



**Tratamiento sostenible de 300,000 L/d de aguas residuales en el Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur de la Universidad Nacional Autónoma de México: Solución anaerobia-humedal para cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021 de México**

***Sustainable treatment of 300,000 L/d of wastewater at the College of Sciences and Humanities South Campus of the National Autonomous University of Mexico: Anaerobic-wetland solution for compliance with NOM-001-SEMARNAT-2021 of Mexico***

**Salvador Alejandro Sánchez-Tovar\***

Consultoría SAST, Rio Nazas 500, Int. 10, Col. Ventura Puente, 58020 Morelia, Michoacán, México  
Teléfono (+52) 55 3708 3736. Correo-e (*e-mail*): salvadorinvestigador@gmail.com

\*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia / *Corresponding author*

Recibido / *Received*: Octubre / *October* 05, 2025

Aceptado / *Accepted*: Noviembre / *November* 01, 2025

Publicado / *Published*: Diciembre 31, 2025 (Número 1, Enero-Junio) / *December 31, 2025 (Number 1, January-June)*

### **Resumen**

El Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur (CCH-SUR en adelante), construido sobre el pedregal de Zacatépetl, concentra diariamente una población aproximada de 15,000 personas en 38 edificios. La generación estimada de aguas residuales alcanza los 300 m<sup>3</sup>/día, volumen que actualmente se maneja mediante fosas sépticas con descargas hacia grietas naturales del subsuelo. Este sistema resulta insuficiente y representa un riesgo ambiental, especialmente frente a los criterios más estrictos de la NOM-001-SEMARNAT-2021, que regula la calidad de las descargas destinadas a infiltración. La ausencia de un sistema de tratamiento formal compromete tanto la calidad del agua subterránea como la sustentabilidad del entorno ecológico. Ante esta problemática, se plantea el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) basada en un esquema combinado de reactor anaerobio y humedal artificial, ubicada en el Jardín Botánico contiguo al plantel. Esta solución busca garantizar el cumplimiento normativo, proteger el subsuelo volcánico y ofrecer una alternativa descentralizada, eficiente y sostenible para el manejo de las aguas residuales del CCH Sur.

**Palabras clave:** Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), esquema combinado reactor anaerobio-humedal artificial, sistemas educativos

### **Abstract**

The "College of Sciences and Humanities, South Campus (hereinafter CCH-SUR)" built on the volcanic terrain of Zacatépetl, hosts a daily population of approximately 15,000 persons distributed across 38 buildings. The estimated generation of wastewater reaches 300 m<sup>3</sup>/day, which is currently managed through septic tanks discharging into natural fissures of the subsurface. This rudimentary system is insufficient and poses an environmental risk, particularly under the stricter criteria of the NOM-001-SEMARNAT-2021, which regulates the quality of discharges intended for infiltration. The absence of a formal treatment system compromises both groundwater quality and the sustainability of the ecological environment. In response to this problem, the design of a wastewater treatment plant (WWTP) is proposed, based on a combined anaerobic reactor and constructed wetland system, located in the Botanical Garden adjacent to the campus. This solution aims to ensure regulatory compliance, protect the volcanic subsoil, and offer a decentralized, efficient, and sustainable alternative for managing the wastewater of CCH Sur.

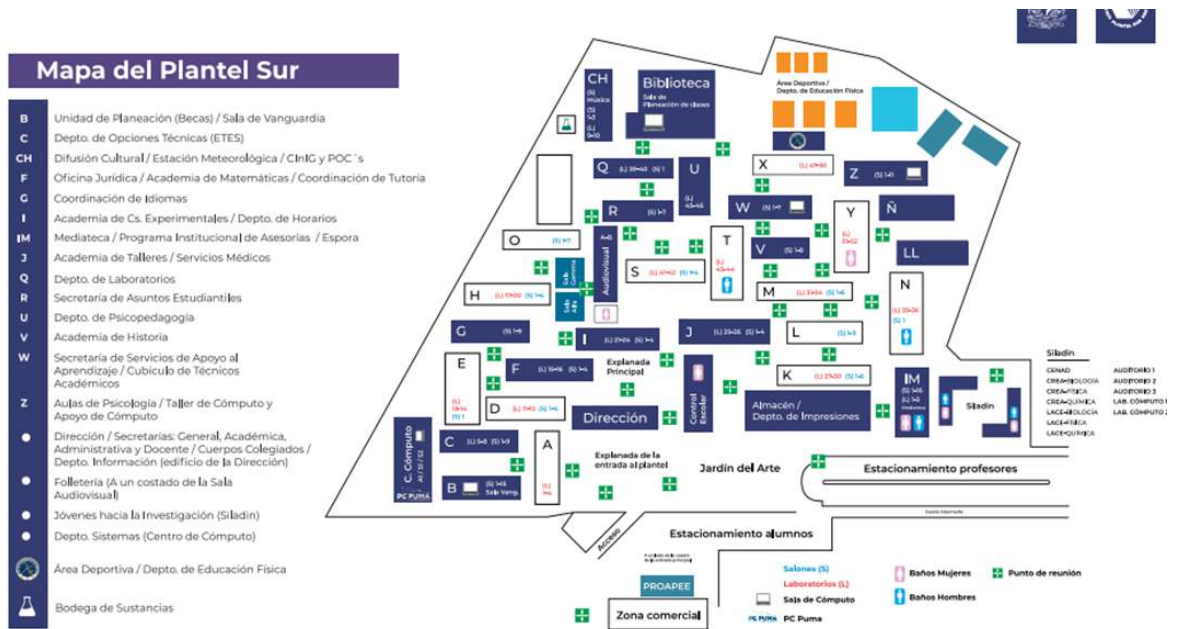
**Keywords:** Design of a wastewater treatment plant (WWTP), combined anaerobic reactor-artificial wetland system, educational systems

**Antecedentes**

El Colegio de Ciencias y Humanidades Plante Sur (CCH-SUR), inaugurado en 1972 y ubicado sobre el pedregal de Zacatépétl (Figura 1), alberga diariamente a una población aproximada de 15,000 personas distribuidas en cerca de 38 edificios (Figura 2).



**Figura 1.** Vista aérea del CCH Sur de la UNAM, Ciudad de México, México (Google Maps, 2022)



**Figura 2.** Edificaciones del CCH-Sur de la UNAM, Ciudad de México, México ([https://www.cch-sur.unam.mx/pdf/induccion\\_docentes\\_nvo\\_ingreso.pdf](https://www.cch-sur.unam.mx/pdf/induccion_docentes_nvo_ingreso.pdf))

A pesar de su tamaño y actividad académica, el plantel no cuenta con un sistema de drenaje sanitario convencional. En su lugar, opera mediante fosas sépticas que descargan eventualmente hacia grietas naturales del subsuelo volcánico, conocidas como grietas fieles.

---

Este sistema rudimentario representa un riesgo ambiental significativo, especialmente bajo el marco de la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2021), que establece parámetros más estrictos para la calidad de las descargas destinadas a infiltración.

Si se considera una producción promedio de 20 litros diarios de aguas residuales por persona, el volumen total generado asciende a 300,000 litros por día, lo cual supera ampliamente la capacidad de tratamiento pasivo de las fosas existentes y compromete la calidad del agua subterránea y la salud ecosistémica del pedregal.

Además, el CCH-SUR colinda con el Jardín Botánico y el Sendero Ecológico, espacios que podrían verse afectados por la infiltración de aguas residuales no tratadas. Sin embargo, esta proximidad también representa una oportunidad:

La instalación de un sistema de tratamiento anaerobio seguido de humedal artificial en el área del jardín botánico permitiría una solución descentralizada, ecológica y educativa, alineada con los principios de restauración ambiental y aprovechamiento del conocimiento tradicional.

La infiltración sin tratamiento adecuado representa un riesgo de contaminación de acuíferos, degradación del ecosistema y afectación a la sustentabilidad ambiental del campus y sus áreas colindantes, como el Jardín Botánico. Ante esta problemática, se plantea la necesidad de una planta de tratamiento de aguas residuales (en adelante PTAR) con capacidad suficiente, basada en un sistema combinado de reactor anaerobio y humedal artificial situada en el jardín botánico y que permita un manejo seguro, eficiente y sostenible de las descargas.

## **Objetivos**

### **Objetivos generales**

Diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales para el CCH-SUR ubicada en el Jardín Botánico cumpliendo con los parámetros de calidad establecidos en la normativa mexicana y contribuyendo a la restauración ecológica y la protección del subsuelo volcánico del Pedregal de Zacatépetl.

Proponer el diseño de un sistema combinado de reactor anaerobio y humedal artificial para un flujo estimado de 300,000 L/día, cumpliendo con la NOM-001-SEMARNAT-2021.

### **Objetivos específicos por fase**

#### **Ingeniería de Perfil**

- Diagnosticar la situación actual del manejo de aguas residuales en el CCH Sur
- Evaluar la situación actual de tratamiento de aguas residuales en el CCH-Sur
- Evaluar el marco normativo aplicable y los objetivos de calidad del efluente
- Realizar un análisis tipo FODA identificando **f**ortalezas, **o**portunidades, **d**ebilidades y **a**menazas del proyecto.

#### **Ingeniería Conceptual**

- Elaborar un diagrama de bloques que represente el flujo general del sistema.

#### **Ingeniería Básica**

- Diseñar diagramas de flujo de proceso (DFP) y balances hidráulicos
- Dimensionar los equipos y procesos
- Estimar costos de inversión y operación, y realizar un análisis de viabilidad técnica y económica.

## Ingeniería de Detalle

- Definir las disciplinas de la ingeniería para el desarrollo del proyecto

A continuación se desglosa este plan de trabajo.

### Plan de trabajo

#### 1. Primer desarrollo: Ingeniería de Perfil

##### 1.1. Diagnóstico de la situación actual del manejo de aguas residuales en el CCH Sur

###### Producción de aguas residuales del CCH Sur

Se ha censado una población promedio de 15,000 habitantes/d y un consumo de agua promedio de 20.0 L/habitante

- $Q = (15,000 \text{ habitantes/día}) \times (20 \text{ Litros / habitante}) = 300,000.00 \text{ Litros/día}$
- $Q = (300,000.00 \text{ L/día}) \times (1 \text{ m}^3/1000\text{L}) = 300.00 \text{ m}^3/\text{día}$
- Horas de producción de 7.00 a.m. a 9.00 p.m. = (14 horas)
- $Q = (300.00 \text{ m}^3/\text{día}) / (14 \text{ h/día}) = 21.42 \text{ m}^3/\text{h}$
- $Q = 5.95 \text{ L/s}; Q = 357.14 \text{ L/min}$

Dado que no se cuentan con análisis de laboratorio vigentes se utilizarán la composición media de la tabla del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (Tabla 1).

**Tabla 1.** Composición del agua residual urbana y doméstica de acuerdo con el Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA, 2015)

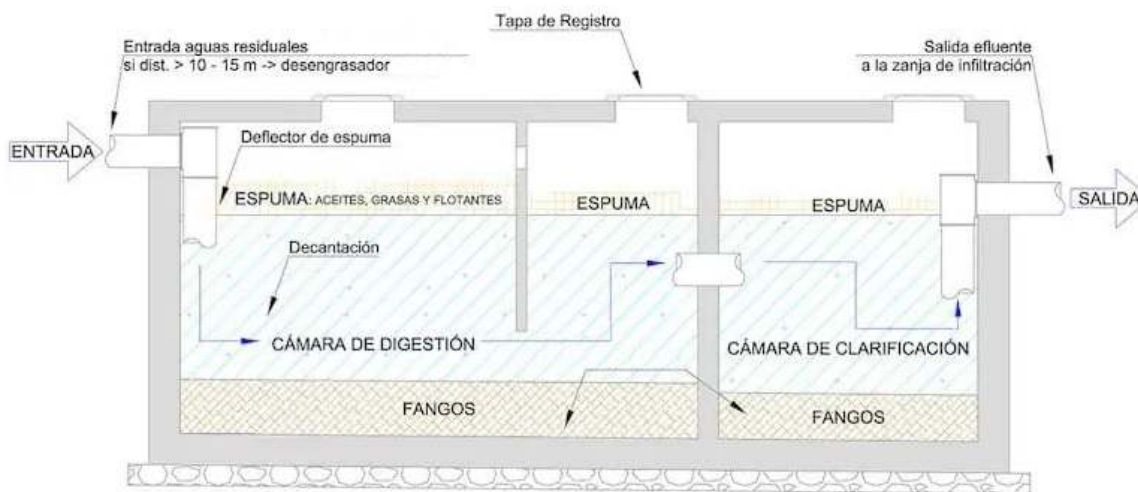
Parámetro	Unidad	Baja	Media	Alta
Sólidos suspendidos totales	mg/L	120	210	400
DBO	mg/L	110	190	350
DQO	mg/L	250	430	800
NTK (Nitrógeno total Kjeldahl)	mg N/L	20	40	85
Fósforo total	mg P/L	4	7	12
Grasas y aceites	mg/L	50	90	100
Coliformes fecales	NMP/100 mL	$10^3$ – $10^5$	$10^4$ – $10^6$	$10^5$ – $10^8$

##### 1.2. Evaluación de la situación actual de tratamiento de aguas residuales en el CCH-Sur

El CCH-Sur carece de un sistema de drenaje que se conecte al sistema de drenaje de la Ciudad de México y en su lugar usa fosas sépticas que después vierten a "grietas fieles".

Lo anterior lleva a la necesidad de un proyecto alternativo de tuberías que no se encuentra dentro de los alcances del presente estudio. En su lugar se enfocará en el dimensionamiento y costeo de una PTAR en los terrenos vecinos del Jardín Botánico o de la Reserva de la Biosfera de la UNAM.

No se sabe el número y la localización exacta de las fosas sépticas y de entrevistas al personal de mantenimiento se han localizado algunas con medidas semejantes (2.0m ancho x 5.0 m de largo x 5.0 m de profundidad), todas de multicompartimientos a un esquema semejante al de la Figura 3.



**Figura 3.** Perfil transversal de una fosa séptica (Modificada de Life Rural Supplies, 2025)

Se ha demostrado que las fosas sépticas por sí mismas y sin el apoyo de otros sistemas de tratamiento no son suficientes para la remoción total de contaminantes (Castañeda-Olvera et al., 2020; Méndez-Novelo et al., 2012). Presentan además los siguientes problemas:

#### **Tratamiento incompleto**

- Función principal: Sedimentar sólidos y permitir una digestión parcial (tratamiento pseudo anaerobio)
- Reducción típica: cerca del 40% de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- No elimina: Nitrógeno, fósforo, detergentes, metales pesados ni microorganismos patógenos

#### **Riesgo sanitario**

- El efluente líquido aún contiene bacterias, virus y parásitos
- Puede contaminar acuíferos y suelos si se infiltra sin tratamiento adicional
- En zonas urbanas densas, como Coyoacán, esto representa un riesgo directo para la salud pública

#### **Impacto ambiental**

- Nutrientes (N y P): favorecen la eutrofización de cuerpos de agua
- Materia orgánica residual: Consume oxígeno en ríos y lagos, afectando fauna acuática
- Infiltración en suelos volcánicos: Como en el Pedregal, puede transportar contaminantes rápidamente hacia acuíferos

#### **Normativa**

- En México, la NOM-001-SEMARNAT-2021 exige límites de descarga mucho más estrictos que los que una fosa séptica puede cumplir.
- Por ello, se requieren sistemas complementarios como reactores anaerobios, humedales artificiales o plantas de tratamiento convencionales

“Si bien las fosas sépticas pueden ser mejoradas en su capacidad de tratamiento mediante la aplicación de microorganismos eficientes (EM, por sus siglas en inglés: “Efficient Microorganisms”), este proceso requiere la adecuada localización de las unidades, la formulación del consorcio probiótico y la implementación de un programa sistemático de inoculación” (Figueroa-Barrios et al., 2025; Kalaiselvi et al., 2025). El entubamiento y la conducción de las aguas residuales a una PTAR externa al plantel permitirían recuperar las aguas residuales tratadas en carros tanque que pudieran usarse para riego de áreas verdes de la UNAM e incluso apoyar a parques públicos.

### 1.3. Evaluación del marco legal y normativo aplicable y los objetivos de calidad del efluente

El CCH-SUR, inaugurado en 1972, fue construido en una época previa al desarrollo de la normatividad ambiental vigente. Por ello, su infraestructura sanitaria se basó en fosas sépticas, consideradas suficientes en ese contexto histórico, pero hoy resultan obsoletas frente a los criterios estrictos de 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 (Tabla 2), lo que hace necesaria una reingeniería del sistema de saneamiento para garantizar sustentabilidad y cumplimiento normativo.

**Tabla 2.** Límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales, que sean vertidos en cuerpos de agua propiedad de la nación

Parámetro	Ríos/Arroyos (P.M./P.D./V.I.)	Lagos/Embalses	Zonas Marinas	Riego Áreas Verdes	Infiltración	Cárstico
Temperatura (°C)	40 / 40 / 45	40 / 40 / 45	40 / 40 / 45	40 / 40 / 45	40 / 40 / 45	40 / 40 / 45
Grasas y Aceites (mg/L)	15 / 20 / 25	15 / 20 / 25	15 / 20 / 25	15 / 20 / 25	15 / 20 / 25	15 / 20 / 25
Sólidos Suspendidos Totales	75 / 100 / 150	75 / 100 / 150	75 / 100 / 150	75 / 100 / 150	75 / 100 / 150	75 / 100 / 150
DQO (mg/L)	150 / 200 / 250	150 / 200 / 250	150 / 200 / 250	150 / 200 / 250	150 / 200 / 250	150 / 200 / 250
Nitrógeno Total (mg/L)	40 / 50 / 60	40 / 50 / 60	40 / 50 / 60	40 / 50 / 60	40 / 50 / 60	40 / 50 / 60
Fósforo Total (mg/L)	10 / 15 / 20	10 / 15 / 20	10 / 15 / 20	10 / 15 / 20	10 / 15 / 20	10 / 15 / 20
Huevos de Helmintos	≤ 1 huevo/L	≤ 1 huevo/L	≤ 1 huevo/L	≤ 1 huevo/L	≤ 1 huevo/L	≤ 1 huevo/L
E. coli (NMP/100 ml)	1000 / 2000 / 4000	1000 / 2000 / 4000	1000 / 2000 / 4000	1000 / 2000 / 4000	1000 / 2000 / 4000	1000 / 2000 / 4000
Enterococos fecales	200 / 400 / 800	200 / 400 / 800	200 / 400 / 800	200 / 400 / 800	200 / 400 / 800	200 / 400 / 800
pH	6–9	6–9	6–9	6–9	6–9	6–9
Color verdadero (436–620nm)	≤ 75 unidades	≤ 75	≤ 75	≤ 75	≤ 75	≤ 75
Toxicidad aguda (UT)	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1

---

El CCH-Sur, está obligado a cumplir con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021:

Si el CCH-Sur no cumple con la NOM-001-SEMARNAT-2021, puede enfrentar sanciones administrativas y penales como la clausura temporal de instalaciones y riesgos ambientales y sanitarios graves. La norma es obligatoria para cualquier descarga de aguas residuales en México, incluyendo instituciones públicas. El incumplimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 por parte de instituciones públicas como el Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur (CCH-Sur) representa una violación directa a diversas leyes mexicanas que regulan la protección ambiental, el uso del agua y la observancia de normas técnicas. A continuación, se detallan las principales leyes involucradas:

### **Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)**

**Artículo 88:** Establece que las descargas de aguas residuales deben cumplir con las normas oficiales mexicanas.

**Artículo 117:** Obliga a prevenir y controlar la contaminación del agua.

**Artículo 120:** Faculta a las autoridades para imponer sanciones por incumplimiento.

**Implicación:** El CCH-Sur estaría violando disposiciones que protegen el equilibrio ecológico y la calidad del agua, lo que puede derivar en sanciones administrativas, clausura de instalaciones y responsabilidad ambiental.

### **Ley General de Aguas (LGA, 2025)**

**Artículo 6:** La aplicación de esta Ley se regirá por los siguientes principios: **V. Prevención:** Conjunto de medidas para evitar que el daño ambiental de los recursos hídricos se verifique; **VI. Precaución:** Adopción de medidas eficaces para impedir la degradación del agua destinada para consumo humano y doméstico cuando exista peligro de daño grave o irreversible, aún a falta de certeza científica; **VII. Progresividad y no regresividad:** Avance paulatino, efectivo y constante en el cumplimiento del derecho humano al agua, al tiempo que evita el retroceso en el nivel alcanzado del goce de los derechos humanos asociados al agua; **VIII. Sustentabilidad:** Acciones de protección, restauración y conservación que garanticen el derecho de las generaciones presentes y futuras al acceso al agua de calidad y en cantidad suficiente; **IX. In dubio pro aqua:** En caso de duda o contradicción, prevalecerá el criterio que beneficie en mayor medida el derecho humano al agua, y **X. Universalidad:** Todas las personas sin excepción alguna son titulares del derecho humano al agua independientemente de su origen, nacionalidad, etnia, género, religión o cualquier otra condición.

**Artículo 17:** Los municipios, demarcaciones territoriales de la Ciudad de México, localidades, pueblos y comunidades de las entidades federativas deberán contar con sistemas de saneamiento adecuados a las condiciones socioeconómicas e hidrológicas, que garanticen la recolección, conducción, tratamiento, disposición o reutilización de las aguas residuales, y la eliminación de excretas, que cumplan con las disposiciones jurídicas relacionadas con el derecho a un medio ambiente sano.

**Implicación:** La infiltración de aguas residuales sin tratamiento adecuado en el Pedregal de Zacatépetl puede constituir una infracción grave, al tratarse de un ecosistema volcánico y acuífero sensible.

### **Ley de Infraestructura de la Calidad**

**Artículo 4:** Las normas oficiales mexicanas son de observancia obligatoria.

**Artículo 47:** El incumplimiento puede derivar en multas, suspensión de actividades y pérdida de permisos.

**Implicación:** El CCH-Sur, como institución pública, está obligado a cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-2021. Su incumplimiento representa una falta técnica y administrativa.

### **Código Penal Federal (en casos graves)**

**Artículo 420 bis:** Establece sanciones penales por contaminación grave de cuerpos de agua.

**Implicación:** Si se demuestra daño ambiental irreversible, podría configurarse responsabilidad penal contra quienes autoricen o perpetúen el sistema actual sin tratamiento.

#### 1.4. Análisis FODA para identificar fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del proyecto

El FODA (también conocido como SWOT en inglés) es una herramienta de análisis estratégico que permite evaluar la situación de un proyecto, organización o persona a partir de cuatro dimensiones clave (Figura 4). El análisis FODA fue desarrollado por Albert S. Humphrey en la década de 1960 en el Instituto de Investigación de Stanford (hoy SRI International). Ingeniero químico y consultor de gestión, con formación en la Universidad de Illinois y Harvard. En el Stanford Research Institute (SRI) dirigió un proyecto financiado por empresas del "Fortune 500" para entender por qué fallaban los planes corporativos de largo plazo (Tabla 3).

- **Fortalezas:** Capacidades internas, recursos y ventajas competitivas que favorecen el éxito.
- **Oportunidades:** Factores externos positivos que pueden aprovecharse para crecer o mejorar.
- **Debilidades:** Limitaciones internas, carencias o aspectos que dificultan el desempeño.
- **Amenazas:** Factores externos negativos que pueden poner en riesgo los objetivos.



**Figura 4.** Modelo FODA desarrollado por Albert S. Humphrey "Standfor Research Instiute" (1960)

**Tabla 3.** Análisis FODA para demostrar la implementación de una PTAR tipo reactor anaerobio-humedal artificialen el CCH-Sur en los terrenos del Jardín Botánico de la UNAM, México

<b>Fortalezas</b> Solución sostenible (anaerobio + humedal). • Cumplimiento NOM-001-SEMARNAT-2021 • Ubicación estratégica en Jardín Botánico • Valor académico y social	<b>Debilidades</b> • Falta de datos precisos sobre fosas • Limitaciones de espacio/logística • Inversión inicial elevada • Dependencia de mantenimiento adecuado • Posible resistencia institucional
<b>Oportunidades</b> • Educación ambiental y laboratorio vivo • Generación de tesis e investigación aplicada	<b>Amenazas</b> • Riesgo de sanciones por incumplimiento normativo

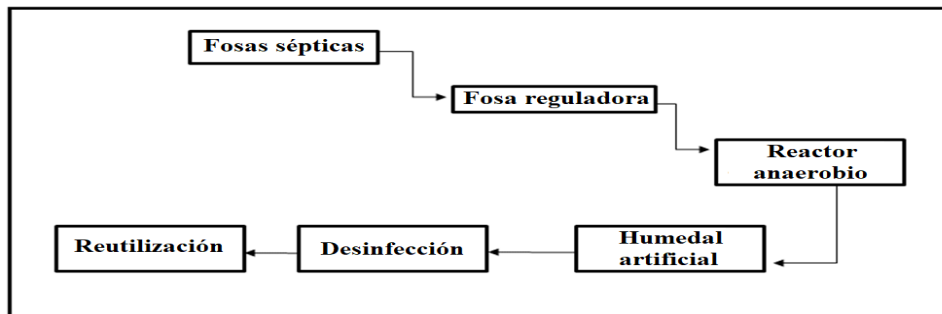
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Replicabilidad en otros planteles</li> <li>• Acceso a financiamiento externo (Fundación Slim)</li> <li>• Restauración ecológica del Pedregal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación de acuíferos y ecosistemas</li> <li>• Presencia de personas conflictivas o actores opositores, capaces de difundir rumores, generar resistencia o sabotear iniciativas</li> <li>• Cambios normativos futuros</li> <li>• Impactos climáticos extremos</li> </ul>
--	--

El proyecto es factible de acuerdo con la ingeniería de perfil.

## 2. Segundo desarrollo: Ingeniería Conceptual

### Elaboración de un diagrama de bloques que represente el flujo general del sistema

En la Figura 5 se presenta el diagrama de bloques del sistema propuesto.



**Figura 5.** Diagrama de bloques o de ingeniería conceptual

## 3. Tercer desarrollo: Ingeniería Básica

### Diseño de diagramas de flujo de proceso (DFP), balances hidráulicos

#### Dimensionamiento de equipos

#### Dimensionamiento de un desarenador

##### Datos de diseño

- Caudal (**Q**): 5.95 L/s = 0.00595 m<sup>3</sup>/s
- Tiempo de residencia hidráulica (**TRH**): 30–60 s (tomando 40 s como valor medio)
- Velocidad de sedimentación de arena (**Vs**): ≈ 0.03 m/s (arena de 0.2–0.25 mm)
- Velocidad del flujo en canal: 0.25 m/s (para evitar sedimentación de lodos)
- Profundidad útil (h): 0.6–0.8 m (tomemos 0.7 m)
- Relación largo/ancho: 15:1 a 20:1

#### Cálculos

##### Volumen requerido

$$V = Q * TRH \quad (1)$$

$$V = (0.00595 \text{ m}^3/\text{s}) * (40.0 \text{ s}) = 0.238 \text{ m}^3$$

##### Área superficial

$$A = Q / Vs \quad (2)$$

$$A = (0.00595 \text{ m}^3/\text{s}) / 0.03 \text{ m/s} = 0.198 \text{ m}^2$$

#### Dimensiones del canal

Se supone

$$\begin{aligned}
 B &= \text{ancho} = 0.3\text{m} \\
 H &= \text{profundidad} = 0.7\text{m} \\
 L &= \text{Longitud} = V/(b \cdot h) \\
 L &= (0.238 \text{ m}^3)/(0.3 \text{ m} \cdot 0.7\text{m}) = 1.13 \text{ m}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

### Propuesta de diseño

Canal rectangular de:

Ancho: 0.30 m

Profundidad: 0.70 m

Largo: ~1.2 m

### Velocidad de flujo

$$\begin{aligned}
 v &= Q/(b \cdot h) \\
 v &= (0.00595 \text{ m}^3/\text{s})/(0.3\text{m} \cdot 0.7\text{m}) = 0.028 \text{ m/s}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

→ Es demasiado baja, por lo que conviene reducir la sección para alcanzar ~0.25 m/s

### Ajuste de sección

Si se busca:  $v = 0.25\text{m/s}$

$A = Q/v$

$$A = (0.00595 \text{ m}^3/\text{s})/(0.25\text{m/s}) = 0.024\text{m}^2
 \tag{5}$$

### Puede elegirse:

Ancho = 0.15 m

Profundidad = 0.16 m

Largo = 10–12 m (para cumplir relación largo/ancho y TRH)

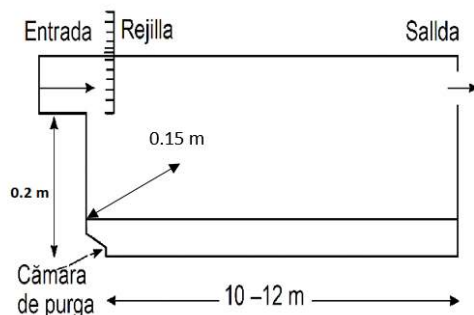
### Recomendación final

Diseñar dos canales paralelos (operación alternada) (Figura 6)

Largo ≈ 10–12 m, ancho ≈ 0.15 m, profundidad ≈ 0.16–0.20 m

Incluir rejilla de entrada y cámara de purga de arenas

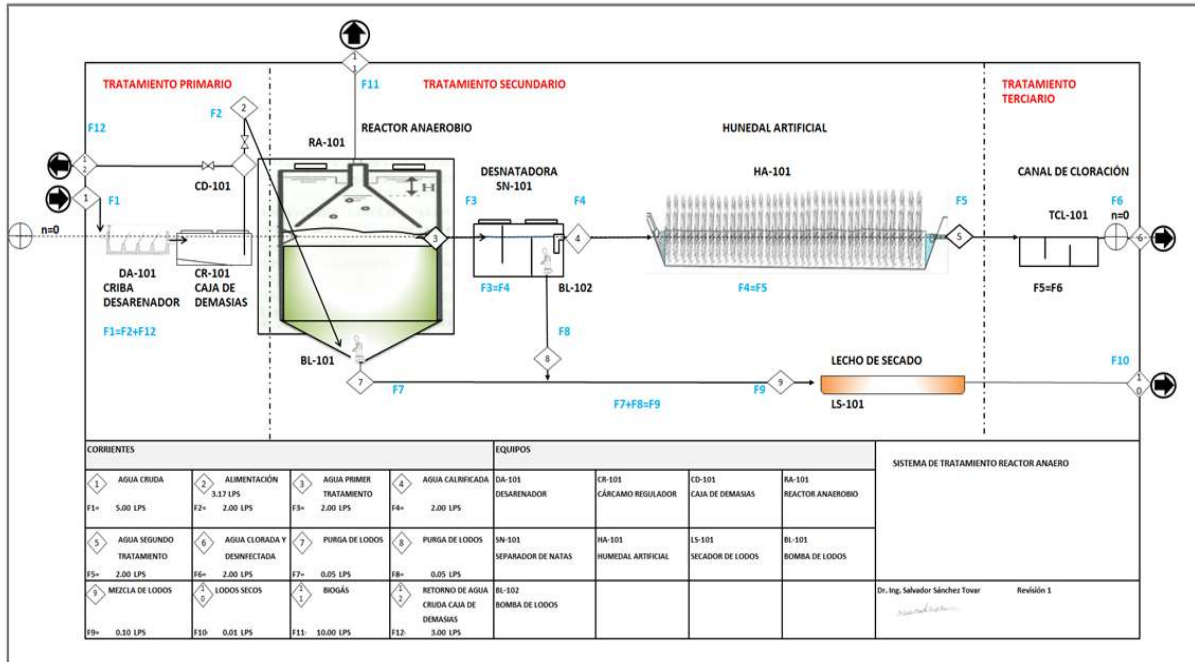
Ajustar dimensiones según espacio disponible en la PTAR y caudal máximo horario



**Figura 6.** Dimensiones del desarenador con rejilla criba

La Figura 7 muestra el diagrama de flujo y proceso (DFP) para un sistema Reactor Anaerobio-Humedal Artificial Subsuperficial para el tratamiento de 300,000 L/d de aguas residuales en el CCH-Sur.

Ahora seguirá la descripción del dimensionamiento del reactor anaerobio.



**Figura 7.** Diagrama de flujo y proceso para un Reactor Anaerobio-Humedal Artificial Subsuperficial para tratar 300,000L de aguas residuales/den el CCH-Sur (lps: L/s)

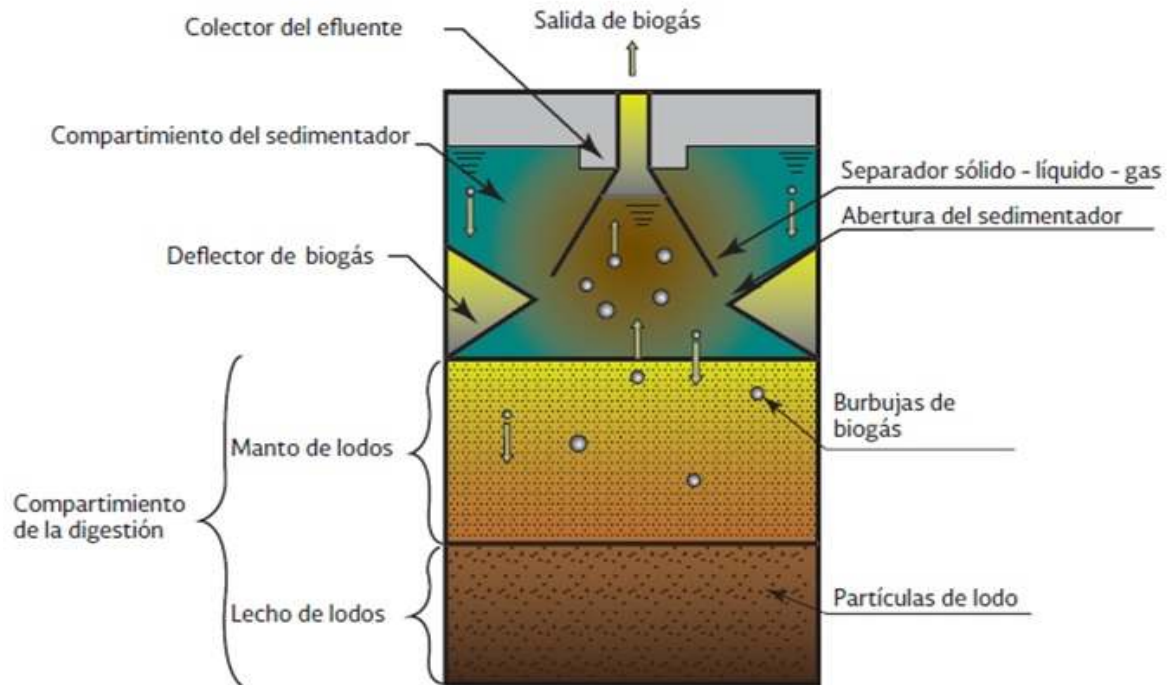
**Dimensionamiento de un Reactor Anaerobio de Lecho de Lodos de Flujo Ascendente, RALLFA (Figuras 8a,b)**

**Datos de diseño**

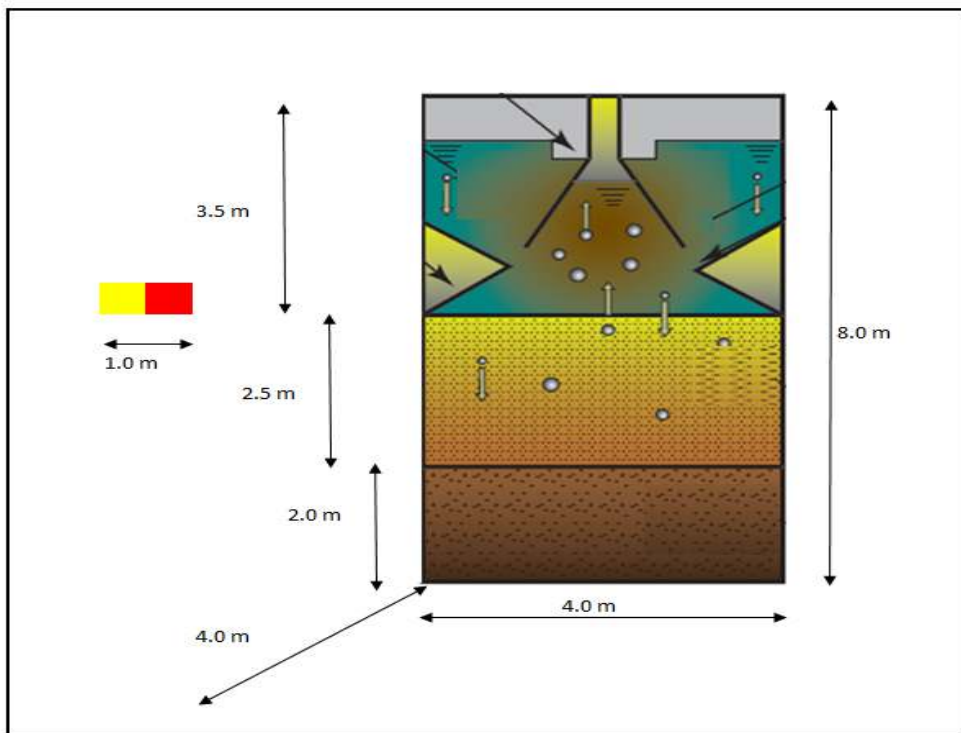
- Caudal (**Q**) = 21.43 m<sup>3</sup>/h
- Tiempo de residencia hidráulica (**TRH**): 6 horas
- Tiempo de operación (**TOP**) = (7.00 a.m. a 9.00 p.m.) = 14h
- Tiempo de retención de sólidos (**TRS**) = 20 días
- Velocidad ascensional (**Va**): ≈ 0.7 m/h
- Altura del reactor (**H**) = 5.0 m
- Remoción esperada (**RE**) = 70%; 0.7

Parámetros de entrada (influyente <sup>13</sup> )	Parámetros de salida (efluente)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DQO</b> = 600.0 mg/L; 0.6 kg/m<sup>3</sup></li> <li>• <b>DBO (Refractaria)</b> = 300 mg/L</li> <li>• <b>NTK</b> = 55.0 mg/L</li> <li>• Fósforo, <b>P</b> = 12.0 mg/L</li> <li>• Sólidos suspendidos totales (<b>SST</b>) = 345 mg/L</li> <li>• Temperatura de operación: Mesofílica (≈25.5 °C)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DQO</b> = 180.0 mg/L; 0.18 kg/m<sup>3</sup></li> <li>• <b>DBO (Refractaria)</b> = 90 mg/L</li> <li>• <b>NTK</b> = 16.5.0 mg/L</li> <li>• Fósforo, <b>P</b> = 3.6.0 mg/L</li> <li>• Sólidos suspendidos totales (<b>SST</b>) = 103.5 mg/L</li> <li>• Temperatura de operación: mesofílico (≈25.5 °C)</li> </ul>

<sup>13</sup> Del latín *fluere*, fluir: Influyente, fluido entrando a un sistema; efluente, fluido saliendo de un sistema; afluyente, corriente secundaria de un fluido uniéndose a otra (i.e., afluyente de un río principal, un afluyente secundario)



**Figura 8a.** Partes de un Reactor Anaerobio de Lecho de Lodos de Flujo Ascendente o RALLFA (Manual del Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento - CONAGUA, 2007)



**Figura 8b.** Dimensiones de un Reactor Anaerobio de Lecho de Lodos de Flujo Ascendente o RALLFA (Manual del Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento - CONAGUA, 2007)

### Relación C: N: P

DQO = 600 mg/L → equivalente a  $\approx 0.6$  g/L de carbono orgánico

NTK = 55 mg/L, P = 12 mg/L.

**C: N: P:** 100-9-2 (Operable)

### Alcalinidad mínima

Con DQO = 600 mg/L:

$$\text{Alcalinidad} \geq \frac{600 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{0.5} = 1,200.00 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{CaCO}_3. \quad (6)$$

Pero para seguridad y estabilidad mesofílica, se recomienda  $\geq 1500$  mg/L como  $\text{CaCO}_3$

### Volumen del reactor

TRH = 6 h

$$V = Q * \text{TRH} \quad (7)$$

$$V = Q * \text{TRH} = (21.43 \text{ m}^3/\text{h}) * (6\text{h}) = 128.6 \text{ m}^3$$

### Área superficial requerida (As)

( $V_a = 0.7$  m/h)

$$A_s = Q/V_a \quad (8)$$

$$A_s = Q/V_a = (21.43 \text{ m}^3/\text{h}) / (0.7 \text{ m/h}) = 30.6 \text{ m}^2$$

### Altura hidráulica del reactor

$$H = V/A_s \quad (9)$$

$$H = V/A_s = 128.6 \text{ m}^3 / 30.6 \text{ m}^2 = 4.2 \text{ m}$$

La altura calculada es  $\approx 4.2$  m, muy cercana a la propuesta de 5.0 m (lo cual da margen de seguridad y estabilidad hidráulica), los 0.8 m restante corresponden a la cámara de separación de biogás y bien pudiera escalarse a 5.5 m.

### Carga másica

Concentración influente: 600 mg/L = 0.6 kg/m<sup>3</sup>

Carga másica en kgDQO influente/d (**CM**):

$$CM = \text{Caudal} * \text{concentración} * \text{tiempo} = Q * \text{DQO} * \text{TOP} \quad (10)$$

$$CM = (21.43 \text{ m}^3/\text{h}) * (0.6 \text{ kg DQO/m}^3) * (14.0 \text{ h}) = 180.01 \text{ kg DQO/d}$$

### Carga volumétrica

Carga volumétrica (**CV**) de kg DQO influente/m<sup>3</sup> reactor-día:

$$CV = CM / V \quad (11)$$

$$CV = (180.01 \text{ kg DQO/d}) / (128.6 \text{ m}^3) = 1.41 \text{ kg DQO influente/m}^3 \text{ reactor-día}$$

La carga menor a 2.0 garantiza un sistema operable

### Producción de biogás

Si se supone 70% de remoción de DQO:

$$\begin{aligned} \text{DQO (Removida)} &= \text{CM} * \text{RE} & (12) \\ \text{DQO (Removida)} &= (180.01 \text{ kg DQO/d}) * (0.7) = 126.007 \text{ kg DQO/d} \\ \text{Rendimiento teórico de metano: } &\approx 0.35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO removido} \end{aligned}$$

Producción estimada de metano (**PEM**) = (126 kg DQO/d) × (0.35 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO removido)  
 PEM ≈ 44 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/día → ≈ 68 m<sup>3</sup> biogás/día (considerando 65% CH<sub>4</sub>)

### Energía y potencia de metano

El metano tiene un poder calorífico inferior (**PCI**) de ≈9.5 kWh/m<sup>3</sup>  
 Energía de metano (**EMT**) = PCI \* PEM & (13)  
 EMT = (9.5 kWh/m<sup>3</sup>)\*(44.0 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/d) = 418 kWh/día de energía

### Contexto práctico

- Equivalencia doméstica: 418 kWh/día cubriría el consumo eléctrico de unas 40 viviendas promedio en México (≈10 kWh/día por hogar)
- Aplicación industrial: Suficiente para alimentar bombas, calefacción del reactor o incluso generar excedentes para iluminación y equipos auxiliares
- Comparación: Digestores comunitarios de tamaño similar suelen producir entre 300–500 kW/día

### Conclusión

- Caudal corregido: 21.4 m<sup>3</sup>/h
- Volumen útil: 129 m<sup>3</sup>
- Área superficial: 30.6 m<sup>2</sup>
- Altura: 4.2 m (diseñada en 6 m, aceptable)
- Carga orgánica: 1.4 kg DQO/(m<sup>3</sup>·d) → rango seguro, baja carga

La producción de biogás estimada en el reactor anaerobio se fundamenta en el balance de masa de la demanda química de oxígeno (DQO) removida y en la estequiometría de la degradación anaerobia. Con una carga influente de aproximadamente 180 kg DQO/día y una eficiencia de remoción del 70%, se obtiene una conversión de 126 kg DQO/día. Considerando un rendimiento teórico de 0.35 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO removido, la producción de metano se estima en 44 m<sup>3</sup>/día, equivalente a un volumen total de biogás cercano a 68 m<sup>3</sup>/día (65% CH<sub>4</sub>). Este valor se encuentra dentro de los rangos reportados en la literatura para digestores mesofílicos de baja carga (1–2 kg DQO/m<sup>3</sup>·d), confirmando la coherencia del diseño y la estabilidad operacional (APHA-AWWA-WEF, 2017; Metcalf y Eddy, 2014; Speece, 1996). Asimismo, la energía potencial asociada con el metano producido alcanza aproximadamente 418 kWh/día, lo que refuerza la viabilidad del sistema no solamente como opción de tratamiento de aguas residuales, sino también como fuente renovable de energía. En la Tabla 4 se presentan los parámetros de diseño del RALLFA propuesto.

**Tabla 4.** Parámetros de diseño, operación y producción de biogás en el Reactor Anaerobio de Lecho de Lodos de Flujo Ascendente, RALLFA

Parámetro	Valor calculado	Referencia técnica
Caudal de operación	300 m <sup>3</sup> /día (≈21.4 m <sup>3</sup> /h en 14 h)	Flujo real de entrada
Tiempo de residencia hidráulica	6 h	Metcalf & Eddy, 2014
Volumen útil del reactor	≈129 m <sup>3</sup>	Cálculo con TRH
Área superficial	≈30.6 m <sup>2</sup>	Va = 0.7 m/h
Altura calculada	≈4.2 m	Diseño propuesto: 6 m
DQO influente	600 mg/L (0.6 kg/m <sup>3</sup> )	APHA-AWWA-WEF, 2017

**Tabla 4.** Parámetros de diseño, operación y producción de biogás en el Reactor Anaerobio de Lecho de Lodos de Flujo Ascendente, RALLFA

Parámetro	Valor calculado	Referencia técnica
DQO total influente	180 kg/día	Balance de masa
Carga orgánica volumétrica	≈1.4 kg DQO/(m <sup>3</sup> ·d)	Speece, 1996
Remoción estimada de DQO	70% → 126 kg/día	Rango típico digestión
Producción de metano	≈44 m <sup>3</sup> /día	0.35 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg DQO removido
Producción total de biogás	≈68 m <sup>3</sup> /día (65% CH <sub>4</sub> )	Conversión típica
Energía potencial	≈418 kWh/día	PCI CH <sub>4</sub> ≈ 9.5 kWh/m <sup>3</sup>
Relación C:N:P	100:9:2	Nutrientes balanceados
Alcalinidad mínima	≥1500 mg/L CaCO <sub>3</sub>	Estabilidad mesofílica

### Nota metodológica

Los cálculos se basan en la estequiometría de la digestión o degradación anaerobia considerando un rendimiento de **0.35 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO removido** y una remoción del 70% de la carga orgánica.

Los valores se compararon con rangos reportados en la literatura técnica (APHA-AWWA-WEF, 2017; Metcalf y Eddy, 2014; Speece, 1996), confirmando la coherencia y estabilidad del diseño. Las Figuras 8a,b muestran las partes de este sistema.

Siguiendo el diagrama de bloques de la Figura 5 y el DFP de la Figura 7 sobre las ingenierías conceptual y básica, a continuación se presenta el diseño del sistema de humedales artificiales subsuperficiales que purificarán el agua tratada anaerobiamente en el RALLFA.

### Dimensionamiento de un humedal artificial subsuperficial por el método de Reed (1993)

#### Parámetros de diseño

- Caudal (**Q**) = 300 m<sup>3</sup>/día
- Concentración de entrada (C<sub>i</sub>): DQO = 180 mg/L
- Meta de salida (C<sub>e</sub>): ≈ 90 mg/L (50% reducción adicional)
- Constante de remoción (k<sub>20</sub>): 0.35 m/día (valor típico para humedales horizontales subsuperficiales)

Parámetros de entrada (influyente)	Parámetros de salida (efluente)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DQO</b> = 180.0 mg/L; 0.18 kg/m<sup>3</sup></li> <li>• <b>DBO (Refractaria)</b> = 90 mg/L</li> <li>• <b>NTK</b> = 16.5.0 mg/L</li> <li>• Fósforo, <b>P</b>= 3.6.0 mg/L</li> <li>• Sólidos suspendidos totales (<b>SST</b>)= 103.5 mg/L</li> <li>• Temperatura de operación: Mesofílica (≈25.5 °C)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DQO</b> = 90.0 mg/L; 0.90 kg/m<sup>3</sup></li> <li>• <b>DBO (Refractaria)</b> = 45 mg/L</li> <li>• <b>NTK</b> = 8.30 mg/L</li> <li>• Fósforo, <b>P</b>= 1.50 mg/L</li> <li>• Sólidos suspendidos totales (<b>SST</b>)= 50.0 mg/L</li> <li>• Temperatura de operación: Mesofílica (≈25.5 °C)</li> </ul>

### Cálculos

#### Fórmula de Reed (1993)

El área superficial se calcula como:

$$As = \frac{Q}{Kt} * \ln \left( \frac{Ci}{Ce} \right) \quad (14)$$

donde:

**Q** = caudal (m<sup>3</sup>/día)= 300.00 m<sup>3</sup>/d

**Kt** = constante de remoción ajustada por temperatura (m/día)= 0.35 m/d

**Ci** = concentración de entrada (mg/L)= 180.0 mg **DQO** /L

**Ce** = concentración de salida deseada (mg/L)= 90.0 mg **DQO** /L

**Kt**: Ajuste por temperatura **T= (25.5 °C)**

$$Kt = K_{20} * (1.06)^{(T-20)} \quad (15)$$

$$Kt = 0.35 * (1.06)^{5.5} = 0.48 \text{ m/d}$$

$$As = 300.00 \text{ m}^3/\text{d} / (0.48 \text{ m/d}) * \ln(180.0 \text{ mg DQO /L} / 90.0 \text{ mg DQO /L})$$

$$As = 433.0 \text{ m}^2$$

### Corrección por porosidad de la grava

El método de Reed supone que todo el volumen es hidráulico, pero en realidad solamente una fracción está disponible para el agua:

Porosidad efectiva de grava de 1.0" (**€**)  $\approx 0.37$

Profundidad efectiva (h): 0.6 m

$$\text{Área corregida. } \mathbf{Ac} \text{ (m}^2\text{)} = \text{Área calculada. } \mathbf{As} \text{ (m}^2\text{)} / (\mathbf{€}) \quad (16)$$

$$\mathbf{Ac} = \mathbf{As} = 433.0 \text{ m}^2 / 0.37 = 1,170.00 \text{ m}^2$$

### Dimensiones sugeridas

Largo: 40.0 m

Ancho: 30.0 m

Profundidad: 0.6 m

Medio filtrante: grava de 1.0" con porosidad  $\approx 0.37$

Estas dimensiones pueden dividirse en 3 celdas de 10.0 m de ancho para facilitar el flujo y reducir las zonas hidráulicamente muertas

Largo: 40.0 m

Ancho: 10.0 m

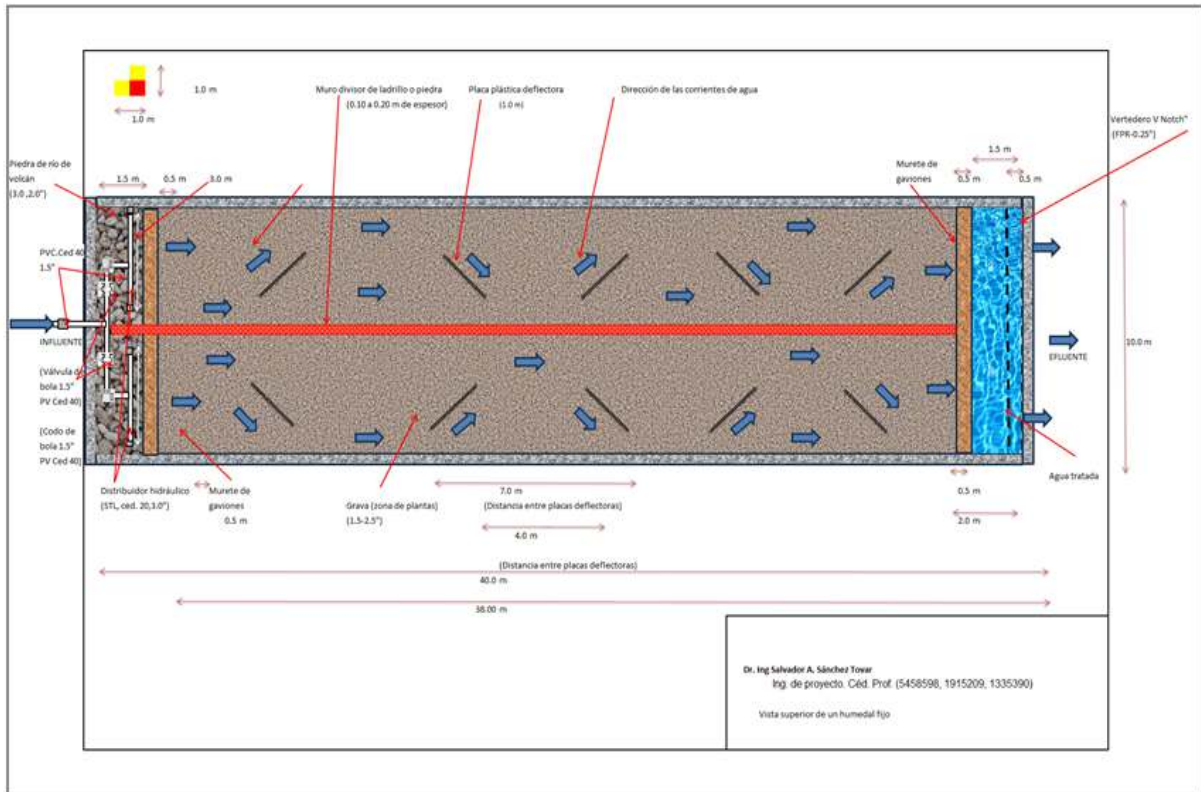
Profundidad: 0.6 m

Medio filtrante: grava de 1.0" con porosidad  $\approx 0.37$

En la Figura 9 se muestra el sistema propuesto para la parte correspondiente al humedal artificial.

Y, en la Tabla 5 se presentan los parámetros de diseño, operación y producción del humedal artificial propuesto, que es de flujo subsuperficial horizontal.

Por último se propone un sistema de desinfección que permita el manejo seguro de esta agua tratada cumpliendo con la norma de reutilización como agua de riego de áreas verdes.



**Figura 9.** Diseño de humedal artificial propuesto

**Tabla 5.** Parámetros de diseño, operación y producción del humedal artificial propuesto

Parámetro	Valor	Comentario
Caudal de operación	300 m <sup>3</sup> /día	Igual al efluente del RALLFA
Concentración de entrada (Ci)	180 mg/L DQO	Después del RALLFA
Concentración de salida (Ce)	90 mg/L DQO	Meta de diseño
Constante de remoción (kT)	0.48 m/día	Ajustada a 25.5°C
Área teórica (Reed)	≈430 m <sup>2</sup>	Sin corrección
Porosidad efectiva (grava 1")	≈0.37	Ajuste por medio filtrante
Área corregida (Reed + porosidad)	≈1170 m <sup>2</sup>	Diseño realista
Volumen geométrico	≈700 m <sup>3</sup>	Área × profundidad (0.6 m)
Configuración	3 celdas de 10 m × 30 m cada una	Modular, facilita operación
Medio filtrante	Grava de 25 mm (1")	Buen drenaje y soporte vegetal
Vegetación	<i>Typha latifolia</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Scirpus spp.</i>	Plantas emergentes
Remoción esperada de DQO	25–40% adicional	Efluente final ≈110–135 mg/L
Remoción de NTK	20–35%	Efluente final ≈11–13 mg/L
Remoción de fósforo	15–25%	Efluente final ≈2.7–3.0 mg/L
Remoción de SST	50–70%	Efluente final ≈30–50 mg/L

## Dimensionamiento de un sistema de desinfección

### Ajuste de caudal para desinfección

Volumen diario: 300 m<sup>3</sup>/d

Tiempo de operación: 14 h/d

$Q = \text{Caudal m}^3/\text{h} = (300 \text{ m}^3/\text{d}) / (14\text{h}/\text{d}) = 21.43 \text{ m}^3/\text{d} ; 5.95 \text{ L/s}$

$TC = \text{Tiempo de contacto requerido: } 30 \text{ min} = 1800 \text{ s}$

Volumen de cámara de contacto:

$Vc = Q \cdot TC = (5.95 \text{ L/s}) \cdot (1,800 \text{ s}) = 10.7 \text{ m}^3$

Diseño de cámara de contacto

- Volumen útil:  $\approx 11 \text{ m}^3$
- Configuración: tanque rectangular o canal serpenteante con deflectores (*baffles* en inglés)
- Velocidad de flujo:  $< 0.3 \text{ m/s}$  para evitar cortocircuitos
- Dosificación de NaOCl: 5–10 mg/L, ajustada según demanda de cloro
- Cloro residual libre esperado: 0.5–1.0 mg/L

La Tabla 6 presenta la información condensada de ambos sistemas.

**Tabla 6.** Concentrado de parámetros de diseño, operación y producción de la PTAR Reactor-Humedal Artificial Subsuperficial propuesta

Unidad	Parámetros principales	Valores de diseño	Resultados esperados
<b>Desarenador</b>	Caudal: 5.95 L/s ( $\approx 21.4 \text{ m}^3/\text{h}$ en 14 h) TRH: 30–60 s Velocidad sedimentación arena: 0.03 m/s	Canal rectangular: Ancho 0.15 m, profundidad 0.16–0.20 m, largo 10–12 m Dos canales paralelos	Remoción de arenas y sólidos gruesos, protección del RAFA
<b>RALLFA (Reactor Anaerobio de Lecho de Lodos de Flujo Ascendente)</b>	Caudal: 21.4 m <sup>3</sup> /h TRH: 6 h Volumen útil: $\approx 129 \text{ m}^3$ Área superficial: $\approx 30.6 \text{ m}^2$ Altura hidráulica: 4.2–5.0 m	Carga orgánica: 1.4 kg DQO/(m <sup>3</sup> ·d) Producción biogás: $\approx 68 \text{ m}^3/\text{día}$ (65% CH <sub>4</sub> )	Remoción $\approx 70\%$ DQO Producción de energía $\approx 418 \text{ kWh/día}$
<b>HASSH (Humedal Artificial Sub-Superficial Horizontal) (Reed, 1993)</b>	Caudal: 300 m <sup>3</sup> /día (21.4 m <sup>3</sup> /h en 14 h) Ci: DQO 180 mg/L Ce: DQO 90 mg/L k20: 0.35 m/día (ajustado a 0.48 m/día por T=25.5°C)	Área superficial: $\approx 433 \text{ m}^2$ Medio: grava 1.5–2.5" Longitud efectiva: 38 m, ancho 10 m	Reducción adicional 50% DQO NTK $\approx 8.3 \text{ mg/L}$ P $\approx 1.5 \text{ mg/L}$ SST $\approx 50 \text{ mg/L}$
<b>Desinfección con hipoclorito de sodio</b>	Caudal: 21.4 m <sup>3</sup> /h (5.95 L/s) Tiempo de contacto: 30 min pH óptimo: 6.5–7.5	Volumen cámara: $\approx 11 \text{ m}^3$ Dosificación: 5–10 mg/L NaOCl Cloro residual libre: 0.5–1.0 mg/L	Inactivación de bacterias, virus y helmintos Cumplimiento NOM-001 en coliformes fecales

## Conclusión técnica

El tren de tratamiento **Desarenador** → **RALLFA** → **Humedal** → **HASSH** → **Cloración** asegura:

- Cumplimiento integral con la **NOM-001-SEMARNAT-2021**
- Producción de biogás como fuente renovable de energía
- Agua tratada segura para infiltración y posible reutilización para riego
- Valor educativo y replicabilidad en otros planteles de la UNAM

## Comentarios finales

### Disciplinas de ingeniería de detalle necesarias para el proyecto

El proyecto requiere un equipo multidisciplinario donde las ingeniería civil e hidráulica llevan a cabo el esfuerzo estructural, las ingenierías química y ambiental aseguran la calidad del proceso y las ingenierías eléctrica/mecánica/control garantizan su operación confiable. Todo ello bajo un marco de costos y gestión que permita su construcción en el área colindante del CCH Sur con el Jardín Botánico con respeto al Pedregal de Zacatépetl. Los costos/administración consolidan la viabilidad económica. Todo ello bajo un principio de **respeto al Pedregal, al agua del subsuelo, a las personas que habitan la zona y a la sustentabilidad académica.**

A continuación se presenta, en la Tabla 7, un organigrama de estas disciplinas con sus respectivas responsabilidades para garantizar el éxito de esta tarea tan importante y vital.

**Tabla 7.** Organigrama de disciplinas de ingeniería de detalle necesarias para el desarrollo del proyecto

Disciplina	Responsabilidades principales
<b>Ingeniería Civil</b>	Diseño de cimentaciones y estructuras en suelo pedregoso. Construcción de muros, canales y cámara de contacto. Obras de nivelación y contención con gaviones
<b>Ingeniería Hidráulica / Sanitaria</b>	Dimensionamiento de unidades de tratamiento (desarenador, RALLFA, humedal, cloración). Diseño de tuberías, válvulas y sistemas de distribución. Balances hidráulicos y control de tiempos de residencia y retención
<b>Ingeniería Ambiental</b>	Evaluación de impacto ambiental. Monitoreo de calidad del agua (DQO, DBO, NTK, fósforo, coliformes). Cumplimiento con la NOM-001-SEMARNAT-2021 y otras legislaciones aplicables
<b>Ingeniería Química / Bioquímica</b>	Modelado de procesos anaerobios y cinética de remoción en humedales. Balance de masa para producción de biogás. Dosificación y control de hipoclorito en la desinfección
<b>Ingeniería Mecánica</b>	Selección y diseño de bombas, agitadores y equipos auxiliares. Mantenimiento de sistemas móviles y accesorios
<b>Ingeniería Eléctrica</b>	Instalación de sistemas eléctricos para bombas, sensores y lámparas UV (si se complementa). Integración de energía renovable a partir del biogás para complementar sistemas fotovoltaicos para el día
<b>Ingeniería de Control y Automatización</b>	Instrumentación para medir caudal, pH, cloro residual y turbidez. Sistemas SCADA/PLC para operación y monitoreo remoto. Protocolos de

Disciplina	Responsabilidades principales
<b>Ingeniería de Costos y Administración de Proyectos</b>	seguridad y alarmas Estimación de inversión inicial y costos de operación. Programación de obra y logística en campus universitario. Evaluación de viabilidad económica y financiamiento

### Costos de construcción

Los costos de construcción en un suelo pedregoso como el del Jardín Botánico tienden a ser más altos que en suelos blandos, principalmente por la necesidad de excavación especializada, cimentaciones reforzadas y manejo de materiales. Para una PTAR de 300 m<sup>3</sup>/día, el rango estimado en México puede variar entre **15 y 40 millones de pesos**, dependiendo del tipo de obra civil y acabados (Tablas 8 y 9).

**Tabla 8.** Costos de construcción en México en suelo rocoso

Concepto	Rango de costo aproximado
Excavación en suelo pedregoso	\$1,200–\$1,800 MXN/m <sup>3</sup>
Concreto reforzado (cimentación y muros)	\$3,500–\$4,500 MXN/m <sup>3</sup>
Construcción de RAFA (129 m <sup>3</sup> )	\$4–6 millones MXN
Construcción de humedal (≈433 m <sup>2</sup> )	\$2–3 millones MXN
Cámara de cloración (≈11 m <sup>3</sup> )	\$0.5–1 millón MXN
Obras complementarias (tuberías, válvulas, gabiones, acabados)	\$5–8 millones MXN
<b>Total estimado</b>	<b>15–25 millones MXN</b>

(Los valores son aproximados y dependen de precios locales, licitaciones y nivel de acabado requerido)

**Tabla 9a.** Costos generales de la PTAR propuesta

Planta: Digestor más humedal					OBRA CIVIL	EQUIPO	INSTALACIÓN	INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario USD\$	Costo Total USD\$				
<b>AD Administración</b>								
Fianza		1	10,000	10,000				10,000
Contingencias		1	9,000	9,000				9,000
Seguro		1	9,000	9,000				9,000
<b>EE Equipo Eléctrico</b>								
CCM		1	9,000	9,000		9,000		
Tablero de Control		1	1,500	1,500		1,500		
<b>EQ Equipo</b>								
Bombas Alimentacion		0	3,000	-		-		
Bombas de lodos		2	3,000	6,000		6,000		
Rejilla de desbaste		1	6,000	6,000		6,000		
Quemador y arrestador de flama		1	6,000	6,000		6,000		
Bombas de recirculacion		1	1,500	1,500		1,500		
Dosificador de cloruro férrico		0	1,500	-		-		
Dosificador de hipoclorito de sodio		0	250	-		-		
Laboratorio, mesas	Lote	1	2,000	2,000		2,000		
Bomba de lodos	Lote	1	900	900		900		
LECHO DE SECADO		1	16,000	16,000		16,000		
<b>IE Instalación Eléctrica</b>								
Iluminación		1	12,000	12,000			12,000	
Instalación Eléctrica		1	12,000	12,000			12,000	
<b>IM Instalación Mecánica</b>								
Instalación Mecánica		1	8,000	8,000			8,000	
<b>IN Ingeniería</b>								
Ingeniería		1	210,000	210,000				210,000
Supervisión		1	200,000	200,000				200,000
Asesorías y laboratorios externos		1	60,000	60,000				60,000
<b>IO Instrumentación</b>								
Flujo Parshall		1	2,000	2,000		2,000		
Nivel		0	5,000	-		-		
Oxígeno		0	2,500	-		-		
pH		0	2,500	-		-		
Temperatura		0	600	-		-		

**Tabla 9b.** Costos generales de la PTAR propuesta

Planta: Digestor más humedal					OBRA CIVIL	EQUIPO	INSTALACIÓN	INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario USD\$	Costo Total USD\$				
<b>OC Obra civil</b>								
Tanque de recepción	m3	20	1,400	28,000	28,000			
Recubrimiento base del Biodigestor	m2	0	8	-	-			
Membrana inflable del Biodigestor	m2	0	18	-	-			
Biodigestor (excavación)	m3	200	3,500	700,000	700,000			
Tuberías de biogás	lote	1	3,000	3,000	3,000			
Bordeo del humedal	m3	5200	30	156,000	156,000			
Base del humedal geomembrana	m2	3000	12	36,000	36,000			
Grava, arena o tezontle para base	m3	7000	10	70,000	70,000			
Cloración tanque de contacto	m3	60	800	48,000	48,000			
Area techada Cribas	m2	0	800	-	-			
Cuarto de Control y Laboratorio	m2	1	2,000	2,000	2,000			
Caseta de productos químicos	m2	1	800	800	800			
Acabados y Urbanización	lote	1	3,000	3,000	3,000			
<b>TR Tráfico</b>								
Agente aduanal		3	4,000	12,000			12,000	
Flete adicionales	lote	2	4,000	8,000			8,000	
<b>TV Tuberías y válvulas</b>								
TUBERÍA PVC DE 40	lote	1	15,000	15,000	15,000			
Válvulas	lote	1	3,000	3,000	3,000			
<b>VI Viáticos</b>								
Viáticos		1	12,000	12,000				12,000
<b>Costo Total</b>				<b>\$ 1,677,700.00</b>	<b>1,046,800</b>	<b>68,900</b>	<b>52,000</b>	<b>510,000</b>
<b>Utilidad 30%</b>				<b>\$ 503,310.00</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Precio de Venta</b>				<b>2,181,010</b>	<b>1,046,800</b>	<b>68,900</b>	<b>52,000</b>	<b>510,000</b>
					<b>1,677,700</b>			
					<b>Total USD\$ 2,181,010</b>			
					<b>Tipo de cambio 17.9</b>			
					<b>Total Pesos M.N. 39,040,079</b>			

### Riesgos y consideraciones

- **Sobrecostos por imprevistos:** Fracturas de roca, necesidad de explosivos o refuerzos adicionales
- **Tiempo de obra mayor:** Excavación en pedregal puede duplicar la duración respecto a suelos blandos
- **Normativa ambiental:** Permisos de impacto ambiental y supervisión de la UNAM pueden añadir costos indirectos

### Conclusiones finales

#### Viabilidad técnica:

El sistema combinado de **desarenador, reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA), humedal artificial subsuperficial horizontal (HASSH) y desinfección con hipoclorito** demuestra ser una solución integral para tratar un caudal de 300,000 L/día en el CCH-Sur. Los cálculos hidráulicos y de remoción confirman estabilidad operativa y cumplimiento de parámetros de diseño.

### Cumplimiento normativo:

Los valores de salida del humedal (DQO  $\approx$  90 mg/L, NTK  $\approx$  8.3 mg/L, fósforo  $\approx$  1.5 mg/L, SST  $\approx$  50 mg/L) y la desinfección final con hipoclorito aseguran el cumplimiento de la **NOM-001-SEMARNAT-2021**, particularmente en lo referente a coliformes fecales y nutrientes, reduciendo riesgos ambientales y sanitarios.

### Sostenibilidad y energía renovable:

El RALLFA aporta un beneficio adicional al generar  $\approx$ 68 m<sup>3</sup>/día de biogás ( $\approx$ 418 kWh/día), lo que abre la posibilidad de aprovechar energía renovable para operación de bombas, iluminación o calefacción del reactor, reforzando la sustentabilidad del sistema.

### Adaptación al territorio:

La experiencia piloto en el Siladin, donde se construyó un humedal de 10 m<sup>3</sup>/día sobre roca volcánica sin excavación, valida la factibilidad de implementar sistemas en suelos pedregosos como los del Jardín Botánico. Esta estrategia reduce costos de excavación y simboliza respeto al paisaje del Pedregal.

### Valor académico y social:

La planta propuesta no solamente atiende una necesidad ambiental, sino que se convierte en un **laboratorio vivo** para estudiantes y docentes, generando investigación aplicada, tesis y educación ambiental. Su replicabilidad en otros planteles de la UNAM refuerza su impacto institucional.

### Viabilidad económica:

Aunque la construcción en suelo pedregoso implica mayores costos (estimados entre 15 y 25 millones de pesos), la inversión se justifica por los beneficios ambientales, energéticos y educativos, además de evitar sanciones legales por incumplimiento normativo.

### Reconocimientos

El autor agradece los valiosos aportes de los(as) revisores(as) que enriquecieron la contribución. Cualquier error es responsabilidad del autor.

### Referencias citadas en el texto

- APHA-AWWA-WEF. 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). 'American'<sup>14</sup> Public Health Association, 'American' Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, D.C. Estados Unidos.
- Castañeda-Olvera, D.R., Cruz-Maldonado, S., Ocampo-Barrera, A. 2025. Gestión del agua y uso de fosas sépticas en comunidades rurales. Estudio de caso: Pablo Galeana, Guerrero. Humanidades, Tecnología y Ciencia del Instituto Politécnico Nacional. 32(Enero-Junio):1-9.  
[http://revistaelectronica-ipn.org/ResourcesFiles/Contenido/33/HUMANIDADES\\_33\\_001352.pdf](http://revistaelectronica-ipn.org/ResourcesFiles/Contenido/33/HUMANIDADES_33_001352.pdf)
- DOF. 2021. Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-2021, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores nacionales. Publicada el 3 de abril de 2022. Diario Oficial de la Federación. Estados Unidos Mexicanos.
- Figueroa-Barrios, T., Pérez-Pino, L., Entrena-García, A., Herrera-Cárdenas, J.A. 2025. Microorganismos eficientes en el tratamiento de efluentes: Revisión de técnicas y aplicaciones / *Efficient microorganisms in effluent treatment: Review of techniques and applications*. Revista MIX-TEC. 5(9): 54-72. <https://mixtec.utim.edu.mx/articulosv9/articulo05.pdf>
- Google maps. 2022. Volando hacia otros 50 años. Abril 9, 2022. You Tube. CCH Sur Oficial. [https://www.google.com/search?q=Vista+a%C3%A9rea+del+CCH+Sur+de+la+UNAM%2C+Ciudad+de+M%C3%A9xico%2C+M%C3%A9xico+&sca\\_esv=ac8dc95cd3d12e0a&sxsrf=ANbL-n5Rq\\_00DD-jHg30A4\\_Wm67X-](https://www.google.com/search?q=Vista+a%C3%A9rea+del+CCH+Sur+de+la+UNAM%2C+Ciudad+de+M%C3%A9xico%2C+M%C3%A9xico+&sca_esv=ac8dc95cd3d12e0a&sxsrf=ANbL-n5Rq_00DD-jHg30A4_Wm67X-)

<sup>14</sup> En realidad solamente está en los Estados Unidos no en el resto del continente americano [Nota de los(as) editores(as)]

- YmdBw%3A1769555144203&ei=yER5adCEDLvckPIP6YjRgAw&ved=0ahUKEwjQij\_O6qySaxU7LkQIHWIEFMAQ4dUDCB&eq=Vista+a%3%A9rea+del+CCH+Sur+de+la+UNAM%2C+Ciudad+de+M%3%A9xico%2C+M%3%A9xico+&gs\_l=EpGnd3Mtd2I6LXNlcniQFZpc3RhIGHDqXJIYSBkZWwgQ0NIIFN1ciBkZSBSYsBVTkFNLCBDaXVkyWwQgZGUgTcOpeGlijbywgTcOpeGlijbyBtrC9Q6ANyqSjwAngBkAEAmAF7oAF7qgEDMC4xuAEMyAEA-AEB-AECmAIcCoAIWqAIKwgIKEAAYRjWBBiwA8ICEBAAGAMYjwEY6gIYtALYAQHCAhAQLhgDGI8BGOoCGLQC2AEBmAMJ8QUAWD4ToF-2jIgzAGZAGCLOGBAgBGAqSBwEyoAdSsgcAuAcAwgcFMi0xLjHIBxCACAE&scient=gws-wiz-serp#fpstate=ive&vld=cid:a84009ec,vid:ktDovIIAwUw,st:0
- IMTA. 2015. Guía técnica para el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- Kalaiselvi, P., Haripriya, R.J., Saravanan, V.S., Davamani, V., Sebastian, S.P., Parameswari, E., Poornima, R., Bharani, A., Maheswari, M. 2025. Formulation and evaluation of effective microorganisms in sewage treatment. *Environmental Science and Pollution Research*. 32: 2298–2323. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35833-y>
- LGA. 2025. LEY GENERAL DE AGUAS. TEXTO VIGENTE. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 11 de diciembre de 2025. Deroga la Ley de Aguas Nacionales. 2016. Diario Oficial de la Federación del 1o de diciembre de 1992. Última reforma publicada DOF 24-03-2016. Nueva Ley DOF 11-12-2025. Estados Unidos Mexicanos.
- Life Rural Supplies. 2025. Cómo calcular y dimensionar una fosa séptica de doble cámara <https://about-haus.com/fosa-septica/> <https://liferuralsupplies.wordpress.com/4-informacion-al-usuario/saneamiento-autonomo/04-saneamiento-autonomo-basico-fosa-septica-y-area-de-percolacion/04-02-la-fosa-septica/>
- Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento – CONAGUA. 2007. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Reactores anaerobios de flujo ascendente. ISBN: 978-607-8246-99-1 Publicado por: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Disponible en: [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)
- Méndez-Novelo, R.I., Chan-Gutiérrez, E.A., Castillo-Borges, E.R., Vázquez-Borges, E.R., Espadas-Solís, A.E. 2012. Digestión “anaerobia”<sup>15</sup> de efluentes de fosas sépticas / ‘Anaerobic’<sup>16</sup> digestion of effluents from septic tanks. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. XIII(3): 339-349. <https://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v13n3/v13n3a8.pdf>
- Metcalf & Eddy. 2014. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5th ed. McGraw-Hill Education. New York, NY. Estados Unidos.
- Reed, S.C. 1993. *Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Technology Assessment*. National Small Flows Clearinghouse. West Virginia University. Morgantown, WV. Estados Unidos. Helping America’s<sup>17</sup> small communities meet their wastewater needs. Design Manual Number 74. WWP/CDM74. USEPA. Office of Water (4204). EPA832-R-93-008. July 1993. <https://books.googleusercontent.com/books/content?req=AKW5QacpNauXVM53iajNKy2tQCbCZ2ReXFDytD0ITmoAczgxTA55EQExIeBRjYwW7nnp8WosVodbjIms70Ty233x3iQwWrD9uIEX1vtZcGBUQHfNSLd6mv0n6Br5xY-b4W8yDHF8by884t65MXAdgbYIayNk3J8ywb3EUxzF1JjvkdLyleebm6t2iN1PIp57NPz77F6-lhvcxchvF52PSXXmjkePsvGwwAkPx16bnRSZ4Yq5-rGI8yHb4Jzw8OQozirgKmpa0gKHzTbr7U2B8McZpweCTc7mR8OMD2KvCSSbllWzSWTQ>
- Speece, R.E. 1996. *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters*. Archae Press. Nashville, TN, Estados Unidos.

## Referencias consultadas

- Acá-Solano, C., Zaragoza-Pérez, R. 2024. Guía de inducción para docentes de primer ingreso, CCH Sur. Escuela Nacional Colegio de Ciencias y Humanidades. Coordinado por: Secretaría académica. Ciudad de México, México. [https://www.cch-sur.unam.mx/pdf/induccin\\_docentes\\_nvo\\_ingreso.pdf](https://www.cch-sur.unam.mx/pdf/induccin_docentes_nvo_ingreso.pdf)
- Anónimo. 2015. Guía técnica para el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- Durán-de-Bazúa, M.d.C. 1991. Material didáctico del curso Tratamiento biológico de aguas residuales. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.
- Herrera-López, G., Mejía-González, G., Cuevas-González, R., Arévalo-Velázquez, M.A., Guillén-Navarro, G.K. 2021. Sistema acoplado reactor anaerobio con deflectores-humedal artificial como alternativa de reúso en riego de áreas verdes. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 37:247-259. [file:///C:/Users/Asis%2004/Downloads/53643-Texto%20del%20Márquez-Vázquez, M., Martínez-González, S.A. 2011. Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente \(RAFA o UASB\). Antología. Centro Tecnológico Aragón. Laboratorio de Ingeniería Ambiental. FES Aragón, UNAM. 31 páginas. https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/M%3%81RQUEZ%20y%20MART%3%8DNEZ%202011%20Reactores%20Anaerobios.pdf](file:///C:/Users/Asis%2004/Downloads/53643-Texto%20del%20Márquez-Vázquez, M., Martínez-González, S.A. 2011. Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA o UASB). Antología. Centro Tecnológico Aragón. Laboratorio de Ingeniería Ambiental. FES Aragón, UNAM. 31 páginas. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/M%3%81RQUEZ%20y%20MART%3%8DNEZ%202011%20Reactores%20Anaerobios.pdf)
- Salas-Rodríguez, J.J. 2017. Humedales Artificiales. Diseño y Construcción. <https://docplayer.es/63185567-Humedales-artificialesdiseno-y-construccion.html>
- Solano-de-la-Cruz, V. 2020. Tratamiento de un agua residual azucarera utilizando un sistema híbrido (digestión-humedal construido). Tesis para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Química. Directores de tesis: Vallejo-Cantú, N.A., Alvarado-Lassman, A. Tecnológico Nacional de México, Orizaba Veracruz, México.

<sup>15</sup> La digestión es inherentemente anaerobia por lo que no necesita ese adjetivo [Nota de los(as) editores(as)]

<sup>16</sup> *Digestion is inherently anaerobic and does not need any adjective [Note of the editors]*

<sup>17</sup> En este caso especial, aunque Reed pensaba solamente en los Estados Unidos, su uso de la palabra América implica a todas las comunidades de este continente aunque dividido artificialmente en dos por el Canal de Panamá y también a las del resto del mundo ya que los humedales artificiales son útiles en todo el planeta Tierra [Nota de los(as) editores(as)]

---

file:///C:/Users/Asis%2004/Documents/sast20222023/JUNIO%20SELECCION%20%202023/HUMEDALES%202023/Viridia  
na\_Solano\_De\_La\_CruzTESIS%20ANAEROBIO%20HUMEDAL.pdf  
Valladares-Rodríguez, M.R., Juárez-Sedano, N., Flores-Valverde, E. 2019. Tratamiento biológico combinado anaerobio-humedal.  
Revista Tendencias en Docencia e Investigación Química (Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco). 5(5):199-  
203.  
[http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/7820/Tratamiento\\_biologico\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/7820/Tratamiento_biologico_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)