

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



DELVALLE  
GRUPO EDUCATIVO

**Selección de un sistema de infiltración de agua para la planta de  
tratamiento de aguas residuales del municipio de Zapotitlán,  
departamento de Jutiapa.**

Trabajo de graduación presentado por Kennet Manuel Coloco Quiñónez  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil  
Ambiental

Guatemala,

2023



**Selección de un sistema de infiltración de agua para la planta de  
tratamiento de aguas residuales del municipio de Zapotitlán,  
departamento de Jutiapa.**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



DELVALLE  
GRUPO EDUCATIVO

**Selección de un sistema de infiltración de agua para la planta de  
tratamiento de aguas residuales del municipio de Zapotitlán,  
departamento de Jutiapa.**

Trabajo de graduación presentado por Kennet Manuel Colucho Quiñónez  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil  
Ambiental


Guatemala,


2023

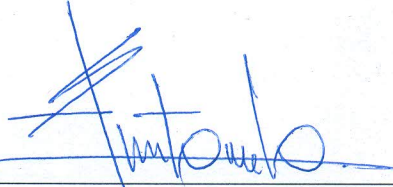
Vo. Bo.:

(f)   
Ing. Otoniel Echeverría

Tribunal examinador:

(f)   
Ing. Otoniel Echeverría

(f)   
Ing. Luis Quiroa

(f)   
Ing. Danilo Rodríguez

Fecha de aprobación: Guatemala, 04 de diciembre de 2023.

## CONTENIDO

<b>CONTENIDO</b> .....	<b>v</b>
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	<b>vii</b>
<b>LISTA DE GRÁFICOS</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>x</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>II. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>2</b>
<b>III. OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
<b>A. Objetivo general</b> .....	<b>4</b>
<b>B. Objetivos específicos</b> .....	<b>4</b>
<b>IV. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
<b>A. Tratamiento de aguas residuales</b> .....	<b>5</b>
1. Sistema de alcantarillado .....	<b>6</b>
2. Sistema de drenaje con plantas de tratamiento .....	<b>6</b>
3. Sistema de tratamiento de aguas residuales .....	<b>7</b>
<b>B. Parámetros fisicoquímicos</b> .....	<b>10</b>
<b>C. Reuso de aguas residuales tratadas</b> .....	<b>12</b>
1. Normativas y Marco Legal .....	<b>12</b>
<b>D. Recarga artificial de acuíferos</b> .....	<b>17</b>
1. Involuntarios .....	<b>17</b>
2. No gestionados.....	<b>17</b>
3. Gestionados.....	<b>18</b>
<b>E. Metodologías de infiltración</b> .....	<b>19</b>
1. Pozos de absorción.....	<b>19</b>
2. Zanjas de infiltración .....	<b>22</b>
3. Áreas de infiltración.....	<b>25</b>
<b>F. Análisis de decisión</b> .....	<b>27</b>
<b>G. Municipio de Zapotitlán, Jutiapa.</b> .....	<b>31</b>
<b>V. METODOLOGÍA</b> .....	<b>34</b>
<b>A. Área de estudio</b> .....	<b>34</b>
<b>B. Análisis de estudio fisicoquímico</b> .....	<b>35</b>
<b>C. Conductividad hidráulica</b> .....	<b>36</b>

1.	Determinación de prueba Lefranc.....	36
2.	Desarrollo de prueba Lefranc tipo somera.....	38
3.	Cálculos para la prueba Lefranc tipo somera.....	40
4.	Clasificación de conductividad hidráulica.....	41
<b>D.</b>	<b>Matriz de decisión.....</b>	<b>42</b>
<b>VI.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>55</b>
<b>A.</b>	<b>Análisis de calidad de agua.....</b>	<b>55</b>
<b>B.</b>	<b>Capacidad de infiltración.....</b>	<b>58</b>
<b>C.</b>	<b>Análisis de alternativas de infiltración.....</b>	<b>60</b>
<b>D.</b>	<b>Diseño y características preliminar de pozos de absorción.....</b>	<b>66</b>
<b>VII.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>69</b>
<b>VIII.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>70</b>
<b>IX.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>72</b>
<b>X.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE CUADROS

<i>Cuadro 1.</i> Tipo de pruebas Lefranc recomendadas con relación al grado de conductividad hidráulica .....	37
<i>Cuadro 2.</i> Selección del tipo de prueba Lefranc de acuerdo con las condiciones que presenta el terreno en un tramo somero . .....	37
<i>Cuadro 3.</i> Rangos de conductividad hidráulica.....	42



## LISTA DE GRÁFICOS

<i>Figura 1.</i> Esquema del sistema de alcantarillado. ....	6
<i>Figura 2.</i> Esquema del sistema de drenaje con plantas de tratamiento. ....	7
<i>Figura 3.</i> Esquema de tratamiento de aguas residuales. ....	9
<i>Figura 4.</i> Límites máximos permisibles para el reuso de aguas residuales. ....	11
<i>Figura 5.</i> Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores. ....	14
<i>Figura 6.</i> Relación entre metas, objetivos y criterios. ....	28
<i>Figura 7.</i> Mapa del municipio de Zapotitlán, Jutiapa. ....	32
<i>Figura 8.</i> Mapa esquemático de ubicación de elementos. ....	34
<i>Figura 9.</i> Diagrama de flujo para selección de prueba Lefranc. ....	38
<i>Figura 10.</i> Esquema de prueba Lefrac somera de flujo variable en descenso. ....	39
<i>Figura 11.</i> Diagrama de flujo para ejecución de prueba Lefranc somera de flujo variable . .....	40
<i>Figura 12.</i> Mapa esquemático de las alternativas de ubicación de presas. ....	43
<i>Figura 13.</i> Estructura jerárquica para el ejemplo de PJA. ....	53
<i>Figura 14.</i> Ubicación de pruebas Lefranc. ....	59
<i>Figura 15.</i> Resultados de conductividad hidráulica para las repeticiones de la prueba Lefranc .....	59
<i>Figura 16.</i> Esquema de pozo de infiltración. ....	67
<i>Figura 17.</i> Ubicación propuesta para pozos de infiltración. ....	68

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1.</i> Tabla de evaluación para el ejemplo de ADM. ....	43
<i>Tabla 2.</i> Evaluaciones y ponderaciones normalizadas del ejemplo.....	48
<i>Tabla 3.</i> Valores de RI.....	53
<i>Tabla 4.</i> Matriz de comparación por pares nivel 2 respecto a C1.....	54
<i>Tabla 5.</i> Matriz de comparación por pares nivel 2 respecto a C2.....	54
<i>Tabla 6.</i> Matriz de comparación por pares nivel 2 respecto a C3.....	54
<i>Tabla 7.</i> Matriz de decisión para evaluar la alternativa de infiltración más adecuada. ....	61
<i>Tabla 8.</i> Valoración numérica de variables lingüísticas. ....	62
<i>Tabla 9.</i> Matriz numérica de decisión.....	62
<i>Tabla 10.</i> Matriz de decisión normalizada con valoración de alternativas.....	63
<i>Tabla 11.</i> Matriz de valoración por criterio .....	63
<i>Tabla 12.</i> Matriz de valoración para C1. ....	64
<i>Tabla 13.</i> Matriz de valoración para C2. ....	64
<i>Tabla 14.</i> Matriz de valoración para C3. ....	64
<i>Tabla 15.</i> Matriz de valoración para C4. ....	64
<i>Tabla 16.</i> Matriz de valoración para C5. ....	65
<i>Tabla 17.</i> Matriz de valoración para C6. ....	65
<i>Tabla 18.</i> Matriz de valoración para C7. ....	65
<i>Tabla 19.</i> Matriz de valoración para C8. ....	65
<i>Tabla 20.</i> Matriz de decisión valorizada con SUMA de las tres alternativas evaluadas. ..	65

## RESUMEN

Generalmente, entre el 70 % y 80 % del agua potable de las comunidades se convierte en aguas residuales las cuales son descargadas hacia un cuerpo receptor (INFOM, 2018). En Guatemala anualmente se producen alrededor de 1,660 millones de metros cúbicos de agua residuales, de los cuales únicamente el 5 % recibe algún tipo de tratamiento previo a su disposición al ambiente (SEGEPLAN, 2011).

Considerando que este pequeño porcentaje de agua que recibe un tratamiento se introduce en el ciclo hidrológico de un cuerpo de agua contaminado, este trabajo de tesis propone una solución al problema de descargar el agua tratada hacia un cuerpo de agua contaminado. Se presenta el análisis de factibilidad para la absorción del agua de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales con el fin de contribuir con la recarga hídrica y el beneficio ambiental del municipio.

Se obtiene un valor promedio de la conductividad hidráulica de  $5.55 \times 10^{-5}$  cm/s lo cual genera una capacidad de infiltración baja. Tomando en cuenta estos datos y la teoría sobre métodos de infiltración, la alternativa de infiltración que más de adecua a los parámetros técnicos, sociales y ambientales evaluados son los pozos de infiltración. Por lo que para infiltrar el 20% del afluente de la planta de tratamiento de aguas residuales, se propone la ejecución de 30-35 pozos de infiltración con un diámetro de 4 m y profundidad de 25 m.

Cabe destacar que la propuesta de infiltración toma como supuesto que el afluente cumpla con el marco legal vigente, ya que según el estudio realizado por la municipalidad, se determinó que el agua de descarga no cumple con el límite máximo permisible para el parámetro de coliformes fecales.

## I. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales es una rama de la Ingeniería Civil bastante importante para el ciclo hidrológico del agua en la actualidad debido a las constantes descargas de agua residual provenientes de las actividades antropogénicas del humano. En Guatemala el tema de tratamiento de aguas residuales se percibe más como un trámite en cumplimiento del pobre régimen legal existente, en lugar de ser una acción en pro del bienestar medioambiental del país.

Los cuerpos de agua del país están, en su mayoría, contaminados lo cual contribuye al constante deterioro físicoquímico del ciclo hidrológico del agua. Parte de la contaminación de ríos de Guatemala proviene de la falta de implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales. Las pocas plantas de tratamiento que cumplen su funcionamiento en el marco técnico y legal descargan el agua tratada en uno de múltiples cuerpos de agua contaminados, siendo la cantidad de agua tratada una proporción muy baja en comparación de los miles de metros cúbicos de agua contaminada que recorre los ríos, el problema de contaminación no se ve favorecido.

Existen múltiples metodologías de técnicas de aprovechamiento de aguas residuales tratadas para el reuso en actividades que contribuyan a las actividades del humano o al bienestar del medioambiente. Esto se puede realizar siempre y cuando el agua tratada cumpla con los límites permisibles para reuso establecidos en el marco legal de la institución que vele por la gestión de agua en un territorio.

La infiltración del agua tratada al manto freático es una alternativa de reuso implementada en países de Latinoamérica que contribuye con la recarga hídrica en lugares con alta demanda de agua. Es más común que se opte por infiltrar agua pluvial a través de técnicas factibles de infiltración que se ajusten a los criterios sociales, ambientales y económicos del lugar en el que se realice el proyecto; esto se debe a que el agua residual tratada puede llegar a ser contraproducente infiltrarla en aguas subterráneas y contaminar con metales pesados el agua que se utilizaría en la vida diaria de muchas familias.

## II. JUSTIFICACIÓN

En Guatemala, anualmente se producen alrededor de 1,660 millones de metros cúbicos de agua residuales, de los cuales únicamente el 5 % recibe algún tipo de tratamiento previo a su disposición al ambiente (SEGEPLAN, 2011).

En condiciones ideales las comunidades tienen un sistema de agua potable que los surte 24 horas diarias, con la cantidad y calidad suficientes. En general, entre el 70 % y 80 % de estas aguas se convierten en aguas residuales, es decir, aguas contaminadas por el uso doméstico, industrial u otros servicios; estas aguas contaminadas se descargan a un cuerpo receptor (río, quebrada, lago, humedal, etc.) que compromete el ciclo hidrológico e incluso limita la disponibilidad de agua no contaminada a otras comunidades ubicadas aguas abajo (INFOM, 2018).

Con el objetivo de mejorar la situación actual de la contaminación del agua, se emitió el Acuerdo Gubernativo 236-2006 el cual establece los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga de agua a un cuerpo de receptor. Sin embargo, en este acuerdo no se les exige a los entes generadores que tengan un tratamiento terciario de sus aguas residuales ni tampoco que se encarguen de descargar las aguas tratadas a un cuerpo receptor en donde el líquido no se vuelva a contaminar.

Es por ello por lo que en este proyecto se pretende encontrar la metodología más eficiente para infiltrar el agua tratada de la PTAR de Zapotitlán, Jutiapa e introducirla directamente al manto freático del sector; ayudando de esta manera a evitar que el agua residual tratada regrese a un sistema hidrológico en donde se vuelva a contaminar.

Este trabajo de investigación es de importancia para el beneficio no solamente del ciclo hidrológico de Jutiapa, sino que también para la recarga hídrica a nivel nacional. Con el planteamiento de una matriz de decisión sobre la metodología más adecuada para infiltrar las aguas residuales tratadas, se establece la línea base para el aprovechamiento de las

aguas residuales y se da como punto de partida el diseño para un proyecto de impacto antropogénico por la escasez de agua que se ha evidenciado en las últimas décadas.

En este proyecto se hace el planteamiento sobre la inyección de agua proveniente de plantas de tratamiento de aguas residuales, como conveniencia por la dimensión de los caudales de salida de estas obras hidráulicas. Sin embargo, la idea es escalable al grado de no solo trabajar con el agua tratada de una PTAR si no que, con la captación del agua pluvial de una cuenca, siempre y cuando esta cumpla con el marco legal y ambiental de las normas que regulan la infiltración de agua al manto freático.

### **III. OBJETIVOS**

#### **A. Objetivo general**

Evaluar la alternativa más eficiente para infiltrar el agua tratada de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Zapotitlán, departamento de Jutiapa.

#### **B. Objetivos específicos**

- Determinar el estado fisicoquímico del agua tratada y el coeficiente de absorción del suelo del lugar como una alternativa para la infiltración.
- Proponer una matriz de decisión sobre las posibles alternativas de infiltración en función de criterios técnicos, ambientales y sociales.
- Identificar y proponer las características de un diseño preliminar de la alternativa de infiltración que mejor se adapta a los criterios de la matriz de decisión.

## IV. MARCO TEÓRICO

### A. Tratamiento de aguas residuales

Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) son instalaciones intermedias entre la descarga de agua residual de una industria, ciudad o complejo domiciliario y un ambiente de cuerpo receptor, el cual en su mayoría suele ser un cuerpo acuático. Su función principal es convertir efluentes de agua contaminada con desechos sólidos y componentes químicos complejos en sustancias disponibles para la integración en el medio ambiente a través de plantas fotosintetizadoras y/o retenedoras de elementos tóxicos para el ecosistema. La construcción de estas obras de depuración depende de varios factores como el tipo de efluente que se va a tratar, la composición y concentración de los elementos involucrados o bien del tipo de producto terminado que se pretende tener al finalizar el proceso de tratamiento (Wais, sf).

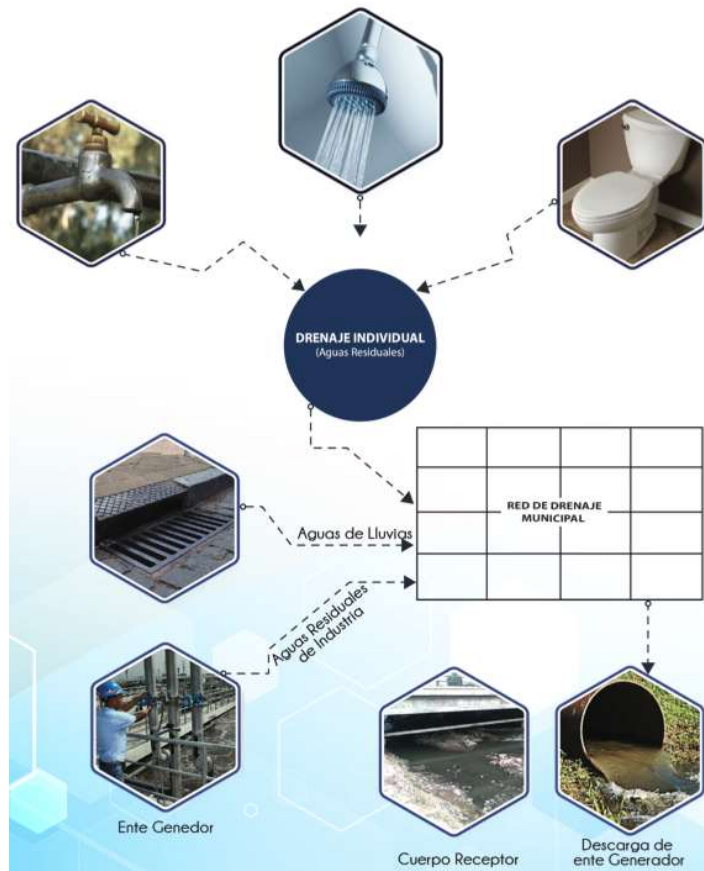
Las comunidades con servicio de agua potable normalmente generan aguas contaminadas. Cada casa por el uso de baños y cocinas genera aguas residuales, estas se recolectan en cada casa y se conectan a la red de drenajes. Generalmente estas redes son municipales. Los sistemas de drenaje se pueden dividir en tres grandes grupos: sanitarios, pluviales (agua de lluvia) o combinados. Es muy importante saber cómo es el drenaje de cada lugar. En general, inicialmente se generan las aguas servidas a nivel de cada vivienda, las que después ingresan a la red de alcantarillado (SEGEPLAN, 2011).

Es importante indicar que cualquier descarga hacia un cuerpo receptor, implica que quien descarga es un ente generador y que este se debe hacer cargo que el agua que se va a descargar esté tratada conforme lo indican las leyes del país (SEGEPLAN, 2018).



## 1. Sistema de alcantarillado

A la red de drenaje municipal pueden llegar aguas residuales y pluviales de diferentes fuentes, como lo puede ser de las que se dan en el uso doméstico o bien aguas de un ente generador de una industria, además del agua pluvial a través de los drenajes que usualmente se sitúan en las calles. Toda esta red de drenaje municipal se descarga en un cuerpo receptor el cual usualmente suele ser un río o quebrada que esté cerca de la comunidad.



*Figura 1.* Esquema del sistema de alcantarillado.  
(SEGEPLAN, 2011).

## 2. Sistema de drenaje con plantas de tratamiento

Cuando se tiene una planta de tratamiento establecida en conjunto con una red de drenaje municipal se tiene que las aguas residuales domésticas y aguas pluviales van

directo a la red de drenaje y luego a una Planta de Tratamiento para Aguas Residuales (PTAR). Sin embargo, un ente generador que reusa agua tratada con su propia PTAR puede descargar esa agua reutilizada en la red de drenaje municipal.

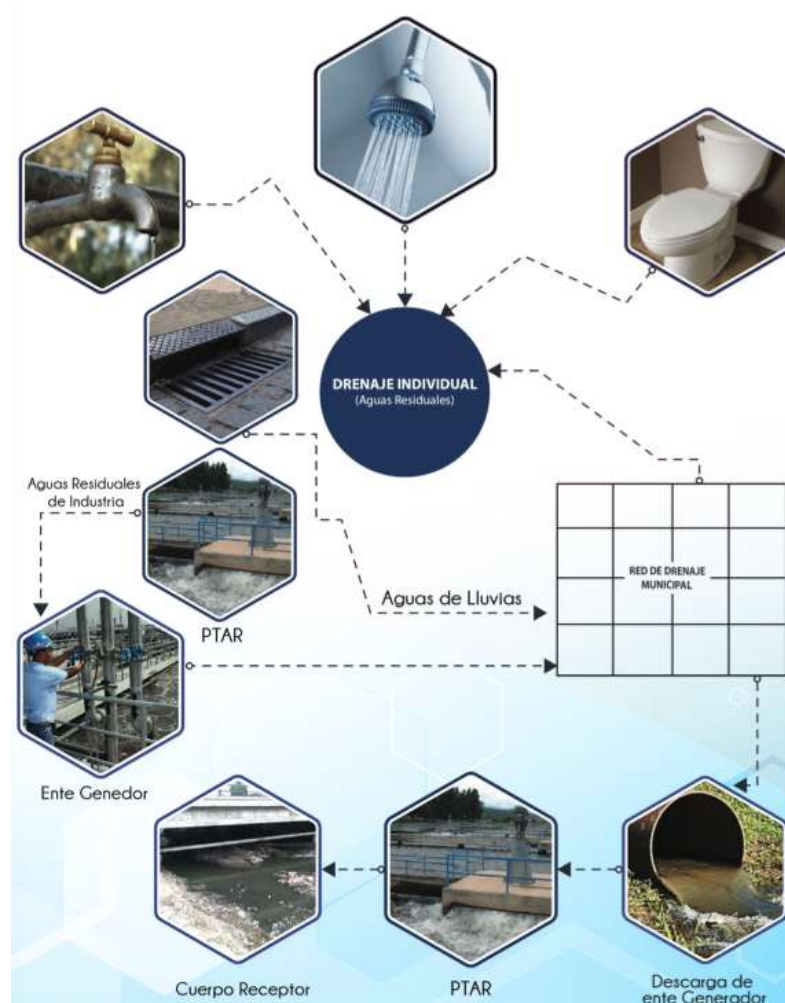


Figura 2. Esquema del sistema de drenaje con plantas de tratamiento (SEGEPLAN, 2011).

### 3. Sistema de tratamiento de aguas residuales

Para tratar las aguas residuales existen varias tecnologías. Se debe escoger la que mejor se adapte a las características dependientes del agua residual que se tenga, la disponibilidad de espacio para las instalaciones, así como los recursos financieros y humanos disponibles. Independientemente del tipo de planta de tratamiento que se elige, estas cuentan con varias etapas la cuales se definen a continuación:

a. Pretratamiento:

Consiste en retirar todo aquel material voluminoso que pudiera llegar, como hojas, desechos sólidos, ramas de árboles, material flotante (aceites, grasas y arenas) y material sólido de gran tamaño, etc. Generalmente está conformada por una rejilla, un desarenador y una trampa de grasas. Es muy importante también incluir un sistema de medición de caudal (SEGEPLAN, 2011)

b. Tratamiento primario:

Remueve los sólidos suspendidos, es decir todos aquellos sólidos que van en el agua. El sistema de remoción es básicamente un proceso de sedimentación, que se logra dejando o reteniendo el agua contaminada en un tanque, el tiempo suficiente, para que los sólidos se sedimenten. Algunas veces pueden incorporar unidades de filtración, flotación y precipitación, dependiendo de las características del agua residual (Salazar, 2004)

c. Tratamiento secundario:

Es el proceso para remover la materia orgánica disuelta, que se logra al tener un ambiente propicio para que las bacterias puedan alimentarse de esa materia orgánica, es decir, es un proceso que utiliza microorganismos para tratar el agua. Hay dos grandes grupos anaeróbicos (sin oxígeno) y aeróbicos (con oxígeno) (Salazar, 2004).

d. Tratamiento terciario:

Es el proceso que remueve nutrientes, es decir, remueve sustancias químicas (generalmente fósforo y nitrógeno), para alcanzar una calidad física, química y biológica, adecuada a cuerpos receptores sensibles o para algún reuso". En una planta de tratamiento se puede utilizar más de un proceso terciario, como ejemplo el uso de químicos, campos eléctricos, vaporización, puentes químicos, carbón, etc. Dependiendo de las condiciones puede incluir un sistema de desinfección (cloración u otro), para eliminar microorganismos (Salazar, 2004).

e. Tratamiento de lodos:

Es el tratamiento de los sólidos, normalmente con un alto contenido de agua (80%), que se tratan en un proceso que requiere tiempo y temperatura para eliminar patógenos. Puede incluir patios de secado o deshidratación, espesadores y digestión. La disposición final debe planificarse adecuadamente de acuerdo con el reglamento (SEGEPLAN, 2011).

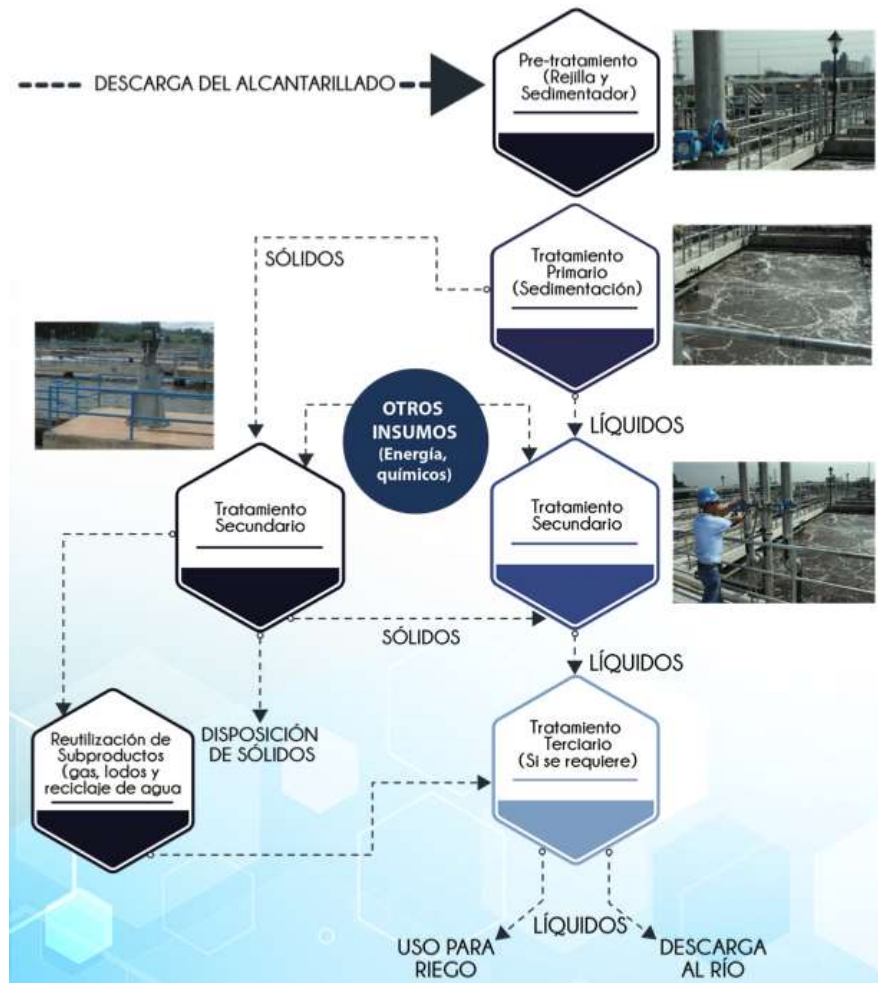


Figura 3. Esquema de tratamiento de aguas residuales

(SEGEPLAN, 2011).

## **B. Parámetros fisicoquímicos**

Los parámetros fisicoquímicos brindan información sobre la naturaleza de las especies químicas del agua y sus propiedades físicas. Ayudan a evaluar la calidad del agua, las posibles fuentes de contaminación, el posible impacto ambiental y las necesidades de tratamiento. Para determinar las características fisicoquímicas del agua es necesario realizar análisis de laboratorio y así garantizar la calidad del agua (López Brango, 2021).

Esta información fisicoquímica del agua es importante para conocer el estado del agua en cierto momento y evaluar la calidad del agua ya que con base en eso se puede determinar si es factible reusarla o no.

Dentro de las características fisicoquímicas del agua se incluyen las siguientes:

1. Temperatura: Esta característica puede afectar la solubilidad, la densidad y la capacidad para transportar contaminantes.
2. pH: El pH es una medida de la acidez o alcalinidad del agua. Un pH neutro es de 7,0, un pH inferior a 7,0 es ácido, mientras que un pH superior a 7,0 es alcalino.
3. Grasas y aceites: La cantidad de grasas y aceites en el agua cambia la densidad del cuerpo.
4. Conductividad: Es la capacidad del agua para conducir la electricidad. La conductividad es mayor en el agua que contiene mayor cantidad de sales disueltas.
5. Turbiedad: La turbiedad es una medida de la cantidad de partículas en suspensión en el agua. La turbiedad puede ser causada por sólidos orgánicos, sólidos inorgánicos o microorganismos.
6. Materia flotante: La materia flotante o materia en suspensión es la materia sólida que se encuentra en el agua. Esta puede ser orgánica o inorgánica.
7. Color: El color del agua puede ser causado por la presencia de sustancias orgánicas o inorgánicas.
8. Olor: El olor del agua puede ser causado por la presencia de sustancias orgánicas en descomposición.
9. Demanda química de oxígeno (DQO): Es la medida de la cantidad de oxígeno disuelto

que se necesita para oxidar la materia orgánica en el agua.

10. Demanda biológica de oxígeno (DBO): Es la medida de la cantidad de oxígeno disuelto que se consume por la descomposición de la materia orgánica en el agua por bacterias.
11. Nitrógeno total (NT): El NT es la suma de los diferentes tipos de nitrógeno presentes en el agua.
12. Fósforo total (PT): El PT es la suma de los diferentes tipos de fósforo presentes en el agua.
13. Metales pesados: Los metales pesados son elementos químicos que tienen una alta densidad y una toxicidad relativamente alta.
14. Contaminantes orgánicos persistentes (COP): Los COP son compuestos orgánicos que son difíciles de degradar y que pueden tener efectos nocivos en el medio ambiente.
15. Coliformes fecales: Bacterias provenientes de materia fecal proveniente de seres vivos de sangre caliente, ya sea animales o humanos (López Brango, 2021).

Según el acuerdo gubernativo 236-2006 sobre el reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos estos son los límites máximos permisibles para descargas de aguas residuales a cuerpos receptores en Guatemala:

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	100	50	25	20
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Niquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Piomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

Figura 4. Límites máximos permisibles para el reuso de aguas residuales.

### **C. Reuso de aguas residuales tratadas**

La reutilización de aguas residuales para diferentes industrias brinda muchas ventajas específicamente para cada campo. En la agricultura, el reuso de aguas grises es un recurso de agua estable y constante que adicionalmente también proporciona nutrientes a las plantas. También es una forma de prevenir la contaminación de aguas superficiales con sustancias químicas tóxicas y desechos orgánicos perjudiciales para el bienestar de los ecosistemas, además de ser una buena oportunidad para reservar agua de mejor calidad para el consumo humano, de otros seres vivos y la producción de alimento o bien para reintegro del líquido a un ciclo hidrológico en donde no se contamine.

Sin embargo, las aguas residuales contienen agentes infecciosos o contaminantes peligrosos para la salud, por lo que su reuso debe ser manejado con precaución, relacionando el nivel de tratamiento que se le dé o vaya a dar con el tipo de reuso, respetando normas establecidas con esos propósitos (Salazar, 2004).

Lastimosamente, de manera general en la región latinoamericana el aprovechamiento de las aguas residuales no ha sido promovido por las autoridades o entidades pertinentes. Por lo contrario, se ha prohibido el uso de estas aguas tratadas por considerárseles como las responsables de muchos de los problemas sanitarios existentes. A pesar de la falta de promoción del reuso de aguas residuales en Latinoamérica, han sido los propios campesinos y agricultores quienes las han utilizado, por supuesto sin monitoreo o control. (Salazar, 2004).

#### **1. Normativas y Marco Legal**

Con el afán de mejorar la situación del recurso hídrico de Guatemala se han establecido ciertas normativas que tienen como objeto principal establecer los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reuso de aguas residuales, así como para la disposición de lodos. Lo anterior para que, a través del mejoramiento de las características de dichas aguas, se logre establecer un proceso continuo que permita: “a) Proteger los cuerpos receptores de agua de los impactos provenientes de la actividad humana. b) Recuperar los cuerpos receptores de agua en proceso de eutrofización. c) Promover el

desarrollo del recurso hídrico con visión de gestión integrada” (Congreso de la República de Guatemala, 2006). Las normas que se tienen que tomar en cuenta para la implementación de una planta de tratamiento y para el reuso de aguas residuales son las siguientes:

a. Código de Salud: Decreto 90-97, en el Libro II, de las acciones de salud, en el Título I, de las acciones de promoción y prevención, en el Capítulo IV. Salud y ambiente, en su Sección III, de la eliminación y disposición de excretas y aguas residuales, en los artículos del 92 al 101, trata lo relativo al tema (SEGEPLAN, 2011).

b. Código Municipal de Guatemala: (Decreto número 12-2002 del Congreso de la República de Guatemala), en su artículo 68 establece “Competencias propias del municipio: Las competencias propias deberán cumplirse por el municipio, por dos o más municipios bajo convenio, o por mancomunidad de municipios, y son las siguientes: a) Abastecimiento domiciliario de agua potable debidamente clorada; alcantarillado; alumbrado público: mercados; rastros; administración de cementerios y la autorización y control de los cementerios privados; recolección, tratamiento y disposición de desechos sólidos; limpieza y ornato.” Así como en su artículo 72 sobre “Servicios públicos municipales: El municipio debe regular y prestar los servicios públicos municipales de su circunscripción territorial y, por lo tanto, tiene competencia para establecerlos, mantenerlos, ampliarlos y mejorarlos...”. (SEGEPLAN, 2011).

c. Acuerdo Ministerial No. 105-2008: Aprobación del Manual general del reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos” (SEGEPLAN, 2011).

d. Acuerdo Gubernativo No. 418-2013: Aprobación de la Política Nacional del Sector de Agua Potable y Saneamiento, elaborada por el Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, en coordinación con las instituciones del sector de agua potable y saneamiento del país. (SEGEPLAN, 2011).

e. Acuerdo Ministerial No. 8-2016: Aprobación de la Norma técnica que establece el procedimiento para emitir dictamen sanitario sobre proyectos de construcción,



reparación y/o modificación de plantas de tratamiento de aguas residuales". (SEGEPLAN, 2011).

f. Reglamento de descargas y de reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos": establecido en los Acuerdos Gubernativos 236-2006, la modificación para la cuenca del lago de Atitlán 12-2011, el 129-2015 determinando el plazo de cumplimiento al mes de mayo 2017, y extendido según el Acuerdo Gubernativo 110-2016, para el 6 de mayo de 2019 por lo que todas las municipalidades del país deben contar con plantas de tratamiento primario en funcionamiento (SEGEPLAN, 2011).

g. El Acuerdo Gubernativo 236-2006 es muy importante para el reuso del agua residual ya que se establecen los parámetros fisicoquímicos que el agua debe tener dependiendo de su uso. Como es de saber, en este proyecto se pretende reusar el agua residual tratada para infiltrarla directamente al manto freático, por lo que se tienen que tomar en cuenta los siguientes parámetros:

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
		Uno	Dos	Tres	Cuatro	
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	100	50	25	20
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 <sup>5</sup>	< 1x10 <sup>5</sup>	< 1x10 <sup>5</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

Figura 5. Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores

(Congreso de la República de Guatemala, 2006).

Según el Acuerdo Gubernativo 254-2019, reforma al acuerdo Gubernativo Número 236-2006 de fecha 5 de mayo del año 2006, Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales Municipales: a) El treinta (30) de mayo del año dos mil diecinueve (2019), las municipalidades deberán contar con el Estudio Técnico que estipula el Artículo 5, de este Reglamento, determinando el número de descargas de aguas residuales y evaluando los parámetros establecidos en cada una de ellas; además deberán incluir el inventario de todas las redes de alcantarillado público, de todas las descargas sin tratamiento y en caso corresponda, de las condiciones en que se encuentren los sistemas de tratamiento de aguas residuales en operación, estos inventarios deberán formar parte de los anexos del referido Estudio Técnico.

b) El dos (2) de mayo del año dos mil veintitrés (2023), todas las municipalidades deberán de cumplir, con tener en operación sistemas de tratamiento completos, por lo menos, para las dos (2) descargas principales que en el inventario se reporten sin tratamiento y que concentren la mayor carga de demanda bioquímica de oxígeno. Los efluentes ya tratados deben de cumplir con los límites máximos permisibles de la etapa uno (1) del presente.

c) Para completar el tratamiento de las descargas restantes, las municipalidades deberán de cumplir con ejecutar y tener en operación, sistemas de tratamiento para las descargas consignadas en el inventario que se adjuntará al Estudio Técnico y cuyos efluentes deben cumplir con los límites máximos permisibles de la etapa que corresponda.

c.1) El tres (3) de mayo del año dos mil veintisiete (2027), todas las municipalidades deberán de cumplir con tener en operación sistemas de tratamiento para el sesenta por ciento (60 %) del total de las descargas consignadas en el inventario, que debe adjuntarse al Estudio Técnico.

c.2) El dos (2) de mayo del año dos mil treinta y uno (2031), todas las municipalidades deberán de cumplir con tener en operación sistemas de tratamiento para el restante cuarenta por ciento (40%) del total de las descargas consignadas en el inventario que debe adjuntarse al Estudio Técnico. El acumulado de obras

municipales ejecutadas en esta etapa, debe corresponder al cien por ciento (100%) del total de las descargas del inventario.

En el AG 236-2006 se listan los cinco tipos de reuso que se le puede dar al agua residual tratada siempre y cuando cumplan con los límites máximos permisibles que a cada uso corresponden:

**TIPO I: REUSO PARA RIEGO AGRÍCOLA EN GENERAL:** uso de un efluente que debido a los nutrientes que posee se puede utilizar en el riego extensivo e intensivo, a manera de fertirriego, para recuperación y mejoramiento de suelos y como fertilizante en plantaciones de cultivos que, previamente a su consumo, requieren de un proceso industrial, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35. Se exceptúa de este reuso los cultivos considerados en el tipo II (Congreso de la República de Guatemala, 2006).

**TIPO II: REUSO PARA CULTIVOS COMESTIBLES:** con restricciones en el riego de áreas con cultivos comestibles que se consumen crudos o precocidos, como hortalizas y frutas. Para el caso de coliformes fecales y demanda bioquímica de oxígeno, deberá cumplirse de conformidad con los límites máximos permisibles del artículo 35. Adicionalmente, para otros parámetros, deberán cumplir los límites máximos permisibles presentados en el cuadro del artículo 21 del presente Reglamento, a excepción de sólidos en suspensión, nitrógeno y fósforo totales (Congreso de la República de Guatemala, 2006).

**TIPO III: REUSO PARA ACUACULTURA:** uso de un efluente para la piscicultura y camaricultura, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35.

**TIPO IV: REUSO PARA PASTOS Y OTROS CULTIVOS:** con restricciones en el riego de áreas de cultivos no alimenticios para el ser humano como pastos, forrajes, fibras, semillas y otros, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35 (Congreso de la República de Guatemala, 2006).

TIPO V: REUSO RECREATIVO: con restricciones en el aprovechamiento para fines recreativos en estanques artificiales donde el ser humano sólo puede tener contacto (Congreso de la República de Guatemala, 2006).

PARÁMETROS Y LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA REUSO. El agua residual para reusó deberá cumplir con los límites máximos permisibles del siguiente cuadro:

TIPO DE REUSO	DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO, MILIGRAMOS POR LITRO	COLIFORMES FECALS NÚMERO MÁS PROBABLE POR CIENTOS MILIMITROS
Tipo I	NO APLICA	NEGATIVO
Tipo II	NO APLICA	$<2 \times 10^2$
Tipo III	200	NO APLICA
Tipo IV	NO APLICA	$<1 \times 10^3$
Tipo V	200	$<1 \times 10^3$

Cuadro 1. Artículo 35 del AG 236-2006 con límites permisibles para reuso de agua residual tratada.

#### D. Recarga artificial de acuíferos

La recarga artificial de acuíferos, también llamada gestión de la recarga de acuíferos (*Managing Aquifer Recharge*, MAR por sus siglas en inglés), es la recarga intencional de agua a los acuíferos para su recuperación subsecuente o beneficio ambiental (Puerto, 2015). Las actividades humanas que potencian la recarga de acuíferos se clasifican en tres categorías:

##### 1. Involuntarios.

Tales como despejar la vegetación arraigada en una zona, filtraciones profundas a través de los campos de irrigación y por fugas de las tuberías de agua y alcantarillado (Puerto, 2015).

##### 2. No gestionados.

Incluyen pozos de drenaje de aguas pluviales y sumideros, así como lagunas de infiltración o tanques filtrantes. Por lo general, estas obras se usan para la eliminación de agua no deseada sin pensar en un reuso (Puerto, 2015).

### 3. Gestionados.

A través de mecanismos tales como pozos de inyección e infiltración, cuencas de infiltración y galerías para agua pluvial, agua reciclada, agua de corrientes superficiales y agua de otros acuíferos que son subsecuentemente recuperados para todo tipo de usos (Puerto, 2015). Algunos tipos de MAR son los siguientes:

#### a. Almacenamiento y recuperación de acuíferos:

Ejemplo de este método es la inyección de agua por medio de un pozo para almacenamiento y recuperación de agua a través del mismo pozo. Esto es útil en los acuíferos salobres, en donde el almacenamiento es el principal objetivo y el tratamiento de agua es una consideración menor (Puerto, 2015).

#### b. Almacenamiento, transferencia y recuperación de un acuífero:

Incluye la inyección de agua a través de un pozo para almacenamiento y recuperación de un diferente pozo. Esto se utiliza para lograr un tratamiento adicional de agua en el acuífero mediante la extensión de tiempo de residencia en el acuífero, más allá de la de un solo pozo (Puerto, 2015).

#### c. Estanques de infiltración:

Implican desviar las aguas superficiales dentro de una cuenca sin corrientes (*off-stream*) y canales que permitan que el agua penetre a través de una zona no saturada hacia el acuífero libre subyacente (Puerto, 2015).

#### d. Galerías de infiltración:

Son zanjas enterradas que contienen celdas de polietileno o tubos ranurados en suelos permeables que permiten la infiltración a través de la zona no saturada a un acuífero no confinado (Puerto, 2015).

e. Captación de agua pluvial para el almacenamiento de un acuífero:

Puede incluir el desvío de escurrimientos pluviales en el techo hacia un poco, sumidero o cajón lleno de arena o grava en donde se deja filtrar hacia la superficie freática para posteriormente extraer el agua mediante el bombeo de un pozo (Puerto, 2015).

f. Pozos secos:

Son pozos colocados en zonas en donde las capas freáticas son muy profundos, permitiendo que el agua infiltrada mejore su calidad a través de las propiedades físicas de las rocas presentes en el subsuelo para el acuífero libre que se encuentra a profundidad (Puerto, 2015).

## **E. Metodologías de infiltración**

### **1. Pozos de absorción.**

a. Características y generalidades

Un pozo de absorción es una estructura subterránea que se utiliza para infiltrar agua al suelo. Consiste en una excavación cilíndrica o rectangular, que se llena con material permeable, como grava o piedra. El agua se introduce en el pozo a través de una tubería o un sistema de drenaje (Aguilar-Morales, 2019).

Dentro de las principales características de estas estructuras está la profundidad, la cual debe ser suficiente para que el agua se infiltre por gravedad y lo mínimo recomendado es de 1.5 metros, pero puede ser mayor en función de las características del suelo. Por otro lado, el diámetro o ancho del pozo debe ser suficiente para que el agua infiltre de manera uniforme, el mínimo recomendado es de 1.0 metros (Aguilar-Morales, 2019).

El material de relleno del pozo debe ser permeable para permitir una facilidad de infiltración de agua, como por ejemplo la grava, sin embargo, la piedra y arena también son empleadas en este uso (García-Gutiérrez, 2014).

Estas estructuras son una alternativa sostenible para la gestión de aguas residuales ya

que pueden reducir la contaminación de agua y suelo además de recargar los acuíferos del sector. Esta puede ser una solución económica y de fácil instalación dependiendo de los objetivos del proyecto que se plantee. Se pueden utilizar para infiltrar una variedad de aguas incluyendo aguas residuales domésticas e industriales tratadas y aguas pluviales (Tchobanoglous, 2014).

b. Consideraciones de diseño

En las consideraciones de diseño para un pozo de absorción se debe tomar en cuenta la ubicación de la perforación para evitar que esté cerca de fuentes de agua potable superficiales y evitar que se contaminen, al igual que en lugares en donde el manto freático esté cerca de la superficie.

Además, se toman en cuenta las dimensiones de profundidad y diámetro del pozo dependiendo de las condiciones del suelo. Así como el tipo de material de relleno, el sistema de ingreso de caudal al pozo y la tapa de registro, son otros de los factores que se toman en cuenta para el diseño.

Sin embargo, uno de los más importantes para determinar los parámetros de un pozo es la conductividad hidráulica (K) la cual castiga las dimensiones del pozo dependiente de la velocidad de absorción que tenga el suelo en el que se pretende realizar la perforación (SEMARNAT, 2018).

Algunos de los parámetros que se toman en cuenta para esta relación son los siguientes:

En suelos con baja conductividad hidráulica, se recomienda utilizar pozos de absorción más grandes y profundos. El diámetro del pozo debe ser de al menos 3 m y la profundidad debe ser de al menos 4,5 m. El material de relleno debe ser de grava o piedra con un valor K mayor que 0,01 cm/s (SEMARNAT, 2018).

En suelos con conductividad hidráulica media, se recomienda utilizar pozos de absorción de tamaño mediano. El diámetro del pozo debe ser de al menos 2 m y la profundidad debe ser de al menos 3 m. El material de relleno puede ser grava, piedra o

arena con un valor K mayor que 0,01 cm/s (SEMARNAT, 2018).

En suelos con alta conductividad hidráulica, se recomienda utilizar pozos de absorción de tamaño pequeño. El diámetro del pozo debe ser de al menos 1 m y la profundidad debe ser de al menos 2 m. El material de relleno puede ser arena con un valor K mayor que 0,1 cm/s (SEMARNAT, 2018).

c. Aspectos de salud y aceptación

Los pozos de absorción son una tecnología de tratamiento y disposición de aguas residuales que puede ser segura para la salud humana y el medio ambiente. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el tratamiento previo de las aguas residuales ayuda a eliminar los contaminantes que pueden causar problemas de salud, como los patógenos, los metales pesados y los productos químicos tóxicos (EPA, 2023).

Además de que, si el suelo no es permeable, el agua puede acumularse y causar problemas de salud, como la contaminación de las aguas subterráneas o la propagación de enfermedades (EPA, 2023).

d. Operación y mantenimiento

La frecuencia de mantenimiento de un pozo de absorción depende de varios factores, como el tamaño del pozo, el tipo de suelo y el volumen de agua residual que se descarga. En general, se recomienda realizar una limpieza del pozo cada 1-3 años (García-Gutiérrez, 2014).

Estas estructuras deben ser limpiadas periódicamente para eliminar los sedimentos y las obstrucciones. Una de las maneras en que el mantenimiento del pozo puede realizarse mediante el bombeo del agua residual o la limpieza manual (García-Gutiérrez, 2014).

e. Pros y contras

Son una tecnología simple y de bajo costo. La construcción de un pozo de absorción es relativamente sencilla y no requiere el uso de equipos o materiales costosos.



No requieren energía eléctrica para funcionar y, con un mantenimiento adecuado, pueden durar muchos años (Aguilar-Morales, 2019).

Son una opción sostenible que ayuda a proteger el medio ambiente y a reducir la contaminación de las aguas superficiales, ya que las aguas residuales se infiltran en el suelo y se filtran naturalmente. Además, son una opción viable para comunidades rurales y periurbanas que no tienen acceso a redes de alcantarillado (Aguilar-Morales, 2019).

Por el lado negativo, los pozos requieren un suelo permeable para que funcione eficazmente, el suelo debe ser permeable, es decir, que permita que el agua se filtre a través de él. Además de que pueden contaminar las aguas subterráneas si no se instalan y operan correctamente ya que, si no está bien diseñado o construido, existe el riesgo de que las aguas residuales contaminen las aguas subterráneas. Y por último si el agua residual no se trata adecuadamente, puede emitir un olor desagradable (Aguilar-Morales, 2019).

## **2. Zanjas de infiltración.**

### **a. Características y generalidades**

Las zanjas de infiltración se utilizan para permitir que el agua, ya sea pluvial o tratada, se infiltre de manera gradual en el suelo subyacente. Esto ayuda a recargar los acuíferos, reducir la escorrentía superficial y evitar la contaminación del agua (Pastrán, 2010).

Las zanjas de infiltración son sistemas poco profundos de absorción en el suelo, que constan de una serie de zanjas de poca profundidad, llenas de grava. El efluente se dispone a través de las zanjas en el subsuelo, permitiendo su oxidación y disposición (Pastrán, 2010).

Las zanjas de infiltración mejoran el tratamiento químico y biológico del efluente de un tratamiento primario, porque aprovechan la actividad bacteriana del suelo e incrementan la oportunidad de absorción de fósforo, metales y virus. Además de mayores remociones

de DBO, sólidos suspendidos totales (SST) y nitrógeno (Pastrán, 2010).

b. Consideraciones de diseño

Las zanjas de infiltración generalmente son trincheras excavadas en el suelo y rellenas con material filtrante, como grava o arena, para facilitar la infiltración. El diseño geométrico incluye la longitud, la anchura y la profundidad de las zanjas, que dependen de la cantidad de agua que se espera manejar y las condiciones del suelo (Pastrán, 2010).

Se requiere un sistema de recolección y conducción de agua que lleve el agua a las zanjas de infiltración. Esto puede incluir tuberías, canales o canalones que dirijan el agua hacia las zanjas (Pastrán, 2010).

La naturaleza del perfil del suelo y su permeabilidad es de vital importancia en la evaluación y valoración del lugar. Otros aspectos importantes son la profundidad de las aguas subterráneas, la pendiente del terreno, el paisaje y vegetación existentes y las características de drenaje superficial (Pastrán, 2010).

La pendiente del terreno también es un factor que determina la posible colocación del sistema de infiltración ya que en terreno con pendientes pronunciadas, el agua tiende a desplazarse rápidamente a la cota más baja acumulándose en un solo punto (Pastrán, 2010).

Este tipo de disposición funciona bien en sitios con suelos profundos y permeabilidad relativa, donde se tienen aguas subterráneas profundas y el terreno es relativamente nivelado (Pastrán, 2010).

c. Aspectos de salud y aceptación

La aceptación de las zanjas de infiltración por parte de la comunidad en la que se vaya a ejecutar el proyecto depende del involucramiento que se le otorgue a la comunidad en el proceso de planificación, diseño y ejecución del proyecto para que sepan de los beneficios ambientales y de salud que se pueden tener.

Además, otro de estos aspectos es la estética de las zanjas para poder tener una aceptación adecuada de parte de la comunidad. Mientras más estético y ordenado sea el proyecto que se ejecute, mayor será la aceptación por parte de la comunidad.

d. Operación y mantenimiento

Las zanjas de infiltración no requieren de ningún tipo de mantenimiento y su vida útil dependerá de la granulometría del suelo, de la capacidad de infiltración, de la altura y variaciones del nivel freático, y del correcto funcionamiento y limpieza del tanque séptico o sistema de aguas residual utilizado como tratamiento previo, que evitará el paso de sólidos a las zanjas de infiltración (Pastrán, 2010).

e. Pros y contras

De las principales ventajas de las zanjas de infiltración es la capacidad para recargar los acuíferos subterráneos ya que puede mantener el equilibrio hídrico en áreas propensas a la sobreexplotación de recursos hídricos. Además, esta metodología de infiltración reduce significativamente la escorrentía superficial lo que promueve la mitigación de inundaciones y la disminución de erosión del suelo.

La flexibilidad del diseño también es una ventaja ya que estas se pueden diseñar y dimensionar de acuerdo con las necesidades específicas de cada sitio, lo que las hace adecuadas para una amplia variedad de condiciones y tamaños de proyectos.

Por otro lado, las desventajas de las zanjas de infiltración está la contaminación cruzada porque si no se maneja adecuadamente el caudal de entrada a las zanjas, estas pueden ser susceptibles a contaminar por medio de infiltración de contaminantes químicos y biológicos.

Una desventaja física de las zanjas es que, para su correcta implementación, requieren de un espacio relativamente amplio para funcionar adecuadamente, lo que puede ser una limitación si no se cuenta con terreno suficiente o se pretende emplear en áreas urbanas. Además, la topografía del terreno debe ser preferiblemente con inclinación para que el

agua infiltre por gravedad hacia el sistema de zanjas (Pastrán, 2010).

### **3. Áreas de infiltración.**

#### **a. Características y generalidades**

Las áreas de infiltración son extensas áreas de terrenos con una alta capacidad de absorción con la principal característica que funcionan para infiltrar agua pluvial, o residual tratada de caudales de gran cantidad. Al igual que otras metodologías, esta permite que el agua superficial se infiltre gradualmente en el suelo, recargando los acuíferos subterráneos y reduciendo la escorrentía superficial.

Usualmente, esta metodología de infiltración depende, además de grandes extensiones de tierra, de una vegetación saludable y frondosa en el área de infiltración para permitir más eficientemente la absorción de agua en el suelo y evitar con eso también problemas de evaporación si el agua está directamente expuesto al ambiente.

#### **b. Consideraciones de diseño**

Para esta metodología de infiltración, al tratarse de sistemas de infiltración a gran escala, se debe de tomar en cuenta el determinar la cantidad de agua que llegará al área de infiltración y si esta afecta el tamaño necesario para la implementación.

Además, otros aspectos de diseño importante para las áreas de infiltración son la evaluación de la cantidad de escorrentía que se espera en el área durante eventos de lluvia, adicional al caudal de entrada del agua tratada que se pretende infiltrar. Se deben de utilizar datos de intensidad de lluvia, conductividad hidráulica, sistema de desbordamiento, profundidad de suelo permeable y control de caudales para poder dimensionar de manera adecuada todo el sistema de infiltración.

#### **c. Aspectos de salud y aceptación**

La calidad del agua es un factor crítico en sistemas de infiltración a gran escala, ya que el agua que se infiltra puede afectar la calidad de las aguas subterráneas. Es importante

realizar un monitoreo constante para asegurarse que el agua infiltrada cumple con los estándares de calidad y no contiene contaminantes que puedan representar un riesgo para la salud pública.

Para que los sistemas de infiltración sean aceptados, deben cumplir con su función de manera efectiva, infiltrando de manera adecuada el agua que se le introduzca siempre cuidando que no genere malos olores, aspectos negativos en la comunidad y sin causar problemas de salud o ambientales.

#### d. Operación y mantenimiento

En áreas de infiltración extensas, es común que se acumule agua durante eventos de lluvia intensa por lo que se implementan sistemas de drenaje para evacuar el exceso de agua y evitar el desbordamiento, a estos sistemas se les debe de dar mantenimiento periódicamente para el adecuado funcionamiento de infiltración.

Por otro lado, si se ha plantado vegetación en el área de infiltración o bien si se tiene vegetación natural del sitio, es necesario asegurarse de que esté sana y bien mantenida. De la misma manera, se debe de cuidar la no proliferación de vegetación no deseada.

#### e. Pros y contras

Dentro de las ventajas de las áreas de infiltración está que contribuyen a la gestión sostenible del agua y facilitan la mejora de la calidad del agua al permitir que el agua se filtre a través del suelo, donde los contaminantes pueden quedar retenidos y degradarse.

Otro aspecto ventajoso es la versatilidad del diseño ya que estos sistemas se pueden diseñar en función de las necesidades específicas del sitio, lo que permite su adaptación a una amplia variedad de condiciones y tamaños de proyectos.

Por otro lado, los aspectos negativos de esta metodología de infiltración son que necesitan de grandes extensiones de terreno con espacio significativo para elaborar el sistema de infiltración, lo cual puede ser una limitación. Además de los costos iniciales ya que el diseño e instalación de esos sistemas de gran escala pueden ser costos

especialmente en comparación con métodos tradicionales de infiltración.

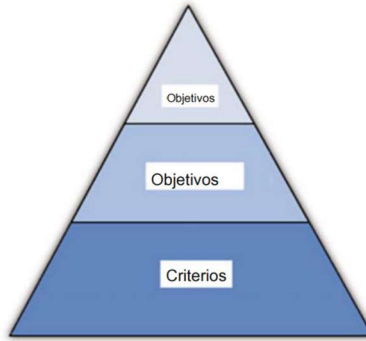
Por último, otra contra que tiene esta metodología es la regularidad del mantenimiento que requieren para mantener su eficacia ya que se puede volver complicado al tratarse de grandes extensiones de terreno.

## **F. Análisis de decisión**

El análisis de decisiones es la ciencia y el arte de diseñar o elegir las mejores alternativas en función de los objetivos y preferencias de quien toma las decisiones. Tomar una decisión implica que hay opciones alternativas a considerar. En tales casos, no se requiere identificar sólo tantas alternativas como sea posible, sino que elegir la que mejor se ajuste a nuestras metas, deseos, estilo de vida, valores, etc (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

En otras palabras, el análisis de decisiones es la ciencia de la elección. Por ejemplo, seleccionar la mejor tecnología para el suministro de agua urbana, desarrollar alternativas de protección contra inundaciones u optimizar el funcionamiento de un embalse son todos problemas de elección (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

Para describir las preferencias de quien toma decisiones, se puede utilizar uno de los términos de Metas, Objetivos, Criterios y Atributos. Sin embargo, existen diferencias entre sus significados. Las metas son útiles para identificar claramente el nivel de logro por alcanzar. Las metas se relacionan con los resultados de desempeño deseados en el futuro, mientras que un objetivo es algo que debe perseguirse hasta su máximo nivel o, en general, puede indicar la dirección del cambio deseado. Los criterios son resultados más específicos y mensurables. Un criterio generalmente indica la dirección en la que debemos esforzarnos por hacerlo mejor (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).



*Figura 6.* Relación entre metas, objetivos y criterios (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

## 1. Análisis de Decisión Multicriterio (ADM)

El Análisis de Decisión Multicriterio (ADM) o MCDA por sus siglas en inglés (Multicriteria Decision Analysis) es un conjunto de técnicas planteadas por Zarghami, M. y Szidarovszky, F. en donde se plantean los conceptos sobre metodologías para la toma de decisiones con base a una explicación matemáticas que toma en cuenta los factores importantes que un ente tomador de decisiones debe de considerar.

Cualquier problema de ADM tiene tres componentes principales que se deben de tomar en cuenta. Los tomadores de decisión (TM), alternativas y criterios. Las definiciones de estos conceptos son las siguientes:

### a. Tomadores de decisión (TD)

El primer elemento es identificar los TD ya que, para un problema particular, se podría tener una sola persona responsable de decidir qué hacer o varias personas u organizaciones involucradas en el proceso de toma de decisiones. En el primer caso, se considera un solo DM; en el segundo caso, se tomarían en cuenta varios TD. Cuando hay más de un TD presente es posible que tengan diferentes preferencias, metas, objetivos y criterios, por lo que es probable que ningún resultado de decisión satisfaga a todos por igual (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

En esos casos, se debe tomar una decisión colectiva cuando el resultado depende de cómo los diferentes TD toman en cuenta los intereses de los demás. En otras palabras, el resultado depende de su voluntad de cooperar entre sí. En el caso de múltiples tomadores de decisiones, se podría considerar el problema como un problema ADM, donde los criterios de los diferentes tomadores de decisiones se consideran los criterios del problema (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

En el caso de un solo TD y un criterio, se tiene un problema de optimización de un solo objetivo. Los métodos aplicados dependen del tipo de problema (programación lineal, programación no lineal, programación entera o mixta, optimización dinámica, programación estocástica, etc.). Los problemas típicos del ADM surgen cuando un único responsable de la toma de decisiones considera varios criterios simultáneamente (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

En la presencia de múltiples TD, el problema puede modelarse mediante ADM como se mencionó anteriormente, o en el caso de prioridades y deseos conflictivos de los TD, se puede utilizar la teoría de juegos. El ADM se considera a menudo como la metodología más poderosa para resolver problemas de teoría de juegos con jugadores cooperativos (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

#### b. Alternativas

Estas son las posibilidades entre las que uno tiene que elegir. Se pueden identificar alternativas o incluso desarrollarlas (crearlas donde antes no existían) (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

Al conjunto de todas las alternativas posibles se le llama espacio de decisión. En muchos casos, el espacio de decisión tiene sólo un número finito de elementos. Por ejemplo, seleccionar una tecnología entre cuatro posibilidades da como resultado un espacio de decisión con cuatro alternativas (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

En muchos otros casos, las alternativas de decisión se caracterizan por variables de decisión continuas que representan ciertos valores sobre los cuales se debe tomar la



decisión. Por ejemplo, la capacidad del embalse puede ser cualquier valor real entre el valor más pequeño factible y la mayor posibilidad (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

### c. Criterios

Estos son las características o requisitos que cada alternativa debe poseer en mayor o menor medida. Las alternativas generalmente se califican según su grado de cumplimiento de los criterios (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

Dado que se debe elegir entre un conjunto dado de alternativas factibles, es necesario medir qué tan buenas son esas alternativas. La bondad de cualquier alternativa puede caracterizarse por sus evaluaciones con respecto a los criterios. Estas evaluaciones pueden describirse mediante números nítidos, valores lingüísticos, números aleatorios o difusos. Un criterio se llama positivo si valores mayores indican una mejor evaluación. De la misma manera, un criterio se denomina negativo si un valor menor muestra una mejor evaluación (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

En el caso de un criterio, el problema se plantea como:

$$\text{Maximizar } f(x) \text{ sujeto a } x \in X$$

Aquí  $x$  representa una alternativa y  $X$  es el conjunto de todas las alternativas factibles. Todos los valores de  $f(x)$  cuando  $x$  está dentro del conjunto factible,  $X$ , se encuentran en la recta real. La solución óptima tiene por tanto las siguientes propiedades:

1. La solución óptima es al menos tan buena como cualquier otra solución.
2. No hay mejor solución que la solución óptima.
3. Todas las soluciones óptimas son equivalentes, es decir, tienen el mismo valor objetivo.

(Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

### **G. Municipio de Zapotitlán, Jutiapa.**

El municipio de Zapotitlán se encuentra ubicado al Sureste de la cabecera departamental de Jutiapa, Guatemala, dentro de las siguientes coordenadas: latitud: 14° 08' 12", longitud: 89° 49' 36" y altitud a 875 metros sobre el nivel del mar. Su extensión territorial es de 84 kilómetros cuadrados. La distancia de Zapotitlán a la cabecera departamental de Jutiapa es de 36 Km y de la cabecera municipal a la ciudad capital hay una distancia de 157 kilómetros. El municipio limita al este con la república de El Salvador, facilitando así la exportación y comercio de sus productos (Consejo Municipal Zapotitlán, 2019).

El 70% de la topografía es plana o con leves relieves dentro de los cuales se incluyen montañas, montes, cerros, colinas, valles, llanuras y mesetas; estas características ejercen un papel importante en la definición de microclimas. Los suelos son adecuados para la producción de hortalizas de clima cálido, principalmente de jocote y café. En el Municipio no existe ningún volcán, encontrándose únicamente dos cerros, uno en el caserío Cunixtepeque, el cual se encuentra en la ruta que conduce hacia la aldea La Ceibita y el caserío Canoas. El segundo cerro le da el nombre a la aldea Cerro Redondo, ubicado en la ruta que conduce hacia el municipio de El Adelanto (Consejo Municipal Zapotitlán, 2019).

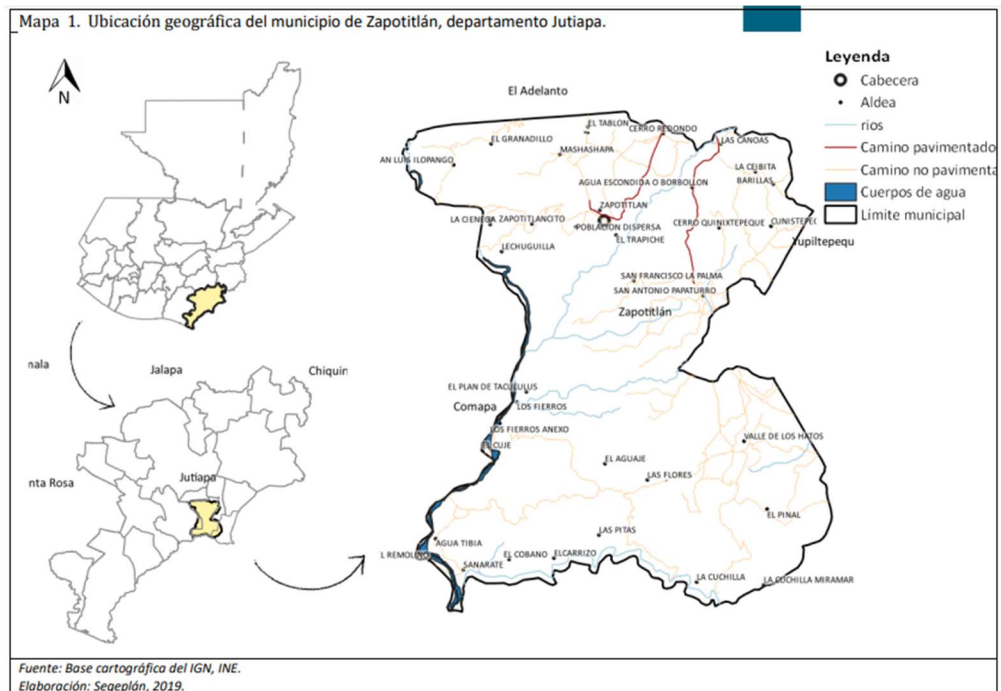


Figura 7. Mapa del municipio de Zapotitlán, Jutiapa.

Zapotitlán es uno de los municipios menos poblados de Jutiapa, según el INE, cuenta con una población total estimada de 10,693 habitantes, de los cuales el 50.19% son hombres y el 49.81% mujeres y de ellos el 23% de habitantes se encuentra en el área urbana y 77% en el área rural. Un 60% de la población está comprendida entre las edades de 0 a 24 años, y un 30% entre los 25 a 55 años; por lo que se puede decir que un 90% de la población total es relativamente joven. Según las proyecciones se estima que la población llegue a una cifra total de 11,254 habitantes en un período de cinco años, con una tasa de crecimiento del 5.25% (INE, 2020).

Dentro del municipio la mayoría de las familias se dedica a la agricultura de subsistencia (cultivo de granos básicos), quienes en los últimos años se han visto afectados por el fenómeno de sequía, lo cual causa una baja productividad agrícola y pecuaria, pérdida total de cosechas, especialmente en la parte sur del municipio en las aldeas. Por otro lado, se ha visto una baja significativa en las oportunidades laborales, incrementando el desempleo, lo cual ha motivado a personas individuales y familias a migrar hacia la ciudad capital o hacia Estados Unidos. Actualmente dentro del municipio existe mayor acceso a los niveles de educación preprimario, primario y básico, ya que en

la mayoría de las comunidades hay escuelas, lo cual ha mejorado la capacidad laboral de la población ya que se encuentran mejor preparados para optar a distintas oportunidades de trabajo. Sin embargo, la oferta no ha incrementado al mismo ritmo de la demanda causando que varios habitantes busquen dichas oportunidades fuera del municipio (Consejo Municipal Zapotitlán, 2019).

Se espera que para el 2032 Zapotitlán sea un municipio con desarrollo equitativo en toda la región donde se valore la sostenibilidad de los recursos naturales, se mejore la calidad de servicios y así mismo la calidad de vida de la población (Consejo Municipal Zapotitlán, 2019).

## V. METODOLOGÍA

### A. Área de estudio

La PTAR del sector del Barrio La Lagunita de Zapotitlán, Jutiapa está ubicada en las coordenadas latitud: 14.1362149 y Longitud: -89.8273231 y se caracteriza por recoger las aguas residuales tipo ordinarias de una parte del casco urbano del municipio en una tubería de 6 pulgadas de diámetro.



--- Terreno para infiltración    — PTAR    — Quebrada Barrio la Lagunita

*Figura 8.* Mapa esquemático de ubicación de elementos.

Esta PTAR y área de estudio fue elegida para la investigación del trabajo de graduación como conveniencia por la facilidad al acceso de información y anuencia a permitir la ejecución de las pruebas respectivas por parte de la Municipalidad de Zapotitlán.

En el rectángulo rojo se encierra la planta de tratamiento con sus respectivos sistemas de tratamiento primario y secundario, en el cual el agua residual tratada desfoga hacia la quebrada La Lagunita (línea color celeste). Cabe destacar que el área para la experimentación de las pruebas Lefranc de infiltración fue destinada porque según la información proporcionada por parte de la Municipalidad, esta entidad cuenta con la propiedad del terreno encerrado en la línea amarilla punteada.

## **B. Análisis de estudio fisicoquímico**

Para el análisis de la calidad de agua de la PTAR del Municipio de Zapotitlán, se utiliza la información sobre los límites máximos permisibles del Acuerdo Gubernativo 236-2006 en el cual se establecen los parámetros que se deben de cumplir para el reuso del agua residual según el tipo al que está destinado.

Paso 1: Realizar estudio fisicoquímico del agua de descarga de la PTAR en un laboratorio certificado que pueda generar todas las pruebas con instrumentos y equipo profesional.

Paso 2. Procesar los datos del laboratorio y plasmar los resultados en un informe con la comparativa entre los datos obtenidos versus los límites máximos permisibles del AG 236-2006.

Paso 3. Discusión de resultados. Se procede a discutir resultados obtenidos y evaluar las razones por las cuales se obtuvieron los parámetros que no cumplen.

En el caso de esta investigación para trabajo de graduación, el paso 1 y 2 fueron realizados por parte de la Municipalidad de Zapotitlán a través del informe de “ACTUALIZACION DE ESTUDIO TÉCNICO PARA LA CARACTERIZACION DE AGUAS RESIDUALES” ver anexos. Luego la parte del análisis de los resultados y discusión de estos se presenta en el apartado de Resultados de este documento.

## **C. Conductividad hidráulica**

La conductividad hidráulica o también conocida como coeficiente de infiltración es un parámetro empleado en campo para medir la capacidad de infiltración de un terreno dependiendo de las características de los estratos que lo conforman. Este parámetro está medido en dimensionales de velocidad.

Existen varias metodologías para medir la conductividad hidráulica de un terreno y depende de la utilidad y precisión del resultado que se espera obtener, la que se utilizará para cada proyecto. En este caso se utiliza la prueba de Lefranc, la cual según el documento utilizado como referencia literalmente indica que es una “Prueba de carácter puntual, que permite calcular la conductividad hidráulica en materiales granulares en un tramo de barreno (con base en la ecuación de Darcy), en intervalos de tiempo regulares, a partir de la medición del nivel freático y del flujo de agua agregado o extraído al tramo probado o bien, sin considerar éste último, del cálculo de la velocidad con que cambian los niveles de agua en el barreno” (LA, R. Y. S. A. , 2021).

### **1. Determinación de prueba Lefranc**

Para determinar qué tipo de prueba Lefranc se pretende realizar, preliminarmente se tiene que asegurar que el suelo esté saturado para poder tener un resultado acertado ya que de no ser así se esperaría que el resultado sea únicamente orientativo (PLATA-BEDMAR, 2006).

Dependiendo del método que se vaya a emplear, las pruebas Lefranc se clasifican en dos tipos: Lefranc de flujo constante y Lefranc de flujo variables, además estas dos se clasifican en dos tipos dependiendo del ascenso o descenso del nivel freático.

Si la observación del material del terreno indica que el estrato puede tener una alta capacidad de absorción, lo más adecuado es realizar una prueba Lefranc de flujo constante en el que el caudal de ingreso o salida de la prueba se tiene que mantener a un nivel conocido para siempre mantener la columna de agua controlada (LA, R. Y. S. A. , 2021).

Por otra parte, si el suelo pareciera tener una baja permeabilidad, lo más adecuado es realizar una prueba Lefranc de flujo variable en la que se controla la columna de agua que el estrato deja infiltrar en un lapso conocido de tiempo (LA, R. Y. S. A. , 2021).

Además de las anteriores, hay dos casos especiales de pruebas: Lefranc somera, la cual se aplica en el tramo superficial del barreno (con la posibilidad de realizar las de tipo flujo constante y flujo variable y Lefranc vertical (o de fondo), cuando la tubería de perforación se deja hasta el fondo del barreno y se prueba sólo el área circular que queda libre, también incluye las de tipo flujo constante y flujo variable (LA, R. Y. S. A. , 2021).

Para conocer más precisamente el tipo de prueba Lefranc que se debe realizar según los requerimiento u objetivos del proyecto o investigación, y comprender de mejor manera los conceptos de los que se hablan, se presentan los siguientes cuadros:

TIPO DE PRUEBA		Conductividad hidráulica (permeabilidad) estimada	Posición del nivel freático
FLUJO CONSTANTE	Inyección	Alta	Arriba de la cámara filtrante y preferentemente a 10 m del nivel del terreno.
	Bombeo		Preferentemente 10 m por arriba del centro de la cámara filtrante.
FLUJO VARIABLE	Descenso	Baja	Arriba de la cámara filtrante y preferentemente a 10 m del nivel del terreno.
	Ascenso		Preferentemente 10 m por arriba del centro de la cámara filtrante.

*Cuadro 2.* Tipo de pruebas Lefranc recomendadas con relación al grado de conductividad hidráulica (LA, R. Y. S. A. , 2021) .

CASOS ESPECIALES	Tipo de prueba		Conductividad hidráulica (permeabilidad) estimada	Posición del nivel freático	Aspectos a atender
SOMERA (0 a 5 m de profundidad)	Flujo constante	Inyección	Alta	Por lo general no se observa	Probablemente sea difícil mantener niveles estables
		Bombeo		Próximo a la superficie del terreno	Probablemente se requiera extraer un gran volumen de agua
	Flujo variable	Descenso	Baja	Por lo general no se observa	Probablemente el nivel de agua descienda muy lentamente
		Ascenso		Próximo a la superficie del terreno	Es un caso raro, la recuperación del nivel puede tardar mucho

*Cuadro 3.* Selección del tipo de prueba Lefranc de acuerdo con las condiciones que presenta el terreno en un tramo somero (LA, R. Y. S. A. , 2021) .



En el siguiente diagrama de flujo se resume el procedimiento de selección para una prueba Lefranc con base en lo indicado con anterioridad:

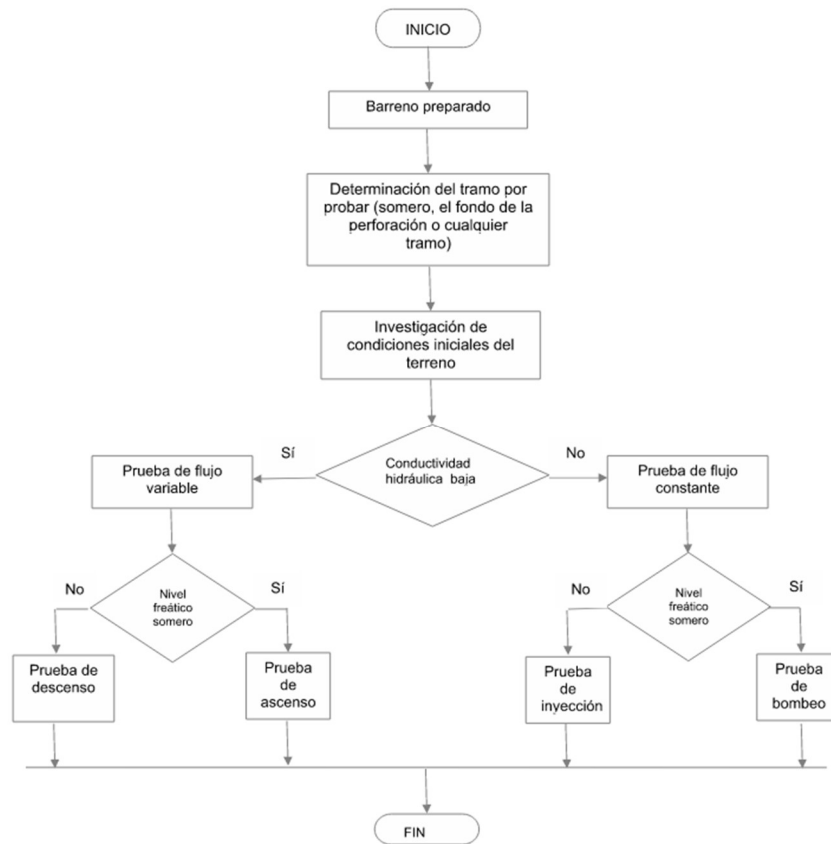


Figura 9. Diagrama de flujo para selección de prueba Lefranc (LA, R. Y. S. A. , 2021).

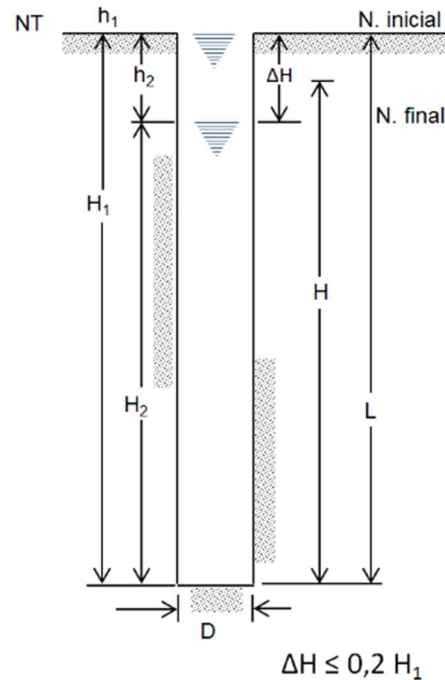
Para fines prácticos de los objetivos de la tesis, a partir de este segmento la metodología se enfoca únicamente en la prueba Lefranc somera de flujo variable en descenso la cual fue la que se eligió para las pruebas que se realizaron en el terreno seleccionado para el experimento de la investigación.

## 2. Desarrollo de prueba Lefranc tipo somera

Con ella se determina la conductividad hidráulica en un tramo desde la superficie del terreno. La perforación no se adema y se considera el tramo de prueba de la superficie al fondo de la perforación. La longitud del tramo por probar debe ser cuando menos de 5

veces el diámetro del barreno y no mayor de 5 m. Una vez concluida la prueba es necesario verificar que el barreno conservó su forma, en caso contrario debe repetirse la prueba, reperforando primero para luego rellenar con grava (LA, R. Y. S. A. , 2021).

Se presenta la siguiente imagen en donde se observa el esquema de la prueba Lefranc y es más comprensible los niveles de las columnas de agua y del terreno natural:



*Figura 10.* Esquema de prueba Lefranc somera de flujo variable en descenso (LA, R. Y. S. A. , 2021).

El procedimiento para realizar la prueba de Lefranc de flujo variable en descenso es bastante simple y se puede resumir en que se debe perforar un barreno (hoyo) en el estrato superficial del terreno siguiendo la relación de que la diferencia de las alturas de las columnas de agua sea menor o igual al 20% de la altura más grande.

Se procede a llenar la perforación hasta  $H_1$  y se deja pasar cierto tiempo para que el agua introducida se absorba en el terreno hasta una altura  $H_2$ . Se presenta el siguiente diagrama de flujo en donde se resume el procedimiento para realizar la prueba en mención:

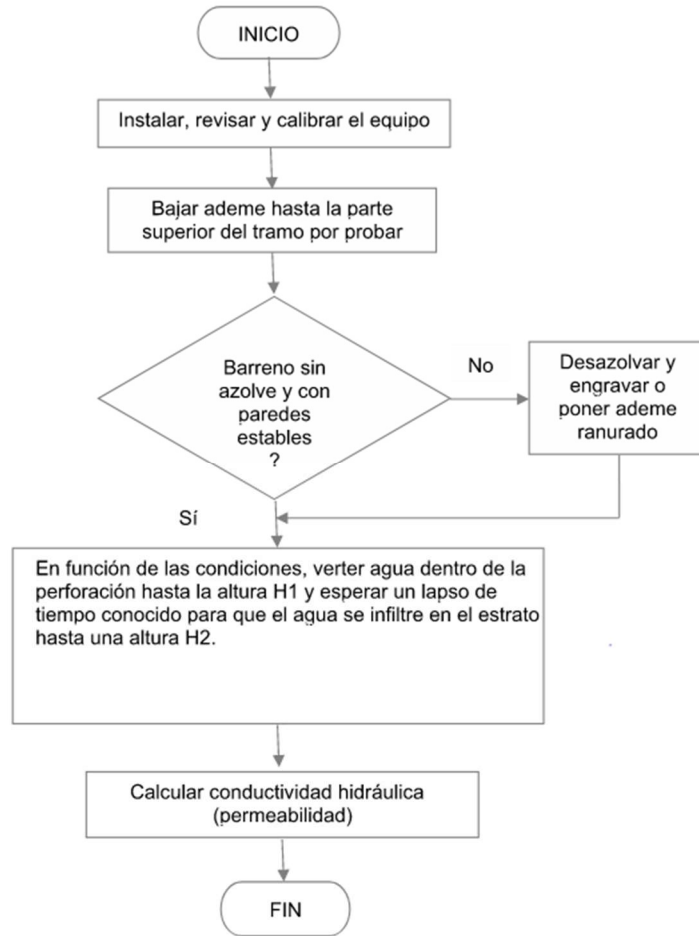


Figura 11. Diagrama de flujo para ejecución de prueba Lefranc somera de flujo variable (LA, R. Y. S. A. , 2021).

### 3. Cálculos para la prueba Lefranc tipo somera

Para el cálculo del valor de la conductividad hidráulica en pruebas someras con flujo variable (con ascenso o descenso) se utiliza la ecuación:

$$k = 2.0 * C * A * \frac{\Delta H}{t} / H$$

Donde:

K = Conductividad hidráulica.

C = Factor de forma.

A = Área de la sección circular del barreno.

T = Tiempo del intervalo de observación.

H = Carga promedio de la columna de agua en cada observación.

$\Delta H$  = Diferencia de carga de las columnas de agua inicial y final de cada observación.

Se debe de tomar en cuenta también la siguiente ecuación para encontrar el factor de forma el cual a diferencia de las pruebas de flujo variable no someras en que la carga de la columna de agua (H) determina la longitud de la cámara filtrante y ésta debe ser diferente en cada observación, así como los factores de forma (C), por lo que en el siguiente cálculo L debe sustituirse por H: (LA, R. Y. S. A. , 2021).

$$C = \frac{0.366 * \log (L + \sqrt{L^2 - D^2})}{L}$$

En donde L es la longitud total de la perforación realizada.

#### 4. Clasificación de conductividad hidráulica

En el siguiente cuadro se presentan los rangos de permeabilidad o conductividad hidráulica basado en la publicación de “*Soil Mechanics in Engineering Practice*” de Karl Terzhagi, Ralph B. Peck, y Gholamreza Mesri en 1996. Este cuadro fue elaborado por Terracon S. A. (empresa de estudios de suelos en Guatemala) como parte del análisis que se presentan en los informes sobre estudios de permeabilidad de suelos:

## TERMINOS UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS REALIZADOS

### Conductividad Hidráulica

El coeficiente de permeabilidad (k) del suelo, también conocido como conductividad hidráulica, describe la velocidad del flujo de agua a través del suelo.

Tabla - Rangos de conductividad hidráulica del suelo basado en el USCS.

Descripción	Clasificación Estandar	Conductividad Hidráulica (cm/s)	Permeabilidad Relativa
Gravas limpias	GW, GP	> 1	Alta
Gravas arenosas, Arenas limpias y Arena finas	GP, GS, SP, SW	1 a $10^{-3}$	Media
Arenas y Arenas limosas	SW, SP, SM	$10^{-3}$ a $10^{-5}$	Baja
Limos y Arcillas limosas	ML, CL-ML	$10^{-5}$ A $10^{-6}$	Muy Baja
Arcillas	CL	< $10^{-6}$	Practicamente Impermeable

Fuente: Basado en Terzaghi, Peck y Mesri (1996)

Cuadro 4. Rangos de conductividad hidráulica.

## D. Matriz de decisión

Se presentan los métodos de solución más populares y utilizados con más frecuencia para problemas ADM discretos deterministas. En los modelos deterministas se supone que las evaluaciones de las alternativas, las ponderaciones de los criterios y todos los demás parámetros son ciertos y conocidos.

### 1. Método de dominancia

Sea  $X_j = (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{nj})$  vector de evaluación de la alternativa  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ). Se dice que una alternativa domina otra si resulta en valor igual o superior en todos los criterios y en al menos un criterio es estrictamente mejor. Matemáticamente la propiedad de que la alternativa  $j$  domina la alternativa  $l$  puede ser expresado como  $a_{ij} \geq a_{il}$  para todos los criterios  $i$  y hay por lo menos un criterio  $i$  tal que  $a_{ij} > a_{il}$  (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

Sin embargo, es muy raro que una alternativa domine a todas las demás. En tales casos la alternativa dominante es la elección que realizar y no es necesario realizar más estudios. En muchos problemas prácticos se puede encontrar pares de alternativas en los que una alternativa domina a la otra incluso si ninguna alternativa domina a todas. Si una alternativa  $j_1$  domina a  $j_2$ , entonces no hay necesidad de considerar la alternativa  $j_2$  en el proceso de selección posterior, por lo que se puede eliminar y el número de alternativas disminuye en uno. Luego de que todas las alternativas dominadas se han eliminado y aún se tiene mas de una alternativa disponible, entonces se debe de continuar el proceso de selección con la implementación de otro método (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

Para explicar más ilustrativo esta metodología, se acude al siguiente ejemplo sobre la mejor ubicación de una presa que se construiría en una cuenca, se basa en tres criterios: beneficio neto (en millones de dólares), número de beneficiarios (en millones de personas) y estabilidad geológica (en escala objetiva de 0 a 100). Las alternativas de ubicación se muestran en la Figura No. 10 y los datos sobre los vectores para las cuatro alternativas se muestran en las columnas de la siguiente tabla (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

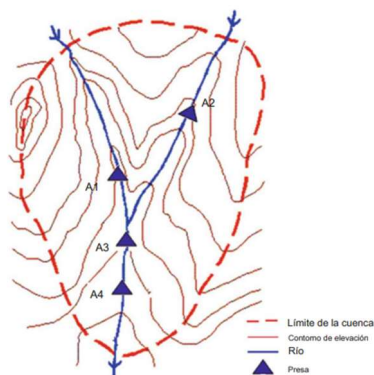


Tabla 1. Tabla de evaluación para el ejemplo de ADM.

Criterios alternativos	A1	A2	A3	A4
C1	99,6	85,7	101,1	95,1
C2	4	19	40	50
C3	70	50	10	20

Figura 12. Mapa esquemático de las alternativas de ubicación de presas.

Analizando, si se cambia el valor de  $a_{11} = 99.6$  a  $a_{11} = 102$  y el valor de  $a_{12}$  de 4 a 51, entonces la alternativa A1 dominará a todas las demás, por lo que sería la opción para elegir.

## 2. Optimización secuencial

Este método se basa en las preferencias ordinales de los criterios. Se supone que el TD puede identificar el criterio más importante  $i_1$ , el segundo criterio más importante  $i_2$ , y finalmente el menos preferido  $i_n$ , porque el TD quiere satisfacer primero el criterio más importante, así como posible, y luego satisfacer el segundo manteniendo el primero en su nivel más favorable, si aún son posibles algunas opciones (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

Después de que el segundo criterio más importante se satisface en su mejor nivel posible y no se encuentra la mejor alternativa, se optimiza el tercer criterio, y así sucesivamente. El procedimiento finaliza si se encuentra la mejor alternativa en cualquiera de los pasos o si el criterio menos preferido ya está optimizado. Si al final de este procedimiento se encuentra una única alternativa óptima, entonces es la elección. En caso contrario se puede seleccionar cualquiera de las alternativas óptimas, ya que tienen evaluaciones idénticas en todos los criterios, por lo que no hay diferencia entre ellas en lo que respecta a los criterios seleccionados originalmente. En muchos casos, el TD puede agregar uno o más criterios nuevos y repetir el proceso solo con las alternativas óptimas para llegar a una decisión única (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

Consideremos nuevamente el problema de selección de la ubicación de la presa presentado en la Tabla 1. Si el criterio 1 es el más importante para el TD, entonces la alternativa  $A_3$  es su elección. Si  $C_2$  es el más importante, entonces  $A_4$  es la opción, y si  $C_3$  es el más importante, entonces la alternativa  $A_1$  es la mejor. Supongamos ahora que el orden de preferencia de los criterios es  $C_1 > C_2 > C_3$ , donde  $C_{i1} > C_{i2}$  significa que el criterio  $i_1$  es más importante que  $i_2$ . Supongamos que además, el TD tiene que clasificar las alternativas para seleccionar su mejor opción (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

En el primer paso el TD considera el criterio  $C_1$  y selecciona la mejor alternativa con respecto a este criterio:  $A_3$ . Entonces esta alternativa se elimina de la tabla y se considera  $C_1$  nuevamente con las tres alternativas restantes. El mejor valor  $C_1$  se obtiene en la

alternativa  $A_1$ . Después de esto también se elimina y sólo las alternativas  $A_2$  y  $A_4$  permanecen en la tabla, se comparan nuevamente con respecto al criterio  $C_1$  y se encuentra que  $A_4$  es mejor. Entonces la clasificación de las alternativas basada en este enfoque se convierte en:

$$A_3 > A_1 > A_4 > A_2$$

Observe que la clasificación de las alternativas fue muy simple en el ejemplo anterior, ya que siempre hubo una mejor alternativa única en cada paso, lo cual no siempre es el caso. En general, decimos que la alternativa  $j_1$  es considerada mejor que la alternativa  $j_2$  si alguno  $a_{ij_1} > a_{ij_2}$  para todos los criterios, o que exista  $k(1 \leq k \leq n - 1)$  tal que  $a_{ij_1} = a_{ij_2}$  para  $l = 1, 2, \dots, k$  y  $a_{i_{k+1}j_1} > a_{i_{k+1}j_2}$ , donde  $i_1, i_2, \dots, i_n$  es el orden preferido de los criterios (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

### 3. Método de restricción $\epsilon$

En la aplicación del método de optimización secuencial ocurre muy a menudo que el procedimiento termina antes de que se evalúen todos los criterios. Tal fue el caso del ejemplo anterior en donde la optimización con respecto a los criterios más importantes dio una solución única y no fue necesaria ninguna investigación adicional con los criterios menos importantes. Sin embargo, existe la posibilidad de que algunos o todos los criterios menos importantes den resultados muy deficientes o inaceptables sobre la evaluación de las alternativas seleccionadas (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

Para evitar esta posibilidad, el DM identifica sus criterios más importantes y da niveles mínimos aceptables a todos los demás criterios. Esta información y requisito deben garantizar que la mejor opción seleccionada no dará peores valores en ningún criterio que el nivel inferior especificado (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

El procedimiento consta de dos pasos. En el primer paso se eliminan todas las alternativas que violen las condiciones del límite inferior. En el segundo paso sólo se considera el criterio más importante y se selecciona la alternativa restante con el mejor número de evaluación (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).



En este ejemplo, se considera nuevamente el problema de la Tabla 1. Supongamos que  $C_1$  es el criterio más importante y que el valor mínimo de aceptación para  $C_2$  es 15 y para  $C_3$  es 20. Con base en estos límites inferiores, las alternativas  $A_1$  y  $A_3$  deben eliminarse, y solo  $A_2$  y  $A_4$  permanecen en la tabla. En el segundo paso se comparan con respecto al criterio más importante  $C_1$ , y en la comparación  $A_4$  tiene mayor valor, por lo que es la opción para elegir (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

#### 4. Ponderación Aditiva Simple (PAS)

En esta metodología también conocida como SAW por sus siglas en inglés (Simple Additive Weighting) el TD tiene que especificar las ponderaciones de importancia relativa de todos los criterios. Si los criterios en conjunto representan el 100% del interés del TD, entonces denotemos  $w_i$  con el porcentaje de interés para el criterio  $i$ . Se supone que para todo  $i$ ,  $w_i \geq 0$  y  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ . En la versión más sencilla del método el TD construye una nueva función objetivo, que es la media ponderada de los valores de evaluación con respecto a los diferentes criterios. Es decir, el promedio ponderado

$$F_j = \sum_{i=1}^n w_i a_{ij} \quad (4.1)$$

se asigna como la evaluación “general” de la alternativa  $j$  (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

En la mayoría de las aplicaciones, los valores de  $a_{ij}$  representan fenómenos muy diferentes, como los dólares, el número de personas y la idoneidad geológica en nuestros ejemplos anteriores. En tales casos, la función objetivo (4.1) no tiene un significado directo, ya que se agregan cosas diferentes. Otra dificultad de aplicar estas funciones objetivo es el hecho de que, al cambiar la unidad de cualquiera de los objetivos, su peso cambia automáticamente. Por ejemplo, si se cambia la unidad del criterio  $C_1$  (beneficio neto) de millones de dólares a diez millones, entonces los números de evaluación correspondientes se dividirán por 10, lo que equivale a dar una décima menos de peso a

este criterio. Para superar estas dificultades se debe de normalizar las cifras de evaluación. Se puede usar una transformación lineal simple

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij} - m_i}{M_i - m_i},$$

donde  $m_i$  y  $M_i$  son los valores mínimo y máximo calculados o estimados del criterio  $i$ . Claramente,  $a_{ij}$  siempre estará entre 0 y 1 con cero peor valor y la unidad el mejor. En lugar de esta simple transformación lineal, se puede introducir funciones de utilidad  $u_i(a_{ij})$  para todos los criterios que muestren los niveles de satisfacción (en porcentajes) de los valores  $a_{ij}$  para el criterio  $i$ . Entonces el promedio ponderado

$$F_j = \sum_{i=1}^n w_i u_i(a_{ij}) \quad (4.3)$$

muestra el nivel promedio de satisfacción de la alternativa  $j$ . La transformación lineal (4.1) corresponde a la función de utilidad lineal

$$u_i(a_{ij}) = \frac{a_{ij} - m_i}{M_i - m_i}. \quad (4.4)$$

La alternativa con el mayor valor objetivo se selecciona como la mejor opción (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

Regresando al ejemplo de la selección de la presa con los datos de la Tabla No. 1, se pueden seleccionar los valores mínimos de los criterios como  $m_1 = 85.7$ ,  $m_2 = 4$ ,  $m_3 = 10$  y los valores máximos como  $M_1 = 101.1$ ,  $M_2 = 50$ ,  $M_3 = 70$ . Por lo que los criterios normalizados pueden computarse de la siguiente manera

$$\bar{a}_{1j} = \frac{a_{1j} - 85.7}{101.1 - 85.7} = \frac{a_{1j} - 85.7}{15.4},$$

$$\bar{a}_{2j} = \frac{a_{2j} - 4}{50 - 4} = \frac{a_{2j} - 4}{46},$$

y

$$\bar{a}_{3j} = \frac{a_{3j} - 10}{70 - 10} = \frac{a_{ij} - 10}{60}$$

para  $j = 1,2,3,4$ . Los valores normalizados se muestran en la Tabla No. 2, donde también se indican los pesos de los criterios. Los valores de satisfacción promedio ponderados de las cuatro alternativas son los siguientes:

$$F_1 = 0.2(0.903) + 0.3(0) + 0.5(1) = 0.681$$

$$F_2 = 0.2(0) + 0.3(0.326) + 0.5(0.667) = 0.431$$

$$F_3 = 0.2(1) + 0.3(0.783) + 0.5(0) = 0.435$$

$$F_4 = 0.2(0.610) + 0.3(1) + 0.5(0.167) = 0.506$$

Es evidente que la primera alternativa es la mejor. El orden completo de las alternativas se puede hacer ordenando las alternativas en valores  $F_j$  decrecientes. En este caso:

$$A_1 > A_4 > A_3 > A_2.$$

(Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

Tabla 2. Evaluaciones y ponderaciones normalizadas del ejemplo.

**Tabla 3.2 Evaluaciones y ponderaciones normalizadas para el ejemplo 3.1**

Criterios	Alternativas				
	Pesos 0,2	A1	A2	A3	A4
C1		0.903	0.000	1.000	0.610
C2	0.3	0.000	0.326	0.783	1.000
C3	0,5	1.000	0,667	0.000	0,167

## 5. Proceso de Jerarquía Analítica (PJA)

En la aplicación de los métodos discutidos anteriormente la prioridad del TD se expresa mediante un vector  $(w_1, w_2, \dots, w_n)$  de pesos de importancia. En muchas aplicaciones, la evaluación de dichos pesos no es fácil. El proceso de jerarquía analítica que se analiza en

esta sección se basa en comparaciones por pares. En esta tarea se pregunta al TD sobre la importancia relativa del criterio  $i$  en comparación con el criterio  $j$  para cada par de criterios  $(i, j)$ . Al responder la pregunta, el TD debe concentrarse en sólo dos criterios y no en el conjunto completo de criterios. La respuesta  $a_{ij}$  del TD da una estimación de la relación  $w_i/w_j$ . Dado que el TD se concentra en sólo dos criterios a la vez y no piensa en las relaciones entre estos criterios y los demás, sus respuestas suelen ser inconsistentes. Si fueran consistentes, entonces deberían satisfacerse las siguientes relaciones:

$\alpha_{ij} = \frac{1}{\alpha_{ji}}$  para todo  $i$  y  $j$ , siempre que

$$\alpha_{ij} = \frac{w_i}{w_j} = \frac{1}{\frac{w_j}{w_i}} = \frac{1}{\alpha_{ji}},$$

$\alpha_{ij} \cdot \alpha_{jk} = \alpha_{ik}$  para todo  $i, j$  y  $k$ , siempre que

$$\alpha_{ij} \cdot \alpha_{jk} = \frac{w_i}{w_j} \cdot \frac{w_j}{w_k} = \frac{w_i}{w_k} = \alpha_{ik}.$$

Supongamos primero que las respuestas son consistentes (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011). Entonces la matriz  $A = (\alpha_{ij})$  satisface claramente la siguiente relación:

$$A \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = n \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix},$$

y si se usa la notación  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$  entonces

$$Aw = nw \tag{4.5}$$

lo que significa que  $n$  es un valor propio de la matriz  $A$  con el vector propio asociado  $w$ . La matriz  $A$  no es negativa y su rango es la unidad, ya que la fila  $k$  de la matriz es el múltiplo  $w_k/w_1$  de la primera fila. Por lo tanto, tiene un valor propio positivo y todos los

demás valores propios son iguales a 0. La teoría de Perron-Frobenius implica que  $n$  es el valor propio principal de  $A$  y el vector  $w$  es único excepto con un multiplicador constante (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011). Podemos normalizar los componentes de este vector dividiéndolos por su suma como:

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (4.6)$$

para pesos normalizados de los criterios.

Para obtener los pesos no necesitamos calcular los vectores propios; se puede obtener una buena aproximación con un enfoque simple. Observe que la suma de los elementos de las diferentes columnas es igual

$$\frac{\sum_{l=1}^n w_l}{w_1}, \frac{\sum_{l=1}^n w_l}{w_2}, \dots, \frac{\sum_{l=1}^n w_l}{w_n},$$

respectivamente, y dividiendo cada columna por la suma de sus elementos la matriz  $A$  modificada se convierte

$$\begin{pmatrix} \bar{w}_1 & \bar{w}_1 & \cdots & \bar{w}_1 \\ \bar{w}_2 & \bar{w}_2 & \cdots & \bar{w}_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \bar{w}_n & \bar{w}_n & \cdots & \bar{w}_n \end{pmatrix}, \quad (4.7)$$

es decir, tiene columnas idénticas (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

Como se mencionó anteriormente, las estimaciones de  $a_{ij}$  obtenidas del TD generalmente no satisfacen los requisitos de consistencia, por lo que la matriz normalizada (4.7) basada en las estimaciones no tendrá columnas idénticas. Entonces tenemos que encontrar el vector columna que sea la mejor aproximación general de las

diferentes columnas de la matriz normalizada obtenida. Como es bien sabido por la estadística, es el promedio algebraico simple de las columnas. Este vector promedio proporciona las estimaciones de los pesos normalizados. Con base en esta observación, el procedimiento se puede describir de la siguiente manera:

Paso 1. Construya la matriz  $A$  a partir de comparaciones por pares.

Paso 2. Normalice cada columna de esta matriz.

Paso 3. Calcule el promedio algebraico de las columnas de la matriz normalizada.

Los elementos de este vector dan los pesos (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

Volvemos ahora al problema de selección de represas examinado en algunos de los ejemplos anteriores. Hay cuatro alternativas para seleccionar según tres criterios. Del cuestionario entregado a los representantes de la empresa TD se obtuvo la siguiente matriz de comparación aproximada por pares:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 5 \\ 3 & 1 & 7 \\ 1/5 & 1/7 & 1 \end{pmatrix}.$$

Las sumas de los elementos de las columnas son  $21/5$ ,  $31/21$  y  $13$ , respectivamente. La matriz de comparación normalizada se obtiene dividiendo todos los elementos de cada columna por la suma de la columna. La matriz normalizada resultante se convierte en

$$\begin{pmatrix} 5/21 & 7/31 & 5/13 \\ 15/21 & 21/31 & 7/13 \\ 1/21 & 3/31 & 1/13 \end{pmatrix},$$

y el promedio algebraico de las tres columnas da el vector de peso aproximado:

$$w = \frac{1}{3} \left\{ \begin{pmatrix} 5/21 \\ 15/21 \\ 1/21 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 7/31 \\ 21/31 \\ 3/31 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 5/13 \\ 7/13 \\ 1/13 \end{pmatrix} \right\} = \begin{pmatrix} 0.2828 \\ 0.6434 \\ 0.0738 \end{pmatrix}. \quad (4.8)$$

También podemos comprobar el nivel de inconsistencia del TD. Primero tenemos que encontrar una buena aproximación del valor propio principal de la matriz  $A$ , que difiere claramente del valor teórico,  $n$ . Si multiplicamos cada elemento del vector de peso normalizado  $w$  por la suma de columna correspondiente de la matriz de comparación verdadera y sumamos estos productos, entonces el resultado se convierte en

$$\sum_{l=1}^n w_l \cdot \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{w_l} = \sum_{l=1}^n 1 = n,$$

el cuál es el verdadero valor propio principal. Podemos obtener su buena estimación  $\lambda_{max}$  con base en la matriz de comparación aproximada haciendo lo mismo: sumando los productos de las sumas de las columnas y los componentes correspondientes del vector de pesos normalizados (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011). Entonces el índice de inconsistencia se puede obtener mediante la fórmula principal:

$$ICI = \frac{\lambda_{max} - n}{(n - 1)RI},$$

donde el valor de  $RI$  depende del tamaño del problema. Está tabulado y sus valores se dan en la Tabla No. 3.

En el caso del ejemplo anterior  $n = 3$ , entonces  $RI = 0.58$ . Es fácil ver que

$$\lambda_{max} = \frac{21}{5} (0.2828) + \frac{31}{21} (0.6434) + 13(0.0738) \approx 3.0969,$$

entonces

$$ICI = \frac{3.0969 - 3}{(3 - 1)0.58} \approx 0.084,$$

el cual es menor al 10% por lo que consideramos consistente el TD.

En muchas aplicaciones, este procedimiento se utiliza primero para encontrar los pesos y luego se utiliza otro método (como el de ponderación o el basado en distancia) con los pesos obtenidos para encontrar la mejor solución.

Tabla 3. Valores de RI

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$RI$	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Este método también se puede utilizar para encontrar decisiones finales. En este caso, el problema debe descomponerse en varios niveles jerárquicos. El nivel más alto es el nivel de los criterios numéricos, el nivel más bajo consta de las alternativas y puede haber varios niveles intermedios cuyos elementos se combinan para obtener el siguiente nivel superior, por ejemplo, mediante el uso de un método multiobjetivo. Las comparaciones por pares se repiten en cada nivel y los resultados se combinan mediante combinaciones lineales simples (Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

Volviendo al ejemplo anterior tenemos dos niveles, las alternativas y los criterios. La estructura jerárquica se muestra en la Figura No. 11. Se realizan comparaciones por pares para las cuatro alternativas con respecto a los tres criterios. Las matrices de comparación se muestran en las Tablas 4 a 6. Luego se puede calcular la medida de bondad combinada de cada alternativa con base en los pesos del nivel correspondiente para los

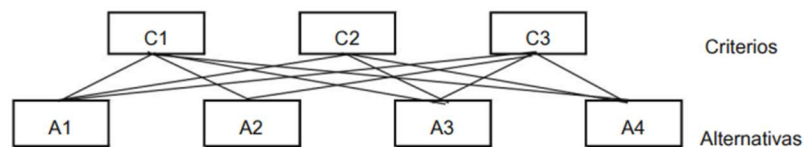


Figura 13. Estructura jerárquica para el ejemplo de PJA.



Tabla 4. Matriz de comparación por pares nivel 2 respecto a C1.

**Table 3.4** Pair-wise comparison matrix level 2 with respect to C<sub>1</sub>

Alternatives	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	Weight vector
A <sub>1</sub>	1	1	7	5	0.45
A <sub>2</sub>	1	1	3	5	0.37
A <sub>3</sub>	0.14	0.33	1	0.33	0.07
A <sub>4</sub>	0.11	0.2	3	1	0.11
Sum	2.25	2.53	14	11.33	1

$\lambda_{\max} = 4.17, ICI = 6.3\% < 10\%$  (acceptable)

Tabla 5. Matriz de comparación por pares nivel 2 respecto a C2.

**Table 3.5** Pair-wise comparison matrix level 2 with respect to C<sub>2</sub>

Alternatives	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	Weight vector
A <sub>1</sub>	1	5	3	5	0.53
A <sub>2</sub>	0.2	1	0.33	3	0.13
A <sub>3</sub>	0.33	3	1	5	0.27
A <sub>4</sub>	0.2	0.33	0.2	1	0.07
Sum	1.73	9.33	4.53	14	1

$\lambda_{\max} = 4.33, ICI = 12.2\% \sim 10\%$  (marginally acceptable)

Tabla 6. Matriz de comparación por pares nivel 2 respecto a C3.

**Table 3.6** Pair-wise comparison matrix level 2 with respect to C<sub>3</sub>

Alternatives	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	Weight vector
A <sub>1</sub>	1	0.2	0.33	1	0.09
A <sub>2</sub>	5	1	3	5	0.54
A <sub>3</sub>	3	0.33	1	5	0.28
A <sub>4</sub>	1	0.2	0.2	1	0.09
Sum	10	1.73	4.53	12	1

$\lambda_{\max} = 4.18, ICI = 6.6\% < 10\%$  (acceptable)

tres criterios. Las medidas de bondad general se obtienen como las siguientes combinaciones lineales:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= 0.29 \times 0.45 + 0.64 \times 0.53 + 0.07 \times 0.09 = 0.48, \\
 F_2 &= 0.29 \times 0.37 + 0.64 \times 0.13 + 0.07 \times 0.54 = 0.23, \\
 F_3 &= 0.29 \times 0.07 + 0.64 \times 0.27 + 0.07 \times 0.28 = 0.21, \\
 F_4 &= 0.29 \times 0.11 + 0.64 \times 0.07 + 0.07 \times 0.09 = 0.08.
 \end{aligned}$$

Los multiplicadores 0,29, 0,64 y 0,07 son los pesos resultantes de los tres criterios obtenidos en el ejemplo de la ecuación 4.8. La segunda parte de cada término se toma de los componentes calculados de los vectores de peso de las Tablas 4 a 6. Por tanto, la clasificación final es:

$$A_1 > A_2 > A_3 > A_4.$$

(Zarghami, M., & Szidarovszky, F., 2011).

## **VI. RESULTADOS**

### **A. Análisis de calidad de agua**

La PTAR del municipio de Zapotitlán cuenta con tratamientos primario y secundario, en donde las aguas residuales de tipo doméstico que son generadas por la población son conducidas por tubería de un diámetro de 6 pulgadas hacia el sistema para su tratamiento, para posteriormente sean descargadas al cuerpo receptor conocido como Quebrada Barrio La Lagunita. El sistema está estructurado de la siguiente manera en la actualidad:

#### **1. Pretratamiento:**

Canal de rejas de concreto armado provisto por una rejilla metálica separada por barras con espaciamiento para la retención de sólidos gruesos como papel, plásticos, objetos domésticos o u otro tipo de desecho que por sus dimensiones obstruyen el paso del caudal de entrada de las aguas residuales. Desarenador, con el fin de retener sólidos inorgánicos como arenas, cenizas y sedimentos que puedan interferir en el sistema, y una caja trampa grasas que provee al sistema una unidad de retención de grasas y aceites derivadas de las actividades domésticas, esto con el fin de hacer más eficiente el proceso biológico y minimizar los riesgos de afección de todo el sistema.

#### **2. Tratamiento primario:**

Se cuenta con un tanque Imhoff construido de concreto armado. Esta unidad tiene doble propósito ya que en la parte superior se da el proceso de sedimentación y en la parte baja se da el proceso de digestión, dicha unidad de tratamiento es muy utilizada en diferentes municipalidades de la región para el tratamiento primario en sistemas de aguas residuales domésticas por su versatilidad y lógica operativa.

### 3. Tratamiento secundario:

Son filtros precoladores con sistema de distribución de agua residual colocados en la parte superior como función principal tienen distribuir el agua de manera uniforme para tener la misma carga hidráulica por unidad de superficie de filtro. El sistema filtrante que tiene como propósito servir de soporte del cultivo biológico que crece sobre el área superficial expuesta del mismo y a su vez permite la circulación del aire necesario para que el proceso se realice en un medio aeróbico.

Sistema recolector: Este permite recolectar las aguas residuales tratadas en el filtro y así mismo proporciona el área necesaria para la circulación del aire.

Sedimentador secundario: Esta unidad complementa el filtro percolador, tomando en cuenta que los filtros percoladores solamente alteran las características de los sólidos de las aguas residuales, pero no los eliminan, por lo que el afluente contiene sólidos suspendidos que deben ser eliminados antes que descarguen el afluente a cuerpo receptores.

### 4. Tratamiento y disposición de lodos:

Se tiene un patio de lodos que funciona únicamente como almacenamiento ya que la Municipalidad tiene estipulada la extracción de los lodos por parte de una empresa privada que tenga los avales del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

En respuesta al objetivo específico de determinar el estado fisicoquímico del agua residual tratada del Municipio de Zapotitlán, en el informe compartido por esta entidad se presentan los resultados de los parámetros establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 y su respectiva reforma para el afluente de Quebrada Barrio La Lagunita:

		Referencia	Fecha Máxima de Cumplimiento		
			Dos (2) de Mayo del Año Dos Mil Veinticuatro (2024)	Dos (2) de Mayo del Año Dos Mil Veintiocho (2028)	Dos (2) de Mayo del Año Dos Mil Treinta (2030)
Parámetros	Dimensiones	Quebrada Barrio La Lagunita	Uno	Dos	Tres
Temperatura	Grados Celsius		TCR+/-7	TCR+/-7	TCR+/-7
Grasas y Aceites	Miligramos por litro	20.8	50	10	10
Materia Flotante	Ausencia/presencia	Presencia	Ausente	Ausente	Ausente
Demanda bioquímica de Oxígeno DBO <sub>5</sub>	Miligramos por litro	217	250	100	100
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	55	275	200	100
Nitrógeno Total	Miligramos por litro	14	150	70	20
Fósforo total	Miligramos por litro	7.41	40	20	10
Potencial de Hidrógeno	Unidades de potencial de Hidrogeno	8.18	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes Fecales	Número más probable en cien (100) mililitros	1.6x10 <sup>7</sup>	1x10 <sup>4</sup>	1x10 <sup>5</sup>	1x10 <sup>6</sup>
Cobre	Miligramos por litro	0.15	3	3	3
Color	Unidades de Planito Cobalto	86	1000	750	500
	Cumple con los parámetros de Límites Permisibles de descarga a cuerpos receptores Acuerdo Gubernativo 254-2019.				
	No Cumple con los parámetros de Límites Permisibles de descarga a cuerpos receptores Acuerdo Gubernativo 254-2019.				

Cuadro 5. Resultados de límites permisibles en punto de descarga.

en donde se puede observar claramente los parámetros que están cumpliendo con los límites máximos permisibles para la etapa respectiva que está en vigencia.

De acuerdo con los análisis realizados por el laboratorio especializado que contrató la Municipalidad en su momento y tomando en cuenta el Artículo 35 del Acuerdo Gubernativo 236-2006, las aguas residuales tratadas de la PTAR con descarga hacia la Quebrada Barrio La Lagunita, no pueden ser reusadas para ninguno de las actividades establecidas en el reglamento ya que superan el límite permisible de  $1 \times 10^4$  para las coliformes fecales.

Esto significa que, para poder ser utilizadas en la infiltración directa hacia el manto freático, se recomienda que reciban un tratamiento terciario o de cloración para reducir los valores de este parámetro para evitar la contaminación de aguas subterráneas.

Además, haciendo énfasis en que las pruebas fisicoquímicas analizadas en esta investigación fueron realizadas en marzo del 2021, cabe destacar que en la visita de campo para ejecutar las pruebas de infiltración Lefranc llevada a cabo en agosto del presente año, se percató que la PTAR no estaba funcionando eficientemente, por lo que de igual manera que en el 2021 el afluente, a la fecha en que se redacta este documento, no puede ser reutilizada ya que no cumple con el marco legal establecido por las entidades de Guatemala.

## **B. Capacidad de infiltración**

El tipo de prueba Lefranc que resultó luego del análisis de posibilidades según el diagrama de flujo y los cuadros presentados en la metodología de esta investigación es un tipo de prueba somera de flujo variable en descenso. Esto se debe a que en la observación preliminar del terreno en el que se pretende realizar el ejercicio de infiltración, se apreció una saturación del terreno la cual cobra sentido al evidenciar que este terreno está ubicado a no más de cincuenta metros de la quebrada La Lagunita en Zapotitlán.

Se realizó la prueba en 5 puntos distribuidos en el terreno para obtener resultados representativos de la capacidad de infiltración del suelo en análisis. En estas pruebas el lapso que se tomó para permitir que el estrado superficial permeara el agua introducida en la perforación fue de cinco minutos exactos.



--- Terreno para infiltración    📍 Ubicación de prueba Lefranc    — Quebrada Barrio la Lagunita

Figura 14. Ubicación de pruebas Lefranc.

Por lo que en la siguiente figura se presentan los resultados de las 5 pruebas Lefranc en donde se aprecia el valor en cm/s para cada una de las repeticiones realizadas. Cabe destacar que el dato que se tomó como resultado final de la conductividad hidráulica es de  $5.55 \times 10^{-5}$  cm/s el cual es el promedio de todas las repeticiones.

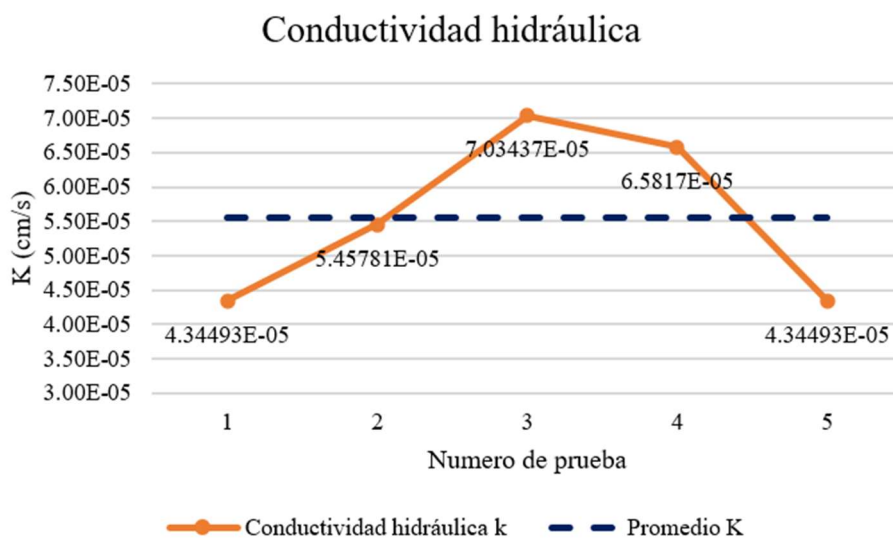


Figura 15. Resultados de conductividad hidráulica para las repeticiones de la prueba Lefranc

La línea azul punteada representa el valor de  $5.55 \times 10^{-5}$  cm/s de la conductividad hidráulica del terreno la cual según el Cuadro No. 3 en donde se presentan los rangos de

clasificación del coeficiente K, este se encuentra dentro del rango de Arenas y Arenas limosas con una clasificación estándar SW, SP, SM el cual posee una permeabilidad baja.

### **C. Análisis de alternativas de infiltración**

Para el análisis de alternativas de infiltración se escogieron las tres alternativas: Pozos de infiltración (A1), Zanjas de infiltración (A2) y Áreas de infiltración (A3) con una serie de criterios (Cn) técnicos, ambientales y sociales que se listan a continuación:

**Capacidad de infiltración (C1):** Este criterio se refiere a la conductividad hidráulica (K) que es requerida en diferentes rangos dependiendo de la alternativa de infiltración.

**Espacio requerido (C2):** Como bien se menciona en la metodología, cada alternativa de infiltración requiere de una extensión de terreno mayor o menor para su funcionamiento. Para este caso, este criterio se toma como negativo ya que mientras más grande sea el requerimiento de espacio, menor es la conveniencia para su selección puesto al reducido espacio que se tiene para la ejecución del proyecto.

**Sensibilidad a obstrucciones (C3):** La sensibilidad a obstrucciones trata sobre la probabilidad o incidencia de taponamientos en el relleno de cada alternativa. Nuevamente, este criterio se toma como negativo porque mientras más alta la sensibilidad, menos conveniente es la alternativa.

**Mantenimiento requerido (C4):** El mantenimiento que se le debe proveer a cada alternativa es un criterio importante ya que lo que se espera es tener la menor periodicidad de mantenimiento para reducir costos de operación de la alternativa. Este criterio se toma como negativo.

**Adaptabilidad a terrenos (C5):** Es importante tomar en cuenta la capacidad de cada alternativa para adaptarse a las características del terreno en el que se pretende realizar el proyecto, mientras más adaptable sea, mas conveniente es la opción a elegir por lo que este criterio es positivo.

**Estudios hidrogeológicos (C6):** La cantidad de estudios que se deben realizar para

cada alternativa se toma como un criterio negativo porque mientras más requerimiento de estudios se necesiten, menor es la conveniencia de elección para la alternativa.

**Integración con el paisaje (C7):** Este aspecto ambiental es importante para la aceptación por parte de la comunidad ya que mientras mejor integración se tenga con el paisaje, mayor conveniencia de elección tendrá la alternativa.

**Promoción de biodiversidad (C8):** Nuevamente, este criterio ambiental no es de los más importantes para la matriz de decisión, pero al momento de tener un enfoque ambiental es un parámetro de decisión en cuanto que mientras más promoción de biodiversidad tenga la alternativa, mas atractiva es la ejecución de esta.

Se ejecutaron dos metodologías de AMD para la selección de la alternativa que mejor se adapte a los criterios anteriormente mencionados, esto con el fin de comparar las dos metodologías y contrastar los resultados para obtener una decisión más acertada.

### 1. Ponderación aditiva simple (PAS)

Lo primero es colocar el valor de cada criterio respectivamente de cada alternativa. En este caso se obtuvo de las investigaciones realizadas en la parte del marco teórico y se categorizó en un rango lingüístico preliminarmente. Además, se colocó el peso de cada criterio con base a la importancia de cada uno.

*Tabla 7.* Matriz de decisión para evaluar la alternativa de infiltración más adecuada.

Criterios	Peso	Alternativas		
		A1	A2	A3
C1	muy alto	1	0.001	0.00001
C2	alto	150	500	3000
C3	bajo	medio	relativamente bajo	bajo
C4	medio	relativamente bajo	relativamente bajo	medio
C5	relativamente bajo	alto	medio	relativamente alto
C6	bajo	medio	medio	relativamente alto
C7	relativamente bajo	medio	relativamente bajo	relativamente bajo
C8	medio	medio	bajo	bajo



Se valorizó numéricamente los parámetros lingüísticos de la Tabla No. 1 con el fin de poder generar la matriz numérica de decisión.

*Tabla 8.* Valoración numérica de variables lingüísticas.

<b>Variables lingüísticas</b>	<b>Valor numérico</b>
muy bajo	0
bajo	0.2
relativamente bajo	0.35
medio	0.5
relativamente alto	0.65
alto	0.8
muy alto	1

En esta valoración, se toma desde muy bajo hasta muy alto y se colocar un número entre 0-1 para cada una de las variables.

Para obtener la siguiente matriz numérica de decisión:

*Tabla 9.* Matriz numérica de decisión.

<b>Criterios</b>	<b>Peso</b>	<b>Alternativas</b>		
		<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>
C1	1	1	0.001	0.00001
C2	0.8	150	500	3000
C3	0.2	0.5	0.35	0.2
C4	0.5	0.35	0.35	0.5
C5	0.35	0.8	0.5	0.65
C6	0.2	0.5	0.5	0.65
C7	0.35	0.5	0.35	0.35
C8	0.5	0.5	0.2	0.2

Con el fin de conocer la alternativa que mayor valor obtenga al multiplicar el peso de cada criterio por el valor normalizado de cada alternativa, se generó la Tabla No. 4 en donde se normalizan los valores entre 0-1.

Tabla 10. Matriz de decisión normalizada con valoración de alternativas.

Criterios	Peso	Alternativas		
		A1	A2	A3
C1	1	1	0.00099001	0
C2	0.8	1	0.877192982	0
C3	0.2	0	0.5	1
C4	0.5	1	1	0
C5	0.35	0	0	1
C6	0.2	1	1	0
C7	0.35	1	0	0
C8	0.5	1	0	0
<b>SUMA</b>		<b>3.35</b>	<b>1.50</b>	<b>0.55</b>

En la Tabla No. 4 se presentan los valores normalizados entre 0-1 de cada criterio vs alternativas y el total de la SUMA para cada alternativa. Mientras más elevado sea el resultado, más conveniente es la alternativa, por lo que utilizando la metodología SAW la alternativa que mejor se adapta a los criterios técnicos, sociales y ambientales son los pozos de infiltración (A1). Las alternativas que siguen en la jerarquía son A2 y A3 respectivamente.

## 2. Proceso de Jerarquía Analítica (PJA)

En este proceso se compara cada criterio individual versus el resto, para luego valorar la importancia de cada comparación tal y como se explica en la metodología de “Introduction to Multicriteria Decision Analysis”.

Tabla 11. Matriz de valoración por criterio

Criterios	Criterios							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	1	0.9	0.8	0.75	0.6	0.4	0.45	0.3
C2	1.2	1	0.9	0.8	0.5	0.6	0.45	0.4
C3	1.3	1.2	1	1.3	0.75	0.9	0.7	0.8
C4	1.5	1.3	0.8	1	0.8	0.5	0.3	0.4
C5	2	1.5	1.3	1.1	1	0.8	0.8	0.5
C6	2.5	1.5	1.1	2	1.5	1	1.2	0.9
C7	3	2	1.2	2	1.5	0.8	1	0.95
C8	5	2	1.1	2.5	1.8	1.1	1.05	1

Luego se procede a normalizar los datos entre 0-1 para obtener el resultado del valor del peso para cada criterio con base a la comparación de pares que se realizó. Esto se presenta en la Tabla No. 6 en la cual cabe destacar que el índice de consistencia, ICI por sus siglas en inglés, es de 1.4% que está por debajo de 10% y que por lo tanto se ha sido aceptablemente consistente en la valoración de comparativa de pares de los ocho criterios analizados.

Tabla 6. Matriz normalizada de valoración de criterios

Criterios	Criterios								Peso
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	
C1	0.06	0.08	0.10	0.07	0.07	0.07	0.08	0.06	0.07
C2	0.07	0.09	0.11	0.07	0.06	0.10	0.08	0.08	0.08
C3	0.07	0.11	0.12	0.11	0.09	0.15	0.12	0.15	0.12
C4	0.09	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.05	0.08	0.09
C5	0.11	0.13	0.16	0.10	0.12	0.13	0.13	0.10	0.12
C6	0.14	0.13	0.13	0.17	0.18	0.16	0.20	0.17	0.16
C7	0.17	0.18	0.15	0.17	0.18	0.13	0.17	0.18	0.17
C8	0.29	0.18	0.13	0.22	0.21	0.18	0.18	0.19	0.20

$\lambda_{max} = 8.14$       ICI = 1.4% < 10% (acceptable)

Luego, previo a analizar la SUMA de los valores para las alternativas, se procedió a generar una matriz de decisión en la que se evaluó par a par cada alternativa para cada uno de los ocho criterios evaluados. Esto se realiza para encontrar el valor del peso de cada alternativa respecto a cada criterio

Tabla 12. Matriz de valoración para C1.

Alternativas	Alternativas			Peso
	A1	A2	A3	
A1	0.17	0.29	0.10	0.18
A2	0.33	0.36	0.43	0.37
A3	0.50	0.36	0.48	0.44

$\lambda_{max} = 3.07$       ICI = 6.3% < 10% (acceptable)

Tabla 14. Matriz de valoración para C3.

Alternativas	Alternativas			Peso
	A1	A2	A3	
A1	0.27	0.29	0.29	0.28
A2	0.32	0.32	0.31	0.32
A3	0.41	0.39	0.39	0.39

$\lambda_{max} = 3.05$       ICI = 4.6% < 10% (acceptable)

Tabla 13. Matriz de valoración para C2.

Alternativas	Alternativas			Peso
	A1	A2	A3	
A1	0.61	0.56	0.50	0.55
A2	0.30	0.28	0.38	0.32
A3	0.09	0.17	0.13	0.13

$\lambda_{max} = 3.08$       ICI = 7.0% < 10% (acceptable)

Tabla 15. Matriz de valoración para C4.

Alternativas	Alternativas			Peso
	A1	A2	A3	
A1	0.71	0.74	0.76	0.74
A2	0.21	0.15	0.13	0.16
A3	0.07	0.12	0.11	0.10

$\lambda_{max} = 3.06$       ICI = 5.1% < 10% (acceptable)

Tabla 16. Matriz de valoración para C5.

Alternativas	Alternativas			Peso
	A1	A2	A3	
A1	0.18	0.27	0.14	0.20
A2	0.27	0.33	0.38	0.33
A3	0.55	0.40	0.48	0.47
$\lambda_{max} = 3.07$		ICI = 5.7% < 10% (aceptable)		

Tabla 17. Matriz de valoración para C6.

Alternativas	Alternativas			Peso
	A1	A2	A3	
A1	0.43	0.38	0.40	0.40
A2	0.35	0.34	0.40	0.36
A3	0.22	0.28	0.20	0.23
$\lambda_{max} = 3.14$		ICI = 12.3% ~ 10% (marginamente aceptable)		

Tabla 18. Matriz de valoración para C7.

Alternativas	Alternativas			Peso
	A1	A2	A3	
A1	0.45	0.45	0.44	0.45
A2	0.36	0.30	0.33	0.33
A3	0.18	0.24	0.22	0.22
$\lambda_{max} = 3.06$		ICI = 5.4% < 10% (aceptable)		

Tabla 19. Matriz de valoración para C8.

Alternativas	Alternativas			Peso
	A1	A2	A3	
A1	0.51	0.41	0.57	0.50
A2	0.38	0.34	0.29	0.34
A3	0.10	0.24	0.14	0.16
$\lambda_{max} = 3.09$		ICI = 7.8% < 10% (aceptable)		

Teniendo la valoración del peso de cada criterio y de cada alternativa respectivamente de cada uno, se procede a generar la matriz de decisión con la SUMA de la multiplicación entre ambos valores de peso para obtener la calificación de las tres alternativas y evaluar cuál es la más adecuada para los criterios tomados en cuenta.

Tabla 20. Matriz de decisión valorizada con SUMA de las tres alternativas evaluadas.

Alternativas	Criterios								SUMA
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	
A1	0.01	0.04	0.03	0.06	0.02	0.07	0.07	0.10	<b>0.42</b>
A2	0.03	0.03	0.04	0.01	0.04	0.06	0.06	0.07	0.32
A3	0.03	0.01	0.05	0.01	0.06	0.04	0.04	0.03	0.26

En la Tabla No. 14 se observa la columna de SUMA en la cual se presenta la sumatoria de la multiplicación de los pesos de criterios y alternativas respectivamente. En esta metodología, nuevamente la alternativa que mejor se adapta a los criterios técnicos, sociales y ambientales evaluados son los pozos de infiltración con 0.42 puntos, en segundo lugar, está la alternativa de zanjas de infiltración con 0.32 y por último las áreas de infiltración.

Cabe destacar que en para todas las matrices analizadas en esta metodología, el índice de consistencia fue menor que 10% por lo cual se contempla el análisis realizado como

un cálculo de consistencia aceptable entre la comparación de par a par de criterios y alternativas.

#### **D. Diseño y características preliminar de pozos de absorción**

En la ejecución de las pruebas de infiltración Lefranc se tomó el tiempo en que el volumen de agua se infiltró en su totalidad, siendo este en promedio 1,325 segundos, lo cual tomando en cuenta el área de infiltración (0.96 m<sup>2</sup>) se tiene un coeficiente de infiltración de 0.0025 L/m<sup>2</sup>/s. Según la información del informe de la Municipalidad de Zapotitlán, el caudal de salida de la PTAR es de 85 L/s, por lo que en el diseño de la alternativa de absorción se plantea utilizar únicamente el 20% por la baja conductividad hidráulica del suelo y no exceder la capacidad de absorción.

Tomando en cuenta la conductividad hidráulica baja del terreno y los lineamientos de diseño teóricos de pozos de infiltración, se necesitan 6,500 m<sup>2</sup> de área de infiltración para el caudal en mención, por lo que, proponiendo pozos de infiltración de 4 m de diámetro y 25 m de profundidad, se necesitarían entre 30 – 35 unidades para infiltrar el 20% del caudal de salida de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Cabe destacar que el terreno propiedad de la Municipalidad en el que se experimentó las pruebas de infiltración tiene un área de aproximadamente 3,000 m<sup>2</sup> lo cual es mucho menos que el área requerida para infiltrar el caudal, por lo que es evidente que las alternativas de zanjas y áreas de infiltración no son las más viables. Además, se debe tomar en cuenta que la PTAR se encuentra a un nivel mas bajo que el terreno destinado a la infiltración, por lo tanto, se debe de considerar en el diseño un sistema de almacenamiento y bombeo que lleve el 20% del caudal de descarga hasta el terreno de infiltración.

Se presenta un esquema de pozo de infiltración para tomarlo de referencia como diseño preliminar y también las ubicaciones propuestas para estos:

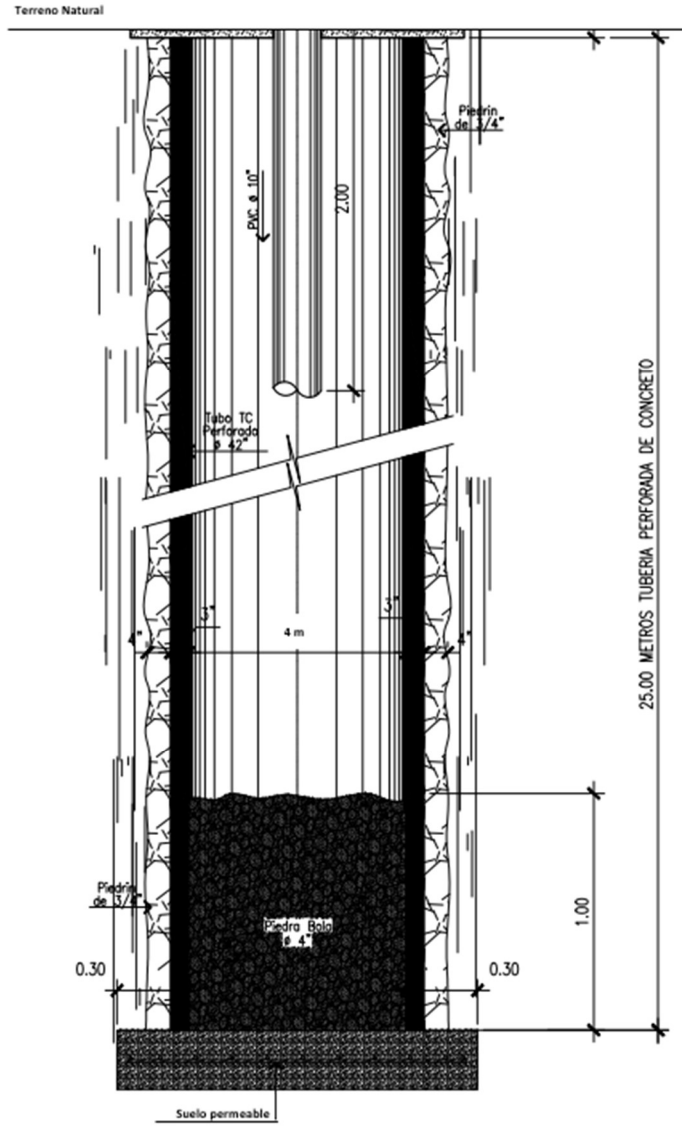


Figura 16. Esquema de pozo de infiltración



--- Terreno para infiltración      📍 Ubicación propuesta para pozos de infiltración      — Quebrada Barrio la Lagunita

*Figura 17.* Ubicación propuesta para pozos de infiltración.

## VII. CONCLUSIONES

1. A través de una prueba de infiltración Lefrac tipo somera de flujo variable en descenso se obtuvo que la conductividad hidráulica del terreno en el que se presenten infiltrar el agua de descarga de la PTAR tiene una permeabilidad baja con un valor de  $5.55 \times 10^{-5}$  cm/s. El parámetro K, que trata sobre la facilidad del suelo para permitir el paso del agua, tiene una alta incidencia y relevancia en cuanto al criterio de selección de la alternativa más eficiente para infiltrar agua directamente al manto freático de cualquier sector.

2. Se determinó, con base en los estudios fisicoquímicos realizados por la Municipalidad de Zapotitlán, que el afluente de la PTAR que descarga hacia la Quebrada Barrio La Lagunita no puede reusarse para la alternativa de infiltración propuesta puesto que no cumple con el límite máximo permisible de coliformes fecales para ningún tipo de reuso establecido en el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

3. Se evaluaron criterios técnicos, sociales y ambientales influyentes en la decisión de la alternativa más adecuada para infiltrar el agua tratada de la PTAR con dos metodologías sobre análisis de decisión multicriterio (MCDA). En las dos metodologías implementadas, el orden de prioridad en la toma de decisión fue a) los pozos de infiltración, b) zanjas de infiltración y c) áreas de infiltración. Es evidente que en el análisis multicriterio se obtuvo un resultado confiable, conciso y representativo porque los índices de consistencias se mantuvieron en su mayoría por debajo del 10%.

4. Se necesita un área de infiltración de aproximadamente 6,500 m<sup>2</sup> lo cual equivale a la necesidad de implementar entre 30-35 pozos de infiltración de 4 m de diámetro y 25 m de profundidad. La alta cantidad de unidades infiltrantes puede incidir en un alto costo de ejecución que vulva inviable el proyecto, por lo que se recomienda evaluar la propuesta de diseño preliminar con un experto profesional en recarga hídrica.



## VIII. RECOMENDACIONES

1. Realizar una prueba Lefranc de permeabilidad que no sea únicamente tipo somera en la que se evalúa la superficie de un terreno y esta sea una representación de los estratos que están por debajo, si no que una prueba de profundidad mayor a 5 m para tener un resultado más preciso y representativo de la conductividad hidráulica real del suelo. Tomar en cuenta que la profundidad de la prueba se determine con base al tipo de alternativa de infiltración que se pretende utilizar para infiltrar agua en el suelo.

2. Realizar pruebas de infiltración de flujo constante en un estrado con profundidad entre 5 a 8 metros para conocer más acertadamente la conductividad hidráulica del terreno destinado para la infiltración.

3. Complementar los resultados de la permeabilidad del terreno con un estudio de suelos que permita caracterizar la calidad del suelo y contrastar los parámetros que influyen en la toma de decisión para la alternativa más adecuada para infiltrar agua al manto freático.

4. Implementar un tratamiento terciario o de cloración para poder tener un nivel de saneamiento más elevado el cual permita que el afluente cumpla con el marco legal y este puede ser reutilizado en diferentes actividades cotidianas del Municipio de Zapotitlán.

5. Proponer el diseño final de los pozos de infiltración con un especialista profesional experto en instalaciones hidrosanitarias, con el fin de proponer detalles específicos constructivos tomando en cuenta aspectos como la topografía del terreno en el que se ejecutaría el proyecto. La propuesta de este trabajo de graduación se queda como una propuesta de diseño preliminar.

6. Evaluar alternativas de reuso del agua tratada de una PTAR que no sea necesariamente colocarla directamente al manto freático a través de alternativas de

infiltración, pero que pretenda evitar que el agua que pasó por un proceso de tratamiento ya no regrese a un cuerpo de agua contaminado que afectará la sanidad del ciclo hidrológico normal del agua.

7. Optimizar el proceso de decisión de alternativas a través de la implementación de software de programación en donde sea más amigable con el usuario el ingreso de criterios y valoraciones para los mismos con el fin de obtener un resultado más rápido y conciso sobre la mejor alternativa de infiltración.

8. Realizar investigaciones utilizando drones para recopilar datos y generar ortofotos con el objetivo de llevar a cabo un estudio más detallado, mejorar el mantenimiento o perfeccionar los detalles. Se propone organizar toda la información calculada en tablas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y automatizar el proceso, incluyendo la obtención de porcentajes, con el fin de implementar una metodología más efectiva en la presentación de los resultados.

9. Realizar un análisis costo-beneficio donde se tome en cuenta el criterio económico de cada alternativa para ser evaluado en las matrices de decisión con el fin de obtener un resultado más acorde al presupuesto que se tiene para ejecutar el tipo de proyecto que se plantea.

## IX. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar-Morales, J. &.-M. (2019). *Diseño de pozos de absorción para la infiltración de aguas residuales. Ingeniería Hidráulica y Ambiental.*
- Congreso de la República de Guatemala. (2006). *ACUERDO GUBERNATIVO No. 236-2006.* Guatemala.
- Consejo Municipal Zapotitlán. (2019). *Segeplan.* Obtenido de [https://portal.segeplan.gob.gt/segeplan/wp-content/uploads/2022/08/2210\\_PDM-OT\\_2019-2032\\_Zapotitlan.pdf](https://portal.segeplan.gob.gt/segeplan/wp-content/uploads/2022/08/2210_PDM-OT_2019-2032_Zapotitlan.pdf)
- Consejo Municipal Zapotitlán. (2019). *SEGEPLAN.* Obtenido de [https://portal.segeplan.gob.gt/segeplan/wp-content/uploads/2022/08/2210\\_PDM-OT\\_2019-2032\\_Zapotitlan.pdf](https://portal.segeplan.gob.gt/segeplan/wp-content/uploads/2022/08/2210_PDM-OT_2019-2032_Zapotitlan.pdf)
- EPA. (2023). *Infiltration systems for wastewater treatment.* . Washington.
- García-Gutiérrez, J. &.-L. (2014). Infiltración de aguas residuales en pozos de absorción: revisión bibliográfica. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental.*
- INE. (2020). *Instituto Guatemalteco de Estadística.* Obtenido de <https://www.ine.gob.gt/ine/wp-content/uploads/2020/12/Estimaciones-y-Proyecciones>
- INFOM. (2018). *GUÍA TÉCNICA PARA IMPLEMENTAR PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN GUATEMALA.*
- LA, R. Y. S. A. . (2021). *REALIZACIÓN DE PRUEBAS LEFRANC.*
- López Brango, S. M. (2021). *Análisis de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales domésticas, generadas en la Subestación Eléctrica de Cerromatoso localizada en el municipio de Montelíbano.*
- Pastrán, N. A. (2010). *Metodología para el dimensionamiento de zanjas de infiltración para el tratamiento de aguas residuales domésticas (Doctoral dissertation, Universidad de Oriente).*
- PLATA-BEDMAR. (2006). Técnicas hidrogeológicas para el estudio de vertederos de residuos . *Revista Ingeniería Civil No. 142.*
- Puerto, Z. (2015). *Diseño de un pozo de infiltración para captación de agua pluvial en San Luis Tlaxiatalmalco, Xochimilco.* Obtenido de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/280010>
- Salazar, D. B. (2004). *Guía para el manejo de excretas y aguas residuales municipales.*
- Samboni Ruiz, N. E. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 172-181.
- SEGEPLAN. (2011). *Política Nacional del Agua en Guatemala y su Estrategia.*
- SEGEPLAN. (2018). *Criterios generales para priorizar la planificación, diseño, construcción y ubicación de las plantas de tratamiento de aguas residuales y desechos sólidos.*
- SEMARNAT. (2018). *Guía para el diseño y construcción de sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales para uso doméstico y agrícola.* . México.
- Tchobanoglous, G. B. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and disposal.* McGraw-Hill Education.
- Wais, I. (sf). *Planta de tratamiento.* Obtenido de <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/>
- Zarghami, M., & Szidarovszky, F. (2011). *Introduction to multicriteria decision analysis. Multicriteria Analysis: Applications to Water and Environment Management.* Springer.

## X. ANEXOS



*Figura 13.* Imagen 1 sobre visita a PTAR de Zapotitlán, Jutiapa.



*Figura 14.* Imagen 2 sobre visita a PTAR de Zapotitlán, Jutiapa.



*Figura 15.* Imagen 3 sobre visita a PTAR de Zapotitlán, Jutiapa.

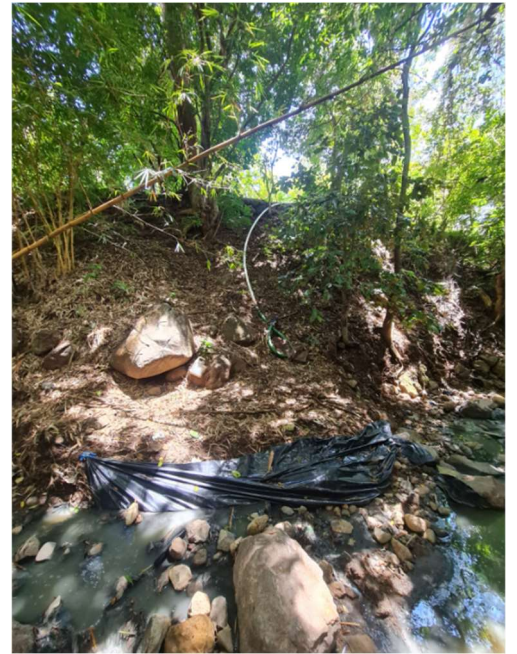


*Figura 16.* Imagen 4 sobre visita a PTAR de Zapotitlán, Jutiapa.





*Figura 17.* Descarga de la PTAR de Zapotitlán, Jutiapa.



*Figura 18.* Descarga de la PTAR de Zapotitlán, Jutiapa hacia quebrada La Barranquilla.



*Figura 19.* Muestra #1 de prueba de infiltración Lefranc.



*Figura 20.* Muestra #3 de prueba de infiltración Lefranc.

Guatemala, agosto de 2023

Ing. Robert Godo  
Director de Ingeniería Civil  
Universidad del Valle de Guatemala

Estimado Ingeniero,

A la vez que envío un cordial saludo, la presente es para informar que de parte de la Municipalidad de Zapotitlán, Jutiapa, se ha otorgado el permiso al estudiante Kennet Manuel Colocho Quiñónez carnet 181075 estudiante de Ingeniería Civil Ambiental para que realice las pruebas y experimentaciones respectivas que se requieren para su tesis "Selección de un sistema de infiltración de agua para la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Zapotitlán, departamento de Jutiapa".

Atentamente,



Hilmar Quiñónez  
Alcalde Municipal  
Municipalidad de Zapotitlán, Jutiapa.

Figura 21. Autorización de parte de la Municipalidad de Zapotitlán Jutiapa para realizar experimentación en la PTAR.



ACTUALIZACIÓN DE ESTUDIO TÉCNICO PARA  
LA CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES



1

*Figura 22.* Informe sobre la actualización de estudio técnico para la caracterización de aguas residuales de la PTAR con afluente hacia la Quebrada Barrio La Lagunita.