricidad. El siguiente punto a tocar es la Sustentabilidad del proyecto, donde se analizan las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del proyecto, buscando que en cada tópico las GEI's tiendan a Cero Emisiones, Zero Emissions (ZE).

De cada tópico, se obtendrán las cotizaciones de diferentes opciones de solución, y se elegirá la que mejor se adapte a las condiciones del Status Quo así como a los objetivos buscados previamente. Se deben obtener los valores de las variables financieras que servirán para realizar la Evaluación Económica del proyecto: Gastos en Capital, también llamado Inversiones o Capital Expenditure (CAPEX), los Gastos Operativos, también llamados Costos de Operación u Operating Expenses (OPEX), el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), la relación Beneficio-Costo (BC), el Pay Back Period (PBP), el horizonte de evaluación (n años) y el Levelized Cost of Water (LCOW). Se debe de considerar previamente que, en cada uno de los siguientes pasos se deberán determinar, dimensionar y cotizar los aspectos legales, permisos, cuotas, gastos, multas que se deriven de la aplicación de cada uno de ellos.

Finalmente se propondrá una estrategia dentro del Marco Legal, que le permita a la Universidad llevar a cabo el proyecto, aportar a los ODS locales, nacionales y globales, y evitar las penalizaciones legales derivadas de la Concesión del Pozo de agua potable.

4.1. Caracterización del Agua Residual Tratada de la PTAR Villa Sur.

4.1.1. Metodología

Se caracteriza el agua residual tratada de la PTAR Villa Sur, haciendo uso de análisis químicos comparados con la NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, dicha información se puede encontrar en el Diario Oficial de la Federación en la Tabla 1 Límites Permisibles en la columna de Suelo, subcolumna Riego de áreas verdes y subcolumna Infiltración y otros riegos. Además de ser comparados con la NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.

Se solicitó a CCAPAMA acceso a los resultados mensuales de laboratorio del agua residual tratada de la PTAR Villa Sur del año 2020, para poder comparar los resultados reales con las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes.

Se compararon los resultados de laboratorio con la NOM-001-SEMARNAT-1996, *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*, con la NOM-002-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, y finalmente con la NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.

FE DE ACTUALIZACIÓN: El día 11 de marzo de 2023 se publicó la NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Se revisó la nueva ley para actualizar los resultados del 2020 utilizados en el presente trabajo, y se encontró que, en dicha ley en el apartado 2. Referencias Normativas en el punto 3.37. Riego se especifica que: “3.37. Riego: Es la utilización del agua residual destinada a la superficie de terrenos de cultivos, esparcimiento o circulación peatonal, conformada por pastos, arbustos y otros elementos complementarios, exceptuando aquellos supuestos considerados en la NOM-003-SEMARNAT-1997.” (Secretaría de Gobernación & Diario Oficial de la Federación, 2022). Esta información confirma que, los resultados obtenidos son vigentes en el presente año y Gobierno Federal.

Se realizó un concentrado anual de resultados estableciendo qué parámetros CUMPLE, NO CUMPLE o están fuera de la NOM-003-ECOL-1997.

Paso 1:

Se registraron los resultados de laboratorio mensuales de la PTAR Villa Sur proporcionados por CCAPAMA. En la Tabla 2 se muestra el encabezado del laboratorio del mes de enero de 2020. Como se puede observar, la PTAR Villasur sólo está obligada a cumplir la NOM-002-SEMARNAT-1996, se hace especial énfasis en APARIENCIA DE LA MUESTRA y OLOR DE LA MUESTRA, ya que son parte de los parámetros que determinan la calidad del agua.

En la Tabla 3 se muestra el encabezado de la tabla que se utilizó para contrastar los resultados de la muestra, una por cada mes del 2020, con cumplimiento de la NOM 002-SEMARNAT-1996, comparado con los Límites máximos permitidos de acuerdo a la NOM 003-SEMARNAT-1997⁵. La primera parte de la tabla contiene los resultados de la muestra en los parámetros que establece la NOM-002-SEMARNAT-1996, el límite máximo permitido para cada parámetro, la incertidumbre porcentual del resultado, y las unidades de medida. La segunda parte son los valores promedio mensual (PM) y promedio diario (PD) contenidos en las tablas 2 y 3 de la NOM 003-SEMARNAT-1997, donde se establecen los límites máximos permitidos para cada uno de los parámetros. En la tercera parte se aplica la metodología que consiste en comparar el valor esperado en la NOM 003 contra el valor obtenido en la muestra que cumple la NOM 002, el resultado de la evaluación de la calidad del agua residual tratada será, si CUMPLE o NO CUMPLE con la NOM 003.

⁵ *Contaminantes básicos:* Son aquellos compuestos o parámetros que pueden ser removidos o estabilizados mediante procesos convencionales. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los siguientes: grasas y aceites, materia flotante, demanda bioquímica de oxígeno 5 y sólidos suspendidos totales.

Contaminantes patógenos y parasitarios: Son los microorganismos, quistes y huevos de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo a la salud humana, flora o fauna. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los coliformes fecales medidos como NMP o UFC/100 ml (número más probable o unidades formadoras de colonias por cada 100 mililitros) y los huevos de helminto medidos como h/l (huevos por litro). (Secretaría de Gobernación & Diario Oficial de la Federación, 1998)

Tabla 2. Encabezado de resultados de laboratorio mensuales de la PTAR Villa Sur proporcionados por CCAPAMA 2020.

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA											
NUMERO DE INFORME:	LUGAR DE MUESTREO:	DESCRIPCION DE LA	METODO DE MUESTR	PERIODO DE ENSAYOS	REFERENCIA	NATURALEZA	TIPO DE MUESTRA	MUESTRAD A POR			
285323/2020	EFLUENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO VILLA SUR	AGUA RESIDUAL TRATADA	NOM-003	DEL LUNES, 6 DE ENERO DE 2020 AL MIÉRCOLES, 22 DE ENERO DE 2020	CONVENIO	AGUA RESIDUAL TRATADA	PUNTUAL	MICROLAB INDUSTRIAL			
DATOS DE MUESTREO											
								CONDICIONES AMBIENTALES AL MOMENTO DE MUESTREO			
FOLIO DE LA MUESTRA:	APARIENCIA DE LA MUESTRA	FECHA DE MUESTREO	FECHA RECEPCION	MUESTRADOR	OLOR DE LA MUESTRA	HORA DE MUESTREO	HORA DE RECEPCION	TEMPERATURA DE BULBO SECO:	PRESION BAROMETRICA	HUMEDAD RELATIVA	CONDICION DEL CIELO
285323/2020	LIGERAMENTE TURBIA	Lunes, 6 de Enero de 2020	Lunes 6 de Enero de 2020		FETIDO	13:20 h	16:44 h	23,80 °C	---	26%	SOLEADO
RESULTADOS DE LA MUESTRA											
LOS LÍMITES MÁXIMOS APLICAN DE ACUERDO A: NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-002-SEMARNAT-1996 QUE ESTABLECE LOS LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO URBANO O MUNICIPAL											

Tabla 3. Encabezado de tabla de análisis de resultados de laboratorio mensuales de la PTAR Villa Sur contrastado con la NOM 003-SEMARNAT- 1997.

Resultados de la muestra de acuerdo a la NOM-002-SEMARNAT-1996					NOM-003: Tablas 2 y 3: Limites Maximos Permitidos Embalses Naturales y Artificiales USO PUBLICO URBANO (C)			Metodologia		Calidad de acuerdo a la NOM 003
PARAMETRO	RESULTADO	LIMITE MAXIMO	INCERTIDUMBRE	UNIDADES	PM: Promedio Mensual	PD: Promedio Diario	Tabla	NOM-003 apartado 3.11	NOM-002	CUMPLE / NO CUMPLE

Paso 2:

Una vez que se hubieron capturado los resultados mensuales de laboratorio de 2020 de la PTAR Villa Sur, se generó la *Evaluación de agua residual tratada* que, como se puede ver en la Tabla 4, contiene los Límites máximos permisibles para cada parámetro de la NOM 003-SEMARNAT-1997, así como los valores de la Tabla 5 *Estándares para fuentes de aguas crudas*⁶, suministro doméstico, requisitos y criterios generales para elegir el tren de tratamiento más adecuado, está última contenida en el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y

⁶ Aguas crudas: Son las aguas residuales sin tratamiento. (Secretaría de Gobernación & Diario Oficial de la Federación, 1998)

Saneamiento (MAPAS 45) Evaluación rápida de Plantas Potabilizadoras, (D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales et al., 2016, 12).

Cabe señalar que, al igual que en los estudios de laboratorio de aguas residuales tratadas, la Normas Oficiales Mexicanas utilizan dentro de su nomenclatura la letra L mayúscula para representar al litro, el cual en el Sistema Internacional (SI) es considerado como una unidad aceptada, que deriva de la unidad de volumen del metro m, por lo que puede también utilizarse la letra l minúscula, que equivale a:

$$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$$

“Aunque l y L son símbolos aceptados internacionalmente para litro, para evitar el riesgo de confundir la letra l con el número 1, en Estados Unidos se utiliza el símbolo L.” (Pérez D’Gregorio, 2002).

Se genera la comparación de los valores mensuales de cada uno de los parámetros, contra los límites máximos permisibles de la NOM 003 y los estándares para fuentes de aguas crudas, permitieron evaluar si el parámetro CUMPLE o NO CUMPLE con la calidad del agua residual tratada.

Tabla 4. Encabezado de tabla Resumen Anual 2020 para evaluación de calidad del agua residual tratada.

PARAMETRO	Evaluación de calidad del agua residual tratada						
	NOM-003	Unidades de medida	TABLA 1.10. CALIDAD DEL AGUA			VALORES	CUMPLE / NO CUMPLE
	Límite máximo permisible		EXCELENTE (REQUIERE SOLO DESINFECCION COMO TRATAMIENTO)	BUENA (REQUIERE TRATAMIENTO USUAL TAL COMO FILTRACION Y DESINFECCION)	POBRE (REQUIERE TRATAMIENTO ESPECIAL O ADICIONAL Y DESINFECCION)	ENE...DIC	ENE...DIC

Tabla 5. Estándares para fuentes de aguas crudas. Fuente: (D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales et al., 2016, 12).

Parámetro	Fuente excelente Requiere solamente desinfección como tratamiento	Fuente Buena Requiere tratamiento usual como filtración y desinfección	Fuente pobre Requiere tratamiento especial o adicional y desinfección
DBO, mg/L (miligramos por litro) Promedio mensual	0.75 - 1.5	1.5 -2.5	>2.5
NMP de coliformes/100 mL (mili Litros)	50-100	50-5000	>5000
Turbiedad -UTN	0-10	10-250	>250
pH promedio	6.0 - 8.5	5.0 - 9	3.8 - 10.5

4.1.2. Análisis

Paso 3:

Una vez realizada la Evaluación del agua residual tratada de la PTAR Villa Sur, se elabora un resumen en la Tabla 6 Resultados de laboratorio de la PTAR Villa Sur, donde se pueden observar de cada PARÁMETRO, el porcentaje de Cumplimiento de la NOM 003, así como el valor promedio anual (PA). De la comparación del promedio anual (PA) contra el límite máximo promedio mensual (PM) de la NOM 003, se observa que, de los 24 parámetros evaluados, 21 SI CUMPLEN con la NOM 003-SEMARNAT-1997. Los 3 parámetros evaluados que NO CUMPLE la NOM 003 son: SST Sólidos Suspendedos Totales, Coliformes fecales y Organismos coliformes, este último no ha sido examinado en los estudios de laboratorio, ya que no es requisito para la NOM 002-SEMARNAT-1996.

De acuerdo a la metodología aplicada para la caracterización del agua residual tratada de la PTAR Villa Sur, en la Tabla 6 se observa que la calidad de la misma excede la NOM 002-SEMARNAT-1996, cumpliendo casi en su totalidad la NOM 003-SEMARNAT-1997.

En el parámetro SST SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES el límite máximo permisible es de 20 mg/L (miligramos por litro), en 2020 se tuvo un promedio anual de 24.10 mg/L, con un cumplimiento del 50% del año, es decir seis meses (abr, ago, sep, oct, nov, dic) estuvo dentro del

límite máximo permisible y seis meses (ene,feb,mar,may,jun,jul) no lo estuvo, por lo tanto **NO CUMPLE con la NOM 003** y se deberá aplicar un proceso unitario de filtración para estar dentro del parámetro de la norma mexicana.

En el parámetro COLIFORMES FECALES el límite máximo permisible es de 240 NMP/mL (número más probable o unidades formadoras de colonias por cada 100 mililitros), se obtuvieron registros atípicos en abril, mayo, junio, julio y septiembre, por lo que se omitieron dichos valores del estudio estadístico, es así que, como resultado en 2020 se tuvo un promedio anual de 1243.71 NMP/mL, con un cumplimiento del 17% del año, es decir 2 meses (nov, dic) estuvo dentro del límite máximo permisible. Los meses restantes (ene-oct) no cumplió dicho límite por lo que **NO CUMPLE con la NOM 003**.

La calidad del agua es buena de acuerdo a los estándares para fuentes de aguas crudas (véase Tabla 5), al estar en el rango de 50-5000 NPM/mL, en este caso se deberán aplicar procesos unitarios de filtración y desinfección para estar dentro del parámetro de la NOM 003.

El parámetro ORGANISMOS COLIFORMES: Escherichia coli* / Enterococos fecales* de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-2021, donde se establecen límites permisibles de 250 NPM/100ml (número más probable o unidades formadoras de colonias por cada 100 mililitros), se determina que: * Si la conductividad eléctrica es menor a 3500 μ S/cm (microSiemens/cm) se analiza y reporta E. coli, * Si la conductividad eléctrica es mayor o igual a 3500 μ S/cm se analiza y reporta Enterococos fecales.

ORGANISMOS COLIFORMES es un parámetro no evaluado y debido a que los COLIFORMES FECALES no cumple la NOM 003, se infiere que organismos coliformes **NO CUMPLE con la NOM 003** y se deberá aplicar el proceso unitario de desinfección con luz ultravioleta para lograr la NOM 003 en dicho parámetro.

Tabla 6. Análisis de resultados de laboratorio de la PTAR Villa Sur, elaboración propia.

PARAMETRO	Límite máximo PM (promedio mensual)	Unidades	RESULTADOS PTAR VILLA SUR 2020					
			Cumplimiento NOM-003 meses/año			Evaluación NOM-003 PA Promedio Anual		
			CUMPLE	NO CUMPLE	% CUMPLIMIENTO	PA (Promedio Anual)	Unidades	CUMPLE/NO CUMPLE
TEMPERATURA (De campo)	40	oC	12	0	100%	26.67	oC	CUMPLE
pH (De campo a 25°C)	5.5 a 10.0	U de PH	12	0	100%	7.69	U de PH	CUMPLE
MATERIA FLOTANTE (De campo)	ausente	---	12	0	100%	ausente	---	CUMPLE
GRASAS Y ACEITES	15	mg / L	12	0	100%	4.40	mg / L	CUMPLE
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	1	mg / L	9	3	75%	<0.1	mg / L	CUMPLE
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	20	mg / L	6	6	50%	24.10	mg / L	NO CUMPLE
DBO5	20	mg / L	9	3	75%	19.46	mg / L	CUMPLE
ARSÉNICO	0.1	mg / L	12	0	100%	< 0.0500	mg / L	CUMPLE
CADMIO	0.1	mg / L	12	0	100%	< 0.0500	mg / L	CUMPLE
CIANUROS	1.0	mg / L	12	0	100%	<0.026	mg / L	CUMPLE

NOM-003		RESULTADOS PTAR VILLA SUR 2020						
		Cumplimiento NOM-003 meses/año			Evaluación NOM-003 PA Promedio Anual			
PARAMETRO	Límite máximo PM (promedio mensual)	Unidades	CUMPLE	NO CUMPLE	% CUMPLIMIENTO	PA (Promedio Anual)	Unidades	CUMPLE/NO CUMPLE
COBRE	4.0	mg / L	12	0	100%	< 0.0500	mg / L	CUMPLE
CROMO VI	0.5	mg / L	12	0	100%	< 0.1000	mg / L	CUMPLE
MERCURIO	0.005	mg / L	12	0	100%	< 0.00300	mg / L	CUMPLE
NÍQUEL	2	mg / L	12	0	100%	< 0.0500	mg / L	CUMPLE
PLOMO	0.2	mg / L	12	0	100%	< 0.0500	mg / L	CUMPLE
ZINC	10	mg / L	12	0	100%	< 0.0500	mg / L	CUMPLE
DQO-TS	500	mg / L	12	0	100%	52.82	mg / L	CUMPLE
COLIFORMES FECALES	240	NMP/100 mL (número más probable o unidades formadoras de colonias por cada 100 mililitros)	2	10	17%	1243.71	NMP/100 mL (número más probable o unidades formadoras de colonias por cada 100 mililitros)	NO CUMPLE
NITRÓGENO TOTAL	40	mg / L	10	2	83%	25.41	mg / L	CUMPLE
FÓSFORO TOTAL	20	mg / L	12	0	100%	3.51	mg / L	CUMPLE

PARAMETRO	Límite máximo PM (promedio mensual)	Unidades	RESULTADOS PTAR VILLA SUR 2020					
			Cumplimiento NOM-003 meses/año			Evaluación NOM-003 PA Promedio Anual		
			CUMPLE	NO CUMPLE	% CUMPLIMIENTO	PA (Promedio Anual)	Unidades	CUMPLE/NO CUMPLE
HUEVOS DE HELMINTO	< 1	Huevos / L (huevos por litro)	12	0	100%	< 1	Huevos / L (huevos por litro)	CUMPLE
ORGANISMOS COLIFORMES : Escherichia coli, (NMP/100 ml)* / Enterococos fecales* (NMP/100 ml)	250	N/100 ml (Numero de unidades formadoras de colonias en 100 m L, número de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y Escherichia coli presuntiva presentes en 1100 cm3)	PARAMETRO NO EVALUADO: * Si la conductividad eléctrica menor a 3500 µS/cm se analiza y reporta E. coli. * Si la conductividad eléctrica es mayor o igual a 3500 µS/cm se analiza y reporta Enterococos fecales.			DESCONOCIDO	N/100 ml (Numero de unidades formadoras de colonias en 100 m L, número de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y Escherichia coli presuntiva presentes en 1100 cm3)	NO EVALUADO

	NOM-003		RESULTADOS PTAR VILLA SUR 2020					
			Cumplimiento NOM-003 meses/año			Evaluación NOM-003 PA Promedio Anual		
PARAMETRO	Límite máximo PM (promedio mensual)	Unidades	CUMPLE	NO CUMPLE	% CUMPLIMIENTO	PA (Promedio Anual)	Unidades	CUMPLE/NO CUMPLE
APARIENCIA DE LA MUESTRA	INCOLORA		10	2	83%	INCOLORA		CUMPLE
OLOR DE LA MUESTRA	INODORA		10	2	83%	INODORA		CUMPLE
Análisis de laboratorios PTAR Villasur 2020 elaborado por Ing. María de los Angeles Arriaga Moreno								

Es importante observar que aún cuando el parámetro DBO5 Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días, CUMPLE con la NOM 003 que establece como límite máximo permisible 20 mg/ L, la calidad del agua de acuerdo a la Tabla 1.10 Estándares para fuentes de aguas crudas (véase Tabla 5) establece que, el DBO Promedio mensual mayor que 2.5 mg/L se evalúa como: Fuente pobre Requiere tratamiento especial o adicional y desinfección, esto último confirma que es necesario un tratamiento de desinfección adicional para obtener la calidad deseada.

4.2. Determinación de la cantidad necesaria de tiempo de exposición del agua residual tratada a la luz UV para eliminar patógenos, caudal de 20 Lps.

4.2.1. Metodología

Las características técnicas que debe cumplir un sistema de desinfección UV, **específicamente** para organismos coliformes fecales (*Escherichia coli* / *Enterococos* fecales), deben satisfacer ciertos criterios generales, ya que debe de ser capaz de destruir o inactivar, el tiempo suficiente, a los microorganismos, independientemente de la especie, en este caso E Coli, y de la cantidad (D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales et al., 2016, 40).

En la Tabla 7 se enumeran las variables del sistema UV, el valor que da eficacia al sistema, las unidades de medida y consideraciones sobre la misma.

Tabla 7. Características técnicas para sistemas de desinfección de agua con radiación ultravioleta

<i>Variable</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>	<i>Consideraciones</i>
UVC	254	nm (nanómetros)	La longitud de onda del espectro electromagnético que tiene aplicaciones de desinfección UV es la radiación ultravioleta C (UVC) entre 200 nm y 280 nm. Aún cuando la luz solar es una fuente de luz ultravioleta, la absorción de longitud de onda corta de la capa de ozono del planeta, disminuye la cantidad de UVC que alcanza a la tierra, por lo que las aplicaciones prácticas de desinfección de agua requieren fuentes artificiales de UVC. Se sabe por experiencia y experimentación que aplicado a desinfección de aguas residuales tratadas la longitud de onda de 254 nm es la más eficiente para desinfección de patógenos. (Wright & Cairns, 1998)
Lámpara UVC	Baja presión	(mW/cm ²) milivatios por centímetro cuadrado	Las lámparas UVC de baja presión maximizan la conversión de energía eléctrica a radiación UV resonante a 254 nm, la cual es letal para bacterias, virus, protozoos, hongos, levaduras y algas. (Proaño Mejía, 2022)
Calidad del agua cruda	menor o igual a 20	mg/L SST (miligramos por litro de sólidos suspendidos totales)	La calidad del agua cruda debe ser de buena a excelente en la concentración de SST sólidos suspendidos totales, ya que esto mejorará la transmitancia ⁷ de UVC a través del líquido. (Proaño Mejía, 2022)
Dosis UV	6.8	(mWs/cm ²) milivatios por segundo por centímetro cuadrado	Dosis UV en mWs/cm ² necesaria para inactivar una población microbiana por 1 Log (90%) y 2 Log (99%) . Enterococos fecales: 3.4 6.8 Escherichia coli: 3.0 6.6 (Wright & Cairns, 1998)
Caudal	131.38	lps (litros por segundo)	Las tres lámparas de baja presión del sistema TrojanUV3000 TM PTP aseguran la desinfección de un caudal de 473 m ³ /h (metros cúbicos por hora) que equivale a 131.38 lps. (Trojan Technologies, 2010). Ver la Tabla 7.

⁷ “Transmitancia. - es la capacidad del agua para ser atravesada por los rayos ultravioleta. Es medida con un espectrofotómetro, ajustado a 254 nm, y sirve para determinar la longitud de onda óptima en casos de desinfección. La transmitancia se relaciona con los residuos coloidales, partículas suspendidas que absorben y esparcen esta longitud de onda de luz UV.” (Proaño Mejía, 2022)

4.2.2. Análisis

De acuerdo a los valores de las variables del sistema de desinfección UV de agua tratada, se confirma que dicho sistema, *será eficiente para un caudal de 20 lps*, el cual corresponde al agua caracterizada de la PTAR Villa Sur, solo se deberá añadir la operación unitaria de filtrado para mejorar la calidad del agua y su transmitancia.

En la Tabla 8 se analiza uno a uno, los elementos del sistema propuesto, para verificar que cumplen con los valores establecidos previamente en la Tabla 7 Características técnicas para sistemas de desinfección de agua con radiación ultravioleta.

Tabla 8. Análisis de elementos del sistemas de desinfección de agua con radiación ultravioleta.

<i>Elemento a analizar</i>	<i>Valor del sistema</i>	<i>Tiempo Exposición UV</i>	<i>Análisis</i>
Capacidad de caudal a tratar mediante sistema TrojanUV3000 TM PPTP (Packaged Treatment Plant)	131.39 lps	1 s	Aplicación típica para desinfección de agua municipal residual tratada, el sistema está conformado por 3 lámparas UV de baja presión a 254 nm. <i>Tiempo ideal en segundos de exposición a radiación UV.</i>
Caudal PTAR Villa Sur	20 lps	0.15 s	Cantidad necesaria de tiempo de exposición, del agua residual tratada de PTAR Villa Sur, a la luz UV usando el sistema TrojanUV3000 TM PPTP para eliminar patógenos. Tiempo Exposición= (Caudal PTAR Villa Sur * Tiempo exposición UV TrojanUV3000 TM PPTP) / Capacidad caudal TrojanUV3000 TM PPTP Tiempo Exposición= (20 lps * 1 s) / 131.39 lps = 0.15 s <i>Tiempo en segundos de exposición a radiación UV es excelente, excede el valor requerido, ya que al ser un caudal menor al del diseño del sistema TrojanUV3000TMPPTP, el tiempo de exposición necesario será menor y la desinfección será mayor por área.</i>
Calidad del agua cruda: Transmitancia	24.10 mg/L SST	operación unitaria de filtrado a 16 lps	La calidad del agua cruda debe ser de buena a excelente en la concentración de SST sólidos suspendidos totales, ya que esto mejorará la transmitancia de UVC a través del líquido (Proaño Mejía, 2022), esta debe ser menor o igual a 20 mg/L de SST (miligramos por litro de sólidos suspendidos totales). <i>Se recomienda la operación unitaria de filtrado para mejorar la transmitancia.</i>

4.3 Dimensionamiento del sistema de mejoramiento del agua residual con lámparas UV.

4.3.1. Metodología

Se buscan y cotizan equipos en el mercado, que cumplan las características técnicas para sistemas de desinfección UV (Tabla 7), *específicamente* para organismos coliformes fecales (Escherichia coli / Enterococos fecales).

En la Tabla 7 se enumera la variable del sistema UV, el valor que da eficacia al sistema, las unidades de medida y consideraciones sobre la misma. En base a estos valores se buscaron sistemas de desinfección que han sido probados anteriormente para aguas residuales tratadas. En la Tabla 9 se recopiló información de las principales empresas de tratamiento de agua residual y sus sistemas de desinfección UV.

Variables a considerar, para la cotización de equipos de desinfección UV de agua residual municipal son:

- Empresa: Empresas con experiencia y trayectoria probada, en la desinfección de aguas residuales municipales tratadas con radiación ultravioleta, que ofrece a la venta equipos de desinfección UV.
- a) Equipo UV / b) Aplicación típica / c) Duración de la lámpara UV en horas: Nombre y Modelo del equipo de desinfección UV que cumple las características establecidas en la Tabla 7; su aplicación típica, es decir su capacidad de caudal a tratar, así como la duración de las lámparas UV en horas de uso.
- Caudal tratado en lps (litros por segundo): Capacidad de tratamiento de agua residual tratada del equipo de desinfección UV cotizado, en litros por segundo.
- d) Costo estimado de inversión sistema propuesto / e) Costo reemplazo lámpara UV: Costo estimado de Inversión en el sistema de desinfección UV y el Costo de mantenimiento al reemplazar las lámparas UV del equipo.
- f) Descripción del sistema / g) Garantía: Descripción del equipo de desinfección UV de aguas residuales municipales y el tiempo de garantía que otorga la empresa.

Tabla 9. Equipos de desinfección UV para agua residual tratada.

<i>Empresa</i>	<i>a)Equipo UV / b)Aplicación típica / c)Duración de la lámpara UV en horas</i>	<i>Caudal tratado en lps (litros por segundo)</i>	<i>d)Costo estimado de inversión sistema propuesto / e)Costo reemplazo lámpara UV</i>	<i>f)Descripción del sistema / g)Garantía</i>
TROJAN technologies (Trojan Technologies, 2023)	a) TrojanUV3000™PTP b) 473 m³/hr c) 12000 h	131.39 lps	d)10,000 USD e)20 USD costo unitario	f)El TrojanUV3000™PTP emplea luz ultravioleta, que no daña el medio ambiente y es la opción más segura para desinfectar aguas residuales. (Trojan Technologies, 2023). g)Garantizar la confianza en el agua para las personas, las industrias y los municipios, mejorando la vida de más de mil millones de personas en todo el mundo. (Danaher Corporation, 2023). <i>Garantía: 15 meses</i>
PURITEC EQUIPOS DE MÉXICO (Puritec de México Equipos, 2023)	a)Serie Classic PURIKOR Lámpara ultravioleta b) 6 GPM c)10000 h	0.378 lps	d)\$3,200 Pesos MXN e)27 USD costo unitario	f)El sistema de desinfección con luz ultravioleta marca PURIKOR, ofrece una solución altamente eficiente y económica para desinfectar el agua de bacterias, virus y microorganismos resistentes al cloro. Aplicaciones hogar, comercio, industria. g) <i>Garantía: 12 meses</i>
ecomagmx (Ecomaq México S.A. de C.V., 2023)	a)Serie Gold PURIKOR Lámpara ultravioleta b)12 GPM, c)10000 h	0.757 lps	d)\$6,348 Pesos MXN e)27 USD costo unitario	
TodoAgua	a)Serie	1.13 lps	d)\$10,914 Pesos	

(Todo Agua, 2023)	Platinum PURIKOR Lámpara ultravioleta b)18 GPM, c)10000 h		MXN <i>e)27 USD costo unitario</i>	
-------------------	---	--	---------------------------------------	--

4.3.2. Análisis.

Cabe destacar que en todos los sistemas de desinfección UV, se utilizan lámparas de mercurio de baja presión, con funda de cuarzo protectora que permite sumergir la lámpara en el agua a tratar y que emiten longitudes de onda UVC resonante a 254 nm. La diferenciación principal estriba en el caudal a tratar y en el tipo de agua a tratar. La eficiencia del sistema está directamente relacionado con la dosis de UV que reciban los patógenos y el tiempo de exposición de los microorganismos al UV. Los Sólidos Suspendidos Totales (SST) afectan directamente a la transmisividad de la luz UV, llamada UVT, la cual es una medida de la cantidad de UV que pasa a través de agua pura, la UVT varía en el tiempo debido a la carga de materia orgánica del agua. Debido a lo anteriormente expuesto, es importante verificar la cantidad de lámparas UV que se necesitarán para alcanzar el objetivo mínimo de de 20 l/s de la operación unitaria de desinfección de agua residual tratada.

Los elementos que se analizan en la Tabla 10, son aquellos que son clave para minimizar los costos de inversión, operación y mantenimiento, susceptibles de cumplir con el objetivo de desinfección de 20 lps. Dichos elementos son:

- a) Sistema UV , b) Duración de la lámpara UV en horas: Nombre y modelo del equipo de desinfección UV y la vida útil de la lámpara UV en horas de uso.
- Cantidad de dispositivos para desinfectar 20 l/s: De acuerdo a las especificaciones del equipo se calcula la cantidad de lámparas a utilizar, es decir se dividen los 20 lps entre la capacidad de cada lámpara y / o equipo.
- Costo Total Sistema UV: Cotizaciones solicitadas a empresas con experiencia y trayectoria probada, en la desinfección de aguas residuales municipales tratadas con radiación ultravioleta, el costo es en moneda nacional.
- Análisis: Análisis de las características del equipo de desinfección UV.

Tabla 10. Análisis de Cotización de Equipos de desinfección UV para agua residual tratada.

a) Sistema UV / b) Duración de la lámpara UV en horas	Cantidad de dispositivos para desinfectar 20 lps	Costo Total Sistema UV	Análisis
a) Serie Platinum PURIKOR Lámpara ultravioleta 18 GPM b) 10,000 h	18 lámparas Caudal por lámpara 1.13 lps	\$194,400.00 MXN	<i>Costo lámpara: \$10,800 MXN cada una.</i> Garantía 12 meses; 10000 horas de uso El sistema debe ser construido desde cero, ya que solo se adquieren las lámparas UV con entrada y salida de agua de ½ pulgada. El agua debe tener una UVT alta, es decir sin SST y mínima turbidez. Se tendría que dividir el flujo de 20 lps entre las 18 lámparas. Aplicaciones en hogar, comercio e industria. Por cotizar por separado instalaciones hidráulicas y sistema de refrigeración .
a) TrojanUV3000 TMPTP, 473 m ³ /hr b) 12000 h	1 sistema con 3 lámparas Caudal para 3 lámparas 131.39 lps	\$200,000.00 MXN	<i>Costo de lámparas \$1,200 pesos MXN cada una.</i> Garantía 15 meses ; 12000 horas de uso El sistema es una planta de tratamiento integral, está diseñado para que se pueda instalar en líneas de tuberías hidráulicas, rápida y económicamente, usando canales prefabricados de acero inoxidable. El agua puede tener una UVT media, con turbidez baja. El flujo se puede aumentar de 20 lps hasta 131.39 lps. Diseñado para aplicación de desinfección de aguas residuales municipales. Se recomienda contar con una lámpara de repuesto para atender inmediatamente cualquier falla de las mismas, el costo estimado por lámpara es de \$1200.00 pesos mx

4.4. Dimensionamiento y cotización de las instalaciones hidráulicas de la PTAR Villa Sur a la Universidad Panamericana campus Aguascalientes sur.

4.4.1. Metodología

Se entrevistó a personal de CCAPAMA del área de Trámites y Permisos, para investigar cómo es que ellos resuelven el paso de tubería bajo las vías del tren (Figura 2) y el tipo de instalación hidráulica que se recomienda. Se determinó que la obra civil e hidráulica consta de los siguientes procesos y trámites:

Tabla 11. Cotización de Obra Civil, Obra Hidráulica y Trámites de Laboratorio UV

Proceso, Trámite	Descripción	Costo estimado Pesos MXN	Observaciones
Levantamiento topográfico	Coordenadas UTM Datum ITRF08 época 2010 y se ligó a la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) de INEGI como lo establece la Norma Técnica del Sistema Geodésico Nacional publicada en el Diario Oficial de la Federación de fecha 23 de diciembre de 2010. El equipo utilizado fué un GPS de dos bandas marca Sokkia modelo GRX-2. Delimitación de zona federal, conforme información proporcionada por el solicitante, en base al plano con fecha noviembre 2003.	\$0.00	La Universidad Panamericana campus Aguascalientes sur, ya cuenta con un estudio topográfico realizado en marzo del 2020.
Permiso para cruce de vía federal. Permiso para ocupación de obra hidráulica en zona federal.	“Permiso para construir accesos, cruzamientos, instalaciones marginales, anuncios y señales publicitarias, construcción y operación de puentes sobre vías férreas, y construcción, conservación y mantenimiento de vías férreas por parte de las empresas cuando éstas se ofrezcan para su explotación y operación a terceros que tengan concesión para el servicio público de transporte ferroviario, en el derecho de vía ferroviario.”	Depende de la obra solicitada. (este trámite contempla la autorización de diversas obras, el costo se calcula al ingresar la solicitud).	Derechos para cruce federal de FERROMEX en el Catálogo Nacional de Trámites, servicios, inspecciones y regulaciones de todo México . Trámite SCT-04-015-A . Se recomienda solicitar apoyo a CCAPAMA, ya que parte de la instalación le pertenece.
Laboratorio UV: Cuarto de máquinas.	Construcción de 25 m ² donde se instalará: <ul style="list-style-type: none"> - Sistema UV para desinfección del agua tratada - Microturbina para la generación de energía eléctrica. (en caso de que se determine su viabilidad) - Banco de baterías de almacenamiento de energía eléctrica. (en caso de que se determine su viabilidad) - Entrada de agua residual tratada. - Salida de agua residual tratada con UV. El precio cotizado por metro cuadrado construido es de \$10,000 pesos MXN..	\$250,000.00	El Laboratorio UV se instalará a un costado de las instalaciones del pozo, para facilitar la conexión de la salida del agua residual tratada con UV al Sistema de riego de la Universidad.

Proceso, Trámite	Descripción	Costo estimado Pesos MXN	Observaciones
Instalación hidráulica.	Se contempla que la instalación hidráulica se divida en 3 etapas: <ul style="list-style-type: none"> - Cruce de PTAR Villa Sur - Vía Ferromex- Universidad Panamericana: 50 metros de tubería Cédula 40, Fierro 8", interior Tubería Clase 10 PVC 6". - PTAR Villa Sur - Laboratorio UV (cuarto de máquinas): 800 metros Tubería Clase 10 PVC 6" - Laboratorio UV (cuarto de máquinas) - Sistema de riego Universidad Panamericana: 400 metros Tubería Clase 10 PVC 6" 	\$643,000.00	Las medidas y costos de la instalación hidráulica son aproximados, ya que aún se debe definir cómo se conectará con el sistema de riego.

4.4.2. Análisis

Dentro del proyecto de obra civil hidráulica, es indispensable contar con los permisos para cruce de vía federal de FERROMEX, el costo no puede conocerse hasta que se solicite el permiso y se entreguen los documentos correspondientes al Trámite [SCT-04-015-A](#). En la entrevista realizada al personal de CCAPAMA, se recomendó que en la Memoria de Cálculo, el Plano General, los Estudios topográfico e hidráulicos contengan la mayor cantidad de información técnica posible, para que los peritos que revisen la solicitud no detecten la necesidad de contratar a terceros para establecer la viabilidad del proyecto, lo cuál se verá reflejado directamente en el costo del trámite solicitado a la Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Debido a que la distancia aproximada entre la PTAR Villa Sur y el predio de la Universidad son 77 metros, se recomienda que los costos de dicha tubería y el trámite para cruzar la vía de FERROMEX sean compartidos entre ambas instituciones, CCAPAMA y la Universidad. Una vez dentro del campus, la Universidad podrá desarrollar las siguientes etapas de la tubería.

En cuanto a la obra civil del Laboratorio UV (cuarto de máquinas) el costo ha sido estimado en el precio actual del metro cuadrado construido para una vivienda media, con terminados residenciales de \$10,000 pesos. (cronoshare, 2023)

Es importante señalar que los elementos que se usarán en la desinfección del agua residual tratada son modulares TrojanUV3000TMP (véase Tabla 10), es decir, una vez seleccionado el equipo, solo se necesita la tubería de entrada de agua residual a tratar con UV, la tubería de salida de agua residual tratada con UV y las instalaciones eléctricas para conectarlo a la energía. Se

recomienda aprovechar el cuarto de máquinas como Laboratorio UV para los alumnos, por lo que las medidas finales del mismo dependerá de lo que las autoridades de la Universidad establezcan para aprovechar el espacio.

4.5. Dimensionamiento de las turbinas generadoras de electricidad, así como su posición en el sistema hidráulico.

4.5.1. Metodología.

Las turbinas hidráulicas son dispositivos electromecánicos capaces de transformar la energía cinética del flujo o caudal Q de agua (m^3/s), en energía mecánica (eje del generador) y esta última en energía eléctrica (generador). El dimensionamiento de las turbinas depende directamente del caudal Q (m^3/s) y de la altura, cabeza de agua o también llamado salto neto H (m), que está por encima del sistema. Se propone que el sistema sea off grid (fuera de la red eléctrica de CFE) por lo que todos los cálculos se realizan en base a esta hipótesis. En el sistema UV propuesto se necesitan 87.5 W de potencia de entrada por cada una de las 3 lámparas conectadas al sistema, dando un total de 262.5 W. Se ha estimado que la cantidad de horas que el sistema estará funcionando corresponderá directamente a la cantidad de horas de riego diario promedio en la Universidad Panamericana, 6 horas diarias, 6 días a la semana, 52 semanas al año dando un total de 1,872 horas, por lo que el consumo energético anual esperada será de 491,400 Wh.

Para obtener la *potencia media* de una central generadora de energía eléctrica se calcula la razón de la generación media anual entre el número de horas al año, que para términos prácticos se consideran 8,760 h/año (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014, pp. 2-5).

<i>Fórmula 1. Potencia media de una central generadora de energía eléctrica.</i>	
$P_{media} = \frac{G_{media}}{No\ h / año} = \frac{Generación\ media\ anual}{Número\ de\ horas\ del\ año}$	$Potencia\ media = (491,400\ Wh) / (8,760\ h/año)$ $= 56.095\ W$

En hidráulica la potencia media se puede expresar en función de las características hidroenergéticas del aprovechamiento, de acuerdo a la siguiente expresión: (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014, 2)

Fórmula 2 Potencia media en función de las características hidroenergéticas.	
$P_{media} = \eta \gamma Q_m H_n (9.81/1000) \text{ en kW}$ Potencia media (kW) con base en el factor de conversión (9.81/1000) de kilogramos fuerza en m/s	$Potencia media = 1 \times 1000 \times 0.02 \times 6 \times (9.81/1000)$ $= 1.1772 \text{ kW}$
γ peso volumétrico del agua, kgf /m ³	1000 kg/m ³
Q _m gasto medio turbinado, m ³ /s	20 l/s (litros por segundo) = 0.02 m ³ /s
H _n carga neta, altura del sistema, más frecuente en metros	6 m
η eficiencia total del conjunto turbogenerador, $\eta = \eta_t \times \eta_g$ en %.	100% (Se calcula con una eficiencia ideal, normalmente la eficiencia de las microturbinas es del 85%)

El primer valor de potencia media anual Fórmula 1 corresponde a las necesidad real calculada para el riego de la Universidad Panamericana y es de *56.095 W*, el segundo valor calculado *Fórmula 2* corresponde a las características hidroenergéticas correspondientes al sistema propuesto en el presente trabajo con un valor de 1.1772 kW.

El siguiente paso es la selección del tipo de turbina de acuerdo a las características hidroenergéticas del sistema, existen en el mercado tres tipos de turbinas: Francis, Pelton y Kaplan. Las hojas técnicas de las turbinas permiten seleccionar el tipo de turbina a utilizar. En el sistema propuesto, se utilizaron tres fuentes para corroborar los cálculos: WWS Wasserkraft productor de turbinas en Europa, el libro Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y el libro Microhidrogeneración de la Escuela de Ingeniería Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana. Las tres gráficas coinciden por lo que comparto la más sencilla de interpretar, la de WWS Wasserkraft.

4.5.2. Análisis.

De acuerdo a las características hidroenergéticas del sistema propuesto en este trabajo, se establece que las condiciones del terreno solo permiten 6 metros de carga neta más frecuente H,

y el flujo o caudal máximo Q que puede entregar la PTAR Villa Sur es de 20 litros por segundo lo que equivale a 0.02 metros cúbicos por segundo. Al revisar la gráfica en la Figura 11 se observa que el punto de intersección $(H,Q)=(6m,0.02 m^3/s)$ no tiene correspondencia con turbina hidráulica en el mercado.

Debido a que, no hay potencial suficiente para la hidrogenación eléctrica, no se instalará dentro del sistema propuesto, sin embargo se sugiere dejar espacio dentro del cuarto de máquinas para una posible innovación que permita más adelante obtener energía eléctrica de caudales pequeños.

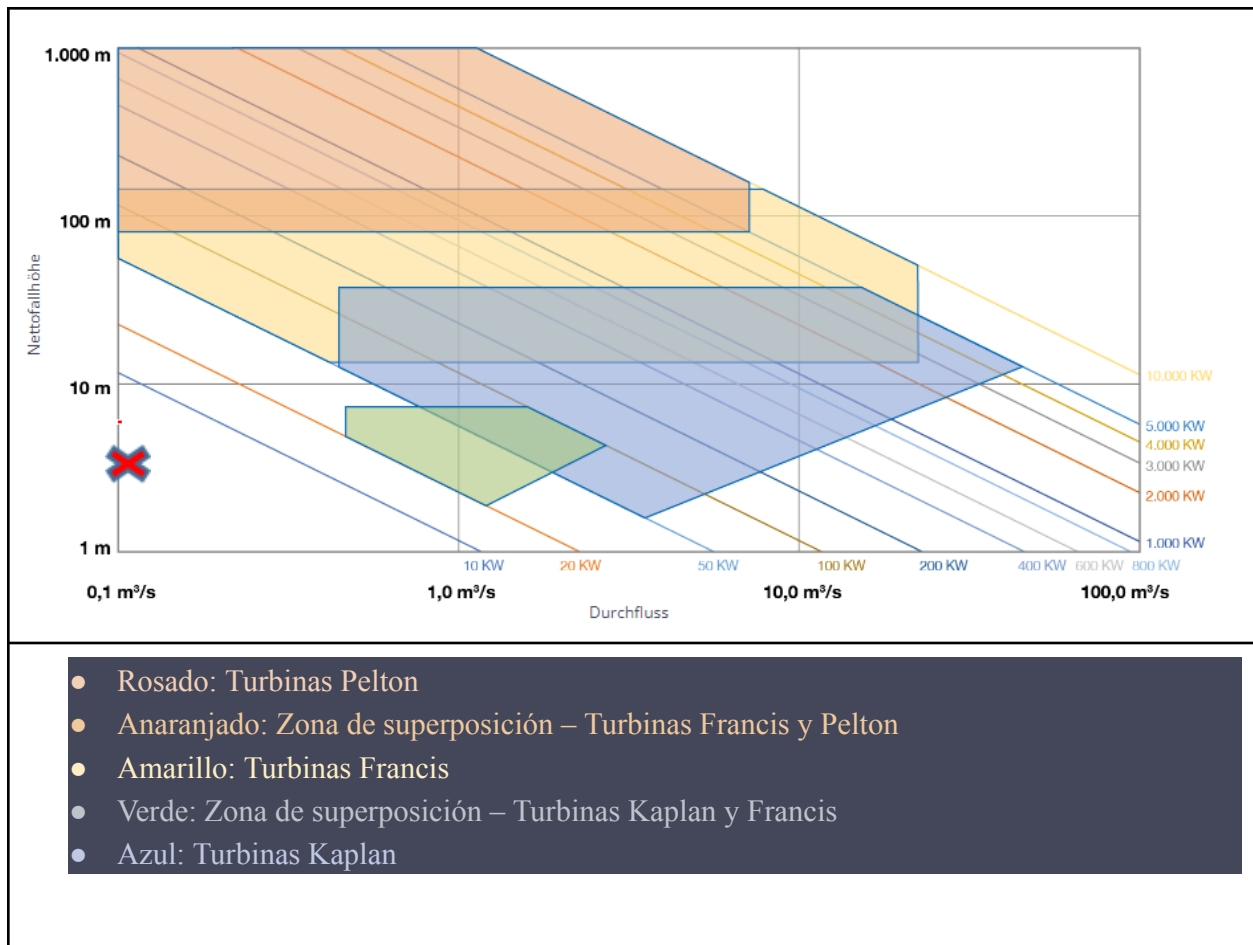


Figura 11. Rangos funcionales de diferentes turbinas hidráulicas. Fuente: (WWS-Wasserkraft, 2022).

4.6. Dimensionamiento y cotización de Almacenamiento de la Energía Eléctrica comparado con conexión a la CFE.

4.6.1. Metodología.

El sistema elegido TrojanUV3000TMMPT tiene un consumo de energía eléctrica de 262.5 W, se estima que se mantendrá en funcionamiento 1,872 horas anualmente, para un riego diario promedio de 6 horas, 6 días a la semana, 16 l/s, 52 semanas al año. El costo estimado de acuerdo a las tarifas de la CFE estipuladas en el Acuerdo Núm. A/064/2018 se debe calcular teniendo en cuenta que:

Consumo anual esperado	491.4 kWh
System Characteristics	TrojanUV3000 TM MPTP
Aplicaciones típicas	131.38 Lps
Potencia de entrada por lámpara	87.5 W
Cantidad de lámparas	3
Alimentación de entrada	120 V, monofásica
Horas de riego anual	1872 hrs
Demanda mensual baja tensión	40.95 KWh
Región Tarifaria	Bajío
Tarifa CFE	GDMTH ⁸

4.6.2. Análisis.

Debido a que no hay potencial suficiente para la hidrogenación eléctrica, no se instalará la hidroturbina ni el banco de baterías por lo que no se dimensionará el sistema eléctrico off grid. Además el sistema UV del sistema propuesto, necesita alimentación de entrada 120 V monofásica, por lo que no hay necesidad de dimensionar sistema eléctrico alguno, ya que los costos de construcción del cuarto de máquinas, ya incluyen la instalación eléctrica.

⁸ “La tarifa GDMTH o de Gran Demanda Media Tensión Horaria, es una de las 12 tarifas establecidas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y en su caso específico, utilizada para el sector industrial mexicano ya que es aplicada a servicios cuya demanda es igual o superior a los 100 kilowatt (kW).”

El costo anual de energía eléctrica estimado depende de la tarifa que tiene la Universidad Panamericana. Para obtener este dato se deberá tener acceso al recibo de pago de energía eléctrica de la institución. Las tarifas en el año 2023 por kWh para la Universidad son:

Base	\$ 0.8969 MXN
Intermedio	\$ 1.3806 MXN
Punta	\$ 1.4964 MXN

Usando como base la Tarifa GDMTH de la CFE, tomando el costo intermedio correspondiente a los horarios de riego, con un precio de \$1.3806 MXN por kWh se estima que el consumo anual esperado de 491.4 kWh tenga un **costo anual total de \$678.43 MXN**.

4.7. Dimensionamiento del Tanque de Almacenamiento de Agua Residual Tratada para riego comparado con el uso de pipas para transportar el agua residual.

4.7.1. Metodología.

La metodología utilizada para el dimensionamiento y cotización del tanque de almacenamiento de agua residual tratada con UV, fué aplicar los conceptos de la gestión del flujo de materiales (Material Flow Management) al sistema de gestión de agua potable en la Universidad Panamericana (2020), el primer paso es establecer el Status Quo de todo el sistema hidráulico, obteniendo un inventario de elementos tecnológicos (Figura 12): bombas y modelos, tuberías, tanques de almacenamiento, logística del servicio, caudales, horas de riego y procesos de extracción del agua del pozo para llenar las cisternas, su ubicación y capacidad. De acuerdo a la investigación realizada en 2020, la Universidad cuenta con 143.5 m³ de capacidad de almacenamiento de agua potable en cisternas bajo tierra, estas se encuentran diseminadas en los principales edificios del campus universitario.



Figura 12. Status Quo 2020: Inventario de cisternas Universidad Panamericana.

Se establece la necesidad de contar con un área de almacenamiento de agua residual tratada con UV, con capacidad de almacenamiento del consumo diario para riego.

Riego diario promedio	6 horas
Velocidad o caudal riego	16 Lps
Tiempo diario	21,600 segundos
Gasto diario agua riego	345,600 litros
Tamaño de Cisterna Diaria	345.6 m ³

Se cotiza el costo de almacenamiento en diferentes tipos de cisternas:

Tabla 12. Cotización de Cisterna para almacenamiento diario de agua residual tratada con UV

<i>Tipo de Cisterna</i>	<i>Descripción</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Costo estimado</i>
10 Depósitos flexibles para agua potable ,	Depósito de Agua Flexible POTABLE EXOM DW1300 35,000 Litros	Garantía de 5 años 100% contra cualquier defecto del	Precio unitario 1.735,65 € 1 Euro=\$ 18.7194 MXN

<i>Tipo de Cisterna</i>	<i>Descripción</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Costo estimado</i>
interconectados. (Grupo APB Depositos Flexibles, 2023)	MEDIDAS : 6.27m X 5.92m X 1.40m Realizadas en un tejido técnico EXOM-DW 100% poliéster con recubrimiento doble capa PVC 1300 g/m ² . Resistencia térmica: - 30 °C a + 70 °	tejido y soldaduras. Tiempo de entrega:20 días Envío a: Unión Europea	Precio 10 Depósitos \$ 324, 903.30 MXN
Obra civil: <i>Base para 10 Depósitos flexibles para agua potable.</i>	“El montaje de nuestros depósitos flexibles requiere de una superficie perfectamente plana y horizontal, verificada con un nivel y un suelo limpio (sin elementos punzantes) y estable en las dimensiones en vacío de la cisterna +0.5 m. La plataforma debe soportar el peso de la cisterna llena sin desplomarse ni erosionarse. Se puede instalar una alfombra de protección para aislar la cisterna del suelo. Le recomendamos dejar siempre el depósito con algunos centímetros de agua, desde el montaje. Las cisternas pueden utilizarse en una ubicación definitiva o provisional.”	Se necesita una superficie de 427.86 m ² para instalar los 10 depósitos flexibles de 35,000 litros cada uno, interconectados. La obra Civil de la base incluye: - Despalme - Excavación - Compactación de fondo - Plantilla de concreto - Acero estructural - Cimbra aparente - Concreto f'c=250 kg/cm ² - Acarreo	\$ 434,214.18 MXN
Cisterna bajo tierra para agua residual tratada con UV.	Cisterna de concreto, bajo tierra para almacenar el agua residual tratada con UV. Medidas: 20m x 15m x 1.80 m Capacidad: 540 m ³	Gasto diario agua riego: 345.6 m ³ . La Cisterna se sobredimensiona debido a que se espera que la demanda de agua para riego crezca al desarrollarse el Plan Maestro de Construcción de la Universidad.	\$ 476,920.98 MXN

<i>Tipo de Cisterna</i>	<i>Descripción</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Costo estimado</i>
1 Deposito Flexible para agua no potable. (Grupo APB Depositos Flexibles, 2023)	<p>DEPOSITO FLEXIBLE CISTERNA AGUA NO POTABLE Modelo XE900 Densidad Gr/M2 350.000 Litros</p> <p>MEDIDAS : 19.93 x 13.32 X 1.60</p> <p>Realizadas en un tejido técnico EXOM-DW 100% poliéster con recubrimiento doble capa PVC 1300 g/m².</p> <p>Resistencia térmica: - 30 °C a + 70 °</p>	10 años de garantía.	<p>9.558,69 € 1 Euro=18.7194 \$ 178,932.94 MXN</p>
Obra civil: <i>Base para 1 Depósitos flexibles para agua residual tratada con UV.</i>	<p>“El montaje de nuestros depósitos flexibles requiere de una superficie perfectamente plana y horizontal, verificada con un nivel y un suelo limpio (sin elementos punzantes) y estable en las dimensiones en vacío de la cisterna +0.5 m. La plataforma debe soportar el peso de la cisterna llena sin desplomarse ni erosionarse. Se puede instalar una alfombra de protección para aislar la cisterna del suelo. Le recomendamos dejar siempre el depósito con algunos centímetros de agua, desde el montaje. Las cisternas pueden utilizarse en una ubicación definitiva o provisional.”</p>	<p>Se necesita una superficie de 315 m² para instalar el depósito flexible de 350,000 litros cada uno, interconectados. La obra Civil de la base incluye: - Despalme - Excavación - Compactación de fondo - Plantilla de concreto - Acero estructural - Cimbra aparente - Concreto f'c=250 - Acarreo</p>	\$ 312,611.74 MXN

4.7.1. Análisis.

El Sistema propuesto necesita tener la capacidad de almacenar el agua residual tratada con UV en una cisterna exclusiva, con la finalidad de no contaminar y mantener las cisternas de agua potable para ese fin. Se estima que el gasto diario de agua para riego es de 345,600 litros por lo que la Universidad debe tener la capacidad de almacenar una cisterna diaria de 345.6 m³.

En la Tabla 13 se comparan los costos de diferentes tipos de depósitos de almacenamiento de agua residual tratada con UV: externas de material flexible y bajo tierra de concreto. Los

depósitos flexibles, aún cuando son una alternativa aparentemente más económica que una cisterna convencional bajo tierra, estos necesitan una superficie plana, que soporte el peso y que evite la perforación del depósito, para este fin se recomienda poner una base de concreto, cuyo costo debe añadirse al del depósito flexible, además al estar al aire libre ocupa un espacio que no podrá ser utilizado para ningún otro fin.

La empresa Japan Automatic Transmission Company Co. Ltd. (JATCO) ofrece su agua residual tratada sin costo alguno, solo debe transportarse de su planta a la Universidad Panamericana campus Aguascalientes, un trayecto redondo de aproximadamente 6 km. Debido a que, el simple hecho de mover el agua residual tratada con pipas de agua que utilizan combustibles fósiles, no es sustentable, esta posibilidad se descarta, aún así se realizará la comparación del costo del transporte para utilizarlo como justificación del presente proyecto.

Tabla 13. Análisis de costos cisterna para almacenamiento diario de agua residual tratada con UV.

<i>Propuesta de cisterna.</i>	<i>Costos</i>	<i>Análisis de costos</i>
<ul style="list-style-type: none"> 10 Depósitos flexibles para agua potable, interconectados. (Medidas 6.27 X 5.92 X 0.40 cada una , Capacidad 350 m³) <p>Obra civil: <i>Base para 10 Depósitos flexibles para agua potable.</i></p>	<p>\$ 324, 903.30 MXN</p> <p>\$ 434,214.18 MXN</p>	<p>Costo total: \$ 759,117.48 MXN</p> <p>Costo por m³ de almacenamiento: \$2,168.90 MXN</p> <p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Económicamente es la inversión más cara - Ocupa un área mayor de terreno
<ul style="list-style-type: none"> Cisterna de concreto bajo tierra para agua residual tratada con UV. (Medidas: 20m x 15m x 1.80 m, Capacidad: 540 m³) 	<p>\$ 476,920.98 MXN</p>	<p>Costo total: \$ 476,920.98 MXN</p> <p>Costo por m³ de almacenamiento: \$ 883.19 MXN</p> <p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Económicamente es la menor inversión. - Ocupa un área de

<i>Propuesta de cisterna.</i>	<i>Costos</i>	<i>Análisis de costos</i>
		terreno que puede ser utilizada en la parte superior para otros fines.
<ul style="list-style-type: none"> Deposito Flexible para agua no potable. (Medidas: 19.93 x 13.32 X 1.60, Capacidad: 350 m³) <p>Obra civil: <i>Base para 1 Depósitos flexibles para agua residual tratada con UV.</i></p>	<p>\$ 178,932.94 MXN</p> <p>\$ 312,611.74 MXN</p>	<p>Costo total: \$ 491,544.68 MXN</p> <p>Costo por m³ de almacenamiento: \$1,404.41 MXN</p> <p>Desventajas: - Expuesto a la intemperie</p>
<ul style="list-style-type: none"> 35 Servicios de transporte de agua residual de JATCO a la Panamericana 6 kms 	<p>\$ 500.00 MXN costo unitario</p>	<p>Costo diario: \$ 17,500 MXN</p> <p>Costo anual: \$ 5,460,000 MXN</p>

4.8. Dimensionamiento de la bomba para transportar el agua residual tratada de la PTAR VillaSur al cuarto de máquinas en la Universidad Panamericana.

4.8.1. Metodología.

La metodología que se aplica para resolver la problemática planteada, es un conjunto de herramientas metodológicas que unidas conforman una solución de ingeniería en economía circular, todas y cada una de ellas son importantes ya que se alinean a los objetivos que la misma plantea como ejes de la estrategia de desarrollo económico sostenible.

Sabemos que la capacidad instalada de la PTAR Villa Sur es de 20 l/s (litros por segundo), y que el caudal que actualmente entrega es de 16 lps. Tomando como base el caudal actual se realizan los cálculos para establecer si la fuerza de la gravedad es suficiente para mantener el agua residual tratada fluyendo o si por el contrario, habrá necesidad de instalar una bomba de succión que lleve el líquido al sistema de desinfección UV. En la Tabla 14 se enumeran los datos

variables que permiten establecer la necesidad y viabilidad de instalar una bomba hidráulica en el sistema.

Tabla 14. Datos del sistema de Transporte de agua residual tratada de la PTAR Villa Sur a la Universidad Panamericana campus sur.

<i>Datos</i>	<i>Valor</i>	<i>Descripción</i>
Cota inicial (ci) PTAR Villa Sur	1,885 msnm	Salida de agua residual tratada de la PTAR Villa Sur en metros sobre el nivel del mar (21°49'14"N, 102°16'35"W)
Cota final (cf) Cuarto de máquinas UV	1,879 msnm	Entrada de agua residual tratada en Cuarto de máquinas Universidad Panamericana en metros sobre el nivel del mar (21°49'18"N, 102°16'54"W)
Caudal (Q)	16 l/s \approx 0.016 m ³ /s	Caudal de agua residual tratada entregada por la PTAR Villa Sur
Longitud de la conducción (lc)	528 m	Longitud de tubería PVC en línea recta de la cota inicial a la cota final.
Material de la tubería	PVC 6"	Tubería de PVC de 6 " (15.24 cm) de diámetro

Con los datos se calculará la pendiente y la velocidad del agua a un caudal de 16 lps, tomando en cuenta la gravedad 9.81m/s².

Fórmula 3 Cálculo de la Velocidad del agua residual tratada.		
Fórmula	Cálculo	Descripción
Pendiente $\alpha = \text{asen}(co/h)$	$\alpha = \text{asen}((ci-cf)/lc) =$ $\alpha = \text{asen}((6)/528)=0.65^\circ$	La pendiente de la tubería es de 0.65°
Velocidad= Caudal/Área $v = Q/A$	$v = Q/A$ $v = (0.016m^3/s) / (\pi \times (7.62m)^2)$ $v = 0.877 m/s$	La velocidad del agua residual tratada en la tubería de Clase 10 PVC 6" se calcula será de 0.877 m/s

4.8.2. Análisis.

El objetivo del presente análisis es determinar si existe la necesidad de una bomba que transporte el agua residual tratada de la PTAR Villa Sur al cuarto de máquinas en la Universidad Panamericana.

Se comparan los resultados obtenidos con los parámetros de velocidad máxima y mínima en tuberías de agua residual tratada, establecidos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), con la finalidad de establecer si la fuerza de la gravedad es suficiente para mantener el flujo de 16 lps en el sistema, sin necesidad de utilizar bombeo en el proceso.

De acuerdo al Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado, se debe verificar la velocidad⁹ del agua dentro de la tubería,

“las velocidades permisibles del líquido en un conducto están gobernadas por las características del material del conducto y la magnitud de los fenómenos transitorios” (D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales et al., 2016, 19).

La velocidad mínima de escurrimiento para tubería Clase 10 PVC 6” es de 0.30 m/s y la máxima permisible 5 m/s.

La velocidad del agua residual tratada en la tubería de Clase 10 PVC 6” es de 0.877 m/s, por lo que se determina que está dentro de los parámetros, por lo que **no hay necesidad de utilizar bomba** para transportarla de la PTAR Villa Sur al cuarto de máquinas en la Universidad Panamericana. Al solo necesitar de la fuerza de la gravedad para transportar el agua de un punto a otro se puede decir que es un sistema de transporte de agua residual tratada con Cero emisiones de Carbono (**ZE**)

⁹ “Existen límites tanto inferiores como superiores. La velocidad mínima de escurrimiento se fija, para evitar la precipitación de partículas de arrastre en el agua. La velocidad máxima será aquella con la cual no deberá ocasionarse erosión en las paredes de las tuberías.” (D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales et al., 2016, 19)

4.9. Diseño hidráulico del sistema de riego con Agua Residual Tratada.

4.9.1. Metodología.

El diseño hidráulico del sistema de riego con agua residual tratada es un nicho de investigación, ya que habrá que dimensionar y resolver el sistema completo: Bombeo, almacenamiento, configuración de tuberías y válvulas, entre otros.

4.9.2. Análisis.

Al ser este diseño un Nicho de Investigación, se recomienda que la Universidad Panamericana establezca el tipo de riego que aplicará, ya sea por manguera, aspersores, goteo o una combinación de varias metodologías.

4.10. Determinación de emisiones de Carbono del SISTEMA DE INGENIERÍA EN ECONOMÍA CIRCULAR.

4.10.1. Metodología.

El día 28 de febrero de 2023 La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, dió a conocer que, la Comisión Reguladora de Energía (CRE) determinó el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional, para el cálculo de las emisiones indirectas de GHG gases de efecto invernadero por consumo de electricidad, el cual es de 0.435 tCO_{2e} / MWh (0.435 toneladas de emisiones de Dióxido de Carbono por Megawatt hora).

Se ha determinado que el consumo eléctrico del sistema propuesto, está directamente relacionado con la cantidad de horas de riego promedio de 6 horas diarias, 6 días a la semana, con una velocidad promedio de 16 lps, dando un total de 1872 horas anuales, con un consumo anual de energía eléctrica de 491.4 kWh.

4.10.2. Análisis.

El valor anual esperado de emisiones del sistema propuesto, sólo es el que corresponde al equipo de desinfección UV TrojanUV3000TMPTP, ya que no se utilizará bomba para transportar el agua, esta se moverá por gravedad.

Consumo anual esperado	491.4 kWh	=	0.4914 MWh
Factor de emisión del sistema eléctrico	0.435		tCO ₂ e / MWh
Total de emisiones anuales del sistema UV	0.213759		tCO ₂ e/a
Total de emisiones promedio anuales del sistema actual.	19.6044		tCO ₂ e/a
Consumo anual de energía por m ³ de agua tratada con UV	11.42 Wh/m ³	=	1.142E-05 MWh/m ³

Como dato histórico comparativo Aguascalientes, en el 2013, el consumo de energía fue de 20,202,743 kWh, requiriendo 0.27 kWh por cada metro cúbico.

4.11. Determinación del Análisis Económico del Proyecto SISTEMA DE INGENIERÍA EN ECONOMÍA CIRCULAR.

4.11.1. Metodología.

Se utilizará la metodología propuesta por el Mtro. Juan Manuel Arriaga Rivera en su Tesis “Guía de Estudio para la Especialización en Proyectos de Inversión de la carrera de Licenciado en Administración Financiera” de la *Universidad Autónoma de Aguascalientes* (Arriaga Rivera, 2006). Tal como el Mtro. Arriaga recomienda, también se utilizará como referencia la GUÍA GENERAL PARA LA PRESENTACIÓN DE EVALUACIONES COSTO Y BENEFICIO DE PROGRAMAS Y PROYECTOS DE INVERSIÓN, 2018 del *Centro de Estudios para la Preparación y Evaluación Socioeconómica de Proyectos* (CEPEP) de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público del Gobierno de México (Morin Maya & Centro de Estudios para la Preparación y Evaluación Socioeconómica de Proyectos (CEPEP), 2018, 29).

Así mismo se aplicarán las metodologías propuestas por el Dr. Michael Knaus, University of Applied Sciences Trier (Germany), *Institute for Applied Material Flow Management* (IfaS) del programa IMAT International Flow Management (2020).

Antes de establecer las variables financieras, se debe calcular el tiempo esperado de vida útil del sistema propuesto. De acuerdo a TROJAN UV, el equipo TrojanUV3000TMPPTP tiene un tiempo esperado de vida útil de 20 años, con sus respectivos mantenimientos preventivos mensuales y, 3 ciclos de repuesto de partes (lámparas, balastras y fundas de cuarzo). Se ha estimado que la cantidad de horas que el sistema estará funcionando corresponderá directamente a la cantidad de horas de riego diario promedio en la Universidad Panamericana, 6 horas diarias, 6 días a la semana, 52 semanas al año dando un total de 1,872 horas anuales. Se sabe que el tiempo estimado de vida útil de cada lámpara es de 12,000 horas, divididas entre las 1,872 horas anuales, se obtiene la duración estimada o tiempo de reemplazo de repuestos (lámpara, balastra, funda de

cuarzo), 6.41 años. Debido a que el tiempo esperado de vida útil del equipo TrojanUV3000TMPTP es de 20 años, se divide esta cantidad entre el tiempo estimado de reemplazo de repuestos, dando como resultado 3 ciclos de reemplazo de partes UV. Ya habiendo determinado los tiempos de vida útil del sistema, se pueden realizar los cálculos financieros. Las variables financieras que se utilizarán para realizar la evaluación económica del proyecto de inversión son las que se detallan en la Tabla 15.

Tabla 15. Cálculo de las variables financieras para realizar la evaluación económica del proyecto.

Variable	Definición	Items	Valor estimado
CAPEX UV	Capital expenditure, Gastos en capital. Inversión en capital fijo para adquirir y mantener el sistema propuesto.	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema UV (3 lamp) - Instalación hidráulica - Permiso FERROMEX - Obra civil Laboratorio UV - Cisterna - 1 Lámpara UV (repuesto) (TrojanUV 302417-004, UV Lamp) - 1 Balastra UV (repuesto) (TrojanUV 302403, Lamp Driver (Ballast)) - Funda UV cuarzo (paquete con 4) (TrojanUV 302108-004, Quartz Sleeve) <p>TOTAL CAPEX UV</p>	<ul style="list-style-type: none"> \$ 200,000 MXN \$ 643,000 MXN \$ 60,000 MXN \$ 250,000 MXN \$ 476,920 MXN \$ 2,746 MXN \$ 42,315 MXN \$ 20,700 MXN \$1,696,681 MXN
OPEX UV	Operating Expenses, Gastos operativos. Costos operativos en un tiempo determinado	<ul style="list-style-type: none"> - Capacitación - Energía Eléctrica - Mantenimiento preventivo - Agua Tratada - Estudios laboratorio calidad agua - Partes y refacciones prorrateadas a 6 años: 3 Lámparas UV (repuesto) (TrojanUV 302417-004, UV Lamp) - 1 Balastra UV (repuesto) (TrojanUV 302403, Lamp Driver (Ballast)) - Funda UV cuarzo (paquete con 4) (TrojanUV 302108-004, Quartz Sleeve) <p>OPEX UV por año OPEX UV 20 años</p>	<ul style="list-style-type: none"> \$ 20,000 MXN \$ 679 MXN \$ 24,000 MXN \$ 344,332 MXN \$ 36,000 MXN \$ 1,373 MXN \$ 21,657 MXN \$ 3,450 MXN \$ 439,491 MXN \$8,789,830 MXN

Variable	Definición	Items	Valor estimado
TOTEX UV	Total Expenditure: "El enfoque TOTEX (Gasto de capital + Gasto operativo) analiza el costo total de los gastos, durante la vida operativa a largo plazo de la planta."	TOTEX UV = Cost of Investment TOTEX UV 20 años TOTEX UV= CAPEX UV + OPEX UV TOTEX UV 20 años = CAPEX UV + OPEX UV 20 años	\$ 2,136,172.5 MXN \$10,486,511 MXN
LCOW UV	Levelized Cost of Water: "costo por unidad de volumen de agua producida por un proceso o servicio de tratamiento de agua"	TOTAL CAPEX UV TOTAL OPEX UV 20 años Producción anual agua residual tratada UV Producción total agua residual tratada UV 20 años Levelized Cost of Water LCOW UV 20 años LCOW=(CAPEX UV + OPEX UV) / Producción total m ³ /20 años LCOW=TOTEX UV / Producción total m ³ /20 años	\$1,696,681 MXN \$8,789,830 MXN 43,078 m ³ /año 861,560 m ³ /20 años \$ 12.17 MXN / m³ de agua
VPN	Valor Presente Neto: $VPN = -I_0 + \sum \frac{B_n - C_n}{(1 + d)^n}$ I ₀ = Inversión B = Beneficios directos C = Costos directos d = Tasa de descuento o costo de oportunidad de la inversión.	Horizonte de evaluación 20 años = n TOTAL CAPEX UV = I₀ TOTAL OPEX UV 20 años Costo anual extracción de agua potable 43,078 m ³ /año Costo total extracción de agua potable 861,560 m ³ /20 años Costo anual agua residual tratada con UV	 \$1,696,681 MXN \$8,789,830 MXN \$1,144,058.18 MXN \$22,881,163.7 MXN \$439,491 MXN

Variable	Definición	Items	Valor estimado
	$d = i / (1 + i)$ $i =$ tasa de interés $n =$ Número de años del horizonte de evaluación (Arriaga Rivera, 2006)	$43,078 \text{ m}^3/\text{año} = \text{OPEX UV} = \mathbf{C}$ Costo total agua residual tratada con UV $861,560 \text{ m}^3/20 \text{ años} = \text{OPEX UV } 20 \text{ años}$ Ahorro anual utilizando agua residual tratada con UV en lugar de agua potable extraída de pozo $43,078 \text{ m}^3/\text{año} =$ Costo anual extracción de agua potable - Costo anual agua residual tratada con UV = B Ahorro 20 años utilizando agua residual tratada con UV en lugar de agua potable extraída de pozo $861,560 \text{ m}^3/20 \text{ años} =$ Costo total extracción de agua potable - Costo total agua residual tratada con UV $i = 11.25 \% \text{ (Banxico)}$ $d = 0.1011 \%$ VPN	$\$8,789,830 \text{ MXN}$ \$ 704,566.7 MXN \$14,091,333.7 MXN \$ 542,835.85 MXN
TIR	Tasa Interna de Retorno TIR “ tasa de descuento que hace que el VPN sea igual a cero, para un proyecto de inversión dado.”	TOTEX UV = Cost of Investment Ahorro anual = Average Annual Cash Flow Horizonte de evaluación 20 años = n	$\$2,136,172.5 \text{ MXN}$ $\$ 704,566.7 \text{ MXN}$ TIR = 33 %
(B/C)	Relación beneficio-costo (B/C)	B = Ahorro 20 años utilizando agua residual tratada con UV en lugar de agua potable extraída de pozo $861,560 \text{ m}^3/20 \text{ años} =$ Costo total extracción de agua potable - Costo total agua residual tratada con UV C = TOTAL OPEX UV 20 años	$\$14,091,333.7 \text{ MXN}$ $\$8 789,830 \text{ MXN}$ (B/C) = 1.6

Variable	Definición	Items	Valor estimado
Pay Back Period	Periodo de Retorno de Inversión PRI= PBP	TOTEX UV = Cost of Investment Ahorro anual = Average Annual Cash Flow	\$2 136,172.5 MXN \$ 704,566.7 MXN
PBP	“Cantidad de tiempo que toma recuperar los costos de inversión.” “El período de recuperación se calcula dividiendo el monto de la inversión por el flujo de caja anual.”	PBP=TOTEX UV/ Ahorro anual Payback Period= Cost of Investment / Average Annual Cash Flow	PBP = 3.03 años

4.11.2. Análisis.

Tabla 16. Resultados financieros para la evaluación de Economía Circular del proyecto.

<i>Variable</i>	<i>Definición</i>	<i>Análisis</i>	<i>Valor estimado</i>
CAPEX UV	Capital expenditure, Gastos en capital.	TOTAL CAPEX UV	\$1 696,681 MXN
OPEX UV	Operating Expenses, Gastos operativos.	OPEX UV por año OPEX UV 20 años	\$ 439,491 MXN \$8 789,830 MXN
TOTEX UV	Total Expenditure.	TOTEX UV = Cost of Investment TOTEX UV 20 años	\$ 2 136,172.5 MXN \$10,486,511.0 MXN
LCOW UV	Levelized Cost of Water treated UV.	Levelized Cost of Water LCOW UV 20 años. LCOW UV representa el 45.83% del Costo de agua potable extraída de pozo. Costo actual por m ³ de agua potable extraída de pozo	\$12.17 MXN / m³ de agua \$26.55 MXN / m ³
VPN	Valor Presente Neto.	VPN, Horizonte de evaluación 20 años = n VPN > 0 : Proyecto generará beneficios	\$ 542,835.85 MXN
TIR	Tasa Interna de Retorno TIR Horizonte de evaluación 20 años = n	Tasa de rendimiento interno TIR > Tasa mínima de rentabilidad del proyecto d=0.1011% . Proyecto de inversión susceptible de ser aceptado.	TIR = 33 %
(B/C)	Relación beneficio-costo	(B/C) Proyecto rentable, los beneficios superan los costos.	(B/C) = 1.6
PBP PayBack Period	Periodo de Retorno de Inversión PRI= PBP	El PBP representa el 15.15% del tiempo de vida útil del proyecto, por lo que se espera que los 16.97 años restantes los ahorros económicos puedan ser reinvertidos y generar dividendos.	PBP = 3.03 años

4.12. Aporte del SISTEMA DE INGENIERÍA EN ECONOMÍA CIRCULAR al cumplimiento de las NOM, ODS de la ONU y a rankings de sustentabilidad internacionales.

4.12.1. Metodología y análisis.

Las metodologías del proyecto, en los puntos:

- 4.1. Caracterización del Agua Residual Tratada de la PTAR Villa Sur.
- 4.2. Determinación de la cantidad necesaria de tiempo de exposición del agua residual tratada a la luz UV para eliminar patógenos, caudal de 20 l/s.
- 4.3 Dimensionamiento del sistema de mejoramiento del agua residual con lámparas UV.

fueron diseñadas para cumplir la NOM-003-SEMARNAT-1997, alinearse a los ODS 6: "Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos", ODS 7: "Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos" y ODS 9: "Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación" (Figura 13), y cumplir con los objetivos de sustentabilidad que se ha planteado la Universidad Panamericana de UI GreenMetric [1]¹⁰ Gestión del Agua (WR), obteniendo hasta el momento de esta investigación WR: 900/1,000 puntos en el ranking (Universitas Indonesia, Kampus Baru & IREG Observatory, 2023).

¹⁰ Actualmente, la Universidad Panamericana Campus Aguascalientes es participante del ranking mundial de universidades GreenMetric. la cuál es una iniciativa por parte de la Universidad de Indonesia que vio la necesidad de considerar los esfuerzos hacia la sostenibilidad ambiental y el empeño de ciertas instituciones para minimizar su impacto ambiental y combatir el cambio climático en las clasificaciones mundiales de instituciones de educación superior. Los objetivos de este ranking son: 1. Moldear y mejorar la educación superior global y la investigación en sostenibilidad ambiental. 2. Promover el liderazgo en sostenibilidad global empezando por las universidades. 3. Fomentar la colaboración de distintas organizaciones, comunidades, gobiernos e instituciones mundiales para combatir los desafíos ambientales. 4. Proveer un método simple y eficiente para medir los esfuerzos por parte de las instituciones para el mejoramiento del medio ambiente. Hasta este momento, en el ranking participan 912 instituciones de 84 países alrededor del mundo. Basado en la última clasificación del año 2020, la Universidad Panamericana Campus Aguascalientes se encuentra en el noveno lugar a nivel nacional y en el lugar número 290 a nivel internacional.



Figura 13. Objetivos de Desarrollo Sostenibles 6, 7 y 9 Fuente: (Naciones Unidas, 2019)

4.13. Establecimiento de Estrategias Jurídicas de conservación de la Concesión del Título del pozo.

4.13.1. Metodología y análisis.

El primer paso es conocer el Status Quo del Título de Concesión del pozo:

“El Registro Público de Derechos de Agua de la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) otorga un Título de Concesión a Bonaterra A.C. número 08AGS103017/12EMDL13 para explotar, usar o aprovechar aguas nacionales del subsuelo por un volumen de 119,141.00 m³ anuales en los términos que el título establece. Cabe mencionar que, entre las cláusulas de dicho Título de Concesión, la DÉCIMO SEGUNDA establece que “Es causa de caducidad dejar de explotar, usar o aprovechar las aguas objeto de esta concesión en forma parcial o total durante 2 (dos) años consecutivos, sin mediar justificada explícita en la Ley de Aguas Nacionales y sus Reglamentos (CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN Secretaría General Secretaría de Servicios Parlamentarios, 1992). Si durante ese mismo lapso solamente se utilizó una parte del volumen de agua autorizada, la caducidad se declarará sobre el volumen que no se hubiese utilizado”. La cláusula antes mencionada, fue hasta inicios de 2019, la justificación para regar las áreas verdes de las instalaciones de la Universidad con agua de pozo.”

El siguiente paso es revisar el Marco Legal que asiste a los Títulos de Concesión de Pozos de Agua potable. En el Estado de Aguascalientes, es la CONAGUA quien puede modificar los términos que el Título de Concesión establece:

“CONVENIO Marco de Coordinación que celebran la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, a través de la Comisión Nacional del Agua, y el Estado de Aguascalientes, con el objeto de establecer los lineamientos para conjuntar recursos y formalizar acciones en las materias de infraestructura hidroagrícola, agua potable, alcantarillado y saneamiento y cultura

del agua en beneficio de la entidad.” (SEGOB Secretaría de Gobernación & CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2023)

“CUARTA.- OTRAS ACCIONES.

Cuando se determine la necesidad de instrumentar acciones que no estén incluidas en la cláusula segunda del presente instrumento, "LA CONAGUA" podrá expedir dentro del ámbito de su competencia, lineamientos específicos que permitan su realización.” (SEGOB Secretaría de Gobernación & CONAGUA Comisión Nacional del Agua, 2023)

Así mismo en la Ley de Aguas Nacionales existen Artículos de dicha ley, que indican el camino para modificar el Título de Concesión, de tal forma que la Universidad Panamericana evite perderlo y al mismo tiempo contribuya con el ahorro de agua potable.

“ARTÍCULO 22. "La Autoridad del Agua" deberá contestar las solicitudes dentro de un plazo que no excederá de sesenta días hábiles desde su fecha de presentación y estando debidamente integrado el expediente.” (CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN, 1992)

“ARTÍCULO 23. PÁRRAFO 3. En ningún caso podrá el titular de una concesión o asignación disponer del agua en volúmenes mayores que los autorizados por "la Autoridad del Agua". Para incrementar o modificar de manera permanente la extracción de agua en volumen, caudal o uso específico, invariablemente se deberá tramitar la expedición del título de concesión o asignación respectivo.” (CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN, 1992)

ARTÍCULO 25. PÁRRAFO 5. “En ningún caso podrá el titular de una concesión o asignación disponer del agua en volúmenes mayores que los autorizados por "la Autoridad del Agua". Para incrementar o modificar de manera permanente la extracción de agua en volumen, caudal o uso específico, invariablemente se deberá tramitar la expedición del título de concesión o asignación respectivo.” (CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN, 1992)

Se eligieron aquellos párrafos de cada artículo donde la Ley de Aguas Nacionales, indica que se debe hacer para modificar el Título de Concesión, trámite que deberá realizar el Jurídico de la Universidad Panamericana campus Aguascalientes.

Capítulo V Resultados

5.1. Resultados

La metodología de mejoramiento de calidad de agua residual tratada, proveniente de PTAR Villasur, aplicando el Sistema de Ingeniería en Economía Circular, demostró que se pueden generar ahorros económicos, ahorro de agua potable y de energía eléctrica a la Universidad Panamericana campus Aguascalientes, al utilizar el agua residual tratada con UV en el riego de áreas verdes y el reúso en servicios al público con contacto directo, cumpliendo la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Tabla 17. Resultados financieros para la evaluación de Economía Circular del proyecto.

<i>Variable</i>	<i>Definición</i>	<i>Análisis</i>	<i>Valor estimado</i>
CAPEX UV	Capital expenditure, Gastos en capital.	TOTAL CAPEX UV	\$1,696,681 MXN
OPEX UV	Operating Expenses, Gastos operativos.	OPEX UV por año OPEX UV 20 años	\$ 439,491 MXN \$8,789,830 MXN
TOTEX UV	Total Expenditure.	TOTEX UV = Cost of Investment TOTEX UV 20 años	\$ 2,136,172.5 MXN \$10,486,511.0 MXN
LCOW UV	Levelized Cost of Water treated UV.	Levelized Cost of Water LCOW UV 20 años. LCOW UV representa el 45.83% del Costo de agua potable extraída de pozo. Costo actual por m ³ de agua potable extraída de pozo	\$12.17 MXN / m³ de agua \$26.55 MXN / m ³
VPN	Valor Presente Neto.	VPN, Horizonte de evaluación 20 años = n VPN > 0 : Proyecto generará beneficios	\$ 542,835.85 MXN
TIR	Tasa Interna de Retorno TIR Horizonte de evaluación 20 años = n	Tasa de rendimiento interno TIR > Tasa mínima de rentabilidad del proyecto d=0.1011% . Proyecto de inversión susceptible de ser aceptado.	TIR = 33 %

<i>Variable</i>	<i>Definición</i>	<i>Análisis</i>	<i>Valor estimado</i>
(B/C)	Relación beneficio-costo	(B/C) Proyecto rentable, los beneficios superan los costos.	(B/C) = 1.6
PBP PayBack Period	Periodo de Retorno de Inversión PRI= PBP	El PBP representa el 15.15% del tiempo de vida útil del proyecto, por lo que se espera que los 16.97 años restantes los ahorros económicos puedan ser reinvertidos y generar dividendos.	PBP = 3.03 años

La aplicación del sistema propuesto, tendrá impacto positivo en la gestión y aprovechamiento del agua potable del acuífero 0101 Valle de Aguascalientes, mitigando el impacto negativo en la disponibilidad del mismo por extracción de agua potable de pozo para riego de 861,560 m³ y sentando un precedente jurídico que le permitirá a la institución educativa, solicitar la ampliación del tiempo de concesión del pozo evitando así mismo, la penalización que se estipula en las cláusulas de extracción mínima de agua potable.

Como resultado de la implementación del sistema propuesto se aportará al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 Agua Limpia y Saneamiento de la ONU, permitiendo a la Universidad cumplir con las certificaciones internacionales de sustentabilidad que se ha propuesto como meta institucional.

5.2. Discusión

Los principales hallazgos del presente estudio han sido sumamente satisfactorios e importantes, ya que se confirma que la posibilidad de ahorrar agua potable es una realidad asequible para la Universidad Panamericana campus Aguascalientes, ahorrando anualmente \$704,566 MXN, es decir el 62% de los costos de extracción de agua de pozo; lo anterior significa que con una inversión inicial de tan solo \$2,136,172.5 MXN y un periodo de retorno de la inversión de 3.03 años, la Universidad contará con el ahorro económico e impacto ambiental positivo de mitigación de extracción de agua potable de 43,078 m³/año (\$1,144,058.18 MXN), además obtendrá en su campus Aguascalientes:

- Instalaciones de desinfección ultravioleta de primer mundo para mejorar la calidad del agua residual doméstica de la PTAR Villa Sur, obteniendo calidad de agua de NOM-003-ECOL 1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público, eliminando población microbiana de Enterococos fecales y Escherichia coli. Dichas instalaciones podrán ser utilizadas como Laboratorio para la academia del campus.

- Una línea morada¹¹ de agua residual doméstica tratada, con calidad superior a la NOM-002-SEMARNAT 1996, directa de la PTAR Villa Sur a sus instalaciones que cumple las estrategias de economía circular de cero emisiones de gases de efecto invernadero, al transportar el agua con solo la gravedad terrestre, implicando ahorro de energía eléctrica.
- Las instalaciones de desinfección ultravioleta TrojanUV3000™PTP, que son en el mercado las más idóneas para la Universidad debido a su relación costo beneficio, con una capacidad de tratamiento de agua de 473 m³/h (131.38 l/s), superior a la capacidad instalada actualmente en la PTAR Villa Sur de 20 l/s. Además el consumo anual esperado de energía eléctrica es de tan solo 491.4 kWh con un costo anual total de \$678.43 MXN.
- Cisterna de almacenamiento de agua residual tratada con UV para uso en riego de áreas verdes y servicios de descarga de inodoros.

En el marco legal, se encontró que, una vez implementado este proyecto, existen mecanismos para solicitar a la CONAGUA que permita a la Universidad reducir la extracción del agua potable del pozo, evitando penalizaciones y sin necesidad de perder la concesión del mismo, argumentando la aportación a los objetivos de mitigación de impacto hídrico que el Gobierno de Aguascalientes y el Gobierno Federal se han establecido como metas

A nivel global se estará aportando a los ODS 6, ODS 7 Y ODS 9 así como a las certificaciones de sustentabilidad Green Metrics y a los ESR (empresa socialmente responsable). La presente propuesta se une a las estrategias de mitigación de estrés hídrico que los gobiernos han establecido como objetivos en la presente administración municipal de Aguascalientes, específicamente se adhiere al MIAA Modelo Integral de Aguas de Aguascalientes.

Las limitaciones que se han encontrado en la presente investigación están relacionadas con los trámites de paso de vías federales, específicamente de las vías de ferrocarril que dividen a la Universidad Panamericana de la PTAR Villa Sur ya que dicho trámite no tiene un costo fijo establecido y depende totalmente de si la solicitud está completa y contiene todos los datos técnicos necesarios, para que el perito de la obra civil lo apruebe, de lo contrario el costo se incrementará al necesitar de un estudio especial de la obra civil planteada.

Otra limitación que se encontró al realizar la presente propuesta, es que una vez que se tenga el agua residual tratada con luz UV de calidad NOM 003-SEMARNAT-1997, se deberá distribuir en la red hidráulica de riego de la Universidad Panamericana, así como en la red de descarga de

¹¹ Línea Morada es una tubería de agua residual tratada que tiene como finalidad su reuso, cambia el esquema de economía lineal del consumo del agua (tomar, hacer, desechar) y pasa a una economía circular que es reparadora y regenerativa del ciclo urbano del agua para reducir, reutilizar, reciclar, recuperar y restituir volúmenes conforme se aplique y normalice su reuso. (Peña, 2021)

inodoros de la misma, la limitación surge cuando se detecta que, se utiliza esa misma red para el agua potable extraída de pozo, para consumo en actividades humanas, es decir no se deben utilizar las mismas tuberías para ambos tipos de agua. Se requiere una reingeniería del sistema hidráulico.

Dentro de las hipótesis del presente proyecto en el punto 4.5 Dimensionamiento de las turbinas generadoras de electricidad, así como su posición en el sistema hidráulico, se encontró que el caudal Q que entrega la PTAR Villa Sur, aun cuando es el adecuado para transportar el agua a la Universidad por gravedad, no es suficiente para utilizarlo como energía potencial generadora de energía eléctrica, al no existir actualmente en el mercado, una microturbina para una caída de agua de solo 6 metros y de $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal, quedando este punto como futuro nicho de investigación.

Se sugiere que, como futuras investigaciones, se aborde el tema de instalaciones hidráulicas diferenciadas en todos los edificios que se construyan de ahora en adelante, ya que esto reducirá los costos de inversión y maximizará la posibilidad de utilizar sistemas como el que se propone en esta investigación en todos los ámbitos humanos.

Lo más sorprendente de haber trabajado en este proyecto es corroborar, como todas aquellas materias científicas, ingeniería, metodologías, marcos normativos, marcos legales, estudios económicos, estrategias administrativas, culturales e inclusive de mercado, se embonan perfectamente cuando el objetivo es generar Ingeniería en Economía Circular aplicada a la solución de un problema. Los invito a utilizar dicha sabiduría en todos y cada uno de los proyectos que realicen en sus vidas profesionales y personales. Son de una riqueza intelectual humana inconmensurable.

Conclusión

La metodología de mejoramiento de calidad de agua residual tratada, proveniente de PTAR Villa Sur, aplicando el Sistema de Ingeniería en Economía Circular, demostró que se pueden generar ahorros económicos, ahorro de agua potable y de energía eléctrica a la Universidad Panamericana campus Aguascalientes, al utilizar el agua residual tratada con UV en el riego de áreas verdes y el reúso en servicios al público con contacto directo, cumpliendo la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Con una inversión inicial CAPEX de \$1,696,681 MXN, se espera que los costos de operación anuales OPEX sean de \$439,491 MXN dando un total en el primer año del proyecto TOTEX de \$2,136,172 MXN. Se espera que el proyecto tenga un tiempo de vida útil de 20 años, por lo que el costo nivelado del agua residual tratada con luz ultravioleta (Levelized Cost of Water) LCOW será de \$12.17 MXN por metro cúbico de agua, que, comparado con el costo actual por metro cúbico de agua potable extraída de pozo de \$26.55 MXN, el LCOW representa solo el 45.83% del costo actual, incluyendo energía eléctrica para la extracción. Tomando como horizonte de evaluación los 20 años de vida útil del proyecto, el valor presente neto del proyecto es de \$542,835.85 MXN y al ser VPN>0 indica que es viable, la tasa interna de retorno TIR=33% indica que es rentable, asimismo la relación beneficio/costo B/C=1.6 indica que el proyecto de inversión es viable y rentable. Finalmente el periodo de retorno de inversión PRI o también conocido como pay back period PBP=3.03 años indica que se espera que los 16.97 años restantes los ahorros económicos puedan ser reinvertidos y generar dividendos, se calcula que estos asciendan a un total de \$14,091,333.7 MXN.

La aplicación del sistema propuesto, tendrá impacto positivo en la gestión y aprovechamiento del agua potable del acuífero 0101 Valle de Aguascalientes, mitigando el impacto negativo en la disponibilidad del mismo por extracción de agua potable de pozo para riego de 861,560 m³ durante los 20 años de vida útil del proyecto, sentando un precedente jurídico que le permitirá a la institución educativa, solicitar la ampliación del tiempo de concesión del pozo evitando así mismo, la penalización que se estipula en las cláusulas de extracción mínima de agua potable.

Como resultado de la implementación del sistema propuesto se aportará al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6,7 y 9 de la ONU, permitiendo a la Universidad cumplir con las certificaciones internacionales de sustentabilidad que se ha propuesto como meta institucional.

El ahorro de energía se hace realidad en dos vertientes: al transportar el agua de la PTAR Villa Sur a la Universidad Panamericana utilizando solo la fuerza de la gravedad, y al utilizar

anualmente en el sistema de desinfección UV 491.4 kWh con un costo anual total de \$678.43 MXN.

En la Tabla 18 se puede observar como el proyecto de utilización de agua residual tratada para riego tiene los mayores beneficios ambientales y económicos y el costo más bajo, cumpliendo las estrategias de ingeniería en economía circular planteadas.

Tabla 18. Comparación de Tipos de Proyectos, Totex y Ahorros anuales.

Valores anuales	Agua Potable	Agua residual tratada UV	Pipas agua tratada JATCO
CAPEX	\$ 1,144,058.18	\$1,696,681.00	\$5,460,000.00
OPEX	\$ -	\$439,491.50	\$ -
TOTEX	\$ 1,144,058.18	\$2,136,172.50	\$5,460,000.00
AGUA POTABLE EXTRAIDA m ³	43,078	0	0
AGUA RESIDUAL TRATADA m ³	0	43,078 m ³	43,078 m ³
COSTO AGUA POTABLE POR m ³	\$ 26.56	\$ 9.13	\$ -
AHORRO DE AGUA POTABLE m ³	0	<i>43,078 m³</i>	43,078 m ³
AHORRO ECONÓMICO ANUAL	\$ -	<i>\$ 704,566.68</i>	<i>-\$4,315,941.82</i>

En la Figura 14 se observa la gráfica representativa de las conclusiones finales.

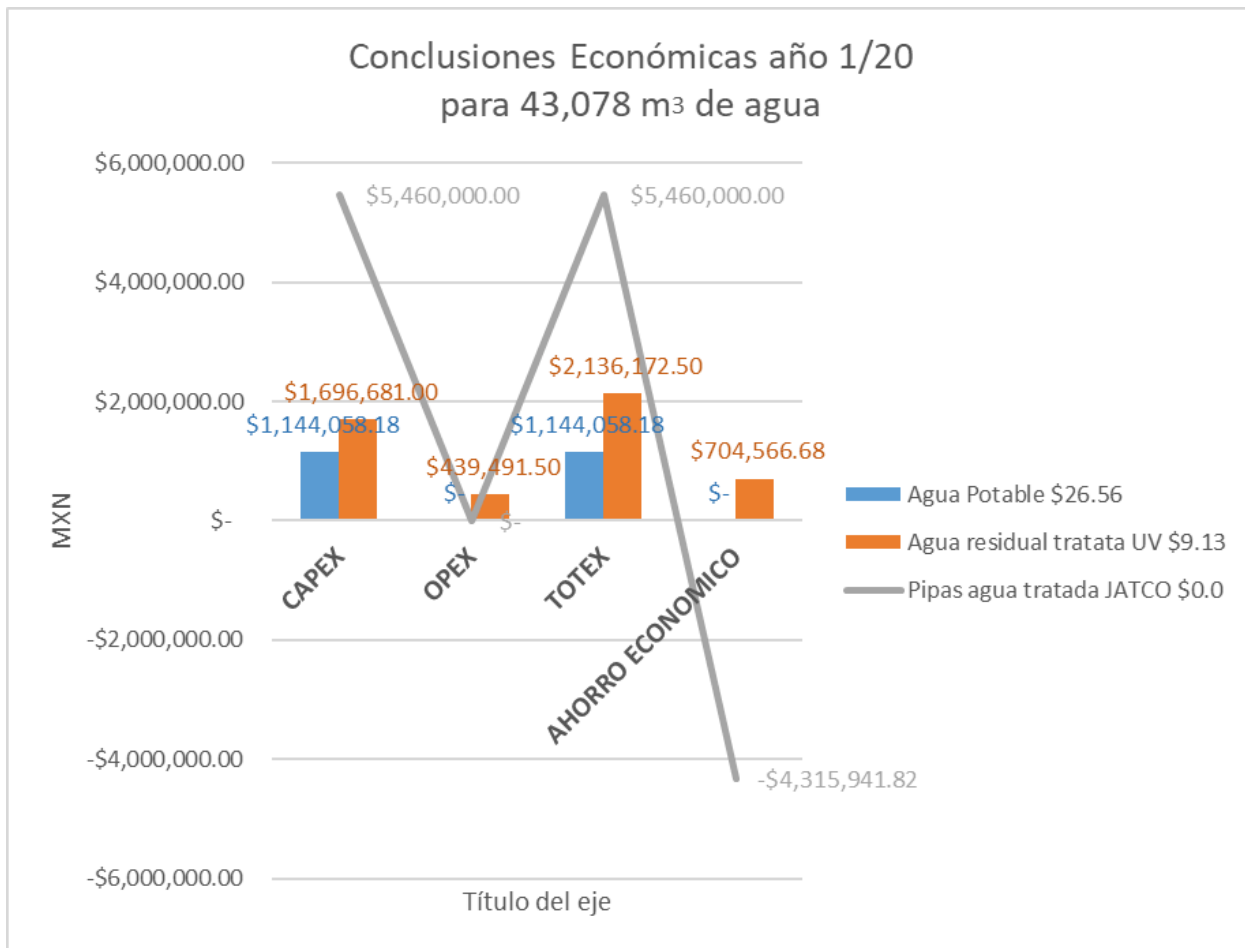


Figura 14. Gráficas de resultados del Sistema de Ingeniería en Economía Circular.

Bibliografía

- Arriaga Rivera, J. M. (2006, 11 01). Guía de Estudio para la Especialización en Proyectos de Inversión de la carrera de Licenciado en Administración Financiera [Caso Práctico]. In *Tesis que para obtener el Grado de Maestría en Finanzas y Negocios* (Única ed.) [Tesis Impresa]. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN Secretaría General
Secretaría de Servicios Parlamentarios. (1992, December 1). *Ley de Aguas Nacionales*.
Cámara de Diputados. Retrieved May 15, 2023, from
<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf>
- Chang, R. (2007). *Química* (E. Jasso Hernán D. Bourneville, Trans.; Decima edición ed.).
McGraw-Hill.
- CONAGUA. (n.d.). *SIGACUA*. MULTIFORMAS. Retrieved 05 12, 2023, from
https://declaragua.conagua.gob.mx/Declaragua/Areas/SIGACUA/Sigacua_multiformas.html
- CONAGUA. (2014). *El Medio Ambiente en México 2013-2014*. El Medio Ambiente en México 2013-2014. Retrieved October 6, 2023, from
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_1_1.html
- CONAGUA Comisión Nacional del Agua. (2020, December 30). *Programa Hídrico Regional 2021-2024*. Región Hidrológico-Administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico. Retrieved May 15, 2023, from

https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/PNH/PHR_2021-2024_RHA_VIII_LSP.pdf

cronoshare. (2023, November 8). *¿Cuánto cuesta construir una casa? Precios en 2023.*

Cronoshare. Retrieved December 5, 2023, from

<https://www.cronoshare.com.mx/cuanto-cuesta/construir-casa>

Danaher Corporation. (2023, 01 01). *THE DANAHER WATER PLATFORM*. THE DANAHER WATER PLATFORM. Retrieved 07 12, 2023, from

<https://www.dhwaterquality.com/home>

Dourojeanni Ricordi, A. C., & iagua. (2022, June 6). *Ciclos hidrológicos natural y antrópico y roles del estado, usuarios y sociedad (I parte)*. iAqua. Retrieved May 31, 2023, from

<https://www.iagua.es/blogs/axel-charles-dourojeanni-ricordi/ciclos-hidrologicos-natural-y-antropico-y-roles-estado>

D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, & Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (1ra ed., Vol. 45). México Gobierno de la República. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro45.pdf>

D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, & Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (1ra ed., Vol. 25). México Gobierno de la República.

https://www.geografica.com.mx/img/Normatividad/CONAGUA/SGAPDS-1-15-Libro25_INTRO_TRATAMIENTO_DE_AGUAS_RES_MUN.pdf

D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, & Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (1ra ed., Vol. 22). México Gobierno de la República. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro22.pdf>

D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, & Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (1st ed., Vol. 40). México Gobierno de la República. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro40.pdf>

D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, & Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (1ra ed., Vol. 4). México Gobierno de la República. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/sgapds-1-15-libro4.pdf>

Ecomaq México S.A. de C.V. (2023). *Sistema de Desinfección con Luz Ultravioleta Serie Gold PURIKOR con | Ecomaq.mx/ Ecomaq México Sa de CV*. Ecomaq.mx. Retrieved December 4, 2023, from <https://ecomaq.mx/products/sistema-de-desinfeccion-con-luz-ultravioleta-serie-gold-purikor-capacidad-12>

EL BANCO MUNDIAL, SENER SECRETARIA DE ENERGIA, & ESMAP. (n.d.).

Espinoza Martínez, C. E., Mejía, V. a., & Reddy Hart, A. (2023, 01 19). Diseño para el aprovechamiento racional de aguas lluvias, en el campus aguas claras de la Universidad Santo Tomás, Villavicencio. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/48962>

Fane, S., & White, S. (2023, 01 01). Levelised cost, a general formula for calculations of unit cost in integrated resource planning (Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney, Ed.). *II International Conference on Efficient Use and Management*. https://www.researchgate.net/publication/228947572_Levelised_cost_a_general_formula_for_calculations_of_unit_cost_in_integrated_resource_planning

Florián Soto, L. C. (2023). *Propuesta conceptual para la implementación de sistemas de drenajes urbanos sustentable en la universidad Cooperativa de Colombia*. (1st ed.). Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ingenierías, Ingeniería Ambiental, Bogotá. <https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/48424>

© Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. & AGUA.ORG.MX. (n.d.). *Agua en el planeta – Agua.org.mx*. Agua.org. Retrieved May 17, 2023, from <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>

García Gutiérrez, H., & Nava Mastache, A. (2014). *SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE TURBINAS HIDRÁULICAS PARA CENTRALES HIDROELÉCTRICAS* (Primera edición ed.). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. https://www.ingenieria.unam.mx/deptohidraulica/publicaciones/pdf_publicaciones/SELECyDIMENSIONAMIENTOdeTURBINAS.pdf

Gobierno del Estado de Aguascalientes, SECRETARIA GENERAL DE GOBIERNO, & INSTITUTO DEL AGUA DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES. (2022, 03 31). PLAN HÍDRICO ESTATAL 2021-2050 [Conforme al ARTÍCULO 3º B.- de la Ley de agua para el Estado de Aguascalientes, “es facultad del Gobernador del Estado, expedir el Plan Hidráulico para el Estado de Aguascalientes, como instrumento rector en el

- tratamiento y atención de la problemática del]. In *PLAN HÍDRICO ESTATAL 2021-2050* (1, 1st ed., Issue 1) [WEB]. PLAN HÍDRICO ESTATAL 2021-2050. Retrieved 05 17, 2023, from <https://eservicios2.aguascalientes.gob.mx/NormatecaAdministrador/archivos/EDO-23-180.pdf>
- Gobierno de México. (2019, October 9). *Instrumentos de Gestión del Agua | Comisión Nacional del Agua | Gobierno | gob.mx*. Gobierno de México. Retrieved May 31, 2023, from <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/instrumentos-de-gestion-del-agua>
- Grupo APB Depositos Flexibles. (2023). *Depósitos Flexibles La solución de almacenamiento de líquidos más práctica, ecológica y económica*. Depósitos Potable. Retrieved 08 08, 2023, from https://www.depositosflexibles.com/epages/90651811.sf/es_ES/?ObjectPath=/Shops/90651811/Categories
- Hernández Arroyo, E. (2020). *Microhidrogeneración* (1ra ed.). Editorial Universidad Pontificia Bolivariana. <http://hdl.handle.net/20.500.11912/5745>
- INEGI Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática & SIATL Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. (2023, 05 12). *SIATL Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. SIATL Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. Retrieved 05 12, 2023, from https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- Marquez, J. A., & Marroquin, S. (2023). *El ciclo del agua (artículo) | Ecología*. Khan Academy. Retrieved May 31, 2023, from

<https://es.khanacademy.org/science/biology/ecology/biogeochemical-cycles/a/the-water-cycle>

Morin Maya, E., & Centro de Estudios para la Preparación y Evaluación Socioeconómica de Proyectos (CEPEP). (2018). *GUÍA GENERAL PARA LA PRESENTACIÓN DE EVALUACIONES COSTO Y BENEFICIO DE PROGRAMAS Y PROYECTOS DE INVERSIÓN, 2018* (UNICA ed.). Secretaría de Hacienda y Crédito Público.

[https://www.cepep.gob.mx/work/models/CEPEP/metodologias/documentos/Guia_Genera1_Analisis_Costo_Beneficio_\(CEPEP\).pdf](https://www.cepep.gob.mx/work/models/CEPEP/metodologias/documentos/Guia_Genera1_Analisis_Costo_Beneficio_(CEPEP).pdf)

Naciones Unidas. (2019, March 9). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Retrieved October 31, 2023, from

<https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/93/PDF/N1529193.pdf?OpenElement>

Naciones Unidas. (2022, May 24). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible. Retrieved May 17, 2023, from

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Ordóñez Gálvez, J. J. (2012). *Cartilla Técnica: Aguas Subterráneas-acuíferos* (Primera ed.). Sociedad Geográfica de Lima. <https://hdl.handle.net/11537/25436>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura & AQUASTAT -

Sistema mundial de información de la FAO sobre el agua en la agricultura. (2021, 01 01).

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

- AQUASTAT - Sistema mundial de información de la FAO sobre el agua en la agricultura.
Retrieved May 18, 2023, from <https://www.fao.org/aquastat/es/>
- Parlamento Europeo. (2023, May 24). *Economía circular: definición, importancia y beneficios*.
Economía circular: definición, importancia y beneficios | Noticias | Parlamento Europeo.
Retrieved October 30, 2023, from
<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>
- Peña, P. (2021, November 17). ¿Qué es una línea morada y por qué beneficia a Huentitán?
Informador.mx.
<https://www.informador.mx/jalisco/Que-es-una-linea-morada-y-Por-que-beneficia-a-Huentitan-20211117-0021.html>
- Pérez D'Gregorio, D. R. (2002, Octubre 01). *Sistema Internacional de Unidades SI*. Gaceta Médica de Caracas. Retrieved octubre 20, 2023, from
https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0367-47622002000400011
- Proaño Mejía, K. A. (2022). Análisis de la interferencia de la turbidez en la efectividad del tratamiento terciario de aguas utilizando radiación ultravioleta en la eliminación de microorganismos indicadores [Bachelor's thesis]. In *Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana*. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23586>
- Puritec de México Equipos. (2023). *Lámpara ultravioleta 6 GPM Purikor serie clasic - Venta de equipos para tratamiento de agua*. Classic Shop - Venta de equipos para tratamiento de agua. Retrieved December 4, 2023, from

<https://www.puritecequipos.com.mx/product/lampara-ultravioleta-6-gpm-purikor-serie-clasic/>

Secretaría de Gobernación & Diario Oficial de la Federación. (1998, 06 03). *NORMA Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996*. Diario Oficial de la Federación. Retrieved 05 9, 2023, from

https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998#gsc.tab=0

Secretaría de Gobernación & Diario Oficial de la Federación. (1998, 09 21). *NORMA Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997*. DOF - Diario Oficial de la Federación. Retrieved May 9, 2023, from

https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4893449&fecha=21/09/1998#gsc.tab=0

Secretaría de Gobernación & Diario Oficial de la Federación. (2022, 03 11). *NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021*. Diario Oficial de la Federación. Retrieved 05 09, 2023, from

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

SEGOB Secretaría de Gobernación & CONAGUA Comisión Nacional del Agua. (2023, 02 28).

CONVENIO Marco de Coordinación que celebran la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, a través de la Comisión Nacional del Agua, y el Estado de Aguascalientes, con el objeto de establecer los lineamientos para conjuntar recursos y formalizar ac. Diario Oficial de la Federación. Retrieved 05 15, 2023, from

https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5680979&fecha=28/02/2023#gsc.tab=0

- Sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas & CONAGUA. (2021). *CONAGUA*. Sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas (SIGACUA). Retrieved 05 12, 2023, from <https://sigagis.conagua.gob.mx/aprovechamientos/>
- TodoAgua. (2023). *SISTEMA DE DESINFECCIÓN 18 GPM SERIE Platinum PURIKOR 40 WATTS*. TodoAgua. Retrieved December 4, 2023, from <https://purificadoragua.tododeagua.mx/filtro/esterilizadores-luz-ultravioleta-uv-sistema-d-e-desinfeccion-18-gpm-serie-platinum-purikor-40-watts-pkuv-18-rav-ph-purikor>
- Trojan Technologies. (2010). *DESINFECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES* [Manual técnico Sistema TROJAN UV3000PTP / TROJAN UV3000B]. <https://www.trojantechnologies.com/en/products/municipal/systems/trojanuv3000ptp>
- Trojan Technologies. (2023, 01 01). *Trojan Technologies*. Trojan Technologies. Retrieved 12 04, 2023, from <https://www.trojantechnologies.com/en/>
- Trojan Technologies. (2023, 01 01). *TROJAN UV WATER CONFIDENCE*. Retrieved 07 13, 2023, from <https://www.trojanuv.com/es/>
- Universidad Panamericana. (2021, 01 01). *Misión, Visión y Valores*. Universidad Panamericana. Retrieved Enero 2, 2021, from <http://up.edu.mx>
- Universitas Indonesia, Kampus Baru & IREG Observatory. (2023, 01 01). *IREG Observatory on Academic Ranking and Excellence*. UI GreenMetric. Retrieved May 17, 2023, from <https://greenmetric.ui.ac.id/>
- Wright, H., & Cairns, W. (1998, Octubre). Desinfección de agua por medio de luz ultravioleta. [In Trabajo presentado en los Anales simposio OPS: Calidad de agua, Desinfección efectiva.]. In *In Trabajo presentado en los Anales simposio OPS: Calidad de agua,*

Desinfección efectiva.

<http://www.elaguapotable.com/Desinfeccion%20del%20agua%20UV%20Trojan%20Theologies.pdf>

WWS-Wasserkraft. (2022, 05 04). *Configurador de turbinas*. WWS Wasserkraft GmbH.

Retrieved July 26, 2023, from

<https://www.wws-wasserkraft.at/es/productos/configurador-de-turbinas>

“La Trascendencia, es la respuesta a la importancia de la Economía Circular, cada acto humano tiene eco en la eternidad, si nos decidimos hoy a actuar individual y colectivamente a favor de su implementación, seremos recordados como la generación que trascendió” Gely Arriaga, 2019.