

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE QUÍMICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería  
Ambiental

**“Plan maestro para la gestión de las aguas residuales del cantón de La Unión”**

Andrés Ortiz Mora

CARTAGO, abril, 2022



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)  
[Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



## **“Plan maestro para la gestión de las aguas residuales del cantón de La Unión”**

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

### **Miembros del tribunal**

---

**MSc. Ing. Diana A. Zambrano Piamba**  
**Director**

---

**Ing. Christian Richmond Ballesteros**  
**Lector 1**

---

**Ing. Macario Pino Gómez**  
**Lector 2**

---

**Dra. Mary Luz Barrios Hernández**  
**Coordinadora COTRAFIG**

---

**MGLA. Ricardo Coy Herrera**  
**Director Escuela de Química**

---

**MSc. Ing. Diana A. Zambrano Piamba**  
**Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental**

## **DEDICATORIA**

A mi papá y mamá

A Tía Mary, gracias por todo.

Al río Tiribí

“Hagamos el cambio hoy y conservemos nuestros ríos.”

-Asociación Movimiento Tiribí Limpio

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, por el apoyo en todos estos años y especialmente con los estudios.

A mis amigas, compañeras y todos los que de alguna manera me han apoyado en estos años.

A la profe Diana, por las oportunidades de crecimiento profesional en mis años como estudiante, también por el tiempo y dedicación como tutora de mi trabajo final.

A todos los profesores que me han apoyado y creído en mí. Teacher Leda, que me motivó y facilitó aprender sobre temas ambientales. Profe Gaby que creyó en mí antes que nadie. A todos los profesores del TEC, por ser parte de mi formación profesional y personal estos últimos años.

Al Concejo Municipal y al personal administrativo de la municipalidad de La Unión especialmente a quienes son parte de la comisión de ambiente y de la Dirección de Recurso Hídrico, por su apoyo durante todo este proceso, desde reuniones y darme información, hasta compartir e ir casa por casa aplicando encuestas.

A las personas voluntarias de la Asociación Movimiento Tiribí Limpio, por apoyar este proceso y participar de una u otra forma del proyecto, lo vamos a lograr.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
2.1	<i>Objetivo general</i>	3
2.1.1	Objetivos específicos	3
<b>3</b>	<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b>	<b>5</b>
3.1	<i>Aguas residuales</i>	5
3.2	<i>Situación actual de las aguas residuales</i>	6
3.2.1	El mundo	6
3.2.2	Costa Rica	6
3.2.3	La Unión	7
3.3	<i>Indicadores de calidad de agua residual</i>	7
3.4	<i>Niveles de tratamiento</i>	9
3.5	<i>Opciones de tratamiento para aguas residuales domésticas</i>	10
3.5.1	Sistemas individualizados	10
3.5.2	Sistemas colectivos	16
3.6	<i>Tratamiento de lodos</i>	21
3.7	<i>Tren de tratamiento</i>	22
3.8	<i>Indicadores y métodos de selección</i>	23
3.8.1	Métodos cuantitativos	24
3.8.2	Métodos cualitativos	24
3.8.3	Métodos mixtos	25
3.9	<i>Evaluación multicriterio</i>	26
3.9.1	Jerarquías	27
3.9.2	Métodos para evaluaciones multicriterio	28

<b>4</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>31</b>
4.1	<i>Lugar de estudio</i>	31
4.2	<i>Planteamiento de opciones de saneamiento</i>	32
4.2.1	División del área por sectores	32
4.2.2	Preselección de opciones	35
4.2.3	Definición de trenes	36
4.2.4	Dimensionamiento de opciones	36
4.3	<i>Identificación y cuantificación de indicadores de opciones</i>	41
4.3.1	Levantamiento de información local	43
4.3.2	Indicadores criterio ambiental	46
4.3.3	Indicadores criterio técnico	49
4.3.4	Indicadores criterio económico	51
4.3.5	Indicadores criterio social	52
4.4	<i>Factibilidad de opciones</i>	54
4.4.1	Método de selección	54
4.4.2	Pesos de criterios e indicadores	54
4.4.3	Evaluación de alternativas	54
<b>5</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>56</b>
5.1	<i>Opciones de saneamiento en el Cantón de la Unión</i>	56
5.2	<i>Ponderación de criterios de evaluación</i>	71
5.3	<i>Priorización de sistemas</i>	72
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>109</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>110</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>111</b>
<b>9</b>	<b>APÉNDICES</b>	<b>115</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 Tanque séptico mejorado. ....	12
Figura 3-2 Cámara doble mejorada ventilada .....	13
Figura 3-3 Cámara de deshidratación .....	14
Figura 3-4 Filtro anaerobio de flujo ascendente .....	15
Figura 3-5 Lecho de infiltración .....	16
Figura 3-6 Diagramas de algunas tecnologías de pretratamiento .....	18
Figura 3-7 Proceso de decisión.....	27
Figura 3-8 Diagrama de Jerarquía del problema .....	28
Figura 4-1 Mapa de Cobertura del Plan Maestro para la Gestión de las Aguas Residuales.	32
Figura 4-2 Mapa de sectores para el área de estudio .....	33
Figura 4-3 Mapa de subsectores para el área de estudio .....	35
Figura 4-4 Jerarquización de los criterios y subcriterios a evaluar.....	42
Figura 4-5 Ubicación de las personas encuestadas. ....	44
Figura 5-1 Propuesta de red de colectores y plantas de tratamiento centralizada .....	59
Figura 5-2 Propuesta de red de colectores y plantas de tratamiento semicentralizada .....	60
Figura 5-3 Distribución de los sistemas de tratamiento recomendados según el análisis multicriterio .....	108

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 3-1 Parámetros indicadores de contaminación.....	8
Cuadro 3-2 Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor.....	9
Cuadro 3-3 Escala de Saaty.....	30
Cuadro 4-1 Referencias de dimensionamiento para sistemas de tratamiento .....	37
Cuadro 4-2 Características de los sistemas individuales.....	38
Cuadro 4-3 Niveles de confianza para las encuestas realizadas .....	45
Cuadro 4-4 Análisis de indicadores para el subparámetro "Ruido y Contaminación Visual" .....	47
Cuadro 4-5 Análisis de indicadores para el subparámetro "Potencial producción de olores e insectos" .....	47
Cuadro 4-6 Análisis de indicadores para el subparámetro "Diseño, construcción y operación" .....	50
Cuadro 5-1 Alternativas preseleccionadas según el primer criterio previo .....	56
Cuadro 5-2 Cumplimiento del segundo criterio previo para el TS + infiltración. ....	57
Cuadro 5-3 Cumplimiento del segundo criterio previo para el TS + FAFA.....	57
Cuadro 5-4 Cumplimiento del segundo criterio previo para el TS + PTAR.....	58
Cuadro 5-5 Características de los sistemas de tratamiento semicentralizado libre de sólidos .....	61
Cuadro 5-6 Características de los sistemas de tratamiento semicentralizados con Lodos Activados .....	63
Cuadro 5-7 Características de los sistemas de tratamiento semicentralizados con RAFA y Lodos Activados .....	66
Cuadro 5-8 Características de los sistemas de tratamiento centralizados con RAFA y Lodos Activados .....	68
Cuadro 5-9 Ponderación para la evaluación de las alternativas .....	71
Cuadro 5-10 Evaluación de sistemas de tratamiento, El Pizote. ....	73
Cuadro 5-11 Evaluación de sistemas de tratamiento, El Pizote. Valor Normalizado .....	74
Cuadro 5-12 Evaluación de sistemas de tratamiento, Sur Nateste. ....	75
Cuadro 5-13 Evaluación de sistemas de tratamiento, Sur Nateste. Valor Normalizado.....	75

Cuadro 5-14 Evaluación de sistemas de tratamiento, CENBUS.....	76
Cuadro 5-15 Evaluación de sistemas de tratamiento, CENBUS. Valor Normalizado .....	77
Cuadro 5-16 Evaluación de sistemas de tratamiento, Policías. ....	78
Cuadro 5-17 Evaluación de sistemas de tratamiento, Policías. Valor Normalizado .....	78
Cuadro 5-18 Evaluación de sistemas de tratamiento, Via Diana Rioja. ....	79
Cuadro 5-19 Evaluación de sistemas de tratamiento, Vía Diana Rioja. Valor Normalizado .....	80
Cuadro 5-20 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Juan 2.....	81
Cuadro 5-21 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Juan 2. Valor Normalizado .....	81
Cuadro 5-22 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Juan 1.....	82
Cuadro 5-23 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Juan 1. Valor Normalizado .....	83
Cuadro 5-24 Evaluación de sistemas de tratamiento, Conce 1. ....	84
Cuadro 5-25 Evaluación de sistemas de tratamiento, Conce 1. Valor Normalizado .....	84
Cuadro 5-26 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Francisco.....	85
Cuadro 5-27 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Francisco. Valor Normalizado ..	86
Cuadro 5-28 Evaluación de sistemas de tratamiento, Entebbe.....	87
Cuadro 5-29 Evaluación de sistemas de tratamiento, Entebbe. Valor Normalizado .....	88
Cuadro 5-30 Evaluación de sistemas de tratamiento, Los Geranios.....	89
Cuadro 5-31 Evaluación de sistemas de tratamiento, Los Geranios. Valor Normalizado ...	90
Cuadro 5-32 Evaluación de sistemas de tratamiento, Bethel. ....	91
Cuadro 5-33 Evaluación de sistemas de tratamiento, Bethel. Valor Normalizado .....	92
Cuadro 5-34 Evaluación de sistemas de tratamiento, Montserrat .....	93
Cuadro 5-35 Evaluación de sistemas de tratamiento, Montserrat. Valor Normalizado.....	94
Cuadro 5-36 Evaluación de sistemas de tratamiento, Las Marianas. ....	95
Cuadro 5-37 Evaluación de sistemas de tratamiento, Las Marianas. Valor Normalizado ...	96
Cuadro 5-38 Evaluación de sistemas de tratamiento, Las Brisas. ....	97
Cuadro 5-39 Evaluación de sistemas de tratamiento, Las Brisas. Valor Normalizado .....	98
Cuadro 5-40 Evaluación de sistemas de tratamiento, Conce 2. ....	99
Cuadro 5-41 Evaluación de sistemas de tratamiento, Conce 2. Valor Normalizado .....	99
Cuadro 5-42 Evaluación de sistemas de tratamiento, TR – DN.....	100
Cuadro 5-43 Evaluación de sistemas de tratamiento, TR - DN. Valor Normalizado.....	101

Cuadro 5-44 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Rafael 1.....	102
Cuadro 5-45 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Rafael 1. Valor Normalizado..	102
Cuadro 5-46 Evaluación de sistemas de tratamiento, Los Sauces.....	103
Cuadro 5-47 Evaluación de sistemas de tratamiento, Los Sauces. Valor Normalizado ....	104
Cuadro 5-48 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Diego. ....	105
Cuadro 5-49 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Diego. Valor Normalizado .....	105
Cuadro 5-50 Resumen de sistema de tratamiento seleccionado para cada subsector.....	106
Cuadro 5-51 Resumen de los sistemas de tratamiento recomendados .....	107

## LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

<b>AHP</b>	Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process)
<b>ASADA</b>	Asociación Administradora del Acueducto
<b>AYA</b>	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
<b>DBO 5,20</b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>FAFA</b>	Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente
<b>LA</b>	Lodos Activados
<b>O&amp;M</b>	Operación y Mantenimiento
<b>PTAR</b>	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
<b>RAFA / UASB</b>	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente
<b>SST</b>	Sólidos Suspendedos Totales
<b>TIR</b>	Tasa interna de retorno
<b>VAN</b>	Valor actual Neto

## RESUMEN

El cantón de La Unión, mayormente urbano, maneja seis plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales únicamente cubren el 9% de la población servida por dicha institución. El resto de la población aborda el saneamiento mediante sistemas individuales, los cuales tienen limitaciones en la gestión de las aguas residuales. Existe en Acueductos y Alcantarillados (AyA) un proyecto que pretende tratar las aguas residuales de la gran área metropolitana en la nueva planta de Los Tajos, sin embargo, dado que en el cantón se proporciona el agua potable mediante servicio municipal, no se tiene certeza de que se pueda incluir dentro del perímetro sanitario que cubre planta de tratamiento. Debido a esto, se plantea por parte del presente documento, el proyecto de Plan Maestro para la gestión de las aguas residuales del cantón de La Unión que tiene como finalidad definir la mejor opción para darle tratamiento a las aguas residuales de más de 17 000 propiedades que comprenden su área de cobertura y que actualmente están teniendo impactos negativos en las microcuencas del río Tiribí y María Aguilar principalmente. En el presente documento se plantea la selección mediante un análisis multicriterio de opciones dentro de las que están la optimización de tratamientos individualizados, PTARs semicentralizadas y centralizadas con RAFA y lodos activados o solamente lodos activados. En conjunto con la municipalidad y la población se estableció una ponderación que incluyó aspectos ambientales, técnicos, económicos y sociales. Se dividió el área de cobertura del acueducto en seis sectores y 20 subsectores, con el fin de realizar un análisis más detallado y obtener una solución más adaptada al lugar. Se diseñaron y caracterizaron las distintas alternativas y redes primarias de alcantarillado centralizado y semicentralizada, además de calcular costos y calidades de los efluentes. Con los datos calculados y consultados en la literatura se procedió a completar la matriz de selección de alternativa para cada uno de los 20 subsectores. De esta manera se determinó que la opción de tratamiento que se adapta mejor a la realidad del cantón es una red de 12 plantas semicentralizadas de tratamiento con RAFA y lodos activados distribuidas por el cantón y 1 planta centralizada con RAFA y lodos activados de un tamaño mayor en la parte baja de la microcuenca del río Tiribí.

**Palabras clave:** Aguas Residuales, evaluación multicriterio, sistema de tratamiento, lodos activados, reactor anaerobio de flujo ascendente, tanque séptico.

## **ABSTRACT**

La Unión Municipality manages six wastewater treatment plants in the city, only covering 9% of its served population. Individual systems treat the rest. It is meant by the Costa Rican waterboard (AyA) to treat La Union sewer water in a nearby wastewater treatment plant, Los Tajos. However, it cannot be administratively done because the city council delivers the drinking water service. Therefore, this thesis proposes a Master Plan for La Unión's local municipality by defining the best option to treat the wastewater of more than 17,000 households, which currently discharge and negatively impact Tiribí and María Aguilar micro-basins. To do so, a technology selection was proposed via a multicriteria analysis. It includes individual treatment, semi-centralized, and centralized wastewater treatment plant with either an Upflow anaerobic sludge blanket (UASB) followed by an activated sludge system or only an activated sludge system. Along with the municipality and the population opinion, the weight for the multicriteria analyses was established including environmental, technical, economic, and social aspects. The area was divided into six sectors and 20 subsectors to conduct more detailed analysis with an adapted solution to each place. Different alternatives for the primary networks of centralized and semi-centralized sewerage were designed. Costs calculations and effluent quality were estimated. The best treatment option that fitted the canton's needs comprehends a network of 12 semi-centralized treatment plants with UASB followed by an activated sludge system and one centralized plant of a larger size. The last one comprehends a UASB and activated sludge located in the lower part of the micro-basin of the Tiribí River.

**Key words:** Wastewater, multi-criteria evaluation, treatment system, activated sludge, upstream anaerobic reactor, septic tank.

## 1 INTRODUCCIÓN

En el mundo, el 80% de las aguas residuales es vertido a las vías fluviales sin un adecuado tratamiento (ONU, 2020). En América latina y el Caribe se le dio un tratamiento “al menos básico” al 87% de las aguas residuales mientras que en Costa Rica se tienen registros de que el 98% de las aguas reciben como mínimo ese tratamiento primario (WHO & UNICEF, 2019). Estos mismos datos indican, que el uso de tanques sépticos se ha incrementado en un 11% en 17 años llegando al 75% del agua tratada a nivel nacional (WHO & UNICEF, 2019). A pesar de tener una cobertura del 75% de sistemas de tratamiento individualizados, la responsabilidad de brindarle correcto manejo y mantenimiento a estas aguas residuales es de cada uno de los usuarios o generadores (Rosales, 2003), que en su mayoría no poseen conocimientos técnicos o básicos sobre estos temas. A esto se le suma, que en muchos casos los tanques sépticos son construidos sin ser correctamente diseñados y supervisados por un profesional del área por lo que no todos estos sistemas estén bien construidos (Rosales, 2003). En el caso antes mencionado, el agua subterránea, se ve afectada por la infiltración de aguas residuales mal tratadas, implicando múltiples efectos ambientales; cambiando así la calidad de estas aguas y dificultando su aprovechamiento por parte de otras comunidades (Gutiérrez, 2020).

Es por la afectación social y ambiental que, la Organización de las Naciones Unidas propone el Objetivo del Desarrollo Sostenible 6: Agua limpia y saneamiento, donde parte de lo que busca es “De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial” (ONU, 2020). El cantón de La Unión, no tiene un sistema de alcantarillado sanitario a excepción de unos cuantos residenciales de los cuales se desconoce el estado de funcionamiento y mantenimiento (Municipalidad de La Unión, 2018), por lo que a la mayoría de estas aguas residuales se les da tratamiento individualizado mediante tanques sépticos operados por los usuarios del servicio de agua potable, por lo que no se tiene un control sobre los vertidos realizados a cuerpos de agua o calidad de las aguas residuales infiltradas al suelo.

Según el estudio del estado actual para el desarrollo de un Plan de Saneamiento Ambiental para la comunidad urbana del cantón de La Unión, Cartago desarrollado por Rodríguez, 2016,

se tiene un inventario de las plantas de tratamiento públicas y privadas ubicadas en el cantón, sin embargo, el 33% de ellas incumplen el reglamento nacional (Rodríguez, 2016). Estos sistemas de tratamiento solamente cubren al 9 % de la población mientras que el 81% cuenta con sistema de tanque séptico y el 10% vierte directamente sus aguas residuales a un cuerpo receptor (Rodríguez, 2016).

A pesar de que se tiene contemplado la cobertura de una gran parte de la población del cantón de La Unión en el plan de la planta de tratamiento Los Tajos, esta tomará muchos años para llegar a cumplir la cobertura esperada (Lopez Fonseca, 2020). De igual forma esto presentará una alta complejidad en cuanto a cobros y tarifas de servicio debido a que la municipalidad es el proveedor de agua potable para gran parte de la población local y la PTAR Los Tajos es operada por el AyA (C. Richmond, comunicación personal, marzo 23, 2021).

Debido a la situación expuesta, se procede a realizar una propuesta de plan maestro para la gestión de las aguas residuales del cantón de La Unión. Se utilizarán los datos recolectados en años anteriores por Rodríguez (2016) y otros datos recolectados para realizar esta propuesta, teniendo en cuenta tanto los datos brindados por los profesionales de la municipalidad de La Unión como la percepción de la ciudadanía, permitiendo así un mejor análisis de la situación.

El análisis actual contempla desde el análisis de los datos recolectados en la encuesta de hogares (Rodríguez, 2016) hasta la formulación y difusión de encuestas a la ciudadanía y la coordinación de talleres con el personal de la Dirección de Recurso Hídrico del cantón de La Unión con el fin de establecer objetivos y prioridades para las alternativas. Además, de la delimitación de requisitos mínimos a cumplir para que la alternativa sea aplicable. Determinando así, distintas opciones para el tratamiento de las aguas residuales, desde sistemas individuales hasta plantas de tratamiento centralizadas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Proponer el plan maestro para la gestión de las aguas residuales del cantón de La Unión.

#### **2.1.1 Objetivos específicos**

- Proponer opciones de saneamiento para el Cantón de la Unión a partir de diagnóstico previo.
- Analizar indicadores ambientales, sociales y económicos para las opciones propuestas.
- Identificar la prefactibilidad de las opciones de saneamiento propuestas.



### **3 REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **3.1 AGUAS RESIDUALES**

En el planeta, se ha intentado cambiar la situación ambiental, social y económica de la población para asegurar facilidades de acceso a recursos básicos para el bienestar de todos. Es por esto por lo que en el año 2015 la Organización de Naciones Unidas lanza la Agenda 2030 para los Objetivos del Desarrollo Sostenible, la cual fue adoptada por los líderes de los estados participantes y está conformada por 17 objetivos entrelazados (Zhou et al., 2018). Con respecto al saneamiento se planteó el Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento, el cual pretende que de aquí al 2030 se mejore la calidad del agua al reducir la contaminación, eliminar el vertimiento, minimizar la emisión de productos químicos y peligrosos, reducir en un 50% el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentar el reciclado y reutilización de esas aguas sin riesgos (ONU, 2020).

Las aguas residuales son todas aquellas que provienen de la combinación de agua usadas para la actividad domiciliar, industrial o comercial e infiltración en el alcantarillado (WHO & UNICEF, 2019). Según la legislación costarricense existen dos tipos de aguas residuales, las ordinarias o domésticas y las especiales (Ministerio de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía, 2007). El agua residual doméstica, también conocida como ordinaria está compuesta por excretas humanas y agua usada (WHO & UNICEF, 2019). El agua residual especial es aquella de tipo diferente al ordinario (Ministerio de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía, 2007).

El agua residual doméstica está compuesta tanto por desechos humanos como heces y orina como por el agua usada para los inodoros, lavado y limpieza del hogar y personal. Debido a esto, el agua residual tiene compuestos que funcionan como alimento de bacterias, característica que se aprovecha para su tratamiento. Cabe destacar que, aunque algunos de estos microorganismos pueden causar enfermedades, la gran mayoría son inofensivos o incluso beneficiosos (Mara, 2003).

Con respecto las aguas residuales ordinarias, lo que se busca es el aislamiento de las excretas de los humanos, con el fin de evitar transmisión de enfermedades; esto incluye las enfermedades potenciales transmitidas por su presencia en cuerpos receptores, por lo que desde hace años se monitorean los servicios de saneamiento manejados de manera segura por

parte de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y sus dependencias (WHO & UNICEF, 2019).

## 3.2 SITUACIÓN ACTUAL DE LAS AGUAS RESIDUALES

### 3.2.1 El mundo

A nivel global, el 80% de las aguas residuales es vertida a las vías fluviales sin un adecuado tratamiento (ONU, 2020). Entre los retos para cumplir las metas planteadas en cuanto a los Objetivos del Desarrollo Sostenible está eliminar la defecación a cielo abierto y que todas las personas tengamos acceso a sistemas de defecación seguros, ya que 892 millones de personas defecan al aire libre y 600 millones lo hace en letrinas o inodoros compartidos entre varias casas (Zhou et al., 2018).

### 3.2.2 Costa Rica

En América latina y el Caribe se le dio un tratamiento “al menos básico” al 87% de las aguas residuales mientras que en Costa Rica se tienen registros de que el 98% de las aguas reciben al menos ese tratamiento (WHO & UNICEF, 2019). Estos mismos datos indican, que el uso de tanques sépticos se ha incrementado en un 11% en 17 años llegando al 75% del agua tratada a nivel nacional (WHO & UNICEF, 2019). En el país se deben seguir varios reglamentos correspondientes al correcto diseño, aprobación y manejo de tanques sépticos, sistemas de tratamiento y sus residuos. Entre ellos se encuentra, el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2017) que regula a los profesionales del área con respecto a cómo se deberían de construir y diseñar sistemas principalmente de tanque sépticos, el Reglamento para la disposición al subsuelo de aguas residuales ordinarias tratadas (Ministerio de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía, 2019) que regula lo referente a características mínimas de un sistema de infiltración y diseño de un tanque séptico y el Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos (Ministerio de Salud, 2019) que regula los procedimientos, tratamientos y destinos probables para los lodos residuales y biosólidos producto de las actividades de saneamiento.

### **3.2.3 La Unión**

El cantón de La Unión no posee un sistema de alcantarillado sanitario a excepción de unos cuantos residenciales de los cuales se desconoce el estado de funcionamiento y mantenimiento (Municipalidad de La Unión, 2018). En contraste, para 2016 se tenía un inventario de las plantas de tratamiento públicas y privadas ubicadas en el cantón, sin embargo, el 33% de ellas incumplían el reglamento nacional (Rodríguez, 2016). Estos sistemas de tratamiento solamente cubren al 9 % de la población mientras que el 81% cuenta con sistema de tanque séptico y el 10% vierte directamente sus aguas residuales a un cuerpo receptor (Rodríguez, 2016). Cabe recalcar, que la municipalidad de La Unión cuenta con el “Reglamento para la operación y administración del Alcantarillado Sanitario y Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales del Cantón de la Unión” (Municipalidad de La Unión, 2012) referente a la operación y mantenimiento de alcantarillado sanitario, por lo que todo lo relacionado a ese tema debe apegarse a lo dispuesto por las autoridades municipales de ese momento o modificarse mediante el debido proceso.

### **3.3 INDICADORES DE CALIDAD DE AGUA RESIDUAL**

El objetivo principal del tratamiento de las aguas residuales es evitar y reducir el efecto en el ambiente y la salud humana, teniendo en cuenta la percepción de las comunidades; es por esto que se han venido estableciendo parámetros mínimos de vertido para los tipos de aguas (Tchobanoglous, 2014). Estos dependen del estado o país, y debido a los avances tecnológicos se va logrando un mejor monitoreo, medición y remoción con forme pasa el tiempo (Tchobanoglous, 2014).

Con la tecnología actual se ha logrado identificar cuáles son los factores más relevantes a la hora de determinar la calidad del agua residual, estos se pueden observar en el Cuadro 3-1.

**Cuadro 3-1 Parámetros indicadores de contaminación**

<b>Parámetro</b>	<b>Importancia</b>
Sólidos suspendidos	Al ser liberados pueden generar grandes depósitos de lodos y condiciones anaerobias en los cuerpos de agua superficial
Orgánicos biodegradables	Al estar disueltos en agua y ser liberados, en el proceso de su estabilización consumirán el oxígeno disuelto en el agua generando condiciones sépticas y perjudicando el ecosistema acuático
Patógenos	Se pueden transmitir enfermedades a través de las fuentes de agua
Nutrientes	El exceso de nutrientes como nitrógeno, fósforo y carbono son esenciales para el crecimiento, en exceso, estos pueden generar crecimiento indeseado de vida acuática y además pueden llegar a contaminar el agua subterránea
Contaminantes prioritarios	Investigaciones han identificado ciertos contaminantes como cancerígenos, mutagénicos o de gran toxicidad.
Metales pesados	Principalmente en procesos industriales los metales pesados deben ser monitoreados y removidos para el reúso del agua
Inorgánicos disueltos	Principalmente el calcio, sodio y sulfato son agregados a las aguas domésticas y deben ser reducidos antes de reusar el agua.

Adaptado de (Tchobanoglous, 2014)

Como se mostró en el Cuadro 3-1 los indicadores de calidad están claramente definidos y se van modificando o añadiendo paulatinamente según investigaciones; sin embargo, corresponde la legislación definir los valores máximos o mínimos aceptables para el país. En el Cuadro 3-2 se listan los parámetros universales de análisis obligatorio que debe cumplir una planta de tratamiento para hacer el vertido de las aguas residuales a un cuerpo receptor.

**Cuadro 3-2 Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor**

<b>Parámetro</b>	<b>Límite Máximo</b>
DBO 5,20	50 mg/L
DQO	150 mg/L
Sólidos Suspendidos	50 mg/L
Grasas/aceites	30 mg/L
Potencial hidrógeno	5 a 9
Temperatura	Entre 15°C y 40°C
Sólidos sedimentables	1 mL/L
SAAM	5 mg/L

**Adaptado de Ministerio de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía, 2007**

### 3.4 NIVELES DE TRATAMIENTO

En cuanto al tratamiento existen múltiples alternativas y tecnologías disponibles. El nivel, hace referencia al objetivo de tratamiento y tipo de proceso utilizado para la mejora en la calidad: primario, secundario, terciario y avanzado. Se puede incluir el pretratamiento como un nivel ya que es necesario para lograr implementar los otros cuatro (Tchobanoglous, 2014). En el pretratamiento se prepara el agua para los procesos de remoción de contaminantes, por lo que se busca eliminar posibles interferencias o potenciales daños al equipo para las siguientes etapas, esto incluye grandes cantidades de grasa, ramas o residuos sólidos grandes. El objetivo del primario es disminuir la cantidad de sólidos suspendidos y la carga orgánica del agua, puede ser por un proceso de decantación, filtración o adición de químicos. El secundario elimina materia orgánica disuelta o que se mantuvo en suspensión aún después del tratamiento primario. El tratamiento terciario puede tener varios objetivos, uno de estos es la eliminación de sólidos suspendidos que fueron producidos en el tratamiento secundario. Otras opciones para un tratamiento terciario son la desinfección o la remoción de nutrientes.

Finalmente, el avanzado, busca mejorar aún más esas calidades para cumplir con ciertos límites más estrictos como lo son los establecidos para reuso o aprovechamiento (Tchobanoglous, 2014).

En los distintos niveles, como se mencionó, se agrupan muchas y distintas tecnologías, para los casos donde se ven involucrados procesos químicos o biológicos se puede elegir entre tecnologías aeróbicas, con oxígeno disponible en el agua, o anaeróbicas, sin oxígeno disuelto en el agua. Por ejemplo, para la remoción de compuestos biodegradables se puede escoger entre los distintos tipos de lagunas, reactores anaerobios, reactores aerobios de biofilm o alguna de las variantes de lodos activados (aerobio) (Sperling & Chernicharo, 2005).

### 3.5 OPCIONES DE TRATAMIENTO PARA AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

#### 3.5.1 Sistemas individualizados

En el contexto de aguas ordinarias municipales un sistema de tratamiento individual es el que está diseñado para sanear el agua residual de una familia, comercio, escuela o edificio pequeño. Existen varias alternativas como letrinas, inodoros secos, entre otros (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2017).

##### *Trampa de grasa*

Una trampa de grasa se ubica en los conductos de desagüe de fregaderos o lavaplatos con el fin de que se retenga el exceso de grasa en el agua y se disminuya el riesgo de que se afecte negativamente el funcionamiento del sistema de desagüe (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2017). En el caso de las aguas domésticas provenientes del lavado de platos es obligatorio que antes del tanque séptico se encuentre una de estas (Ministerio de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía, 2019).

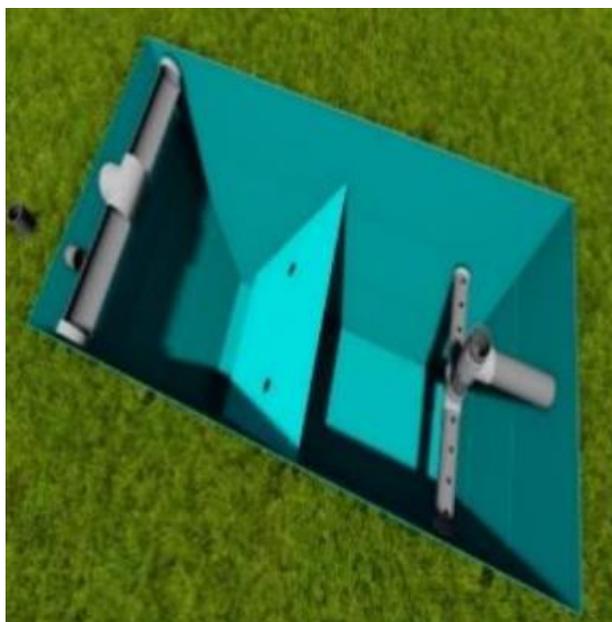
En cuanto a su diseño, la trampa se compone de dos deflectores, uno al inicio y otro al final, de esta manera se evita la turbulencia en la superficie y logrando una separación entre los componentes del agua. Con un tamaño mayor podría también separar sólidos por medio de la sedimentación. Cuando se mantiene de manera adecuada es capaz de retener gran cantidad de las grasas y aceites presentes en el agua residual. Para los sistemas de tratamiento individualizado, el mantenimiento consiste básicamente en la recolección de las grasas y

sólidos de la trampa de grasa cada 3 meses (Ministerio de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía, 2019).

### ***Tanque séptico***

Este sistema de tratamiento suele usarse y recomendarse en lugares donde se tiene servicio constante de agua y no hay cobertura de sistemas de alcantarillado sanitario. Esta tecnología consiste en una estructura de concreto para la retención de lodos y natas, con entrada y salida que permite solamente la salida de las aguas residuales (sin sólidos); su efluente puede ser infiltrado al suelo o pasar por otro tratamiento que mejorará la calidad de este (Rosales Escalante, 2008). Adicional al sistema tradicional, hay pruebas de campo que indican que se puede mejorar la eficiencia de estos tanques con la implementación de placas que disminuyen los tiempos de sedimentación, a estos se les conoce como tanques sépticos mejorados y se recomienda su uso por sobre los comunes. En estos tanques mejorados (Figura 3-1) se reportan eficiencias de remoción de hasta 39% para DBO y 73% para SST (Hegg, 2018).

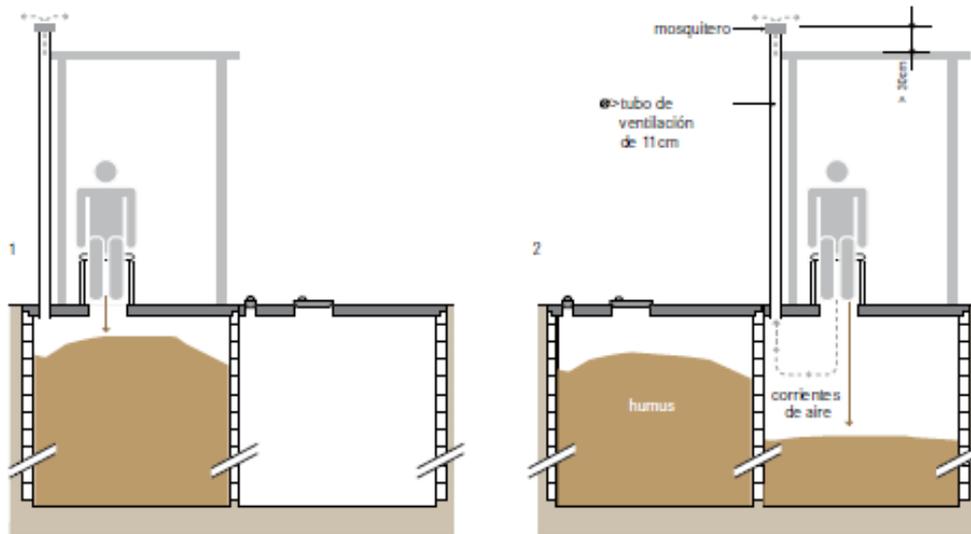
Entre las ventajas de esta tecnología se encuentra que no requiere electricidad, requiere un terreno pequeño, posee bajos costos de operación y es una tecnología sencilla. Por el contrario, sus principales desventajas son la poca reducción de patógenos, limitada reducción de sólidos y compuestos orgánicos, requiere tratamiento adicional para el efluente y los lodos y además, requiere el desenlodado constante (Tilley, et al., 2018). En cuanto a operación y mantenimiento, se debe hacer la limpieza del 80% del contenido de los tanques sépticos al menos cada dos años (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2017). También se debe tener el cuidado de no agregar productos químicos fuertes y monitorear constantemente los niveles de espuma y lodos (Tilley, et al., 2018).



**Figura 3-1 Tanque séptico mejorado.  
Tomado de Hegg, 2018.**

### ***Cámara doble mejorada ventilada***

La cámara doble mejorada ventilada es un sistema individualizado que consiste en dos cámaras donde se depositarán las excretas y se extraerá un material similar al humus al cabo de un tiempo. Como se aprecia en la Figura 3-2, primero se utiliza una cámara y luego la otra, moviendo las instalaciones sanitarias de lugar, manteniendo ventilación en el que está en uso y sellando el que está en proceso de degradación. El material depositado reposará, drenará, reducirá su volumen y se degradará durante el periodo que la otra cámara se llena; obteniendo así material parcialmente desinfectado y parecido al humus (Tilley, et al., 2018). En cuanto a recomendaciones para su uso, se recomienda para áreas urbanas densas, y ya que no se requiere camión de bombeo para su mantenimiento estas zonas pueden ser inaccesibles para estos camiones. Por otro lado, no se recomienda su uso en suelos compactos o rocosos ni áreas que se inundan frecuentemente. Sus ventajas principales son que tiene una vida útil indefinida con correcto mantenimiento, el humus es más fácil de extraer que los lodos fecales, se reducen los patógenos y los malos olores se reducen en comparación con otros sistemas. Las principales desventajas son la potencial contaminación de acuíferos y remoción manual del humus (Tilley, et al., 2018).

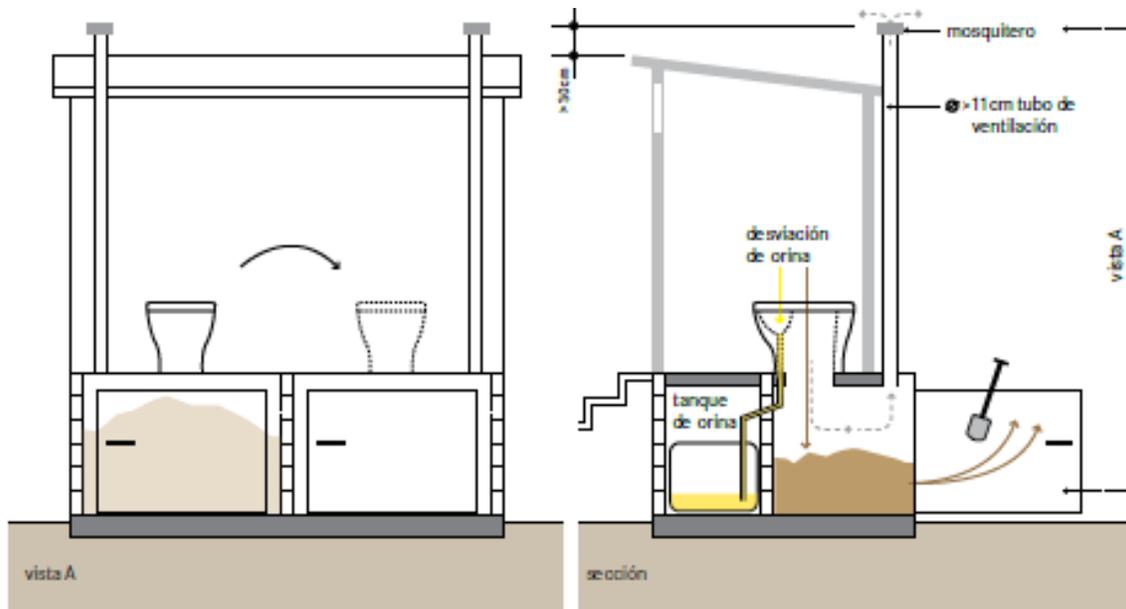


**Figura 3-2 Cámara doble mejorada ventilada**  
Tomado de Tilley et al., 2018.

### ***Cámara de deshidratación***

Este sistema de tratamiento comprende de cámaras donde las heces son depositadas libres de cualquier líquido añadido (orina o agua de limpieza anal) y se deshidratan. Ya que el proceso depende de que no entren en contacto heces y orina, es importante que se utilice un inodoro seco con separador de orina como el que se observa en la Figura 3-3, de esta manera se podrá disponer de ella de manera adecuada sin afectar el sistema de deshidratación. Se debe utilizar cal, ceniza o tierra seca para obtener una mejor calidad de subproducto, con menos olores, moscas y mejor secado (Tilley, et al., 2018).

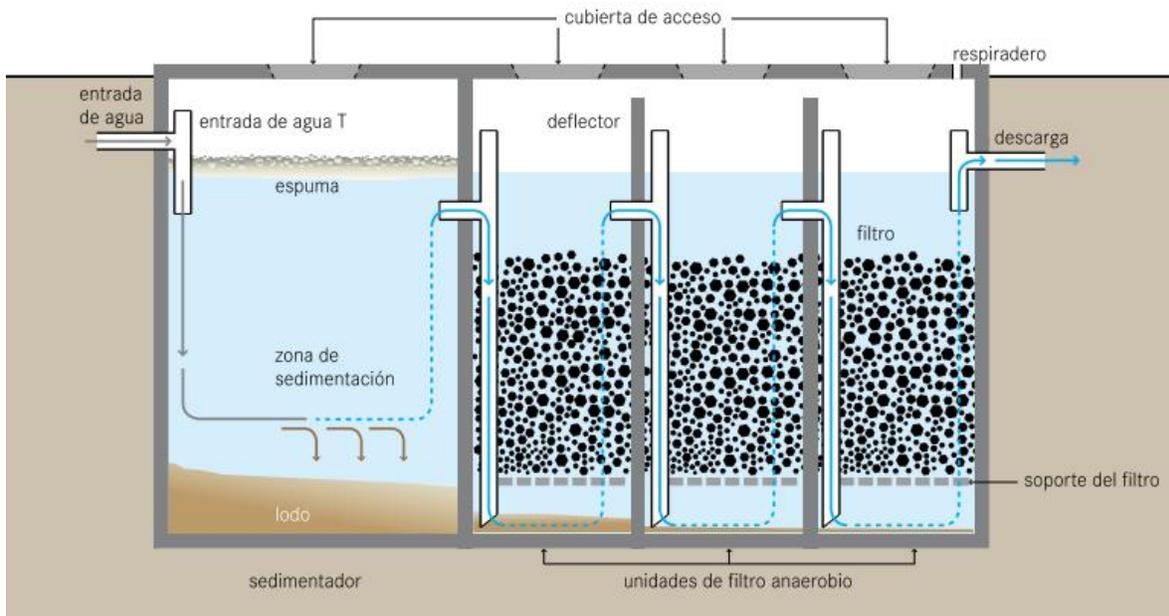
Si se cuenta con servicio para retirar la orina y heces secas es recomendable su uso en zonas urbanas y rurales, en caso de que no, entonces solo rurales. Al ser resistentes al agua, se recomienda su uso en zonas con alto nivel freático o inundables y rocosas. Entre sus principales ventajas está que tiene una vida útil prácticamente ilimitada, se reducen los patógenos significativamente, se pueden utilizar las heces como acondicionador de suelo y requiere bajo costo de inversión. En contraste sus principales desventajas son que requiere personal capacitado para su operación y las heces secas deben ser removidas manualmente (Tilley, et al., 2018).



**Figura 3-3 Cámara de deshidratación**  
Tomado de Tilley et al., 2018.

### ***Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)***

Consiste en una o más cámaras de filtración en serie, el agua ya sin sólidos o grasas ingresan por la parte inferior del FAFA y por gravedad atraviesan el medio filtrante (Figura 3-4). Las partículas presentes en el agua son atrapadas y degradadas por los microorganismos presentes en el medio de soporte, saliendo el agua de una mejor calidad (Tilley, et al., 2018). Se ha demostrado que algunos medios filtrantes como tapas plásticas de botella tienen mejor rendimiento que medios tradicionales para la remoción de SST por lo que se recomienda su uso en los FAFA (Hegg, 2018). Se ha encontrado que, en conjunto a un tanque séptico, un FAFA tiene una remoción de hasta 51% de DBO y 88% de SST (Hegg, 2018).



**Figura 3-4 Filtro anaerobio de flujo ascendente**  
Tomado de (Tilley, et al., 2018)

Como puntos a favor esta tecnología no requiere electricidad, tiene bajos costos de operación, baja producción de lodo, altas reducciones de DBO y sólidos y requiere un terreno moderado; por el contrario es una desventaja la baja reducción de patógenos, tiene alto riesgo de obstrucción y es incómodo limpiar el material del filtro (grava) si este se obstruye (Tilley, et al., 2018). Se genera lodo que está estabilizado y el agua del efluente requiere un tratamiento posterior, aparte de eso, el sistema requiere extracción de lodos para la cámara sedimentadora y realizar un lavado del medio filtrante cada vez que sea necesario (Hegg, 2018; Tilley, et al., 2018).

### ***Campo de infiltración***

El método de infiltración subsuperficial es ampliamente usado para el tratamiento de aguas residuales como disposición final. Este método normalmente se lleva a cabo en zonas rurales o áreas donde el alcantarillado sanitario no está disponible. Como se puede observar en la Figura 3-5 consiste en la colocación de tuberías debajo del nivel del suelo para la distribución del caudal y que este sea infiltrado al suelo (Yang et al., 2021). Para el correcto dimensionamiento de este sistema de tuberías, se debe implementar una prueba de infiltración, la cual tiene como objetivo medir la cantidad de agua que es capaz de infiltrarse en el suelo en cualquier momento, para de este modo evitar inundaciones o desbordes del

sistema (Ministerio de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía, 2019). Entre las desventajas de la infiltración resalta la baja remoción de nitrógeno total y el riesgo de bloqueo del drenaje, también requiere un área grande y puede perjudicar las propiedades del suelo y los acuíferos (Tilley, et al., 2018; Yang et al., 2021); las ventajas del sistema son que tiene una larga vida útil si es mantenido adecuadamente, costo bajo, no requiere electricidad (Tilley, et al., 2018). En cuanto a la operación y mantenimiento del sistema, se debe tener un tratamiento previo al menos primario para evitar obstrucciones y debe mantenerse el campo de infiltración libre de árboles, plantas o tráfico pesado (Tilley, et al., 2018).

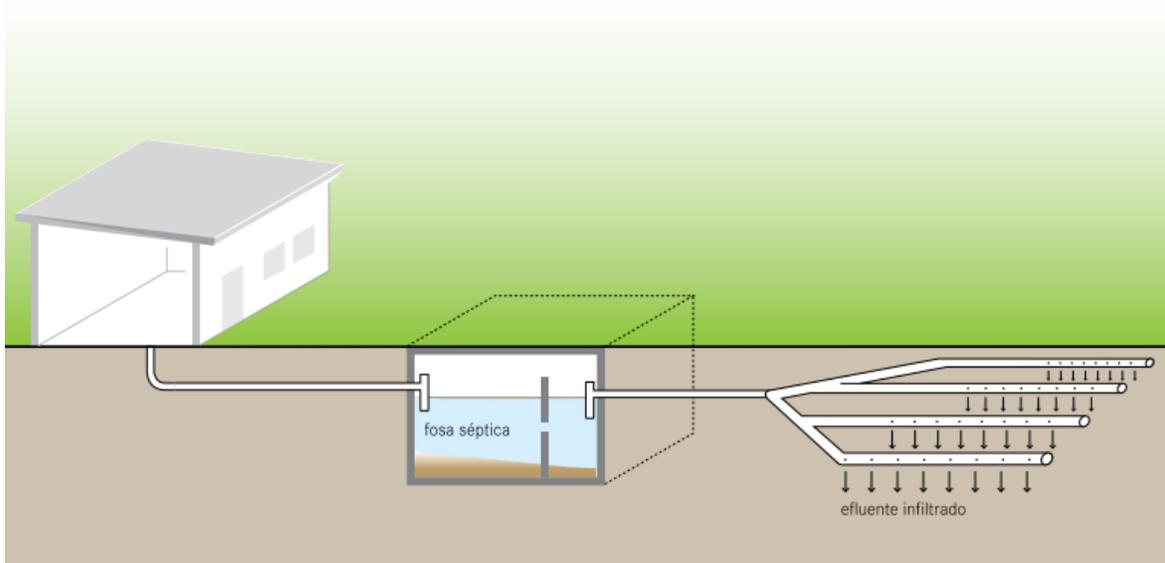


Figura 3-5 Lecho de infiltración, tomado de (Tilley, et al., 2018)

### 3.5.2 Sistemas colectivos

#### Sistemas semicentralizados y centralizados

El sistema de tratamiento centralizado ha sido usado ampliamente por países desarrollados y sus principales ciudades, es un método por el cual se puede asegurar una mejor calidad del agua vertida a un cuerpo receptor o al ambiente ya que comúnmente quienes manejan sistemas individualizados no conocen el funcionamiento y propósito de esos sistemas. En casos de ciudades muy grandes, los costos del transporte de las aguas residuales se incrementan, es por esto, por lo que en ocasiones se opta por la construcción de varios

sistemas de tratamiento locales en vez de uno a gran escala para reducir costos constructivos (Wilderer & Schreff, 2000).

Debido a la alta demanda y poca disponibilidad del agua potable en las grandes ciudades se ha dado otro enfoque a la gestión de las aguas residuales generadas. A esta opción se le conoce como sistema satélite o descentralizados, esto debido a que consiste en una red de sistemas de tratamiento para brindar distintas calidades de agua según las necesidades y oportunidades de reúso. Esta agua puede ser reutilizada por las mismas personas para usos no potables o puede ser vendida a la industria o comercio o incluso ser utilizada para riego según la legislación lo permita (Gikas & Tchobanoglous, 2009).

Para estos sistemas de tratamiento existen múltiples alternativas de tratamiento y transporte dependiendo de la calidad y el uso que se le quiera dar al agua tratada; a continuación, se presentan y explican brevemente algunas de estas.

### ***Recolección y transporte***

#### ***Alcantarillado con transporte de sólidos***

Llamado también alcantarillado convencional por gravedad, es ampliamente conocido y utilizado. Consiste en una red de colectores y subcolectores de aguas residuales que se extiende desde las casas de los abonados hasta una planta de tratamiento de aguas residuales por gravedad o bombeo. Estas redes no requieren pretratamiento ni tratamiento primario antes de llegar a la planta de tratamiento, ya que se diseñan para poder transportar los sólidos mediante la propia velocidad del agua. Sus componentes principales son los colectores, pozos de registro y estaciones de bombeo (de ser necesarias) (Tilley, et al., 2018).

#### ***Alcantarillado sin transporte de sólidos***

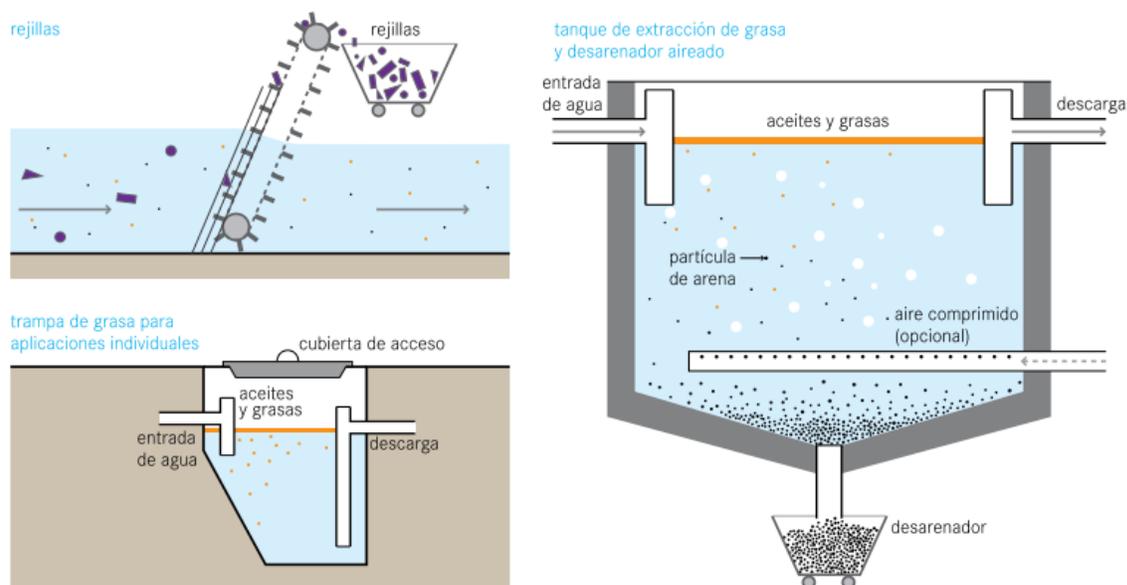
Esta red de alcantarillado consiste en transportar las aguas residuales a una planta de tratamiento, la diferencia principal con respecto al alcantarillado tradicional es que se hace un tratamiento previo con tanque séptico para eliminar lodos y grasas. Presenta varias ventajas y desventajas con respecto al alcantarillado convencional, entre las ventajas se incluyen un diámetro menor de tubería y profundidad menor de excavación por lo tanto menores costos. También debido a que no presenta sólidos ni grasas puede trabajar en algunos sectores por presión y no requiere pozos de registro. Los puntos negativos son que

se requiere un pretratamiento y tratamiento primario del agua ya que esto es lo que permite una disminución de diámetros. Su aplicación es muy útil en casos que no se tenga suficiente espacio para lechos de infiltración, pero si para el tanque séptico (Tilley, et al., 2018).

## ***Tratamiento***

### ***Pretratamiento***

El pretratamiento es lo que se efectúa a un agua residual antes de ingresar propiamente al proceso de mejora de calidad, independiente de qué opción tecnológica se opte, el principal objetivo de este es la protección del equipo de tratamiento y búsqueda de un mejor proceso de tratamiento; para lograr esto se tienen operaciones unitarias como cribado, tanques de equalización, desarenadores, trituradores, entre otros (Figura 3-6). Se eliminan solidos grandes, grasas y sólidos sin embargo la calidad del agua no se ve mejorada en gran medida (Shun Dar Lin, 2014).



**Figura 3-6 Diagramas de algunas tecnologías de pretratamiento**  
Tomado de (Tilley, et al., 2018)

Con una correcta implementación del pretratamiento se logra proteger las bombas y equipo mecánico, las tuberías internas y muros del desgaste u obstrucciones. Además, de proteger al cuerpo receptor de estos sólidos y facilitar el transporte del agua y lodos. El mantenimiento para las rejillas, trampas de arena es remover cada cierto tiempo los sólidos y disponerlos de manera adecuada (von Sperling, 2015).

### Lagunas

Los sistemas de tratamiento por lagunas consisten en una serie de lagunas (anaeróbica, facultativa, de maduración), tienen un bajo costo y son sencillas de diseñar (Ho & Goethals, 2020). En estos sistemas no se da la remoción de contaminantes por una sola vía, si no que a la vez suceden distintos procesos que ayudan a la disminución de la carga de contaminantes. Uno de ellos es la sedimentación de sólidos biodegradables los cuales son descompuestos por bacterias al fondo de la laguna, los inertes permanecen como lodos, el cual es uno de los subproductos de esta tecnología. Por otro lado, la materia orgánica soluble es digerida según las condiciones por bacterias facultativas, aerobios o anaerobias. En las lagunas también se llega a dar la fotosíntesis de algas que, dependiendo de la profundidad a la que se encuentren van a ayudar a oxigenar o a desoxigenar el agua. Las lagunas pueden diseñarse en distintas formas según los objetivos de tratamiento, desde una hasta más de tres tipos de sistemas en serie (von Sperling, 2015). Es típico que para una laguna facultativa se alcance una eficiencia de remoción del 75-85% para DBO y entre 70 y 80% en sólidos sedimentables; en contraste, un sistema con laguna anaerobia seguida de una facultativa y de otra de maduración logra remociones de entre 80 y 85% para DBO y 73 a 83% en sólidos sedimentables (von Sperling, 2015)..

Su principal desventaja es el alto requerimiento de espacio para las lagunas, además de tener una gran acumulación de lodos que deberán ser extraídos con regularidad. Mientras que su ventaja principal es el bajo consumo de energía eléctrica (von Sperling, 2015). Señala Ho (2020), que, en caso de no lograrse una mejora importante para esta tecnología, probablemente sea sustituida por otras como lodos activados, filtros de membranas y digestión anaerobia.

### Humedales Artificiales

Los humedales artificiales, se han convertido en una de las opciones consideradas a la hora de construir un sistema de tratamiento, ya sea para una comunidad o para una casa. El sistema consiste en simular lo que sucede en los humedales naturales, mediante la colocación de plantas como plantas herbáceas o manglares. El sistema tiene una buena remoción de algunos contaminantes como nitrógeno, esto debido a las bacterias que se ubican en las plantas. Esta

tecnología requiere de un pretratamiento para funcionar correctamente (Tian et al., 2020). Se pueden identificar dos tipos principales de humedales artificiales, los de flujo superficial que se asemejan mucho a los humedales naturales, el agua corre por la superficie y las plantas crecen sobre la superficie, bajo el agua o como plantas flotantes. El segundo tipo es el de flujo subsuperficial, consiste en una cama de piedras de diferentes diámetros, arena y grava y el nivel de agua se mantiene siempre debajo del nivel superior de estos materiales. También se pueden clasificar según el flujo del agua; hay humedales artificiales de flujo vertical y horizontal, esto depende del tipo y posición de la salida y entrada del agua (von Sperling, 2015). El alto espacio requerido para su construcción es una de sus desventajas. Para este sistema de tratamiento las eficiencias de remoción oscilan entre 80 y 90% para DBO y 87 y 93% para sólidos suspendidos (von Sperling, 2015).

#### Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

Son conocidos como RAFA o UASB por sus siglas en inglés; su funcionamiento consiste en ser un medio de crecimiento microbiano, en constante movimiento sobre gránulos debido a la corriente de entrada. El agua residual ingresa y en su transcurso los microorganismos anaerobios degradan materia orgánica y producen metano y dióxido de carbono. Al salir el agua del sistema los gránulos se mantienen dentro, continuando así con el tratamiento (Solano, 2019). Entre las ventajas que presenta el RAFA están su capacidad de trabajar con alta carga orgánica e hidráulica, además el biogás puede usarse como combustible. La principal desventaja es que requiere constantemente electricidad para funcionar. En cuanto a operación y mantenimiento se requiere personal capacitado para el mantenimiento de las bombas; cada 2 o 3 años es necesario desenlodar (Tilley, et al., 2018). Típicamente este sistema presenta una remoción entre el 60 y 75% para DBO y del 65 al 80% para sólidos suspendidos (von Sperling, 2015).

#### Lodos activados

Los lodos activados, se tratan de un reactor con medio suspendido en el agua que se encarga de degradar los contaminantes. El funcionamiento de los lodos se basa en microorganismos aerobios y constante aireación de las cámaras para mantener unas buenas condiciones aerobias. Su efluente es de una calidad muy buena para agua residual doméstica (Tilley, et

al., 2018). Dependiendo de lo que se quiera, se puede diseñar para desnitrificar el agua o simplemente para bajar la carga orgánica. Debido a su alta concentración de lodos debe diseñarse y construirse un clarificador como complemento para que los lodos sedimenten antes de que el agua continúe con su tratamiento, o en sus variaciones como el secuencial, considerar los ciclos de operación de aireación y sedimentación en el mismo volumen. Este sistema tiene un alto consumo energético y costos de construcción y mantenimiento, sin embargo, puede cumplir con los límites de vertido sin problema y es muy resistente a cambios de caudal o de carga orgánica (Tilley, et al., 2018). Con respecto a su eficiencia de remoción de contaminantes, cuando está luego de un RAFA puede llegar a alcanzar eficiencias del 93% para el DBO y de hasta 93% para sólidos suspendidos (von Sperling, 2015). Entre sus desventajas están que requiere personal altamente capacitado y que al equipo mecánico se le debe dar constante mantenimiento. Además, se debe contar con un medio para la disposición o aprovechamiento de los lodos (Tilley, et al., 2018).

### 3.6 TRATAMIENTO DE LODOS

Con la tecnología actual para el tratamiento de aguas residuales es imposible evitar la formación de lodos (Grobelač, Grosser, Kacprzak, & Kamizela, 2019), ya sea en un tanque séptico o en una gran planta de tratamiento, este es un sub producto que se tendrá que tratar de aprovechar o desechar responsablemente. Al ser un residuo con altas concentraciones de nutrientes y gran potencial energético, se recomienda buscar su uso como mejorador de suelos o para aprovechamiento energético (Grobelač et al., 2019). Existen distintos tipos de lodos, estos dependerán del nivel de tratamiento de donde provienen, por ejemplo, el lodo primario proviene de sistemas de tratamiento primario y así con el secundario. Cuando se utilizan procesos fisicoquímicos se genera también un lodo llamado químico. Los más comunes que son los primeros dos, se pueden tratar como mezcla. Las principales alternativas para el tratamiento de los lodos buscan la eliminación de agua, patógenos y estabilización. Al igual que para el tratamiento de la fase líquida existen múltiples combinaciones posibles para lograr los objetivos planteados (von Sperling, 2015).

### 3.7 TREN DE TRATAMIENTO

Es cierto que, por sí solas las tecnologías no tienen una gran eficiencia de remoción para ciertos contaminantes, o que la gran mayoría de ellas solo brinda un nivel de tratamiento (primario, secundario o terciario). En conjunto algunas de ellas se complementan de una gran manera, logrando así una alta eficiencia en la remoción de contaminantes y mejoramiento importante de la calidad del agua de efluente. En el caso de las lagunas de estabilización se ha comprobado una importante mejora en el efluente al agregarle un filtro de piedras al final ya que esto retiene gran parte de los sólidos suspendidos (incluyendo algas) que pasan las lagunas. En otro caso se identificó mejoría al utilizar un sistema avanzado de tratamiento de aguas residuales con lagunas, para las cuales se colocaron cuatro tipos diferentes para lograr un buen tratamiento con algas y luego retirarlas del agua mejorando la remoción de los sólidos suspendidos al final del sistema (Ho & Goethals, 2020).

Hay gran variedad de trenes de tratamiento que van desde una letrina con recolección y tratamiento de lodos hasta letrinas que separan los componentes en sólidos y líquidos y los aprovechan. Dependiendo de la situación y requisitos de calidad del agua se pueden aplicar un par o varios tratamientos hasta conseguir los objetivos de tratamiento. Algunos ejemplos de trenes de tratamiento son: Sistema sin agua con separador de orina, sistema de biogás, sistema de tratamiento de aguas negras con infiltración, sistema de alcantarillado con separador de orina. Cada una de estas alternativas tiene distintas permutaciones haciendo que la variedad y las posibilidades sean cada vez mayores y se ajusten a todas las situaciones (Tilley, et al., 2018). En cuanto a su aplicabilidad en sistemas centralizados se pueden mencionar combinaciones de las siguientes tecnologías de tratamiento (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013):

- Laguna cubierta anaerobia + laguna facultativa + laguna de pulimiento
- RAFA + Laguna de pulimiento
- RAFA + Humedales artificiales
- RAFA + Filtros percoladores
- RAFA + Lodos activados
- Lodos Activados de aireación extendida
- Lodos activados completamente mezclados
- Filtros percoladores + lodos activados

### 3.8 INDICADORES Y MÉTODOS DE SELECCIÓN

Existen varias metodologías para la selección del mejor sistema (centralizado, descentralizado o mixto) y de igual manera para el tren de tratamiento.

A lo largo de los años se han realizado investigaciones sobre distintos métodos de tratamiento, en una de ellas se determinaron las ventajas de los sistemas centralizados, descentralizados y mixto (con tratamiento en las casas y fuera de estas) se llegó a la conclusión de que a largo plazo es más rentable el sistema centralizado, siempre y cuando la tasa de crecimiento poblacional sea mayor o igual a la proyectada para los cálculos de diseño iniciales. Sin embargo, se rescata que si se toma en cuenta la reducción de costos y los beneficios ambientales entonces el sistema de tratamiento local con separación de aguas podría ser comparable al tratamiento centralizado (Roefs, Meulman, Vreeburg, & Spiller, 2016).

Existen varias metodologías para la selección del mejor sistema de tratamiento, por ejemplo, en caso de optar por sistemas centralizados, en unas investigaciones se incluyen optimizaciones multiobjetivo mientras en otras se ofrece una matriz para la selección de la mejor opción. Esta presenta un procedimiento recomendado para la mejor selección de las tecnologías según criterios de simulación y recomendaciones de experiencias previas. Para este proceso se deben tomar en cuenta 8 pasos, entre los cuales están la selección de indicadores de cumplimiento, selección de alternativas de tratamiento según lo que se busque, comportamiento de estas alternativas con fenómenos atmosféricos, entre otros (Jafarinejad, 2020). En comparación, la matriz utilizada para la selección del sistema de tratamiento de una ciudad de México es mucho más completa y detallada, incluye los pasos generales así como el detalle de lo que debe ser comprobado o revisado para cada paso, algunos de los puntos que toma en cuenta son identificación de técnicas y limitaciones del proceso, selección de indicadores de sostenibilidad donde se incluyen los 3 ejes (económico, social y ambiental), optimización del problema, definición del modelo, entre otras (Padrón-Páez, Almaraz, & Román-Martínez, 2020).

### **3.8.1 Métodos cuantitativos**

Estos métodos estudian variables cuantificadas, ya sean ordinales, intervalos o de razón obteniendo así datos objetivos y generalizables. A su vez, pueden ser de distintos tipos, simples o complejos según el nivel al que se quieran llevar (Pacheco & Contreras, 2008).

#### ***Simples***

Los métodos cuantitativos simples son muy utilizados para la determinación de prioridades en proyectos, el principal de ellos es el de indicadores económicos en los que se usan el VAN y el TIR, por ejemplo. Principalmente es utilizado en proyectos con información financiera amplia ya que depende principalmente de estos datos para calcularse. Su principal desventaja es que solo toma en cuenta factores que se puedan expresar en términos económicos por lo que estaría excluyendo los otros factores en la toma de la decisión. Puede ser utilizado como filtro previo en la selección, definiendo un mínimo a cumplir y luego priorizando las opciones viables mediante otro método (Pacheco & Contreras, 2008).

#### ***Complejos***

Por otro lado, los métodos complejos analizan de una manera más amplia las probabilidades, restricciones y metas de los proyectos. Entre ellas las principales son la dominancia entre proyectos y la programación lineal. Esta primera analiza la probabilidad de diferentes escenarios para los proyectos, sin embargo, se ve limitada por la dificultad para estimar de forma confiable la probabilidad de cada resultado posible. Por otro lado, la programación lineal busca el cumplimiento de múltiples objetivos incluyendo distintas restricciones, es un método muy robusto para la toma de decisiones sin embargo su implementación está muy limitada y resulta difícil ya que para muchos proyectos no se cuenta con los datos y estudios necesarios para efectuar esta valoración (Pacheco & Contreras, 2008).

### **3.8.2 Métodos cualitativos**

En contraste con los métodos cuantitativos, los cualitativos estudian variables que dependen de deseos, juicios o actitudes por lo que no son objetivos. Se considera complemento de los

métodos cuantitativos ya que pueden llegar a complementar el análisis de la situación (Pacheco & Contreras, 2008).

### *Simples*

Son tres los métodos simples más utilizados actualmente, dependiendo de lo que se busque con la selección se puede seleccionar uno o varios de estos. Las listas de verificación funcionan básicamente para descartar proyectos que no cumplen con ciertas condiciones mínimas establecidas en los objetivos. Por otro lado, el aporte a metas mide porcentualmente cuánto de la meta logra cada proyecto, teniendo así, según la ponderación para los objetivos una nota final que puede ser usada para la priorización de las opciones. Finalmente, la interacción nominal depende del criterio de un grupo de evaluadores quienes según su área determinan un orden de relevancia para los proyectos y luego se reúnen y discuten hasta llegar a un consenso sobre la prioridad de estos (Pacheco & Contreras, 2008).

### *Complejos*

Entre las distintas opciones destaca el método Delphi, este consiste en la elaboración de encuestas entre grupos de expertos en las diferentes áreas relacionadas al proyecto para de esta manera conocer puntos en común y discrepancias en cuanto a prioridades. De manera similar a lo discutido en la sección anterior, se comparan los resultados y se generan foros de discusión para buscar disminuir esas diferencias. Su punto negativo es que, a causa de todo este proceso, el costo y tiempo que toma llegar a una decisión aumentan considerablemente (Pacheco & Contreras, 2008).

### **3.8.3 Métodos mixtos**

Estos métodos unen los métodos cualitativos y cuantitativos, de esta manera se puede lograr un análisis holístico del proyecto mediante una mayor cantidad de perspectivas (Pacheco & Contreras, 2008).

El modelo de puntuación se acerca mucho a lo que es el modelo de aporte a metas, pero añadiendo ponderaciones para cada objetivo. Lo que busca al final es obtener una nota final para cada proyecto utilizando distintas funciones matemáticas. Se puede utilizar como

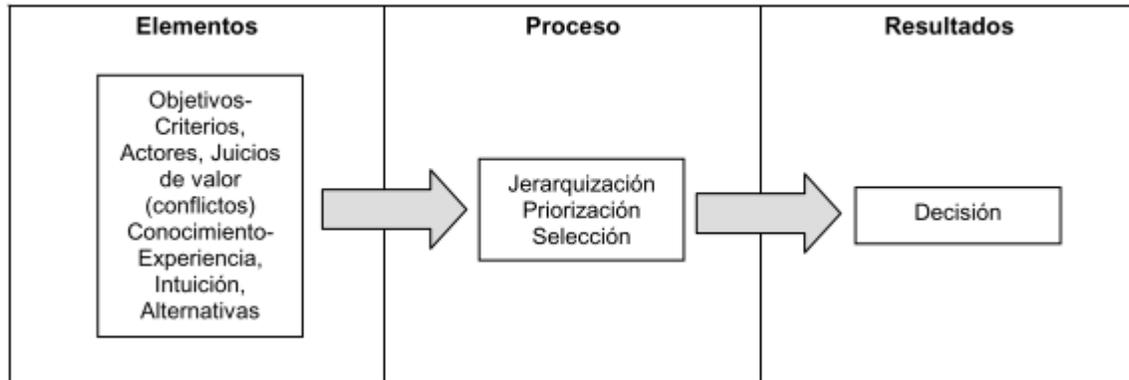
método para la priorización de proyectos sin embargo debe cumplir las propiedades de una escala proporcional para ser válido (Pacheco & Contreras, 2008).

Por otro lado, el proceso analítico jerárquico es un análisis multicriterio que descompone estructuras en diferentes niveles según su jerarquía, en este, se asignan valores numéricos a los parámetros para definir su prioridad. Está basado en tres principios: construcción de jerarquías, establecimiento de prioridades y consistencia lógica. Al igual que el modelo anterior, para tener validez debe cumplir con las propiedades de una escala proporcional (Pacheco & Contreras, 2008).

### 3.9 EVALUACIÓN MULTICRITERIO

La evaluación multicriterio es utilizada como apoyo para los tomadores de decisiones en cuanto en busca de un proceso de selección consistente previamente definido. Como es conocido, el proceso de decisión no se da en tan solo un paso; está compuesto por una serie de procedimientos y elementos que facilitan la comprensión del proceso. En resumen, este proceso busca realizar mediciones que permitan establecer preferencias entre las opciones, estableciendo una jerarquía utilizando varias funciones objetivo simultáneas y un único agente decisor (Pacheco & Contreras, 2008).

Tal y como se puede ver en la Figura 3-7, el proceso de decisión se compone por los elementos, el proceso y los resultados. Los elementos que participan en el proceso de selección están incluidos en el primer grupo, debido a que es probable que varios de estos se definan por diferentes unidades o escalas es necesario transformarlas a una unidad abstracta que sea válida para todas, de esta manera obtener resultados comparables. También se observa que la etapa de proceso está compuesta por la jerarquización que es el orden de prioridad entre las alternativas y la priorización que es cuanto mejor es una alternativa sobre la otra. Finalmente, en los resultados se informa la decisión sobre la selección, jerarquización o priorización de proyectos (Pacheco & Contreras, 2008).



**Figura 3-7 Proceso de decisión**  
**Tomado de Pacheco & Contreras, 2008.**

### 3.9.1 Jerarquías

Este proceso facilita el manejo de los objetivos y la información ya que en las evaluaciones multicriterio se presenta gran variedad de estos. Los sistemas complejos se logran simplificar mediante la jerarquización de los objetivos y temáticas del proyecto en diferentes niveles. El nivel superior, o foco es el problema u objetivo general al que se quiere llegar. Luego, en los siguientes niveles se irán expandiendo los temas relevantes, de más global en el segundo nivel a específico en los niveles inferiores. Luego de esta clasificación, se deberá hacer la comparación entre estos niveles para conocer cuál es la importancia de cada criterio con respecto a las otras y con respecto al total. Lo antes explicado se puede observar en la Figura 3-8, donde luego de la jerarquización de los criterios estos se evalúan para cada alternativa de las disponibles (Pacheco & Contreras, 2008).

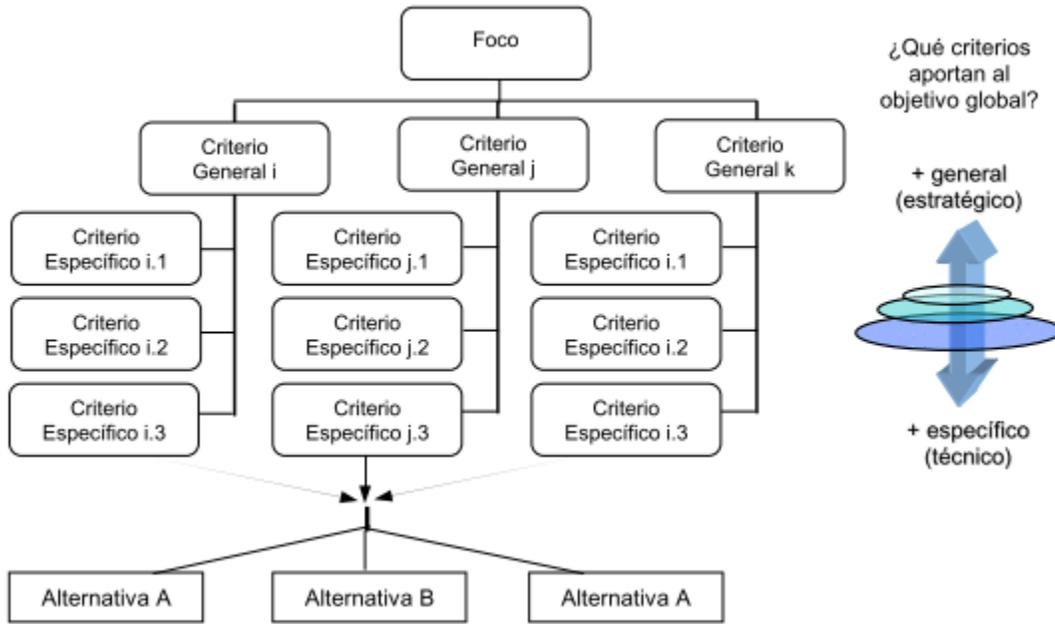


Figura 3-8 Diagrama de Jerarquía del problema  
Tomado de Pacheco & Contreras, 2008.

### 3.9.2 Métodos para evaluaciones multicriterio

#### *Método sencillo de estandarización*

Es un método simple para la evaluación multicriterio, para definir el valor de cada criterio se hace mediante una matriz de comparaciones, se asigna un valor de 1 si es más importante y un cero si no, de esta forma al final se suman los valores de cada criterio y se calcula el porcentaje que este representa con respecto al total para así definir el ponderado final de cada uno de estos. Como se mencionó anteriormente para lograr resultados comparables en este método se deben normalizar los resultados obtenidos o puntajes, para esto se suelen utilizar medidas de tendencia como la media y desviación estándar. Las desventajas principales de este método son que no permite verificar la consistencia entre las elecciones de quienes la definen y tampoco permite hacer una diferenciación entre los grados de importancia entre los criterios, es decir que tan importante es uno con respecto al otro (Pacheco & Contreras, 2008).

#### *Método AHP*

El método AHP soluciona las fallas que tienen el método sencillo, por ejemplo, permite asegurar una consistencia lógica al momento de establecer prioridades y jerarquías. En sí, es

muy similar al método expuesto en la sección 0 pero con cambios importantes al momento de establecer prioridades y asignar puntuaciones (Pacheco & Contreras, 2008). El esquema jerárquico está compuesto por el objetivo o foco, los criterios, los subcriterios y las alternativas, como se mostró en la Figura 3-8.

Primeramente, se debe realizar un filtro según requisitos mínimos que se deben cumplir para que la alternativa sea factible, por ejemplo, que el VAN sea positivo o se cumpla con criterio técnico específico. Ya que los diferentes proyectos tienen diferentes aportes a cada una de las metas, es importante efectuar la jerarquización de criterios. De esta manera se obtendrá la mejor opción de manera que se cumplan las metas y los objetivos de mayor importancia (Pacheco & Contreras, 2008).

El establecimiento de prioridades se ejecuta luego de la división por niveles de manera que se reúne un grupo de tomadores de decisiones y se comparan los elementos de un mismo nivel. Se pregunta a los participantes que en cuanto un elemento es más importante que el otro con el que se compara. Ya que mucho de lo que se dice está siendo analizado en el momento puede existir algún sesgo por opinión o punto de vista, pero en general se debería respetar la consistencia. Al momento de comparar por pares es importante tener alguna guía para evaluar de manera consistente, en muchos de los casos, se utiliza la escala de Saaty (Cuadro 3-3) para ejecutar este ejercicio (Pacheco & Contreras, 2008). En dicha escala, se explica el valor numérico correspondiente dependiendo de la importancia relativa de un criterio sobre otro y permite a los participantes definir los valores numéricos directamente. Es importante que en el caso de que haya más de un experto involucrado se llegue a un consenso entre las partes, en caso contrario se deberá aplicar la media geométrica para integrar las opiniones de estos.

**Cuadro 3-3 Escala de Saaty**  
**Adaptado de Pacheco & Contreras, 2008.**

<b>Intensidad</b>	<b>Definición</b>	<b>Explicación</b>
1	De igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra
7	Muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica
9	Extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta y totalmente clara.
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes
Recíprocos	$a_{ij}=1/a_{ji}$	Hipótesis del método

El método AHP mantiene el principio de consistencia, en sus dos componentes, transitividad y proporcionalidad. La primera es que se debe respetar el orden entre los elementos, es decir que, si el elemento A es mayor que B y B es mayor que C, entonces A debe ser mayor que C. La segunda quiere decir que se respeten las proporciones en las que cada uno de ellos es más grande o importante que la otra, usando el mismo ejemplo, si A es el doble de B y B es el triple de C entonces A debería ser seis veces mayor que C. Esto se calcula mediante la proporción de consistencia.

En síntesis, según Pacheco & Contreras (2008) proceso del Método AHP es:

- a) Definición del problema
- b) Definición de los actores
- c) Jerarquizar
- d) Identificación de alternativas factibles
- e) Construcción del modelo jerárquico
- f) Ingreso de juicios
- g) Síntesis de resultados, ranking de prioridades
- h) Validación de la decisión

## 4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 LUGAR DE ESTUDIO

El cantón de La Unión está ubicado en el extremo oeste de la provincia de Cartago, en el valle central. Al norte se ubica la Cordillera Volcánica Central, al sur los Cerros de La Carpintera y al este el cerro Ochomogo, debido a esto, presenta una topografía muy variada, desde terrenos planos hasta terrenos de muy fuerte pendiente (Municipalidad de La Unión, 2018).

Este cantón es el tercero de la tercera provincia de Costa Rica, está formado por ocho distritos los cuales son Tres Ríos, San Diego, San Juan, San Rafael, Concepción, Dulce Nombre, San Ramón y Río Azul, siendo cabecera el primero.

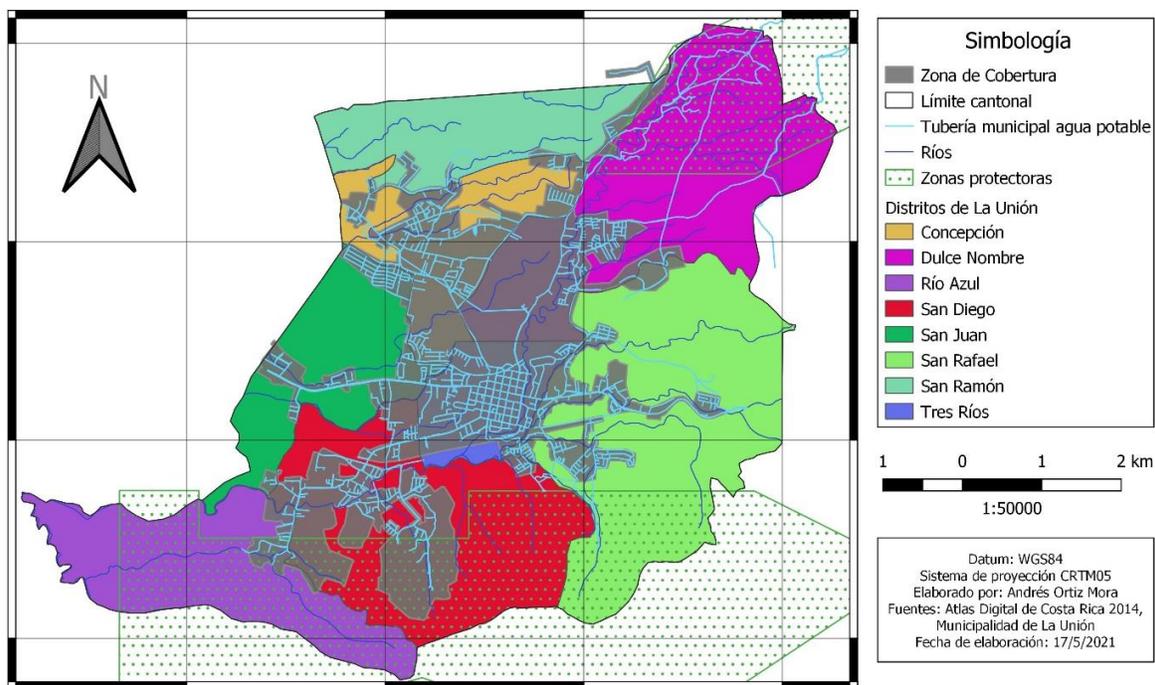
Con respecto a la red hídrica superficial, la totalidad del cantón se ubica en la cuenca del río Grande de Tárcoles. Los cauces de mayor importancia en el cantón son los ríos Tiribí, María Aguilar, Chiquito y Damas (Municipalidad de La Unión, 2018).

Las áreas silvestres protegidas son de suma importancia para la preservación del recurso hídrico y biodiversidad. En el cantón se ubican las zonas protectoras Tiribí y Cerros de La Carpintera, la primera al norte y la segunda al sur (Municipalidad de La Unión, 2018). En la actualidad ambas poseen plan de manejo vigente (Municipalidad de La Unión, 2018; SINAC, 2016).

En cuanto a la cobertura de agua potable, la mayoría del cantón se divide entre la municipalidad y el AyA con pequeñas áreas cubiertas por ASADAs. Específicamente para la municipalidad, la mayor zona de cobertura está comprendida por las zonas habitadas de Dulce Nombre, Concepción, San Rafael, Tres Ríos, pequeños sectores al sur de San Ramón y al este de Río Azul, finalmente un importante porcentaje de San Diego y la zona este y cercana a calle vieja en San Juan (Municipalidad de La Unión, 2018). Para 2021 según datos proporcionados por la Dirección de Recurso Hídrico la municipalidad cuenta con 17.858 servicios brindados.

El presente Plan maestro para la gestión de las aguas residuales del cantón de La Unión comprende toda el área de cobertura del acueducto municipal en los ocho distritos. En la Figura 4-1 se observa el detalle de cobertura del proyecto y su distribución en el cantón. Para la definición de esta, se solicitaron bases de datos geográficas públicas la municipalidad de

La Unión y otras instituciones. El área de cobertura de agua potable municipal se utilizó para definir el área a trabajar, tal y como se observa en la Figura 4-1.



**Figura 4-1 Mapa de Cobertura del Plan Maestro para la Gestión de las Aguas Residuales.**  
Adaptado de Atlas digital de Costa Rica (2014) y Municipalidad de La Unión.

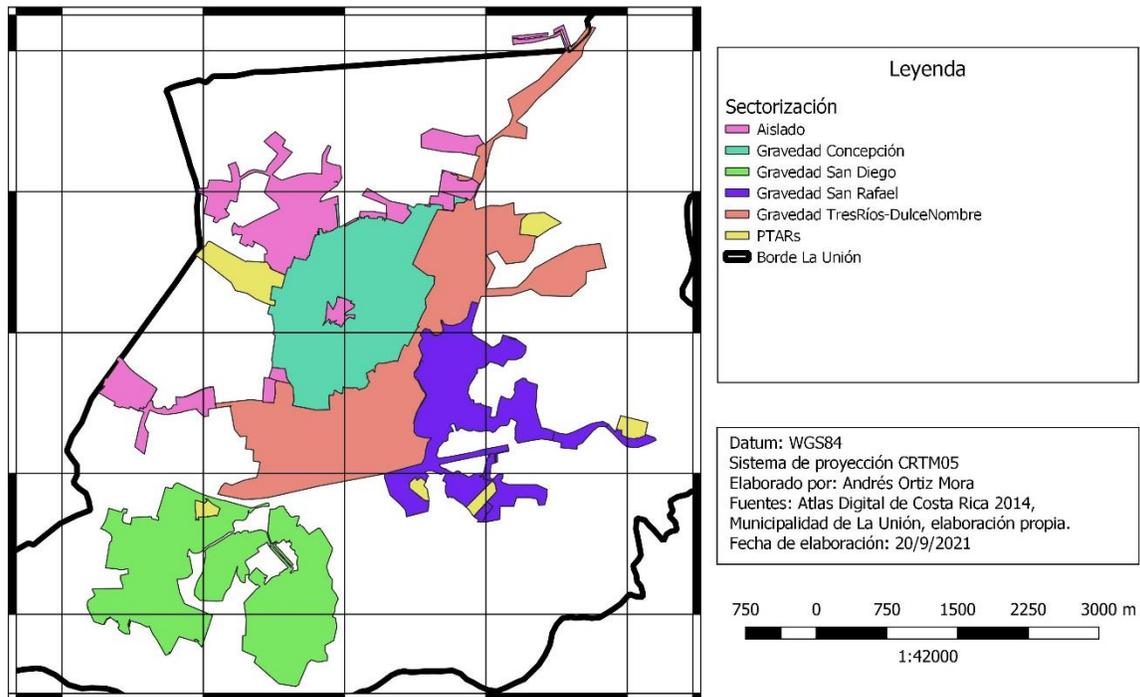
## 4.2 PLANTEAMIENTO DE OPCIONES DE SANEAMIENTO

Para la identificación de las opciones de saneamiento factibles se realizó un análisis de zonas, la selección y prefactibilidad de tecnologías según las características de estas, descritas en la sección 3.5 y la selección de indicadores para su posterior análisis. A continuación, se describe en detalle el método para esta selección.

### 4.2.1 División del área por sectores

Utilizando los datos topográficos de la municipalidad y otros datos físicos y de terreno disponibles se seleccionó el área que debe contemplarse para el estudio y posteriormente se realizó una sectorización en todo el territorio para aplicarle la herramienta establecida con los datos recabados y proponer la división y sistema de tratamiento que mejor se adapta a la

situación de esa zona. Se realizó un análisis de las pendientes del terreno y se analizó el terreno con base en las microcuencas existentes y accidentes topográficos como montañas. Para abordar la selección del mejor sistema de tratamiento para la zona de cobertura de la manera más específica posible, se dividió la totalidad del área en diferentes sectores. Estos fueron divididos y nombrados de acuerdo con sus características y facilidades para la implementación de un sistema centralizado sin utilizar sistemas de bombeo. Los 6 sectores que se definieron son nombrados como: Aislados, PTARs Locales, Gravedad San Diego, Gravedad San Rafael, Gravedad Dulce Nombre Tres Ríos y Gravedad Concepción, se pueden observar en la Figura 4-2.



**Figura 4-2 Mapa de sectores para el área de estudio**

Los sectores con “Gravedad” en su nombre deben esto a que las condiciones del terreno y caminos facilitarían el transporte de las aguas residuales por gravedad hasta un punto donde se une a otros sectores o se propone una planta de tratamiento, en este caso, los sectores convergen a la microcuenca del río Tiribí. En el caso particular de los “Aislados” se encuentran en una depresión o por cuestiones de nivel de suelo es imposible conectarse a la red manejada por gravedad, la alternativa manejada en estos casos es el transporte de estas

aguas por la rivera de algún cauce hasta ubicar topográficamente, la conexión con la red principal. Los barrios, urbanizaciones o condominios que ya poseen una planta de tratamiento municipal fueron catalogados como “PTARS Locales”.

El proceso para definir estos sectores fue el siguiente:

- a) Con datos brindados por la municipalidad, se delimitaron las zonas de cobertura de las plantas de tratamiento actuales, para esto se utilizaron los mapas de tuberías y cobertura facilitados.
- b) A estas zonas se le añade la zona cercana que podría ser tratada de la misma forma, aumentando la capacidad u optimizando las plantas de tratamiento. Según las curvas de nivel y ubicación. Debido a que muchas de las plantas están a su capacidad máxima esto solo se aplicó donde fue necesario y manteniendo un área pequeña.
- c) El área del proyecto que no se encontraba en la cobertura de las PTAR municipales se dividió con base en las curvas de nivel de 2 o 10 m. Con la finalidad de utilizar transporte por gravedad donde fuera posible, definiéndose así zonas que tendrán el mismo sistema de tratamiento. A estas áreas se les asignó un nombre y fueron definidas como subsectores.
- d) A esas grandes áreas se les hizo una inspección y visita de campo para confirmar la agrupación y que no haya obstáculos geográficos que impidan el mismo tratamiento para ese subsector.
- e) Se generó una lista de 20 subsectores para el posterior análisis de alternativas para el tratamiento de las aguas residuales, estos subsectores se pueden observar en la Figura 4-3.

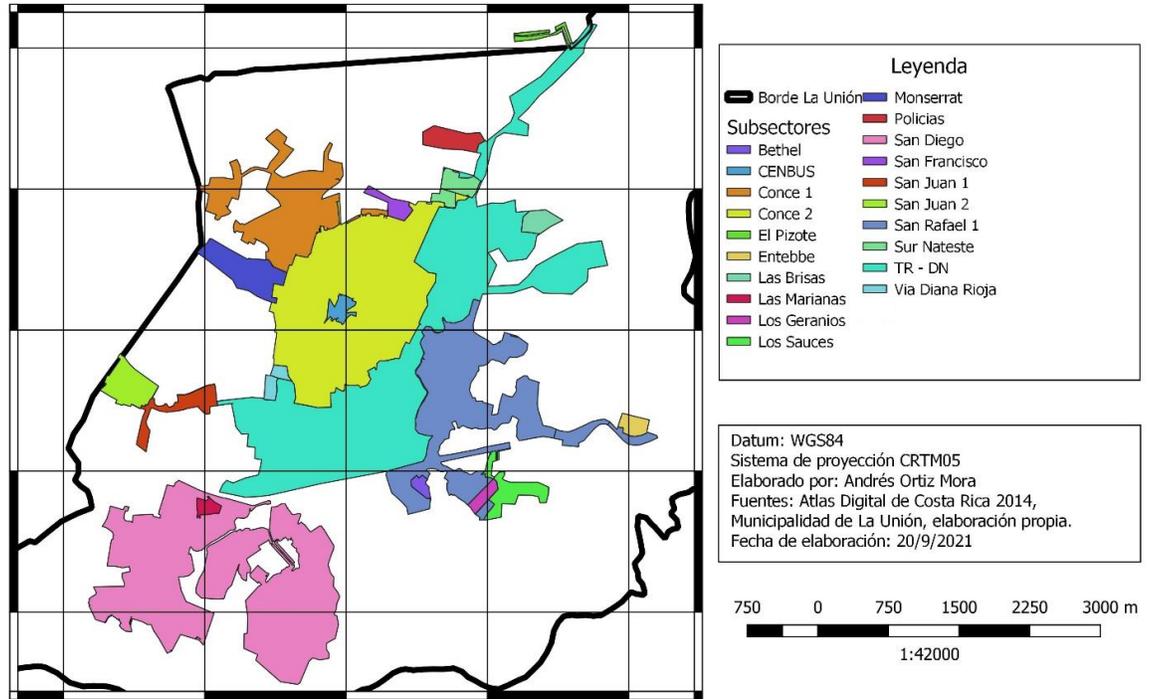


Figura 4-3 Mapa de subsectores para el área de estudio

#### 4.2.2 Preselección de opciones

Se realizó una revisión bibliográfica de distintas fuentes con el fin de conocer las opciones existentes para el tratamiento de aguas residuales ordinarias y preseleccionar opciones aplicables en el cantón de La Unión. Adicionalmente en coordinación con funcionarios de la Dirección de Recurso Hídrico de la Municipalidad de la Unión, se definieron parámetros mínimos a cumplir por parte de los sistemas para ser evaluados. Se definieron como requisitos mínimos para su aplicación en el cantón los siguientes:

- No requerir grandes extensiones de terreno para su implementación, debido al alto valor del suelo y la alta densidad poblacional, lo cual limitaría la posible compra. Debido a esto, tecnologías de lagunas y similares se descartan del planteamiento de opciones.
- Para la valoración de optimización de sistemas individuales, al menos el 90% de las propiedades deben contar con el espacio requerido para su adecuada implementación. Para el caso de los sistemas individuales, las propiedades deben tener un área mínima disponible, en caso de no cumplir con los requisitos mínimos ese sistema se descartó.

### **4.2.3 Definición de trenes**

Para la definición de los trenes de tratamiento a utilizar se tomaron en cuenta las tecnologías que entre la comunidad y funcionarios de la municipalidad están institucionalizadas. Por tanto, y considerando los resultados de la encuesta de hogares realizada por Rodríguez (2016) que se decide utilizar trenes con tanque séptico a nivel individual y lodos activados en sistemas semicentralizados. El 90% (Rodríguez, 2016) de los hogares utilizan alguna de estas dos opciones de tratamiento, ya que en los hogares se maneja el tanque séptico mientras en las plantas de tratamiento municipales el sistema es de lodos activados. Adicional a esto, se analizó una gran cantidad y variedad de sistemas de tratamiento comúnmente utilizados y que cumplieran con las características establecidas. De estos sistemas que cumplieron los requisitos previos, se ha comprobado en la práctica y según la literatura que se obtienen ventajas al utilizar sistemas de transporte libres de sólidos en algunos casos, sistemas de RAFA y lodos activados. Es por esto que se decide analizar distintas iteraciones de los sistemas ya establecidos y otros no utilizados a nivel local para evaluar su viabilidad en el cantón. Los trenes de tratamiento, incluyendo el sistema de transporte, fueron los siguientes:

- a) Tanque séptico, campo de infiltración
- b) Tanque séptico, FAFA, campo de infiltración
- c) Tanque séptico, alcantarillado libre de sólidos, RAFA, lodos activados
- d) Alcantarillado convencional, lodos activados
- e) Alcantarillado convencional, RAFA, lodos activados (planta semicentralizada)
- f) Alcantarillado convencional, RAFA, lodos activados (planta centralizada)

### **4.2.4 Dimensionamiento de opciones**

Se realizó un pre-dimensionamiento de las tecnologías preseleccionadas, con datos de entrada de investigaciones previas o mediante el cálculo específico, con las ecuaciones presentadas en la literatura, los métodos para cada opción se resumen en el Cuadro 4-1. Para las opciones individuales se manejó un mismo diseño para todas las zonas mientras que para las semicentralizadas y centralizadas se realizó un dimensionamiento para cada subzona. Con el fin de tener datos comparables, se utiliza el mismo valor inicial de contaminantes en todos los sistemas. Para el agua residual de la comunidad de Montserrat, en Concepción de La Unión se obtuvieron valores de 216 mg/L de DBO y de 132 mg/L de SST (Ortiz, 2017), al ser datos locales, se decide utilizarlos para todo el cantón.

**Cuadro 4-1 Referencias de dimensionamiento para sistemas de tratamiento**

<b>Etapas</b>	<b>Referencia</b>
Tanque séptico	(Hegg, 2018)
FAFA	(Hegg, 2018)
Infiltración	(Rosales Escalante, 2008)
RAFA	(Sperling & Chernicharo, 2005)
Lodos Activados	(Ortiz, 2017; Tchobanoglous, 2014)

### *Sistemas de manejo de aguas residuales individuales*

En sistemas de tratamiento individuales se manejaron dos opciones, las cuales comparten características o etapas y fueron mencionadas en la sección 4.2.2. En el Cuadro 4-1 se muestran las referencias utilizadas para el dimensionamiento o dato tomado para cada etapa. Únicamente se trabajó con estas tres operaciones unitarias ya que son las que se utilizaron en los trenes o sistemas de tratamiento preseleccionados para su evaluación. Para el tanque séptico y el filtro anaerobio de flujo ascendente se utilizó el dimensionamiento mejorado hecho por Hegg (2018) en su investigación. Para el campo de infiltración se realizó un dimensionamiento general para el cantón con una velocidad de infiltración crítica de  $2,0 \times 10^{-6}$  m/s y un caudal promedio de 14,17 m<sup>3</sup>/mes; estos datos fueron brindados por personeros de la Dirección de Recurso Hídrico de la municipalidad de La Unión. Estos datos fueron utilizados según los procedimientos para el dimensionamiento de Rosales, 2008. En el

Cuadro 4-2 se observa el dimensionamiento y calidades de salida de las etapas para los sistemas individuales.

**Cuadro 4-2 Características de los sistemas individuales.**

<b>Etapas</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Área requerida (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Calidad de salida</b>
Tanque séptico	5,4x10 <sup>-6</sup>	2,205	DBO: 127,44 mg/L SST: 34 mg/L
Tanque séptico y FAFA	5,4x10 <sup>-6</sup>	2,745	DBO: 90,72 mg/L SST: 17 mg/L
Infiltración	5,4x10 <sup>-6</sup>	1,517	N/A

### *Sistemas de manejo de aguas residuales semicentralizados y centralizados*

#### Alcantarillado

Al igual que para las etapas de tratamiento, en el alcantarillado se realizó un dimensionamiento previo general, con base en la división realizada en la sección 4.2.1. Utilizando el programa QGIS Desktop 3.2.3 se trazaron las líneas colectoras principales con base en las curvas de nivel y la red de vías cantonales y adicionales. Con las curvas de nivel cada 2 metros se localizó y marcó el punto más bajo de cada subsector. Posteriormente a estas se les agregó la altura correspondiente a la rasante y un número de identificación para cada una; estos datos fueron organizados de manera que se obtuvieron las siguientes opciones:

- a) Alcantarillado hacia planta local
- b) Alcantarillado a planta cantonal.

Para la alternativa a, se buscó que las tuberías llegaran al punto más bajo de cada subsector por gravedad, ya sea por vías públicas o por la zona de protección del algún río, si no había posibilidad a gravedad por calle. En cambio, para la alternativa b, se logró que todas estas aguas continuaran por gravedad hasta llegar al punto más bajo de la zona de cobertura, donde se tratarán. En este mismo caso, además de la red ya diseñada, se añadieron tuberías de conexión con el fin de unir los distintos subsectores a una única línea. Debido a las limitaciones geográficas del caso, algunos sectores no fueron posibles de conectar de la forma antes mencionadas ya que eso representaría líneas de conducción extensas que se saldrían de

los límites cantonales; tal fue el caso de un sector de concepción y San Juan. Para esas excepciones, el alcantarillado fue idéntico en los dos casos. Cabe destacar que, en caso de que el subsector tuviese planta de tratamiento, se utilizó la red de alcantarillado existente que fue facilitada por parte de la municipalidad de La Unión.

Se calcularon las longitudes, pendiente y área de cobertura de los alcantarillados, de esta forma, y con datos municipales, se calcularon los caudales para cada tramo de tubería. Desde el inicio se supone que el material a utilizar será el PVC, por lo que se utiliza un  $n$  de 0,1 (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2017). Para las pendientes se tomó en cuenta las altitudes existentes a nivel de calle, y en caso de que se tuviera pendiente no favorable en algún tramo se adoptó 0.5% de pendiente; esto únicamente en casos donde no se tuviera una diferencia de alturas mayores a 5 metros. Se utilizó la fórmula de Chezy-Manning para calcular los valores de diámetro requerido en cada tramo y se asignó el valor nominal correspondiente del Listado de precios de Amanco (Mexichem Costa Rica, 2017). Como complemento, se calculó el caudal final de cada una de las líneas de conducción para su posterior uso.

#### Sistemas de tratamiento

Se diseñó de manera general cada una de las alternativas, teniendo en cuenta caudales, calidades del influente y efluente y todos los parámetros relevantes con el fin de determinar el área superficial necesaria para su construcción. Este diseño, solo contempló las principales operaciones unitarias de los sistemas de tratamiento, se excluyó el área verde, distancia a los límites de la propiedad, zona administrativa y de laboratorio, etc.

Los sistemas de tratamiento semicentralizados y centralizados fueron diseñados utilizando la misma calidad de afluente determinado por Ortiz (2017) para una comunidad de La Unión. Con base a esto se definió una calidad de efluente alcanzable para cada operación unitaria y se procedió al diseño de los sistemas para llegar a esa calidad previamente definida. En el Cuadro 4-1 se mencionan las referencias para el dimensionamiento de todas las operaciones unitarias a utilizarse.

Para el sistema sin transporte de sólidos se utilizó también el tanque séptico prediseñado utilizado por Hegg, este es seguido por un reactor anaerobio de flujo ascendente diseñado para cada subsector basándose en el procedimiento de de Lemos y con los caudales y

calidades calculadas previamente. Se determinó la calidad del agua en cada una de las etapas, en el

Cuadro 4-2 se puede observar la calidad de salida del tanque séptico, esta fue utilizada como la del afluente del RAFA; el afluente de este fue a su vez utilizado para el cálculo del sistema de lodos activados y determinar las dimensiones del sistema y de los lechos de secado de lodos. El sistema de lodos activados se diseñó con base al procedimiento de Tchobanoglous y las recomendaciones para el diseño brindadas por Ortiz (2017) para la comunidad de Montserrat en Concepción de La Unión.

#### Tanque Séptico con Planta de tratamiento semicentralizada con RAFA y Lodos activados

En términos específicos, para el RAFA, se definió un tiempo de residencia hidráulico de 9 horas, velocidad ascendente de 0,5 m/h, temperatura ambiente de 25°C y un porcentaje de metano de un 75%. En el caso del sistema de lodos activados se utilizó un tiempo de residencia hidráulico de 6 horas y las recomendaciones de Ortiz (2017) relativo a las características operativas de este sistema. Se calcularon los requerimientos dimensionales para cada una de las 20 plantas recomendadas para un sistema semicentralizado; tanto del tratamiento de las aguas como para el tratamiento de los lodos.

#### Planta de tratamiento semicentralizada con Lodos Activados

Para esta alternativa únicamente fue necesario el dimensionamiento de los sistemas de lodos activados ya que el tren de tratamiento consiste únicamente de esta etapa (adicionado al pretratamiento). Utilizando las calidades de afluente mencionadas en la sección 4.2.4 se diseñó el sistema, utilizando un tiempo de residencia hidráulico de 6 horas, tiempo de secado de lodos de 50 días, tiempo de remoción de lodos de 5 días y las recomendaciones de Ortiz (2017) para la PTAR de Montserrat.

#### Planta de tratamiento semicentralizada con RAFA y Lodos activados

Los cálculos y el dimensionamiento se realizaron usando como base un tren de tratamiento formado básicamente por un RAFA y lodos activados. Para el RAFA se utilizaron las

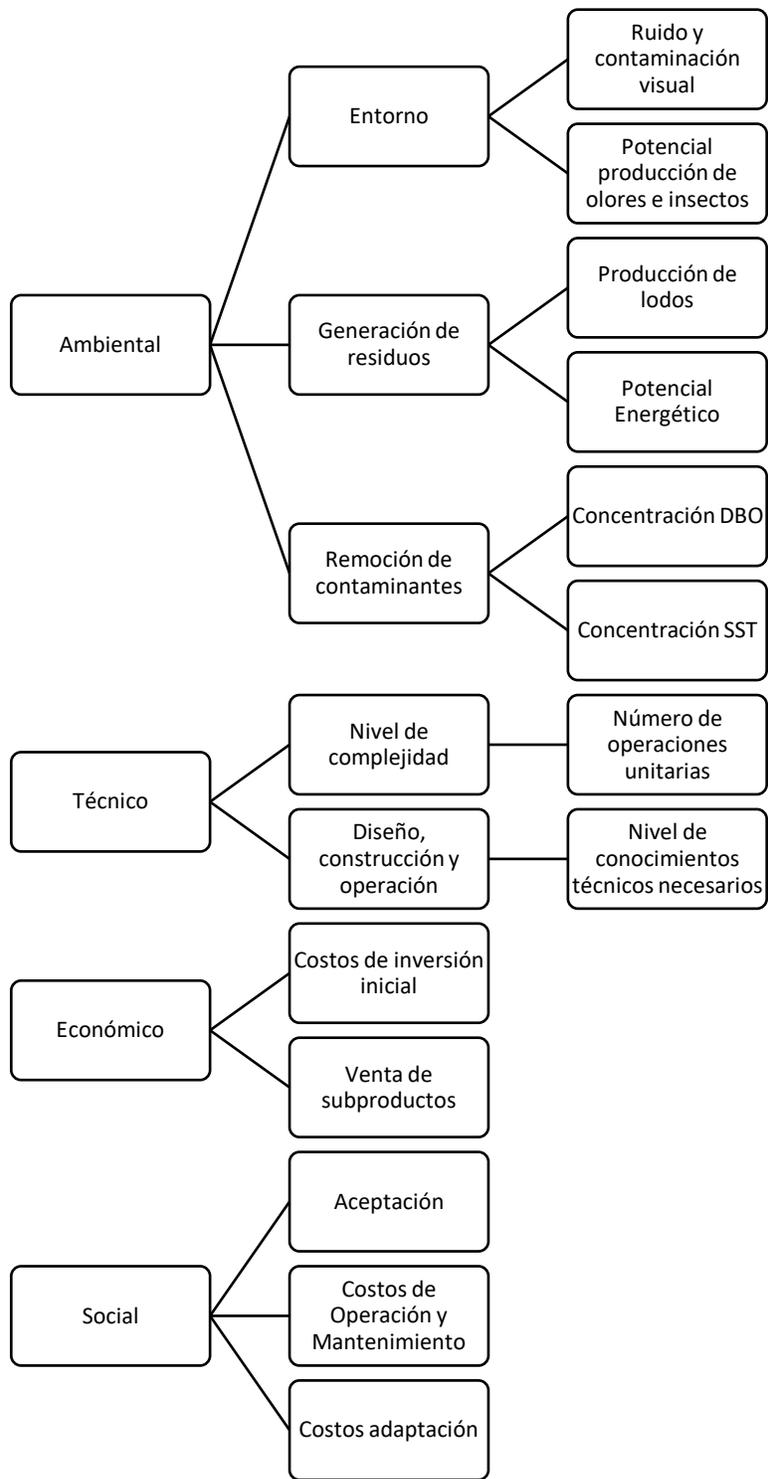
calidades de agua residual inicial, un tiempo de residencia hidráulico de 9 horas, una velocidad ascendente de 0,5 m/h, temperatura de 25°C y un porcentaje de metano del 75%. Por otra parte, las calidades finales del RAFA fueron utilizadas como iniciales de los lodos activados y se calculó bajo estas condiciones los requerimientos para este último. Los lodos activados se dimensionaron con un tiempo de residencia hidráulico de 6 horas, un tiempo de secado de 50 días y tiempo de remoción de lodos de 5 días; mientras que a los lechos de secado se les asignó una altura máxima de 0,3 m.

#### Planta de tratamiento centralizada con RAFA y Lodos activados

El dimensionamiento se realizó de la misma manera y con los mismos parámetros que el de la planta semicentralizada con RAFA y lodos activados; el cambio que se implementó fue con respecto a el caudal y la organización de subsectores. En el caso de que se repitan datos, esto se debe a que forman parte de la misma PTAR, sin embargo, es relevante mostrar el dimensionamiento de la planta que servirá a cada uno de estos subsectores.

### 4.3 IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE INDICADORES DE OPCIONES

Se analizaron diversos estudios en los que se hace uso de indicadores y análisis multicriterio en procesos de selección de tecnologías de saneamiento, con el fin de identificar los aplicables para la investigación y plantear un modelo de selección que permita definir el mejor sistema de tratamiento para cada zona. Se presentó una propuesta de los parámetros jerarquizados en tres niveles a la Dirección de Recurso Hídrico de la Municipalidad de la Unión y de acuerdo con la retroalimentación se definieron los criterios ambiental, técnico, económico y social y los indicadores asociados que se presentan en la Figura 4-4.



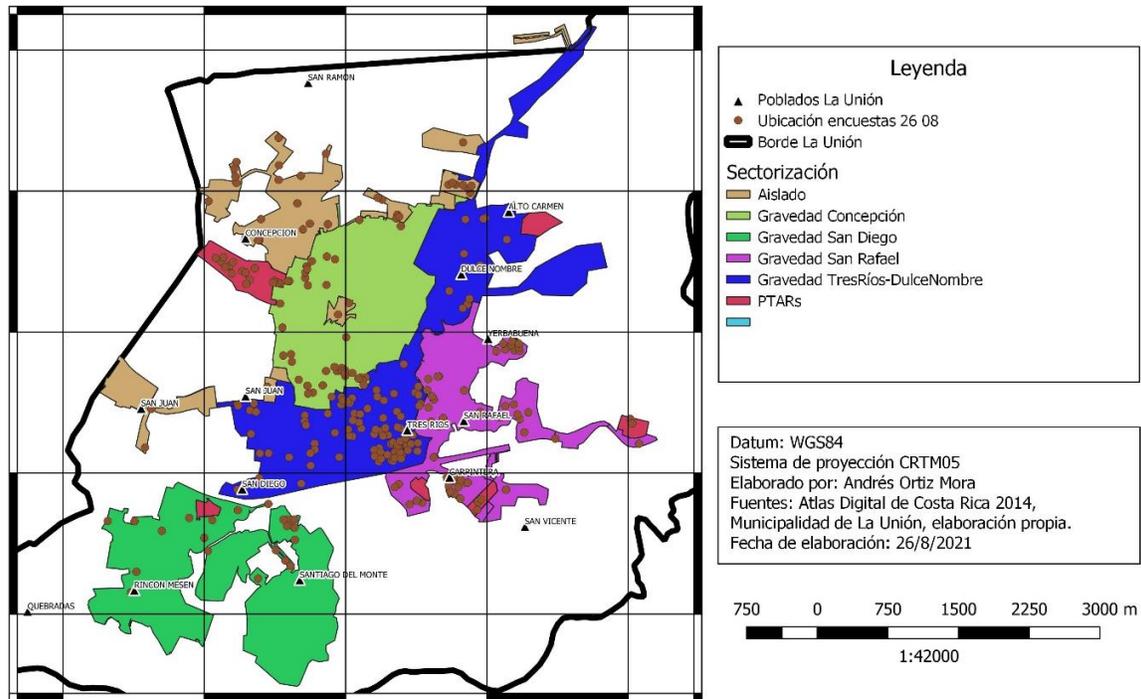
**Figura 4-4 Jerarquización de los criterios y subcriterios a evaluar**

### 4.3.1 Levantamiento de información local

Con base en los criterios e indicadores a analizar que fueron identificados previamente, (Figura 4-4) se procedió a la elaboración de dos encuestas para la recolección de los datos necesarios para la evaluación de los indicadores que dependen de las características de los sistemas de tratamiento actuales y otros relacionados a la opinión de la población. Se incluyó una sección sobre priorización de alternativas que incluyó dos indicadores del criterio ambiental, ruido y contaminación visual y potencial producción de olores e insectos además de la aceptación, costos de operación y costos de adaptación del criterio social. Con respecto a recolección de datos se realizaron consultas que fueron útiles para la evaluación de los indicadores de costos de inversión inicial, aceptación y costos de adaptación. Los formularios se pueden consultar en el **Error! Reference source not found.** y **Error! Reference source not found.** del presente documento.

#### *Encuesta aguas residuales, población de La Unión*

Debido a los aislamientos por la situación sanitaria por la pandemia por COVID-19, se elaboró una encuesta a la población del cantón mediante un formulario virtual estructurado con respuestas semi abiertas sobre las características del sistema de tratamiento individual que poseen en su casa y sobre su preferencia sobre temas de aguas residuales. Con esta descripción se cumple que la encuesta pertenece al muestreo no probabilístico de bola de nieve, ya que unos encuestados conducirán a otros y así de forma continua (Torres, Paz, & Salazar, 2006). La encuesta estuvo disponible del 7 de marzo de 2021 hasta el 29 de agosto del 2021. En la Figura 4-5 se puede observar que la distribución de personas encuestadas se dio por toda el área de estudio.



**Figura 4-5 Ubicación de las personas encuestadas.**

Luego del periodo de 5 meses disponible al público, esta información fue tabulada y relacionada a su ubicación aproximada para así conocer por sector las características recopiladas y utilizarlas como parte de la matriz de selección. Posteriormente se realizó un recuento de la cantidad de respuestas según zona y la información fue dividida por sectores utilizando el programa Microsoft Excel. De las 491 respuestas recibidas tan solo 268 correspondieron al área de estudio. Se recibieron 35 respuestas de la zona Aislados, 39 de Gravedad Concepción, 22 de Gravedad San Diego, 50 de Gravedad San Rafael, 101 de Gravedad Tres Ríos – Dulce Nombre y 21 de la zona de PTARs. Se generó, con el catastro municipal un conteo de las propiedades que se ubican en cada una de las zonas, esta cantidad de propiedades (excluyendo de uso público, calles y ríos) se utilizaron para el cálculo del tamaño de la muestra para la encuesta. Para el cálculo del tamaño de la muestra de cada uno

$$e_n = \frac{N \times Z_a^2 \times p \times q}{d^2 \times (N - 1) + Z_a^2 \times p \times q} \quad \text{Ecuación 1}$$

en donde,

N = tamaño de la población

Z<sub>a</sub> = nivel de confianza

p = probabilidad de éxito, o proporción esperada

q = probabilidad de fracaso

d = precisión (Error máximo admisible en términos de proporción)

En el Cuadro 4-3 se especifican los niveles de confianza obtenidos como parte de las encuestas para cada sector, estos datos indican que se recibieron muchas menos respuestas de las recomendadas para trabajar con datos muy confiables.

**Cuadro 4-3 Niveles de confianza para las encuestas realizadas.**

<b>Sector</b>	<b>Seguridad</b>
Aislados	<50%
PTARS Locales	<50%
Gravedad San Diego	<50%
Gravedad San Rafael	50%
Gravedad Dulce Nombre	70%
Tres Ríos	
Gravedad Concepción	50%
Total	90%

#### Recolección de datos cualitativos

Además de los datos generales sobre ubicación, con la encuesta se buscó la obtención de perspectiva de la población en temas relacionados al proyecto y las posibles tecnologías a implementar. Incluso se solicitó información que se utilizó para la ponderación de indicadores. Parte de la información solicitada fue la ubicación de la salida de las aguas residuales, si se mantienen mezcladas o separadas las aguas grises y de sanitarios, características constructivas del sistema de tratamiento actual, la consulta sobre cual sistema de tratamiento le gustaría utilizar, la importancia que se le da a distintos indicadores.

Estos datos se utilizaron para definir cumplimiento con características mínimas o porcentajes de cumplimiento, sin embargo, otros datos se centraron en el análisis de prioridades para establecer la ponderación para los indicadores relacionados con ruido y contaminación visual

y olores e insectos, también entre aceptación de la comunidad, tarifa de servicio y costos de adaptación.

#### *Recolección de datos cuantitativos*

En cuanto a datos cuantitativos, la encuesta se enfocó en buscar información para la caracterización de los sistemas de tratamiento actuales y para comprobar si se cumple con el mínimo de espacio disponible. De esta manera con las mediciones de los sistemas actuales se comprobó el porcentaje que está bien construido para estimar costos de construcción y adaptación.

#### *Encuesta aguas residuales valoración de espacio disponible*

Considerando la cantidad de respuestas levantadas en la primera encuesta (sección 0), en conjunto con la Dirección de Recurso Hídrico de la Municipalidad de la Unión, se decidió adaptar dicha encuesta, con el fin de que colaboradores municipales visitaran algunas casas de manera aleatoria y recolectaran información adicional para obtener un resultado más confiable con respecto a el área disponible por hogar. Por lo tanto, esta segunda encuesta solo busca determinar las dimensiones del área disponible en cada lote encuestado. Se levantaron 59 encuestas.

Los datos que se recolectaron en esta encuesta contribuyeron a definir el porcentaje de casas que tienen suficiente área disponible como para implementar distintas alternativas en su terreno. Básicamente medidas de zonas verdes frente, al costado y detrás de la construcción principal.

### **4.3.2 Indicadores criterio ambiental**

#### *Ruido y contaminación visual*

Para la determinación del ruido y la contaminación visual se consultó la literatura existente sobre los sistemas de tratamiento. Según lo descrito, principalmente por Tilley (2018) se procedió a evaluar cada una de las opciones de tratamiento según los criterios arbitrarios

planteados en el Cuadro 4-4 con el fin de asignar un correlativo numérico a las características cualitativas de cada sistema.

**Cuadro 4-4 Análisis de indicadores para el subparámetro "Ruido y Contaminación Visual"**

<b>Indicador cualitativo</b>	<b>Correlativo Numérico</b>	<b>Parámetros</b>
Bajo	10	No generan ruidos en su operación habitual. Consiste en estructuras únicamente enterradas
Medio	5	Genera ruido en algunos momentos de su operación. Tiene estructuras de más de 30 cm de altura por sobre el suelo
Alto	1	Generan ruido en todo momento durante su operación, Tiene estructuras de más de un piso de altura por sobre el suelo

***Potencial producción de olores e insectos***

Se evaluó la potencial producción de olores e insectos por parte de la operación habitual de las alternativas. Según lo indicado por la literatura se asignó a cada tren de tratamiento un correlativo numérico dependiendo de los parámetros definidos en el Cuadro 4-5. Esta evaluación se realizó una única vez para cada alternativa.

**Cuadro 4-5 Análisis de indicadores para el subparámetro "Potencial producción de olores e insectos"**

<b>Indicador cualitativo</b>	<b>Correlativo Numérico</b>	<b>Parámetros</b>
Bajo	10	No genera olores ni insectos en su operación habitual
Medio	5	Genera olores en algún momento, hora o existe una probabilidad alta de que se generen olores fácilmente. Alguna de sus etapas contiene agua a bajas velocidades a cielo abierto
Alto	1	Genera olores en todo momento. Para alguna de sus etapas está comprobado que habrá presencia de insectos

### ***Producción de lodos***

Se realizó una aproximación de producción de lodos para las distintas alternativas seleccionadas. Se utilizaron datos oficiales del Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2017) para los sistemas individualizados y para las otras opciones se procedió al cálculo de producción según el libro *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions* (Sperling & Chernicharo, 2005) y el “Diagnóstico y propuesta de mejoras de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Municipalidad de La Unión, en la comunidad de Montserrat en Concepción, Cartago” (Ortiz, 2017). Posteriormente, se buscó la estabilización de los resultados, esto se realizó mediante la interpolación lineal mostrada en la  $P_L = 10 - \left(\frac{L_T}{L_{MAX}} * 10\right)$  Ecuación 2. De esa manera, se obtuvo como puntuación un valor entre 1 y 10 para todos los sistemas.

$$P_L = 10 - \left(\frac{L_T}{L_{MAX}} * 10\right) \text{ Ecuación 2 Cálculo de la puntuación por tren de tratamiento para la producción de lodos.}$$

Donde:

$P_L$  es la puntuación obtenida por la tecnología T para el subparámetro de producción de lodos.

$L_T$  es la producción de lodos de la tecnología T ( $L/m^3AR$ )

$L_{MAX}$  es la producción de lodos de la alternativa que genera la mayor cantidad de estos.

### ***Potencial energético***

Se definió que el proyecto debía buscar reducir gastos operativos y aprovechamiento de los residuos de esta, con esto en mente se realizó una aproximación del potencial metano a producir en las distintas alternativas analizadas. Se calculó la cantidad de metano producido por día según el procedimiento de Sperling (2005). Luego, con los metros cúbicos tratados en ese mismo periodo se calculó la cantidad de metano aprovechable por metro cubico tratado y fue utilizado como indicador para puntuar el potencial energético de cada tren de tratamiento. En la  $P_E = \left(\frac{E_T}{E_{MAX}} * 10\right)$  Ecuación 3 se especifica la ecuación utilizada interpolar de manera lineal los resultados obtenidos, y, de tal manera mantener las proporciones entre estos.

$$P_E = \left( \frac{E_T}{E_{MAX}} * 10 \right) \text{ Ecuación 3 Cálculo de la puntuación por tren de tratamiento para el potencial energético.}$$

Donde:

$P_E$  es la puntuación obtenida por la tecnología T para el subparámetro de potencial energético.

$E_T$  es la producción de metano de la tecnología T ( $m^3CH_4 / m^3AR$ )

$E_{MAX}$  es la producción de metano de la alternativa que genera la mayor cantidad de este.

### **Remoción de contaminantes DBO y SST**

Ambos parámetros tienen un carácter obligatorio para el monitoreo de la calidad del agua vertida a un cuerpo receptor según el “Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales” (Ministerio de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía, 2007). Debido a esto, se tomaron como parámetros para determinar la calidad del agua de salida de la alternativa. Para cada operación unitaria se calcularon al inicio y final los parámetros y se asignó una calificación buscando el efluente con menos DBO y SST. Según los resultados obtenidos de los cálculos, y detallados en la sección 4.2.4 se cuantificó la posible calidad de efluente de las distintas opciones, estas, se interpolaron a un valor equivalente y proporcional entre 1 y 10, buscando la estandarización de los resultados, de manera que un valor alto de DBO o SST obtenga una puntuación baja según la  $P_{DBO} = 10 - \left( \frac{DBO_T}{DBO_{MAX}} * 10 \right)$  Ecuación 4 y

$$P_{SST} = 10 - \left( \frac{SST_T}{SST_{MAX}} * 10 \right) \text{ Ecuación 5.}$$

$$P_{DBO} = 10 - \left( \frac{DBO_T}{DBO_{MAX}} * 10 \right) \text{ Ecuación 4 Cálculo de la puntuación por tren de tratamiento para la remoción de DBO}$$

Donde:

$P_{DBO}$  es la puntuación obtenida por la tecnología T para el subparámetro de remoción de DBO

$DBO_T$  es la remoción de DBO de la tecnología T (mg/L)

$DBO_{MAX}$  es la remoción de DBO de la alternativa que produce efluente con DBO mayor.

$$P_{SST} = 10 - \left( \frac{SST_T}{SST_{MAX}} * 10 \right) \text{ Ecuación 5 Cálculo de la puntuación por tren de tratamiento para la remoción de SST}$$

Donde:

$P_{SST}$  es la puntuación obtenida por la tecnología T para el subparámetro de remoción de DBO

$SST_T$  es la remoción de SST de la tecnología T (mg/L)

$SST_{MAX}$  es la remoción de SST de la alternativa que produce efluente con SST mayor.

### 4.3.3 Indicadores criterio técnico

#### *Nivel de complejidad*

Para este parámetro se definió desde un inicio que lo que busca es un menor número de operaciones unitarias en el tratamiento por lo que se hizo un conteo de las operaciones involucradas en cada una de las opciones y se utilizó ese número para la evaluación. Fueron contempladas de manera que para una cantidad baja de operaciones unitarias se obtuviera una mejor nota, esto se realizó mediante una interpolación lineal, cuya ecuación se muestra en la  $P_C = 10 - \left( \frac{C_T}{C_{MAX}} * 10 \right)$  Ecuación 6.

$$P_C = 10 - \left( \frac{C_T}{C_{MAX}} * 10 \right) \text{ Ecuación 6 Cálculo de la puntuación por tren de tratamiento para el nivel de complejidad}$$

Donde:

$P_C$  es la puntuación obtenida por la tecnología T para el subparámetro de complejidad

$C_T$  es la cantidad de operaciones unitarias del tren de tratamiento T

$C_{MAX}$  es la cantidad de operaciones unitarias más alta entre las opciones de tratamiento.

#### *Diseño construcción y operación*

Se asignó un correlativo numérico a cada alternativa según los parámetros definidos en el Cuadro 4-6, de esta manera estarán estandarizados en una escala de 1 a 10. Para la asignación de estos puntajes se tomaron las características presentadas en el “Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento.” (Tilley, et al., 2018).

**Cuadro 4-6 Análisis de indicadores para el subparámetro "Diseño, construcción y operación"**

<b>Indicador cualitativo</b>	<b>Correlativo Numérico</b>	<b>Parámetros</b>
Bajo	10	Cualquier persona sin conocimientos o conocimientos técnicos básicos puede diseñar, construir y mantener el sistema.
Medio	5	Se requieren conocimientos avanzados nivel de técnico para al menos una de las siguientes: diseño, construcción u operación.

Alto	1	Se requieren conocimientos avanzados nivel de técnico para al menos dos de las siguientes: diseño, construcción u operación.
------	---	--

#### 4.3.4 Indicadores criterio económico

##### *Costos Inversión Inicial*

Se propuso la ubicación de las posibles plantas de tratamiento para el escenario de sistemas semicentralizados y también de sistemas centralizados. Para el cálculo del costo de la inversión inicial en cada una de las plantas la municipalidad facilitó el valor fiscal de los terrenos propuestos por lo que se calculó el valor por metro cuadrado de suelo y una aproximación al costo de adquirir el terreno necesario para las alternativas.

En cuanto a los sistemas de alcantarillado, se utilizaron los tramos, caudal y diámetros calculados en la sección 0; con datos constructivos y de Amanco (2017) se aproximó el costo de construcción de las redes de alcantarillados. Por otro lado, para el cálculo de los costos constructivos de las plantas de tratamiento se utilizaron las ecuaciones definidas por el modelo de costos de construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en el Valle Del Cauca - tecnología lodos activados y UASB para las plantas de tratamiento de lodos activados y RAFA con lodos activados (Valenzuela, 2021). Con respecto a los sistemas individuales, los costos correspondieron a lo señalado por Hegg en su diseño del sistema de tanque séptico mejorado ya que este cálculo incluía todos los costos iniciales. Estos distintos costos económicos fueron sumados según sistema de tratamiento y estandarizados según la  $P_I = 10 - \left( \frac{I_T}{I_{MAX}} * 10 \right)$  Ecuación 7.

$$P_I = 10 - \left( \frac{I_T}{I_{MAX}} * 10 \right) \text{ Ecuación 7 Cálculo de la puntuación por tren de tratamiento para la inversión inicial}$$

Donde:

$P_I$  es la puntuación obtenida por la tecnología T para el subparámetro de inversión inicial

$I_T$  es el costo de inversión inicial del tren de tratamiento T (€).

$I_{MAX}$  es el costo de inversión inicial del tren de tratamiento más alto entre las opciones de tratamiento (€).

### ***Venta de subproductos***

Como se mencionó anteriormente, parte de las metas planteadas fue el máximo aprovechamiento de los residuos generados, de los cuales los lodos son una componente muy importante. Se utilizaron los cálculos de la cantidad de lodos producidos por alternativa para estimar un aproximado del co-compostaje y su valor comercial actual según la tienda EPA (2021). Este valor fue utilizado para la evaluación del parámetro. Se decidió arbitrariamente darle el uso a los lodos como mejorador de suelo con el propósito de este análisis, sin embargo, existen otras alternativas para su aprovechamiento. Como se puede observar en la  $P_V = \left( \frac{V_T}{V_{MAX}} * 10 \right)$  Ecuación 8, se utilizó el valor comercial de los lodos para demostrar el potencial valor en términos monetarios, al igual que como se explicó anteriormente, se realizó la estandarización utilizando una interpolación lineal.

$$P_V = \left( \frac{V_T}{V_{MAX}} * 10 \right) \text{ Ecuación 8 Cálculo de la puntuación por tren de tratamiento para la venta de subproductos}$$

Donde:

$P_V$  es la puntuación obtenida por la tecnología T para el subparámetro de venta de subproductos

$V_T$  es el beneficio por venta de subproductos del tren de tratamiento T (€).

$V_{MAX}$  es el beneficio más alto por venta de subproductos del tren de tratamiento entre las opciones de tratamiento (€).

### **4.3.5 Indicadores criterio social**

#### ***Aceptación***

Se definió la aceptación como la cantidad de encuestados que estarían dispuestos a utilizar cada alternativa planteada. Mediante la encuesta se colectaron los datos de preferencia entre sistemas por parte de los usuarios, de esta manera, se asignó un punto por cada persona que estaba dispuesta a utilizar el sistema. Posterior a eso, se utiliza la  $P_A = \left( \frac{A_T}{A_{MAX}} * 10 \right)$  Ecuación 9 con el fin de normalizar los resultados y convertirlos en valores de 0 a 10 y que fueran comparables mientras se mantenían las proporciones entre preferencias.

$$P_A = \left( \frac{A_T}{A_{MAX}} * 10 \right) \text{ Ecuación 9 Cálculo de la puntuación por tren de tratamiento para la aceptación}$$

Donde:

$P_A$  es la puntuación obtenida por la tecnología T para el subparámetro de aceptación.

$A_T$  es el puntaje acumulado de aceptación para el tren de tratamiento T.

$A_{MAX}$  es el puntaje más alto acumulado de aceptación para el tren de tratamiento entre las opciones de tratamiento.

### **Costos O&M**

Los costos de operación y mantenimiento tienen gran repercusión en las tarifas por el servicio, debido a esto, se incluyeron en la encuesta inicial, permitiéndole así a los abonados decidir sobre su priorización. Para las alternativas se analizaron según la literatura y los datos municipales los costos de mantenimiento y operación anuales (Municipalidad de La Unión, 2021). Que luego se tradujo en costos por metro cúbico. En este análisis se incluyeron tarifas por limpieza y mantenimiento de los sistemas individualizados, mantenimiento y reparación de equipos mecánicos, elaboración de los reportes operacionales y personal. Los costos se totalizaron para cada alternativa y luego se estandarizaron utilizando la interpolación lineal mostrada en la  $P_{OM} = 10 - \left( \frac{OM_T}{OM_{MAX}} * 10 \right)$  Ecuación 10.

$$P_{OM} = 10 - \left( \frac{OM_T}{OM_{MAX}} * 10 \right) \text{ Ecuación 10 Cálculo de la puntuación por tren de tratamiento para la operación y mantenimiento.}$$

Donde:

$P_{OM}$  es la puntuación obtenida por la tecnología T para el subparámetro de operación y mantenimiento

$OM_T$  es el costo de operación y mantenimiento del tren de tratamiento T (€).

$OM_{MAX}$  es el costo más alto de operación y mantenimiento del tren de tratamiento entre las opciones de tratamiento (€).

### **Adaptación**

La adaptación corresponde a la inversión que debería hacer cada propietario para la implementación de los sistemas en su propiedad, de esta forma se establecieron los factores principales que se involucran en el proceso de adaptación de cada alternativa. Se calcularon costos relativos a la instalación de tuberías, reconstrucción de sistemas de tratamiento locales o construcción desde cero de toda la estructura con datos presentados en la “Evaluación de optimizaciones de sistemas individuales de tratamiento de aguas residuales” (Hegg, 2018). Para esto se utilizaron complementariamente los datos recolectados en la encuesta sobre los sistemas de tratamiento actuales, de esta forma, para cada subsector se utilizó el porcentaje de personas que ya utilizaba cada sistema y la ubicación de estos, logrando así un cálculo más adaptado a la situación de esas propiedades. Los costos de adaptación se totalizaron para

cada alternativa y luego se estandarizaron utilizando la interpolación lineal mostrada en la

$$P_{Ad} = 10 - \left( \frac{Ad_T}{Ad_{MAX}} * 10 \right) \text{ Ecuación 11.}$$

$$P_{Ad} = 10 - \left( \frac{Ad_T}{Ad_{MAX}} * 10 \right) \text{ Ecuación 11 Cálculo de la puntuación por tren de tratamiento para los costos de adaptación.}$$

Donde:

$P_{Ad}$  es la puntuación obtenida por la tecnología T para el subparámetro de adaptación

$Ad_T$  es el costo de adaptación del tren de tratamiento T (€).

$Ad_{MAX}$  es el costo más alto de adaptación del tren de tratamiento entre las opciones de tratamiento (€).

#### 4.4 FACTIBILIDAD DE OPCIONES

##### 4.4.1 Método de selección

Para el análisis multicriterio se seleccionó el método AHP según se presenta en el Manual para la evaluación multicriterio para programas y proyectos (Pacheco & Contreras, 2008).

##### 4.4.2 Pesos de criterios e indicadores

La ponderación de la matriz está compuesta básicamente por dos tipos de criterios o subcriterios, los definidos por expertos de la municipalidad y los que están definidos por la opinión de la ciudadanía. El primer grupo, tiene un componente técnico importante por lo que, en un pequeño taller presencial, dos trabajadores municipales asignaron valores de importancia según la escala de Saaty, para definir la ponderación de los criterios de nivel 1 y la mayoría de nivel 2. Para estos, se corroboró su consistencia según lo descrito por Pacheco y Contreras (2008).

Los criterios que no fueron evaluados en pares por parte de los expertos fueron evaluados por medio de la encuesta y de ahí se realizó una asignación de puntos según las respuestas para que, matemáticamente se asignara el valor correspondiente según el método de Saaty. Estos corresponden a los subcriterios de: Ruido y contaminación visual y Potencial producción de olores e insectos en el criterio ambiental y a aceptación, costos de operación y mantenimiento y costos de adaptación. Vale la pena destacar que la participación de la población en esta etapa simplemente fue utilizada para determinar la ponderación de los subcriterios que les afectan más directamente y para la asignación de puntuaciones se

utilizaron datos generados o producto de la revisión bibliográfica. El detalle sobre el proceso para la jerarquización de criterios se puede leer en el Apéndice 3.

#### **4.4.3 Evaluación de alternativas**

Para la evaluación final de las alternativas, se tomaron en cuenta exclusivamente los criterios explicados en la sección 4.3. Debido a que todos los datos se encuentran estandarizados en una escala preestablecida cuyo rango va de 0 a 10, se puede realizar la evaluación de alternativas para el tratamiento. Cada uno de los criterios cuenta con un peso correspondiente y cada sistema de tratamiento cuenta con una nota asignada de 0 a 10 en cada criterio. Mediante el método de ponderación, se procedió a la evaluación de cada una de las 6 opciones de tratamiento en los 20 subsectores en los que se dividió el área de cobertura. Esto se traduce en 120 ponderaciones para identificar la mejor opción para el tratamiento de cada subsector.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.5 OPCIONES DE SANEAMIENTO EN EL CANTÓN DE LA UNIÓN

El primer criterio de preselección es que la alternativa no requiera mucho espacio por la poca disponibilidad de este en el cantón. De esta forma se realizó un primer tamizaje de opciones descartando algunas como las lagunas, humedales, biojardineras, etc. En el Cuadro 4-7 se enlistan las alternativas que cumplieron con el primer criterio. Dos de ellas de tipo individualizado, tres colectivos o comunitario y otra mixta donde una parte se maneja individual y otra colectiva. Las alternativas de tratamiento electas se presentan en el Cuadro 4-7:

**Cuadro 4-7 Alternativas preseleccionadas según el primer criterio previo**

<b>Alternativa</b>	<b>Tipo de sistema</b>
Tanque Séptico, zanjas de infiltración	Individualizado
Tanque Séptico, FAFA, zanjas de infiltración	Individualizado
Tanque Séptico, PTAR semicentralizada con RAFA y Lodos activados	Mixto
PTAR semicentralizada con Lodos activados	Colectivo
PTAR semicentralizada con RAFA y Lodos activados	Colectivo
PTAR centralizada con RAFA y Lodos activados	Colectivo

Con el fin de aplicar el segundo criterio de preselección, se utilizaron los datos de las encuestas (ambas). Según criterio técnico de la Dirección de Recurso Hídrico de la municipalidad, para utilizar un sistema de tratamiento en un subsector se debe cumplir que al menos el 90% de las propiedades tengan el espacio suficiente para hacerlo.

Los encuestados indicaron el área verde disponible en su propiedad con el fin de identificar cuáles de las opciones son factibles para aplicar por sector.

Del Cuadro 4-8, Cuadro 4-9 y

**Cuadro 4-10** es posible notar como este segundo criterio no se está cumpliendo en su gran mayoría para las opciones de tratamiento individualizado. La excepción es para el tanque

séptico y planta de tratamiento en el sector denominado “PTARs”, esto se debe a que este sector está comprendido mayormente por urbanizaciones de clase media donde se dio un crecimiento más ordenado por lo que las propiedades poseen más área verde que en el resto de la zona del proyecto. De igual forma, el terreno es justo el suficiente para la construcción del tanque séptico. Es por esta razón que las alternativas individualizadas son descartadas del todo y la mixta se mantiene. De igual manera, se decidió continuar con las seis alternativas y tomarlas en cuenta en las etapas de calificación ya que se identificó que más del 80% de la población del cantón utiliza estas tecnologías en sus propiedades.

**Cuadro 4-8 Cumplimiento del segundo criterio previo para el TS + infiltración.**

Respuesta	Cumple	No Cumple
Aislado	64,86%	35,14%
Gravedad Concepción	58,49%	41,51%
Gravedad San Diego	45,16%	54,84%
Gravedad San Rafael	56,25%	43,75%
Gravedad Tres Ríos-Dulce	56,30%	43,70%
Nombre		
PTARs	86,96%	13,04%

**Cuadro 4-9 Cumplimiento del segundo criterio previo para el TS + FAFa.**

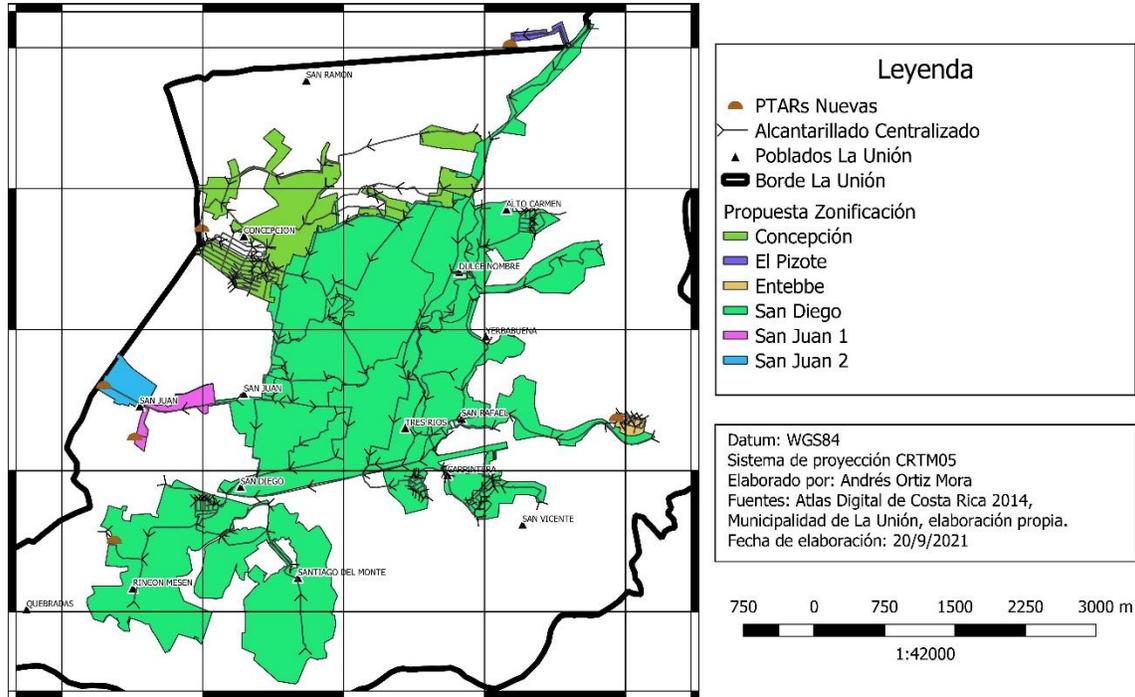
Respuesta	Cumple	No Cumple
Aislado	64,86%	35,14%
Gravedad Concepción	58,49%	41,51%
Gravedad San Diego	45,16%	54,84%
Gravedad San Rafael	56,25%	43,75%
Gravedad Tres Ríos-Dulce	56,30%	43,70%
Nombre		
PTARs	86,96%	13,04%

**Cuadro 4-10 Cumplimiento del segundo criterio previo para el TS + PTAR.**

Respuesta	Cumple	No Cumple
Aislado	72,97%	27,03%
Gravedad Concepción	64,15%	35,85%
Gravedad San Diego	45,16%	54,84%
Gravedad San Rafael	60,94%	39,06%
Gravedad Tres Ríos-Dulce	62,18%	37,82%
Nombre		
PTARs	91,30%	8,70%

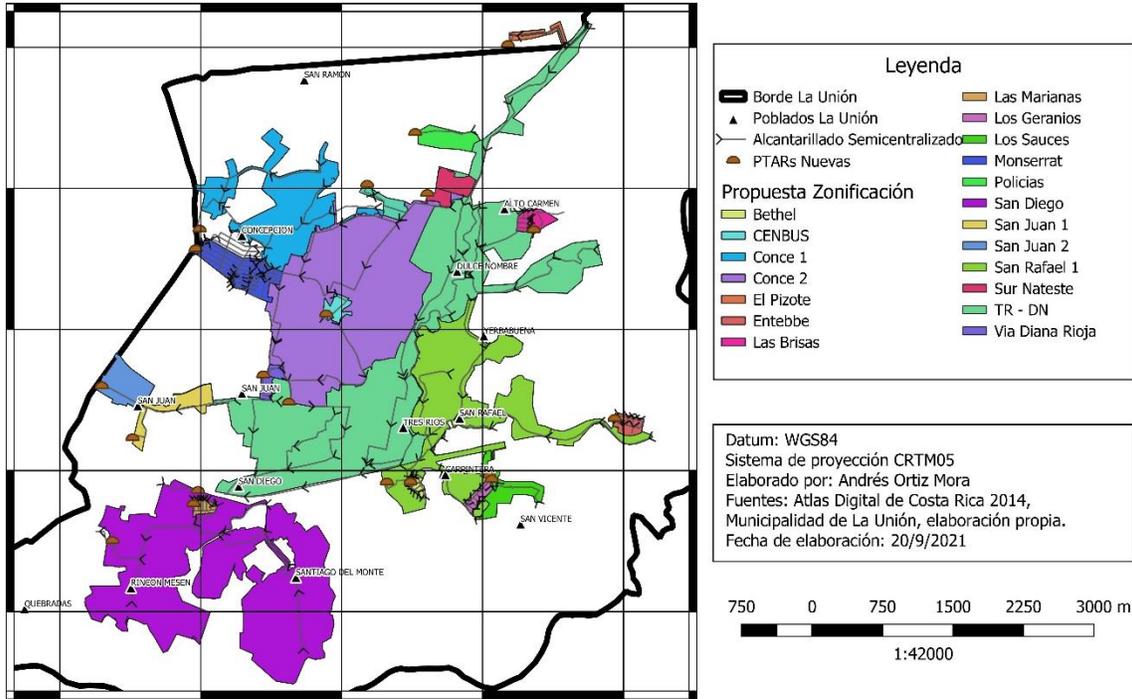
*Red de colectores*

Se determinó, según los parámetros definidos anteriormente, la óptima distribución de la red de alcantarillados primaria y secundaria. Se analizaron dos escenarios, uno donde se buscó la menor cantidad de plantas, el centralizado. En la Figura 4-6 se puede observar la propuesta para este sistema en la zona de cobertura, obteniendo 6 plantas de tratamiento definidas. Las dos de mayor tamaño corresponden a áreas pobladas ubicadas en los alrededores de la microcuenca del río Tiribí y la parte alta del río María Aguilar. Por otro lado, las cuatro plantas de menor tamaño se ubican en pequeñas zonas aisladas; al norte en la microcuenca del río Torres, al este pertenecientes al río Chagüite y María Aguilar y al oeste en la microcuenca del río Tiribí con limitada conectividad a la red principal.



**Figura 4-6 Propuesta de red de colectores y plantas de tratamiento centralizada**

En contraste, se formuló una propuesta para una red de alcantarillado semicentralizada, donde se definieron 19 plantas de tratamiento locales y sus redes primarias y secundarias de colectores. Los límites de estos se pueden observar en la Figura 4-7, estas plantas ya estaban definidas por su previa construcción y se definieron por barrios, comunidades o facilidades de infraestructura. Se presenta variabilidad en los tamaños de estas zonas; definiendo 5 de tamaño mediano y 14 pequeñas.



**Figura 4-7 Propuesta de red de colectores y plantas de tratamiento semicentralizada**

Tanque Séptico con Planta de tratamiento semicentralizada con RAFA y Lodos activados

En el Cuadro 4-11 se tienen los datos de calidad de salida esperada, caudales por subsector además del desglose de área requerida según etapa. Para este caso en el que se incluye un tanque séptico, también se indica el área necesaria dentro de cada propiedad para la correcta implementación del sistema.

**Cuadro 4-11 Características de los sistemas de tratamiento semicentralizado libre de sólidos**

Subsector	Caudal Tanque séptico (m <sup>3</sup> /s)	Caudal PTAR (m <sup>3</sup> /s)	Área Tanque séptico (m <sup>2</sup> )	Área Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (m <sup>2</sup> )	Área Lodos Activados (m <sup>2</sup> )	Área Lechos de secado (m <sup>2</sup> )	Área requerida en propiedad (m <sup>2</sup> )	Área requerida PTAR (m <sup>2</sup> )	Calidad de salida
El Pizote	5,5x10-06	6,0x10-04	2,21	4,31	5,82	2 411,61	2,21	2 421,73	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
Sur Nateste	5,5x10-06	2,4x10-04	2,21	1,74	2,34	3 703,60	2,21	3 707,68	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
CENBUS	5,5x10-06	4,6x10-04	2,21	3,31	4,47	2 450,02	2,21	2 457,80	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
Policías	5,5x10-06	1,0x10-03	2,21	7,48	10,09	4 253,23	2,21	4 270,80	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
Vía Diana Rioja	5,5x10-06	3,9x10-04	2,21	2,81	3,79	3 015,13	2,21	3 021,72	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
San Juan 2	5,5x10-06	1,2x10-03	2,21	8,89	12,00	6 000,69	2,21	6 021,58	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
San Juan 1	5,5x10-06	1,4x10-03	2,21	10,16	13,72	9 061,81	2,21	9 085,70	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L

Subsector	Caudal Tanque séptico (m <sup>3</sup> /s)	Caudal PTAR (m <sup>3</sup> /s)	Área Tanque séptico (m <sup>2</sup> )	Área Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (m <sup>2</sup> )	Área Lodos Activados (m <sup>2</sup> )	Área Lechos de secado (m <sup>2</sup> )	Área requerida en propiedad (m <sup>2</sup> )	Área requerida PTAR (m <sup>2</sup> )	Calidad de salida
Conce 1	5,5x10-06	6,9x10-03	2,21	49,54	66,88	2 71667,10	2,21	2 71783,53	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
San Francisco	5,5x10-06	4,0x10-04	2,21	2,88	3,89	5 229,02	2,21	5 235,79	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
Entebbe	5,5x10-06	4,2x10-04	2,21	3,03	4,08	3 888,63	2,21	3 895,74	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
Los Geranios	5,5x10-06	3,3x10-04	2,21	2,38	3,21	4 113,21	2,21	4 118,79	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
Bethel	5,5x10-06	2,3x10-04	2,21	1,64	2,22	2 238,97	2,21	2 242,83	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
Montserrat	5,5x10-06	2,5x10-03	2,21	17,80	24,03	72 774,03	2,21	72 815,87	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
Las Marianas	5,5x10-06	2,4x10-04	2,21	1,74	2,34	3 652,49	2,21	3 656,57	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
Las Brisas	5,5x10-06	5,6x10-04	2,21	4,02	5,42	3 806,33	2,21	3 815,77	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
Conce 2	5,5x10-06	9,9x10-03	2,21	71,34	96,31	231 243,15	2,21	231 410,79	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
TR - DN	5,5x10-06	2,8x10-02	2,21	201,17	271,58	1 316 141,78	2,21	1 316 614,52	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L

Subsector	Caudal Tanque séptico (m <sup>3</sup> /s)	Caudal PTAR (m <sup>3</sup> /s)	Área Tanque séptico (m <sup>2</sup> )	Área Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (m <sup>2</sup> )	Área Lodos Activados (m <sup>2</sup> )	Área Lechos de secado (m <sup>2</sup> )	Área requerida en propiedad (m <sup>2</sup> )	Área requerida PTAR (m <sup>2</sup> )	Calidad de salida
San Rafael 1	5,5x10-06	1,1x10-02	2,21	79,82	107,76	2 563 805,93	2,21	2 563 993,52	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
Los Sauces	5,5x10-06	1,0x10-03	2,21	7,43	10,03	18 326,71	2,21	18 344,17	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L
San Diego	5,5x10-06	2,2x10-02	2,21	159,47	215,29	724 534,83	2,21	724 909,59	DBO: 1,49 mg/L SST: 15,65 mg/L

*Planta de tratamiento semicentralizada con Lodos Activados*

El detalle de áreas requeridas, caudales y calidades de salida para esta alternativa se pueden ver en el Cuadro 4-12.

**Cuadro 4-12 Características de los sistemas de tratamiento semicentralizados con Lodos Activados**

Subsector	Caudal PTAR (m <sup>3</sup> /s)	Área Lodos Activados (m <sup>2</sup> )	Área Lechos de secado (m <sup>2</sup> )	Área requerida PTAR (m <sup>2</sup> )	Calidad de salida
El Pizote	6,0x10-04	5,82	2 406,72	2 412,54	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
Sur Nateste	2,4x10-04	2,34	969,03	971,38	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
CENBUS	4,6x10-04	4,47	1 847,28	1 851,75	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
Policías	1,0x10-03	10,09	4 175,12	4 185,21	DBO: 10,80 mg/L

<b>Subsector</b>	<b>Caudal PTAR (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Área Lodos Activados (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Lechos de secado (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área requerida PTAR (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Calidad de salida</b>
					SST: 41,00 mg/L
Vía Diana Rioja	3,9x10-04	3,79	1 567,05	1 570,84	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
San Juan 2	1,2x10-03	12,00	4 966,33	4 978,33	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
San Juan 1	1,4x10-03	13,72	5 676,28	5 690,00	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
Conce 1	6,9x10-03	66,88	27 669,38	27 736,27	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
San Francisco	4,0x10-04	3,89	1 611,07	1 614,96	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
Entebbe	4,2x10-04	4,08	1 689,77	1 693,86	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
Los Geranios	3,3x10-04	3,21	1 327,05	1 330,25	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
Bethel	2,3x10-04	2,22	918,73	920,95	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
Montserrat	2,5x10-03	24,03	9 941,97	9 966,01	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
Las Marianas	2,4x10-04	2,34	969,03	971,38	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L

<b>Subsector</b>	<b>Caudal PTAR (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Área Lodos Activados (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Lechos de secado (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área requerida PTAR (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Calidad de salida</b>
Las Brisas	5,6x10-04	5,42	2 243,96	2 249,39	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
Conce 2	9,9x10-03	96,31	39 841,71	39 938,01	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
TR - DN	2,8x10-02	271,58	112 352,35	112 623,93	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
San Rafael 1	1,1x10-02	107,76	44 581,41	44 689,17	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
Los Sauces	1,0x10-03	10,03	4 148,77	4 158,79	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L
San Diego	2,2x10-02	215,29	89 065,79	89 281,08	DBO: 10,80 mg/L SST: 41,00 mg/L

Planta de tratamiento semicentralizada con RAFA y Lodos activados

En el

Cuadro 4-13 se puede observar el detalle de requerimiento de espacio para los componentes principales de este sistema, así como los caudales tomados para cada uno de ellos.

**Cuadro 4-13 Características de los sistemas de tratamiento semicentralizados con RAFA y Lodos Activados**

<b>Subsector</b>	<b>Caudal PTAR (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Área Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Lodos Activados (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Lechos de secado (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área requerida PTAR (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Calidad de salida</b>
El Pizote	6,0x10-04	4,31	5,82	2 411,03	2 421,16	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Sur Nateste	2,4x10-04	1,74	2,34	970,77	974,85	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
CENBUS	4,6x10-04	3,31	4,47	1 850,59	1 858,37	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Policías	1,0x10-03	7,48	10,09	4 182,59	4 200,16	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Vía Diana Rioja	3,9x10-04	2,81	3,79	1 569,85	1 576,45	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
San Juan 2	1,2x10-03	8,89	12,00	4 975,22	4 996,11	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
San Juan 1	1,4x10-03	10,16	13,72	5 686,45	5 710,33	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Conce 1	6,9x10-03	49,54	66,88	27 718,93	27 835,35	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
San Francisco	4,0x10-04	2,88	3,89	1 613,96	1 620,73	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Entebbe	4,2x10-04	3,03	4,08	1 692,80	1 699,91	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L

<b>Subsector</b>	<b>Caudal PTAR (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Área Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Lodos Activados (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Lechos de secado (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área requerida PTAR (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Calidad de salida</b>
Los Geranios	3,3x10-04	2,38	3,21	1 329,42	1 335,01	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Bethel	2,3x10-04	1,64	2,22	920,37	924,24	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Montserrat	2,5x10-03	17,80	24,03	9 959,78	10 001,61	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Las Marianas	2,4x10-04	1,74	2,34	970,77	974,85	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Las Brisas	5,6x10-04	4,02	5,42	2 247,98	2 257,42	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Conce 2	9,9x10-03	71,34	96,31	39 913,04	40 080,69	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
TR - DN	2,8x10-02	201,17	271,58	112 553,52	113 026,26	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
San Rafael 1	1,1x10-02	79,82	107,76	44 661,23	44 848,82	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Los Sauces	1,0x10-03	7,43	10,03	4 156,19	4 173,65	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
San Diego	2,2x10-02	159,47	215,29	89 225,27	89 600,03	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L

Planta de tratamiento centralizada con RAFA y Lodos activados

Se reasignaron valores y áreas agrupándolos según la Figura 4-6, en el Cuadro 4-14 se describen los sistemas de tratamiento que corresponden a cada subsector y se presentan sus requerimientos de área principalmente en cuanto a las operaciones unitarias de tratamiento de líquidos y sólidos.

**Cuadro 4-14 Características de los sistemas de tratamiento centralizados con RAFA y Lodos Activados**

<b>Subsector</b>	<b>Caudal PTAR (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Área Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Lodos Activados (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Lechos de secado (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área requerida PTAR (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Calidad de salida</b>
El Pizote	6,0x10-04	4,31	5,82	2 660,54	2 670,67	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Sur Nateste	1,3x10-02	95,43	128,83	58 918,75	59 143,01	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
CENBUS	7,7x10-02	557,68	752,87	344 309,95	345 620,49	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Policías	1,3x10-02	95,43	128,83	58 918,75	59 143,01	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Vía Diana Rioja	7,7x10-02	557,68	752,87	344 309,95	345 620,49	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
San Juan 2	1,2x10-03	8,89	12,00	5 490,08	5 510,98	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
San Juan 1	1,4x10-03	10,16	13,72	6 274,91	6 298,79	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Conce 1	1,3x10-02	95,43	128,83	58 918,75	59 143,01	DBO: 2.52mg/L

<b>Subsector</b>	<b>Caudal PTAR (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Área Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Lodos Activados (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Lechos de secado (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área requerida PTAR (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Calidad de salida</b>
						SST: 18.70 mg/L
San Francisco	1,3x10-02	95,43	128,83	58 918,75	59 143,01	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Entebbe	4,2x10-04	3,03	4,08	1 867,98	1 875,09	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Los Geranios	7,7x10-02	557,68	752,87	344 309,95	345 620,49	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Bethel	7,7x10-02	557,68	752,87	344 309,95	345 620,49	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Montserrat	1,3x10-02	95,43	128,83	58 918,75	59 143,01	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Las Marianas	7,7x10-02	557,68	752,87	344 309,95	345 620,49	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Las Brisas	7,7x10-02	557,68	752,87	344 309,95	345 620,49	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
Conce 2	7,7x10-02	557,68	752,87	344 309,95	345 620,49	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
TR - DN	7,7x10-02	557,68	752,87	344 309,95	345 620,49	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
San Rafael 1	7,7x10-02	557,68	752,87	344 309,95	345 620,49	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L

<b>Subsector</b>	<b>Caudal PTAR (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Área Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Lodos Activados (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Lechos de secado (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área requerida PTAR (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Calidad de salida</b>
Los Sauces	7,7x10-02	557,68	752,87	344 309,95	345 620,49	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L
San Diego	7,7x10-02	557,68	752,87	344 309,95	345 620,49	DBO: 2.52mg/L SST: 18.70 mg/L

#### 4.6 PONDERACIÓN DE CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Como resultado del taller de jerarquización llevado a cabo, se determinó la ponderación para los criterios y subcriterios a utilizar. Como se puede observar en el Cuadro 4-15, se le dio una gran importancia al criterio ambiental ya que para la Dirección de Recurso Hídrico y la municipalidad esta es la motivación más importante para la implementación del proyecto. Según orden de porcentaje se tiene de segundo el criterio económico, este no es un obstáculo para la implementación, pero si debe tomarse en cuenta a la hora de buscar aprobación y financiamiento, es por esto por lo que es segundo en importancia. Finalmente, los criterios sociales y técnicos, donde el social tiene una importancia mayor ya que se quiso tomar en cuenta la opinión, perspectiva y beneficios para los abonados. El criterio técnico terminó siendo calificado como el menos relevante debido a que la municipalidad cuenta con personal capacitado y el aspecto técnico se maneja bien a lo interno.

**Cuadro 4-15 Ponderación para la evaluación de las alternativas**

Criterio	%	Subcriterio	%	Indicador	%
Ambiental	62,39	Entorno	19,48	Potencial producción de olores e insectos	52,38
				Ruido y contaminación visual	47,62
		Generación de residuos	8,82	Lodos	50
				Energía	50
		Remoción de contaminantes	71,70	DBO	50
				SST	50
Técnico	5,36	Nivel de complejidad	12,50	# de operaciones unitarias	100
		Diseño, construcción y operación	87,50	Nivel de conocimientos	100
Económico	17,15	Inversión inicial	87,50	Costos	100
		Venta de Subproductos	12,50	Lodos	100
Social	15,10	Aceptación	33,33	Aceptación de la comunidad	100
		O&M	33,33	Costos	100
		Adaptación	33,33	Costos	100

Analizando los subcriterios del segundo nivel, los correspondientes a entorno y social fueron determinados por los encuestados según sus respuestas (esto se detalla en el Apéndice 3), esto nos dice que prácticamente para ellos todos son igual de importantes a la hora de la escogencia de una tecnología de saneamiento. Se inclinaron ligeramente por los olores e insectos para que tengan un peso mayor, sin embargo, no es una gran diferencia porcentualmente. Cabe destacar que debido a que las opiniones eran tan similares entre todos los encuestados, no se diferenció entre los sectores y a causa de esto, para este ponderado se tiene un 90% de confianza según el Cuadro 4-3.

Los subcriterios analizados por los expertos de la municipalidad en su mayoría fueron divididos en partes iguales por ser considerados de igual importancia entre ellos. La diferencia más destacable se observa en el criterio económico donde se le dio un 87.5% del total del criterio a los costos de inversión inicial por sobre la recuperación de residuos, esto por decisión técnica y de prioridades para la municipalidad.

#### 4.7 PRIORIZACIÓN DE SISTEMAS

Se realizaron los análisis multicriterio para los 20 subsectores definidos en el cantón, las tecnologías que no cumplieron con los criterios de preselección fueron descartados, terminando así con 3 alternativas en 14 subsectores y para los 6 subsectores del sector PTARs se tuvieron 4 alternativas. En términos generales se puede observar que para algunas alternativas la diferencia es mínima, esto se analizará a continuación.

### El Pizote

Al igual que para muchos otros subsectores, para la evaluación final solo se tomaron en cuenta 3 de las alternativas por falta de espacio disponible en las propiedades. El Cuadro 4-16 presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El Cuadro 4-17 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos. Según el Cuadro 4-17, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR centralizada con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,6. Esta diferencia se debe a que a pesar de que la centralizada tiene un mejor rendimiento para la producción de energía, la planta semicentralizada tiene una mucho mejor aceptación de la comunidad y menores costos de operación y mantenimiento. A pesar de que las primeras dos opciones son la misma pero planteada de manera diferente se tiene una ventaja grande con respecto a la PTAR semicentralizada con lodos activados, principalmente en cuanto a generación de energía y remoción de SST.

**Cuadro 4-16 Evaluación de sistemas de tratamiento, El Pizote.**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	1 240,75	1 244,36	1 244,36
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	21	21	13
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	361,00	361,00	685,95
Costos Adaptación (€/conexión)	276 488	276 488	276 488

**Cuadro 4-17 Evaluación de sistemas de tratamiento, El Pizote. Valor Normalizado**

	PTAR <i>semicentralizada,</i> LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	6,64	10,00
DBO	9,15	9,80	9,80
SST	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	4,82	4,80	4,80
Venta Lodos	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	10,00	10,00	6,19
Costos O&M	9,97	9,97	0,00
Costos Adaptación	8,84	8,84	8,84
<b>Calificación</b>	<b>5,03</b>	<b>6,60</b>	<b>5,97</b>

### Sur Nateste

El Cuadro 4-18, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El Cuadro 4-19 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos.

Según el Cuadro 4-19, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR centralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,02, siendo apenas apreciable. Esta diferencia se debe a que la centralizada tiene un mejor rendimiento para la producción de energía y menores costos de O&M debido a la escala, la planta semicentralizada tiene una mucho mejor aceptación de la comunidad. Siendo así, que, a pesar de ser sistemas y ubicaciones diferentes, obtuvieron una nota muy similar; en este caso se prefiere la opción Centralizada, pero con opción de cambiar por la semicentralizada en caso de alguna dificultad o preferencia municipal.

**Cuadro 4-18 Evaluación de sistemas de tratamiento, Sur Nateste.**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
<i>Generación de Lodos (L/m<sup>3</sup>)</i>	0,003	0,005	0,003
<i>Energía (kW/m<sup>3</sup>)</i>	0,00	1,69	2,55
<i>DBO (mg/L)</i>	10,80	2,52	2,52
<i>SST (mg/L)</i>	41,00	18,70	18,70
<i># de operaciones unitarias</i>	5	7	7
<i>Costos Iniciales (€/m<sup>3</sup>)</i>	927,84	931,44	1 086,06
<i>Venta Lodos (\$/m<sup>3</sup>)</i>	0,17	0,35	0,22
<i>Aceptación de la comunidad (pts.)</i>	21	21	13
<i>Costos O&amp;M (€/m<sup>3</sup>)</i>	843,11	843,11	321,91
<i>Costos Adaptación (€/conexión)</i>	276 488	276 488	276 488

**Cuadro 4-19 Evaluación de sistemas de tratamiento, Sur Nateste. Valor Normalizado**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	6,64	10,00
DBO	9,15	9,80	9,80
SST	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	6,22	6,20	5,57
Venta Lodos	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	10,00	10,00	6,19
Costos O&M	3,30	3,30	8,06
Costos Adaptación	8,84	8,84	8,84
Calificación	4,86	6,42	6,44

**CENBUS**

El Cuadro 4-20, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El

Cuadro 4-21 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos. Según el

Cuadro 4-21, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR centralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,12, siendo muy baja. Esta diferencia se debe a que la centralizada tiene un mejor rendimiento para la producción de energía y menores costos de O&M debido a la escala, la planta semicentralizada tiene una mucho mejor aceptación de la comunidad y una pequeña ventaja en cuanto a la venta de lodos. La diferencia principal en cuanto a construcción y ubicación es que con el sistema centralizado se tendrá una unión de varias zonas. La opción seleccionada tendría una conducción más larga, sin embargo, se uniría con otras zonas, disminuyendo los costos de O&M por temas de cantidad de trabajadores principalmente. En este caso se prefiere la opción Centralizada.

**Cuadro 4-20 Evaluación de sistemas de tratamiento, CENBUS.**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
<i>Generación de Lodos (L/m<sup>3</sup>)</i>	0,003	0,005	0,003
<i>Energía (kW/m<sup>3</sup>)</i>	0,00	1,69	2,55
<i>DBO (mg/L)</i>	10,80	2,52	2,52
<i>SST (mg/L)</i>	41,00	18,70	18,70
<i># de operaciones unitarias</i>	5	7	7
<i>Costos Iniciales (€/m<sup>3</sup>)</i>	1 146,30	1 149,30	1 154,93
<i>Venta Lodos (\$/m<sup>3</sup>)</i>	0,17	0,35	0,22
<i>Aceptación de la comunidad (pts.)</i>	21	21	13
<i>Costos O&amp;M (€/m<sup>3</sup>)</i>	459,41	459,41	93,87
<i>Costos Adaptación (€/conexión)</i>	365 967	365 967	365 967

**Cuadro 4-21 Evaluación de sistemas de tratamiento, CENBUS. Valor Normalizado**

	PTAR <i>semicentralizada</i> , LA	PTAR <i>semicentralizada</i> , RAFA, LA	PTAR <i>centralizada</i> , RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	6,64	10,00
DBO	9,15	9,80	9,80
SST	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	5,16	5,14	5,12
Venta Lodos	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	10,00	10,00	6,19
Costos O&M	4,55	4,55	9,68
Costos Adaptación	8,84	8,84	8,84
<b>Calificación</b>	<b>4,76</b>	<b>6,33</b>	<b>6,45</b>

### Policías

El Cuadro 4-22, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El Cuadro 4-23 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos. Según el Cuadro 4-23, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR *semicentralizada* con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR *centralizada* con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,23. Esta diferencia se debe a que a pesar de que la *centralizada* tiene un mejor rendimiento para la producción de energía, la planta *semicentralizada* tiene una mucho mejor aceptación de la comunidad y menores costos de operación y mantenimiento. La principal diferencia entre las primeras dos opciones es que, en cuanto a ubicación, la *centralizada* estaría a una gran distancia no poblada de la zona de cobertura, por lo que tendría mayor instalación de tubería de recolección a lo largo de calles o zonas de protección de ríos. Se recomienda implementar una PTAR *semicentralizada* con RAFA y lodos activados.

**Cuadro 4-22 Evaluación de sistemas de tratamiento, Policías.**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	1090,62	1094,30	1086,06
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	21	21	13
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	223,36	223,36	321,91
Costos Adaptación (€/conexión)	276488	276488	276488

**Cuadro 4-23 Evaluación de sistemas de tratamiento, Policías. Valor Normalizado**

	PTAR <i>semicentralizada</i> , LA	PTAR <i>semicentralizada</i> , RAFA, LA	PTAR <i>centralizada</i> , RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	6,64	10,00
DBO	9,15	9,80	9,80
SST	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	1,98	1,95	2,02
Venta Lodos	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	10,00	10,00	6,19
Costos O&M	6,31	6,31	4,24
Costos Adaptación	8,84	8,84	8,84
<b>Calificación</b>	<b>4,37</b>	<b>5,94</b>	<b>5,71</b>

Vía Diana Rioja

El Cuadro 4-24, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El Cuadro 4-25 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados

por los respectivos pesos. Según el Cuadro 4-25, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR centralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,2, siendo baja. La diferencia principal en cuanto a construcción y ubicación es que con el sistema centralizado se tendrá una unión de varias zonas. La opción seleccionada tendría una conducción más larga, sin embargo, se uniría con otras zonas, disminuyendo los costos de O&M por temas de cantidad de trabajadores principalmente. En este caso se prefiere la opción Centralizada tiene el potencial de generar más energía, y tiene unos costos iniciales levemente menores y costos de O&M bastante menores también; aunque en su contra esté que la opción semicentralizada genere más lodos para su venta y sea mejor aceptada por la comunidad. Se recomienda la implementación de una PTAR centralizada con RAFA y lodos activados.

**Cuadro 4-24 Evaluación de sistemas de tratamiento, Vía Diana Rioja.**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	1 233,16	1 236,76	1 154,93
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	21	21	13
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	535,12	535,12	93,87
Costos Adaptación (€/conexión)	276 488	276 488	276 488

**Cuadro 4-25 Evaluación de sistemas de tratamiento, Vía Diana Rioja. Valor Normalizado**

	PTAR <i>semicentralizada</i> , LA	PTAR <i>semicentralizada</i> , RAFA, LA	PTAR <i>centralizada</i> , RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	6,64	10,00
DBO	9,15	9,80	9,80
SST	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	5,39	5,38	5,68
Venta Lodos	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	10,00	10,00	6,19
Costos O&M	4,21	4,21	9,81
Costos Adaptación	8,84	8,84	8,84
<b>Calificación</b>	<b>4,78</b>	<b>6,34</b>	<b>6,54</b>

### San Juan 2

El Cuadro 4-26, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El Cuadro 4-27 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos. Según el Cuadro 4-27, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR *semicentralizada* con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR *centralizada* con RAFA y lodos activados. Sin embargo, este corresponde al mismo sistema debido a su ubicación, así que realmente la segunda opción sería la de un PTAR *semicentralizada* con lodos activados. La diferencia entre las dos opciones corresponde a aproximadamente 1,57. Esta diferencia se debe a que a pesar de que la de lodos activados tiene una mejor generación de lodos, menor cantidad de operaciones unitarias y menores costos iniciales, la diferencia no es tan grande como para compensar todos los otros aspectos donde el tren con RAFA y lodos activados tiene una clara ventaja, principalmente en la remoción de SST y la venta de lodos. Se recomienda implementar una PTAR *semicentralizada* con RAFA y lodos activados.

**Cuadro 4-26 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Juan 2.**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	1 049,42	1 053,16	1 053,45
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	21	21	13
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	193,52	193,52	351,00
Costos Adaptación (€/conexión)	276 488	276 488	276 488

**Cuadro 4-27 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Juan 2. Valor Normalizado**

	PTAR <i>semicentralizada,</i> LA	PTAR <i>semicentralizada,</i> RAFA, LA	PTAR <i>centralizada,</i> RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	6,64	10,00
DBO	9,15	9,80	9,80
SST	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	4,95	4,93	4,93
Venta Lodos	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	10,00	10,00	6,19
Costos O&M	9,75	9,75	0,00
Costos Adaptación	8,84	8,84	8,84
<b>Calificación</b>	<b>5,04</b>	<b>6,61</b>	<b>5,99</b>

### San Juan 1

El Cuadro 4-28, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El Cuadro 4-29 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados

por los respectivos pesos. Según el Cuadro 4-29, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR centralizada con RAFA y lodos activados. Sin embargo, este corresponde al mismo sistema debido a su ubicación, así que realmente la segunda opción sería la de un PTAR semicentralizada con lodos activados. La diferencia entre las dos opciones corresponde a aproximadamente 1,57. Esta diferencia se debe a que a pesar de que la de lodos activados tiene una mejor generación de lodos, menor cantidad de operaciones unitarias y menores costos iniciales, la diferencia no es tan grande como para compensar todos los otros aspectos donde el tren con RAFA y lodos activados tiene una clara ventaja, principalmente en la remoción de SST y la venta de lodos. Se recomienda implementar una PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados.

**Cuadro 4-28 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Juan 1.**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	1 231,88	1 235,70	1 235,98
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	21	21	13
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	173,83	173,83	311,60
Costos Adaptación (€/conexión)	276 488	276 488	276 488

**Cuadro 4-29 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Juan 1. Valor Normalizado**

	PTAR <i>semicentralizada</i> , LA	PTAR <i>semicentralizada</i> , RAFA, LA	PTAR <i>centralizada</i> , RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	6,64	10,00
DBO	9,15	9,80	9,80
SST	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	5,02	5,00	5,00
Venta Lodos	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	10,00	10,00	6,19
Costos O&M	9,59	9,59	1,00
Costos Adaptación	8,84	8,84	8,84
<b>Calificación</b>	<b>5,04</b>	<b>6,61</b>	<b>6,00</b>

### Conce 1

El Cuadro 4-30, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El Cuadro 4-31 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos. Según el Cuadro 4-31, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR *semicentralizada* con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR *centralizada* con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,51. Esta diferencia se debe a que a pesar de que la *centralizada* tiene un mejor rendimiento para la producción de energía, la planta *semicentralizada* tiene una mucho mejor aceptación de la comunidad y menores costos de operación y mantenimiento. A pesar de que las dos opciones son están ubicadas en el mismo lugar, la *centralizada* abarca no solo este subsector si no que otros, los cuales pueden ser responsables por el incremento en costos iniciales y de operación y mantenimiento en la opción *centralizada*. Se recomienda implementar la opción PTAR *semicentralizada* con RAFA y lodos activados.

**Cuadro 4-30 Evaluación de sistemas de tratamiento, Conce 1.**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	1 102,47	1 112,47	1 086,06
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	21	21	13
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	64,31	64,31	65,39
Costos Adaptación (€/conexión)	276 488	276 488	276 488

**Cuadro 4-31 Evaluación de sistemas de tratamiento, Conce 1. Valor Normalizado**

	PTAR <i>semicentralizada</i> , LA	PTAR <i>semicentralizada</i> , RAFA, LA	PTAR <i>centralizada</i> , RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	6,64	10,00
DBO	9,15	9,80	9,80
SST	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	5,28	5,24	5,35
Venta Lodos	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	10,00	10,00	6,19
Costos O&M	9,00	9,00	1,00
Costos Adaptación	8,84	8,84	8,84
<b>Calificación</b>	<b>5,00</b>	<b>6,56</b>	<b>6,05</b>

*San Francisco*

El Cuadro 4-32, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El Cuadro 4-33 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados

por los respectivos pesos. Según el Cuadro 4-33, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR centralizada con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,84. Esta diferencia se debe a que a pesar de que la centralizada tiene un mejor rendimiento para la producción de energía, la planta semicentralizada tiene una mucho mejor aceptación de la comunidad, menores costos de operación y mantenimiento y una gran diferencia en cuanto a los costos de inversión inicial. La principal diferencia que hace escoger a una sobre la otra son los costos de inversión inicial, es muy probable que debido a la distancia que se debe transportar el agua los costos hayan incrementado de manera importante, haciendo que se vea la diferencia a nivel de escala, además teniendo en cuenta que el peso de ese subcriterio es muy importante. Se recomienda implementar la opción PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados.

**Cuadro 4-32 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Francisco.**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	407,09	410,70	1 086,06
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	21	21	13
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	521,48	521,48	321,91
Costos Adaptación (€/conexión)	276 488	276 488	276 488

**Cuadro 4-33 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Francisco. Valor Normalizado**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	6,64	10,00
DBO	9,15	9,80	9,80
SST	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	6,58	6,55	0,89
Venta Lodos	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	10,00	10,00	6,19
Costos O&M	4,26	4,26	6,84
Costos Adaptación	8,84	8,84	8,84
<b>Calificación</b>	<b>4,96</b>	<b>6,52</b>	<b>5,68</b>

### Entebbe

Para este y los próximos 5 subsectores, se determinó como suficiente el área verde en las propiedades como para construir un tanque séptico, por lo que se añade a las opciones la de tanque séptico con PTAR semicentralizada con RAFA y LA. El Cuadro 4-34 , presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El Cuadro 4-35 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos. Según el Cuadro 4-35, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR centralizada con RAFA y lodos activados. Sin embargo, este corresponde al mismo sistema debido a su ubicación y cobertura, así que realmente la segunda opción sería la de un tanque séptico con PTAR semicentralizada con RAFA y LA. La diferencia entre las dos opciones corresponde a aproximadamente 1,35. Esta diferencia se debe a que la opción de PTAR centralizada tiene el potencial de generar mucha más energía, tiene costos iniciales y de adaptación mucho más bajos, mejor aceptación de la comunidad y menores costos de O&M. Esta diferencia entre opciones es tan grande debido a que el sistema recomendado ya está en su mayoría construido por lo que disminuye en gran

medida los costos antes mencionados. Se recomienda implementar una PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados.

**Cuadro 4-34 Evaluación de sistemas de tratamiento, Entebbe.**

	TS, PTAR semicentralizada con RAFA y LA	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,015	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	1,49	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	15,65	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	8	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	341,72	2,73	6,33	6,62
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,98	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	14	13	13	14
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	624,79	498,87	498,87	961,70
Costos Adaptación (€/conexión)	682 131	416 524	416 524	416 524

**Cuadro 4-35 Evaluación de sistemas de tratamiento, Entebbe. Valor Normalizado**

	TS, PTAR semicentralizada con RAFA y LA	PTAR <i>semicentralizada,</i> LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,81	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	0,00	6,64	10,00
DBO	9,88	9,15	9,80	9,80
SST	7,18	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	1,00	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	0,68	9,93	9,83	9,82
Venta Lodos	10,00	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	9,29	9,29	9,29	10,00
Costos O&M	8,82	9,06	9,06	0,00
Costos Adaptación	6,29	8,12	8,12	8,12
<b>Calificación</b>	<b>5,88</b>	<b>5,68</b>	<b>7,23</b>	<b>6,88</b>

Los Geranios

El Cuadro 4-36, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El

Cuadro 4-37 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos.

Según el

Cuadro 4-37, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR centralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,21, siendo baja. Esta diferencia se debe a que la centralizada tiene un mejor rendimiento para la producción de energía y mucho menores costos de O&M debido a la escala y tiene una mejor aceptación de la comunidad mientras la semicentralizada tiene una ventaja en cuanto a los costos iniciales, básicamente porque ya está construida una planta de lodos activados y la red de alcantarillado. La diferencia principal en cuanto a construcción y ubicación es que con el sistema centralizado se tendrá una unión de varias zonas. La opción seleccionada tendrá una conducción más larga, sin embargo, se uniría con otras zonas, disminuyendo los costos de O&M por temas de cantidad de trabajadores y reportes principalmente. En este caso se seleccionó la opción de PTAR centralizada con RAFA y lodos activados.

**Cuadro 4-36 Evaluación de sistemas de tratamiento, Los Geranios.**

	TS, PTAR semicentralizada con RAFA y LA	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,015	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	1,49	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	15,65	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	8	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	488,61	2,73	6,33	70,51
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,98	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	14	13	13	14
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	761,27	625,38	625,38	93,87
Costos Adaptación (€/conexión)	682 131	416 524	416 524	416 524

**Cuadro 4-37 Evaluación de sistemas de tratamiento, Los Geranios. Valor Normalizado**

	TS, PTAR semicentralizada con RAFA y LA	PTAR <i>semicentralizada</i> , LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,81	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	0,00	6,64	10,00
DBO	9,88	9,15	9,80	9,80
SST	7,18	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	1,00	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	0,00	9,94	9,87	8,56
Venta Lodos	10,00	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	9,29	9,29	9,29	10,00
Costos O&M	2,33	3,88	3,88	9,93
Costos Adaptación	6,29	8,12	8,12	8,12
<b>Calificación</b>	<b>5,40</b>	<b>5,37</b>	<b>6,93</b>	<b>7,14</b>

### Bethel

El Cuadro 4-38, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El Cuadro 4-39 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos. Según el Cuadro 4-39, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR centralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,25, siendo baja. Esta diferencia se debe a que la centralizada tiene un mejor rendimiento para la producción de energía y mucho menores costos de O&M debido a la escala y tiene una mejor aceptación de la comunidad mientras la semicentralizada tiene una ventaja en cuanto a los costos iniciales, básicamente porque ya está construida una planta de lodos activados y la red de alcantarillado. La diferencia principal en cuanto a construcción y ubicación es que con el sistema centralizado se tendrá una unión de varias zonas. La opción seleccionada tendrá una conducción más larga, sin embargo, se uniría con otras zonas, disminuyendo los costos de O&M por temas de cantidad

de trabajadores y reportes principalmente. En este caso se seleccionó la opción de PTAR centralizada con RAFA y lodos activados.

**Cuadro 4-38 Evaluación de sistemas de tratamiento, Bethel.**

	TS, PTAR semicentralizada con RAFA y LA	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,015	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	1,49	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	15,65	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	8	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	485,85	2,73	6,33	70,51
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,98	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	14	13	13	14
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	1 023,01	887,30	887,30	93,87
Costos Adaptación (€/conexión)	682 131	416 524	416 524	416 524

**Cuadro 4-39 Evaluación de sistemas de tratamiento, Bethel. Valor Normalizado**

	TS, PTAR semicentralizada con RAFA y LA	PTAR <i>semicentralizada</i> , LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,81	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	0,00	6,64	10,00
DBO	9,88	9,15	9,80	9,80
SST	7,18	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	1,00	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	0,00	9,94	9,87	8,55
Venta Lodos	10,00	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	9,29	9,29	9,29	10,00
Costos O&M	1,02	2,22	2,22	9,18
Costos Adaptación	6,29	8,12	8,12	8,12
<b>Calificación</b>	<b>5,39</b>	<b>5,34</b>	<b>6,90</b>	<b>7,15</b>

*Montserrat*

El Cuadro 4-40, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El Cuadro 4-41 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos. Según el Cuadro 4-41, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR centralizada con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,44. Esta diferencia se debe a que la centralizada tiene un mejor rendimiento para la producción de energía, mucho mayores costos de O&M y tiene una mejor aceptación de la comunidad mientras la semicentralizada tiene ventajas en cuanto a venta de lodos y los costos iniciales, básicamente porque ya está construida una planta de lodos activados y la red de alcantarillado. La diferencia principal en cuanto a construcción y ubicación es que, a pesar de ubicarse a menos de 100 metros entre ellos, con el sistema centralizado se tendrá una unión de varias zonas que pueden estar interfiriendo en

la decisión. En este caso se seleccionó la opción de PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados.

**Cuadro 4-40 Evaluación de sistemas de tratamiento, Montserrat**

	TS, PTAR semicentralizada con RAFA y LA	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,015	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	1,49	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	15,65	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	8	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	310,72	2,73	7,24	71,97
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,98	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	14	13	13	14
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	238,53	114,71	114,71	65,39
Costos Adaptación (€/conexión)	682 131	416 524	416 524	416 524

**Cuadro 4-41 Evaluación de sistemas de tratamiento, Monserrat. Valor Normalizado**

	TS, PTAR semicentralizada con RAFA y LA	PTAR <i>semicentralizada,</i> LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,81	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	0,00	6,64	10,00
DBO	9,88	9,15	9,80	9,80
SST	7,18	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	1,00	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	1,67	9,93	9,81	8,07
Venta Lodos	10,00	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	9,29	9,29	9,29	10,00
Costos O&M	4,50	7,88	7,88	2,23
Costos Adaptación	6,29	8,12	8,12	8,12
<b>Calificación</b>	<b>5,76</b>	<b>5,57</b>	<b>7,12</b>	<b>6,68</b>

Las Marianas

El Cuadro 4-42, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El

Cuadro 4-43 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos. Según el

Cuadro 4-43, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR centralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,29, siendo relativamente baja. Esta diferencia se debe a que la centralizada tiene un mejor rendimiento para la producción de energía y mucho menores costos de O&M debido a la escala y tiene una mejor aceptación de la comunidad mientras la semicentralizada tiene una ventaja en cuanto a los costos iniciales, básicamente porque ya está construida una planta de lodos activados y la red de alcantarillado. La diferencia principal en cuanto a construcción y ubicación es que con el sistema centralizado se tendrá una unión de varias zonas. La opción seleccionada tendrá una conducción un poco más larga, sin embargo, se uniría con otras zonas, disminuyendo significativamente los costos de O&M por temas de cantidad de trabajadores y reportes principalmente. En este caso se seleccionó la opción de PTAR centralizada con RAFA y lodos activados.

**Cuadro 4-42 Evaluación de sistemas de tratamiento, Las Marianas.**

	TS, PTAR semicentralizada con RAFA y LA	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,015	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	1,49	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	15,65	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	8	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	655,74	2,73	6,33	70,51
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,98	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	14	13	13	14
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	990,35	843,11	843,11	93,87
Costos Adaptación (€/conexión)	682 131	416 524	416 524	416 524

**Cuadro 4-43 Evaluación de sistemas de tratamiento, Las Marianas. Valor Normalizado**

	TS, PTAR semicentralizada con RAFA y LA	PTAR <i>semicentralizada,</i> LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,81	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	0,00	6,64	10,00
DBO	9,88	9,15	9,80	9,80
SST	7,18	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	1,00	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	0,00	9,96	9,90	8,92
Venta Lodos	10,00	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	9,29	9,29	9,29	10,00
Costos O&M	0,96	2,30	2,30	9,14
Costos Adaptación	6,29	8,12	8,12	8,12
<b>Calificación</b>	<b>5,39</b>	<b>5,35</b>	<b>6,91</b>	<b>7,20</b>

*Las Brisas*

El Cuadro 4-44, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El

Cuadro 4-45 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos. Según el

Cuadro 4-45, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR centralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,07, siendo mínima. Esta diferencia se debe a que la centralizada tiene un mejor rendimiento para la producción de energía y mucho menores costos de O&M debido a la escala y tiene una mejor aceptación de la comunidad mientras la semicentralizada tiene una ventaja en cuanto a venta de lodos y los costos iniciales, básicamente porque ya está construida una planta de lodos activados y la red de alcantarillado. La diferencia principal en cuanto a construcción y ubicación es que con el sistema centralizado se tendrá una unión de varias zonas. La opción seleccionada tendrá una conducción mucho más larga, sin embargo, se uniría con otras zonas, disminuyendo los costos relativos del alcantarillado y de O&M por temas de cantidad de trabajadores y reportes principalmente. En este caso se seleccionó la opción de PTAR centralizada con RAFA y lodos activados.

**Cuadro 4-44 Evaluación de sistemas de tratamiento, Las Brisas.**

	TS, PTAR semicentralizada con RAFA y LA	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,015	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	1,49	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	15,65	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	8	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	217,91	2,73	6,34	70,51
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,98	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	14	13	13	14
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	502,08	384,57	384,57	93,87
Costos Adaptación (€/conexión)	682 131	416 524	416 524	416 524

**Cuadro 4-45 Evaluación de sistemas de tratamiento, Las Brisas. Valor Normalizado**

	TS, PTAR semicentralizada con RAFA y LA	PTAR <i>semicentralizada</i> , LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,81	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	0,00	6,64	10,00
DBO	9,88	9,15	9,80	9,80
SST	7,18	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	1,00	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	4,05	9,93	9,83	8,08
Venta Lodos	10,00	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	9,29	9,29	9,29	10,00
Costos O&M	3,12	4,96	4,96	9,53
Costos Adaptación	6,29	8,12	8,12	8,12
<b>Calificación</b>	<b>6,05</b>	<b>5,42</b>	<b>6,98</b>	<b>7,05</b>

### Conce 2

El Cuadro 4-46, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El Cuadro 4-47 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos. Según el Cuadro 4-47, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR centralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,20, siendo pequeña. Esta diferencia se debe a que la centralizada tiene un mejor rendimiento para la producción de energía y generación de lodos, además tiene unos costos iniciales menores, la planta semicentralizada tiene una mejor aceptación de la comunidad y menores costos de O&M. Siendo así, que a pesar de ser sistemas y ubicaciones diferentes, obtuvieron una nota muy similar; en este caso se prefiere la opción Centralizada, pero con opción de cambiar por la semicentralizada en caso de alguna dificultad o preferencia municipal.

**Cuadro 4-46 Evaluación de sistemas de tratamiento, Conce 2.**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	1726,29	1740,16	1154,93
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	28	28	25
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	55,68	55,68	93,87
Costos Adaptación (€/conexión)	334 523	334 523	334 523

**Cuadro 4-47 Evaluación de sistemas de tratamiento, Conce 2. Valor Normalizado**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	6,64	10,00
DBO	9,15	9,80	9,80
SST	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	5,07	5,03	6,70
Venta Lodos	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	10,00	10,00	8,93
Costos O&M	9,19	9,19	7,95
Costos Adaptación	8,22	8,22	8,22
<b>Calificación</b>	<b>4,95</b>	<b>6,51</b>	<b>6,71</b>

### TR – DN

El Cuadro 4-48, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El Cuadro 4-49 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos. Según el Cuadro 4-49, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR centralizada con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,8, lo cual es muy poco. Esta diferencia se debe a que a pesar de que la centralizada tiene un mejor rendimiento para la producción de energía y menor generación de lodos, la planta semicentralizada tiene mejor aceptación de la comunidad y menores costos de operación y mantenimiento. Siendo así, que, a pesar de ser sistemas y ubicaciones diferentes por casi 1 kilómetro, obtuvieron una nota muy similar; en este caso se prefiere la opción semicentralizada, pero con opción de cambiar por la centralizada en caso de alguna dificultad o preferencia municipal.

**Cuadro 4-48 Evaluación de sistemas de tratamiento, TR – DN.**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	1 094,33	1 118,90	1 154,93
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	59	59	55
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	43,01	43,01	93,87
Costos Adaptación (€/conexión)	294 826	294 826	294 826

**Cuadro 4-49 Evaluación de sistemas de tratamiento, TR - DN. Valor Normalizado**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	6,64	10,00
DBO	9,15	9,80	9,80
SST	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	5,10	4,99	4,83
Venta Lodos	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	10,00	10,00	9,32
Costos O&M	9,54	9,54	7,82
Costos Adaptación	8,64	8,64	8,64
<b>Calificación</b>	<b>4,99</b>	<b>6,54</b>	<b>6,46</b>

*San Rafael 1*

El Cuadro 4-50, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El Cuadro 4-51 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos. Según el Cuadro 4-51, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR centralizada con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,02, lo cual es muy poco. A esta diferencia se llegó debido que a pesar de que la centralizada tiene un mejor rendimiento para la producción de energía y menor generación de lodos, la planta semicentralizada tiene menores costos de operación y mantenimiento, así como costos iniciales. Siendo así, que, a pesar de ser sistemas y ubicaciones diferentes por más de 1 kilómetro, obtuvieron una nota muy similar; en este caso se prefiere la opción semicentralizada, pero con opción de cambiar por la centralizada en caso de alguna dificultad o preferencia municipal.

**Cuadro 4-50 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Rafael 1.**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	1 104,59	1 119,81	1 154,93
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	27	27	27
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	53,59	53,59	93,85
Costos Adaptación (€/conexión)	296 008	296 008	296 008

**Cuadro 4-51 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Rafael 1. Valor Normalizado**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	6,64	10,00
DBO	9,15	9,80	9,80
SST	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	5,70	5,64	5,51
Venta Lodos	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	10,00	10,00	10,00
Costos O&M	9,25	9,25	7,93
Costos Adaptación	8,55	8,55	8,55
<b>Calificación</b>	<b>5,06</b>	<b>6,62</b>	<b>6,60</b>

Los Sauces

El Cuadro 4-52, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El

Cuadro 4-53 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos. Según el

Cuadro 4-53, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR centralizada con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,4. Esta diferencia se debe a que a pesar de que la centralizada tiene un mejor rendimiento para la producción de energía y menor generación de lodos, la planta semicentralizada tiene menores costos de operación y mantenimiento y costos iniciales. Teniendo en cuenta el peso que el factor económico tiene asignado, explicaría la diferencia entre opciones. Este subsector en particular posee una línea de colección a la orilla de un río por una distancia considerable, es probable que por esta razón los costos iniciales obtuvieran una puntuación tan baja. Para este subsector se prefiere la opción de PTAR semicentralizada con RAFA y lodos activados.

**Cuadro 4-52 Evaluación de sistemas de tratamiento, Los Sauces.**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	423,72	427,40	1 154,93
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	27	27	27
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	224,55	224,55	93,87
Costos Adaptación (€/conexión)	296 008	296 008	296 008

**Cuadro 4-53 Evaluación de sistemas de tratamiento, Los Sauces. Valor Normalizado**

	PTAR <i>semicentralizada</i> , LA	PTAR <i>semicentralizada</i> , RAFA, LA	PTAR <i>centralizada</i> , RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	6,64	10,00
DBO	9,15	9,80	9,80
SST	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	7,65	7,63	3,60
Venta Lodos	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	10,00	10,00	10,00
Costos O&M	6,29	6,29	9,03
Costos Adaptación	8,55	8,55	8,55
<b>Calificación</b>	<b>5,21</b>	<b>6,77</b>	<b>6,37</b>

### San Diego

El Cuadro 4-54, presenta los valores calculados para cada indicador en cada opción tecnológica. El Cuadro 4-55 presenta los indicadores normalizados y al pie de la tabla la calificación final resultante de la sumatoria de estos indicadores normalizados ponderados por los respectivos pesos. Según el Cuadro 4-55, el tren de tratamiento que se recomienda implementar es el de PTAR *semicentralizada* con RAFA y lodos activados, seguido por PTAR *centralizada* con RAFA y lodos activados. La diferencia entre las primeras dos opciones corresponde a aproximadamente 0,23. Esta diferencia se debe a que a pesar de que la *centralizada* tiene un mejor rendimiento para la producción de energía, la planta *semicentralizada* tiene una mejor aceptación de la comunidad y menores costos de operación y mantenimiento. A pesar de que las dos opciones están ubicadas en el mismo lugar, la *centralizada* abarca no solo este subsector si no que muchos otros, los cuales pueden ser responsables por el incremento en costos iniciales y de operación y mantenimiento en la opción *centralizada*. Se recomienda implementar la opción PTAR *semicentralizada* con RAFA y lodos activados. En este caso específico, al ser la alternativa de PTAR *centralizada* para la mayoría del territorio, seguirá recibiendo caudales externos de los subsectores que así

lo requieran, sin embargo, lo que se demostró aquí es que para el subsector de San Diego es mejor trabajar una planta de tratamiento local.

**Cuadro 4-54 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Diego.**

	PTAR semicentralizada, LA	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Generación de Lodos (L/m <sup>3</sup> )	0,003	0,005	0,003
Energía (kW/m <sup>3</sup> )	0,00	1,69	2,55
DBO (mg/L)	10,80	2,52	2,52
SST (mg/L)	41,00	18,70	18,70
# de operaciones unitarias	5	7	7
Costos Iniciales (€/m <sup>3</sup> )	993,32	1 016,31	1 154,93
Venta Lodos (\$/m <sup>3</sup> )	0,17	0,35	0,22
Aceptación de la comunidad (pts.)	14	14	11
Costos O&M (€/m <sup>3</sup> )	44,83	44,83	93,87
Costos Adaptación (€/conexión)	365 967	365 967	365 967

**Cuadro 4-55 Evaluación de sistemas de tratamiento, San Diego. Valor Normalizado**

	PTAR <i>semicentralizada, LA</i>	PTAR semicentralizada, RAFA, LA	PTAR centralizada, RAFA, LA
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,00	1,00
Ruido y contaminación visual	1,00	1,00	1,00
Generación de Lodos	9,97	9,93	9,96
Energía	0,00	6,64	10,00
DBO	9,15	9,80	9,80
SST	1,00	6,44	6,44
# de operaciones unitarias	4,75	2,25	2,25
Nivel de conocimientos	1,00	1,00	1,00
Costos Iniciales	5,11	4,99	4,31
Venta Lodos	1,70	3,60	2,28
Aceptación de la comunidad	10,00	10,00	7,86
Costos O&M	9,49	9,49	7,84
Costos Adaptación	7,96	7,96	7,96
<b>Calificación</b>	<b>4,96</b>	<b>6,51</b>	<b>6,28</b>

Se determinó, respetando la priorización establecida por el modelo y según el Cuadro 4-57, que lo idóneo para el plan de manejo de las aguas residuales del cantón de La Unión sería la implementación de 13 plantas de tratamiento, debido a que, según su ubicación, algunas de las plantas locales pueden unirse a otras de mayor tamaño y que cumplen con el tipo de sistema recomendado para el subsector. En el Cuadro 4-56 se puede observar cómo se tiene una distribución variada de los sistemas seleccionados para los distintos subsectores. Posteriormente, en la Figura 4-8 se puede observar como todos estos 20 subsectores se acoplan a lo propuesto, ya sea uniéndose a subsectores más grandes o manteniéndose separados de los otros. Los subsectores para los cuales la alternativa electa fue centralizado se agruparon con los cercanos creando no la alternativa original que era de una gran planta si no algunas plantas medianas para las que fue determinado que unirse a la red inicial no era la mejor opción.

**Cuadro 4-56 Resumen de sistema de tratamiento seleccionado para cada subsector**

<b>Subsector</b>	<b>Sistema con prioridad mayor</b>
El Pizote	PTAR semicentralizada, RAFA, LA
Sur Nateste	PTAR centralizada, RAFA, LA
CENBUS	PTAR centralizada, RAFA, LA
Policías	PTAR semicentralizada, RAFA, LA
Vía Diana Rioja	PTAR centralizada, RAFA, LA
San Juan 2	PTAR semicentralizada, RAFA, LA
San Juan 1	PTAR semicentralizada, RAFA, LA
Conce 1	PTAR semicentralizada, RAFA, LA
San Francisco	PTAR semicentralizada, RAFA, LA
Entebbe	PTAR semicentralizada, RAFA, LA
Los Geranios	PTAR centralizada, RAFA, LA

<b>Subsector</b>	<b>Sistema con prioridad mayor</b>
Bethel	PTAR centralizada, RAFA, LA
Montserrat	PTAR semicentralizada, RAFA, LA
Las Marianas	PTAR centralizada, RAFA, LA
Las Brisas	PTAR centralizada, RAFA, LA
Conce 2	PTAR centralizada, RAFA, LA
TR - DN	PTAR semicentralizada, RAFA, LA
San Rafael 1	PTAR semicentralizada, RAFA, LA
Los Sauces	PTAR semicentralizada, RAFA, LA
San Diego	PTAR semicentralizada, RAFA, LA

**Cuadro 4-57 Resumen de los sistemas de tratamiento recomendados**

<b>Alternativa</b>	<b>Recomendaciones de uso en subsectores</b>
PTAR centralizada UASB+LA	8
PTAR local, UASB+LA	12
<b>Total general</b>	<b>20</b>

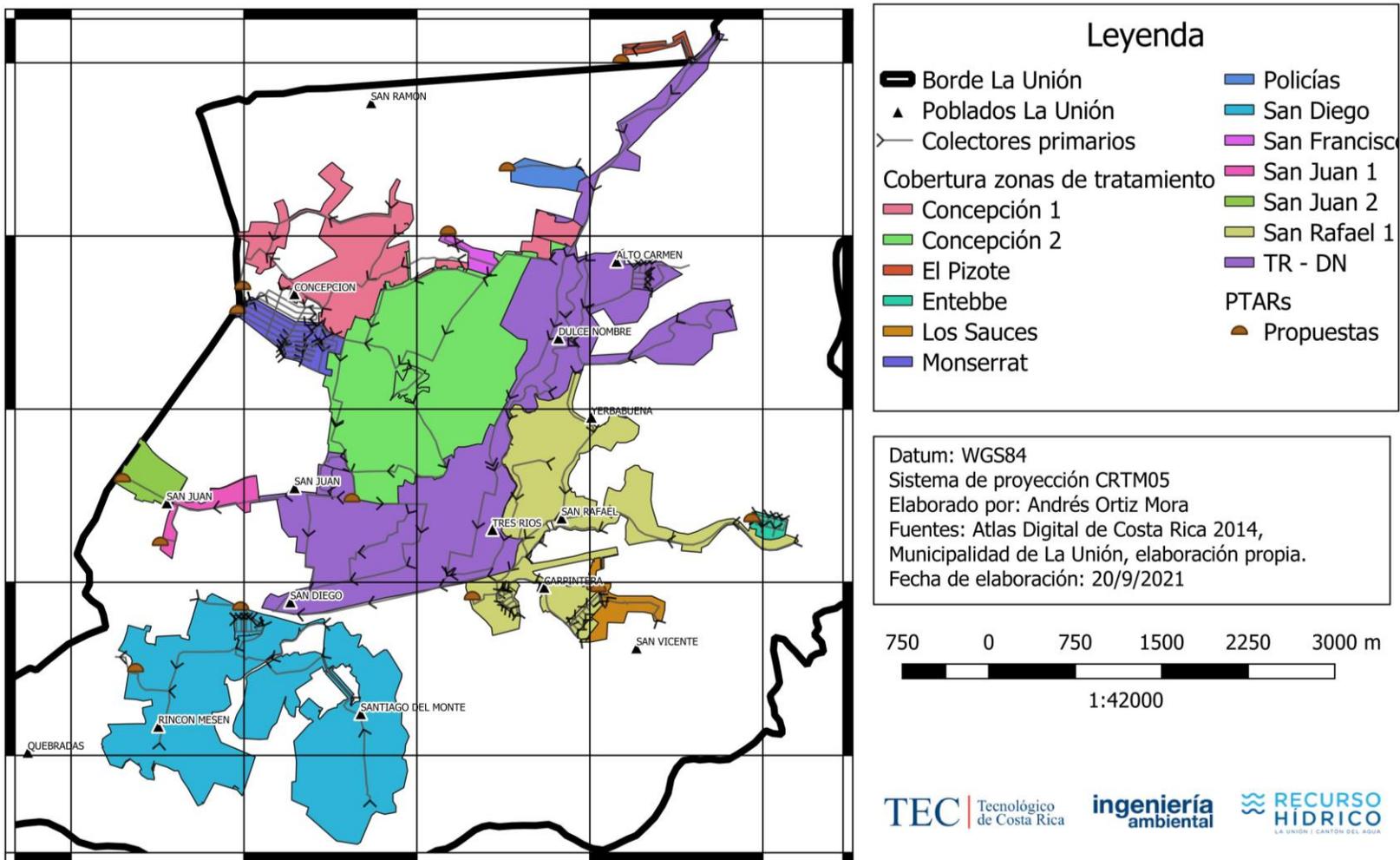


Figura 4-8 Distribución de los sistemas de tratamiento recomendados según el análisis multicriterio



## 5 CONCLUSIONES

- Para la zona de cobertura de este proyecto, no resultó factible la implementación e sistemas de tratamiento que requirieran una gran área para su correcto funcionamiento, debido a la alta densidad poblacional y poca disponibilidad de espacios amplios.
- A pesar de que el plan regulador de la Municipalidad de La Unión no lo permite, un gran porcentaje de las propiedades no tiene área verde suficiente y por ende no es factible permitir el uso de sistemas individualizados como tanque sépticos y zanjas de infiltración ya que se incumpliría con los requerimientos técnicos mínimos sobre diseño y construcción de estos.
- Al ser prioridad para la Municipalidad de La Unión lo ambiental sobre lo económico, fue posible la implementación de tecnologías de mejor calidad de efluente y más controles como lo son las plantas de tratamiento. Esto quedó demostrado en el análisis multicriterio, obteniendo en general mayor calificación los sistemas que incluyeron ese tipo de tecnologías.
- En términos generales, para el cantón de La Unión las opciones más factibles de tratamiento de aguas residuales son las plantas de tratamiento, tal y como se viene haciendo con las seis que ya se encuentran en funcionamiento.
- El análisis multicriterio demostró que es recomendable, la utilización de plantas de tratamiento con RAFA seguido de sistema de lodos activados para todas las plantas de tratamiento del área estudiada ya que se obtuvo mejor calificación para estos sistemas en la mayoría de los subsectores analizados.
- Con respecto al grado de centralización de los sistemas de tratamiento, se concluye en 12 de los subsectores analizados, que la opción de tratamiento más factible es la construcción o adaptación de plantas de tratamiento semicentralizadas.
- Para los ocho subsectores en los que se seleccionó el sistema centralizado, se concluye que la opción de tratamiento más factible es construir o adaptar las instalaciones existentes para el tratamiento según lo indicado en la Figura 5-3.

## 6 RECOMENDACIONES

- Al realizar el diseño de estos sistemas de tratamiento, se puede utilizar como referencia lo calculado en este proyecto como una aproximación a la situación actual, sin embargo, se debe tomar en cuenta las proyecciones de población y densificación de la zona al momento de la construcción, de esta manera se evita recargar el sistema y se tendrá un mejor funcionamiento por más años.
- En caso de que cambie el área de cobertura del servicio municipal, se recomienda repetir el análisis multicriterio para las nuevas zonas y definir la mejor opción con base en la experiencia generada por este proyecto.
- Prestar especial atención a propiedades a las que por su ubicación sea técnicamente complicada su conexión al sistema de alcantarillado, además tener una guía para que en esos casos se permita el uso de un sistema individualizado con el seguimiento adecuado. Mientras estas propiedades específicas cumplan con el área verde mínima definida en este trabajo.
- Realizar un análisis más detallado para la escogencia de los trenes de tratamiento a implementar, debido a que pueden existir opciones o variaciones del tren propuesto que se adapten mejor que otras a las necesidades locales y quedaron por fuera del alcance del proyecto.
- Se recomienda realizar un estudio que analice la potencial demanda local de los lodos y sus subproductos para seleccionar la forma óptima de comercialización y aprovechamiento. Esto debido a que, dependiendo de eso, se puede enfocar el proceso de tratamiento para que sean lo más rentables posible para la comunidad.
- Si se desea mayor confiabilidad en los datos suministrados por la población, se recomienda aumentar la cantidad de encuestas realizadas, así obtener datos más confiables sobre los sistemas de tratamiento y el área verde en las casas.
- Ya que será complicada la compra de terrenos amplios, una recomendación es tener terrenos pequeños para el tratamiento de aguas y espesamiento de lodos para luego transportarlos a un terreno de mayor tamaño para su correcto secado y aprovechamiento.
- Se recomienda que se realice un análisis de la viabilidad de compra de los terrenos donde irían ubicadas las PTARs y la capacidad de contratar el personal que se encargue de todo el manejo de estas. Si por algún motivo fuera del alcance del presente documento no fuera viable alguna ubicación, se podrá tomar en cuenta la segunda opción mejor evaluada e implementarla.

## 7 REFERENCIAS

- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. (2017). *Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones*.
- Gikas, P., & Tchobanoglous, G. (2009). The role of satellite and decentralized strategies in water resources management. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.08.016>
- Gobelak, A., Grosser, A., Kacprzak, M., & Kamizela, T. (2019). Sewage sludge processing and management in small and medium-sized municipal wastewater treatment plant-new technical solution. *Journal of Environmental Management*, 234(October 2018), 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.111>
- Gutiérrez, J. J. Z. (2020). *Diseño de un campo de drenaje de agua residual ordinaria con enfoque en remediación, más allá de su disposición en el subsuelo urbano*. Tecnológico de Costa Rica.
- Hegg, S. S. (2018). *Evaluación de optimizaciones de sistemas individuales de tratamiento de aguas residuales*. Tecnológico de Costa Rica.
- Ho, L., & Goethals, P. L. M. (2020). Municipal wastewater treatment with pond technology: Historical review and future outlook. *Ecological Engineering*, 148(March), 105791. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105791>
- Jafarinejad, S. (2020). A framework for the design of the future energy-efficient, cost-effective, reliable, resilient, and sustainable full-scale wastewater treatment plants. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 13, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.01.001>
- Lopez Fonseca, M. (2020). Proyecto de mejoramiento ambiental del Área metropolitana de San José.
- Mara, D. D. (2003). *Domestic Wastewater Treatment in developing countries*. London, UK: Earthscan.
- Mexichem Costa Rica. (2017). Precio Sugerido del fabricante. Costa Rica.
- Ministerio de Salud. (2019). Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos.
- Ministerio de Salud, & Ministerio de Ambiente y Energía. Reglamento de Vertido y Reuso

- de Aguas Residuales (2007). San José.
- Ministerio de Salud, & Ministerio de Ambiente y Energía. (2019). Reglamento para la disposición al subsuelo de aguas residuales ordinarias tratadas.
- Municipalidad de La Unión. (2012). Reglamento para la operación y administración del alcantarillado sanitario y plantas de tratamiento de aguas residuales del cantón de La Unión, 1–24. Retrieved from [http://www.launion.go.cr/images/Reglamento\\_de\\_Plantas\\_de\\_Tratamiento.pdf](http://www.launion.go.cr/images/Reglamento_de_Plantas_de_Tratamiento.pdf)
- Municipalidad de La Unión. (2018). PLAN REGULADOR DEL CANTÓN DE LA UNIÓN. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Noyola, A., Morgan, J., & Guereca, L. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*. Retrieved from <http://es.slideshare.net/EdwinMamaniVilcapaza/seleccion-de-tecnologias-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-municipales>
- ONU. (2020). Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento | PNUD. Retrieved September 24, 2020, from <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html#targets>
- Ortiz, A. (2017). *Diagnóstico y propuesta de mejoras de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Municipalidad de La Unión, en la comunidad de Montserrat en Concepción, Cartago*. Tecnológico de Costa Rica. Retrieved from [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9225/TFG\\_Ariana\\_Ortiz\\_Obando\\_FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9225/TFG_Ariana_Ortiz_Obando_FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Pacheco, J. F., & Contreras, E. (2008). *Manual para la evaluación multicriterio para programas y proyectos*. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES). <https://doi.org/978-92-1-323231-6>
- Padrón-Páez, J. I., Almaraz, S. D. L., & Román-Martínez, A. (2020). Sustainable wastewater treatment plants design through multiobjective optimization. *Computers and Chemical Engineering, 140*. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106850>
- Rodríguez, W. (2016). Estudio del estado actual para el desarrollo de un Plan de Saneamiento Ambiental para la comunidad urbana del cantón de La Unión, Cartago, 90.
- Roefs, I., Meulman, B., Vreeburg, J. H. G., & Spiller, M. (2016). Centralised, decentralised

- or hybrid sanitation systems? Economic evaluation under urban development uncertainty and phased expansion. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.051>
- Rosales, E. (2003). Tanques sépticos. Conceptos teóricos base y aplicaciones (detalles que se han olvidado o la práctica ha venido tergiversando), 59.
- Rosales Escalante, E. (2008). *Tanques Sépticos Conceptos Teóricos Base y Aplicaciones*.
- Shun Dar Lin, P. D. (2014). *Water and Wastewater Calculations Manual, Third Edition* (3rd editio). New York: McGraw-Hill Education. Retrieved from <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071819817>
- SINAC. (2016). Plan General de Manejo 2017-2021. Zona Protectora Río Tiribí. Cartago-Costa Rica: Área de Conservación Cordillera Volcánica Central (ACCVC).
- Solano, J. (2019). *Diseño de un sistema de tratamiento para las aguas residuales de la Urbanización El Atardecer en Quircot, Cartago*. *Journal of Chemical Information and Modeling*.
- Sperling, M. von, & Chernicharo, C. A. de L. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*. Brazil.
- Tchobanoglous, G. (2014). *Wastewater Engineering*. New York: McGraw-Hill Education. <https://doi.org/10.1002/9780470168219.ch8>
- Tian, T., Yang, Q., Wei, G., Cheung, S. G., Shin, P. K. S., Wong, Y. S., ... Tam, N. F. Y. (2020). Changes of substrate microbial biomass and community composition in a constructed mangrove wetland for municipal wastewater treatment during 10-years operation. *Marine Pollution Bulletin*, 155(April), 111095. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111095>
- Tilley, Elizabeth; Ulrich, Lukas; Lüthi, C., & Reymond, Philippe; Schertenleib, Roland; Zurbrügg, C. (2018). Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento. Segunda Edición Revisada. Retrieved from [https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/schwerpunkte/sesp/CLUES/Compendium\\_Spanish\\_pdfs/compendio\\_sp.pdf](https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/schwerpunkte/sesp/CLUES/Compendium_Spanish_pdfs/compendio_sp.pdf)
- Torres, M., Paz, K., & Salazar, F. (2006). Tamaño de una muestra para una investigación de mercado. *Boletín Electrónico*, (02), 1–13. Retrieved from [http://www.fsalazar.bizland.com/URL\\_INGENIERIA\\_PRIMERO/URL\\_02\\_BAS02.pdf](http://www.fsalazar.bizland.com/URL_INGENIERIA_PRIMERO/URL_02_BAS02.pdf)

- Valenzuela, D. (2021). *MODELO DE COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN EL VALLE DEL CAUCA - TECNOLOGÍA LODOS ACTIVADOS Y UASB*. Pontificia Universidad Javeriana Cali.
- Vargas, C., & Espinoza, Y. (2021). Estudio Hidrogeológico Municipalidad de la Unión. La Unión.
- von Sperling, M. (2015). *Biological Wastewater Treatment Series: Volume 1, Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal* (Vol. 1). London, UK: IWA Publishing.
- WHO, & UNICEF. (2019). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017. Special focus on inequalities. New York: United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization, 2019., 1–71.
- Wilderer, P. A., & Schreff, D. (2000). Decentralized and centralized wastewater management: a challenge for technology developers. *Water Science and Technology*, 41(1), 1–8. Retrieved from <https://iwaponline.com/wst/article-pdf/41/1/1/32554/1.pdf>
- Yang, S., Zheng, Y., Mao, Y., Xu, L., Jin, Z., Zhao, M., ... Zheng, X. (2021). Domestic wastewater treatment for single household via novel subsurface wastewater infiltration systems (SWISs) with NiiMi process: Performance and microbial community. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123434>
- Zhou, X., Li, Z., Zheng, T., Yan, Y., Li, P., Odey, E. A., ... Uddin, S. M. N. (2018). Review of global sanitation development. *Environment International*, 120(July 2018), 246–261. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.047>

## **8 APÉNDICES**

## APÉNDICE 1: ENCUESTA AGUAS RESIDUALES, LA UNIÓN. ESPACIO DISPONIBLE



# Encuesta Aguas residuales, La Unión. Espacio disponible

La siguiente encuesta tiene la finalidad de recolectar datos que serán utilizados para la selección de la mejor opción de tratamiento de las aguas residuales (negras y jabonosas) de las comunidades abastecidas de agua potable por parte de la municipalidad de La Unión. De esta forma, se disminuirá en gran medida la contaminación al suelo y agua de nuestro cantón.

Este proyecto forma parte de la tesis de licenciatura de un estudiante de ingeniería ambiental y cuenta con el apoyo de la municipalidad, específicamente de la Dirección de Recurso Hídrico.

Por favor brinde información lo más exacta posible para obtener un mejor resultado. Los datos serán anónimos y utilizados únicamente para generar políticas públicas y proyectos, no tendrán ninguna implicación legal para quienes completen el formulario.

\* Obligatorio

### Datos generales - Ubicación

Los siguientes datos se utilizarán para relacionar la ubicación de la casa con los sectores que se encuentran definidos para el proyecto, para así proponer la mejor opción de tratamiento a su comunidad.

1. Distrito \*

- Tres Ríos
- San Rafael
- San Juan
- San Diego
- Concepción
- Dulce Nombre
- San Ramón
- Río Azul

2. Zona \*

- Aislado
- PTARs
- Gravedad Concepción
- Gravedad TresRíos-DulceNombre
- Gravedad San Rafael
- Gravedad San Diego

3. Ubicación aproximada

## Datos generales - Área verde

4. ¿Tiene jardín o área verde al frente de la construcción? \*

*Dentro de la propiedad*

Sí

No

5. ¿Cuál es el LARGO (frente) aproximado del área verde en el FRENTE de su propiedad? En metros. \*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.  
Solo cuente lo que está DENTRO de la propiedad, no área verde de la acera.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

6. ¿Cuál es el ANCHO aproximado del área verde en el FRENTE de su propiedad? En metros. \*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.  
Solo cuente lo que está DENTRO de la propiedad, no área verde de la acera.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

7. ¿Tiene jardín o área verde detrás de la construcción? \*

*Dentro de la propiedad.*

Sí

No

8. ¿Cuál es el LARGO (frente) aproximado del área verde DETRÁS de su propiedad? En metros. \*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

9. ¿Cuál es el ANCHO aproximado del área verde DETRÁS de su propiedad? En metros. \*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

10. ¿Tiene jardín o área verde al lado de la construcción? \*

*Dentro de la propiedad.*

Sí

No

11. ¿Cuál es el LARGO (frente) aproximado del área verde AL LADO de su propiedad? En metros. \*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

12. ¿Cuál es el ANCHO aproximado del área verde AL LADO de su propiedad? En metros. \*  
*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

## Finalizar

13. Muchas gracias por participar de la encuesta, esta información es muy valiosa y ayudará a plantear la mejor alternativa para las aguas residuales de su comunidad. Si así lo desea puede enviar su comentario en esta sección o escribir un correo a [anortiz@estudiantec.cr](mailto:anortiz@estudiantec.cr) (<mailto:anortiz@estudiantec.cr>) con sus consultas.

Comentarios:

---

Este contenido no está creado ni respaldado por Microsoft. Los datos que envíe se enviarán al propietario del formulario.

Microsoft Forms

11/28/2021

## APÉNDICE 2: ENCUESTA AGUAS RESIDUALES, LA UNIÓN



# Encuesta Aguas residuales, La Unión

La siguiente encuesta tiene la finalidad de recolectar datos que serán utilizados para la selección de la mejor opción de tratamiento de las aguas residuales (negras y jabonosas) de las comunidades abastecidas de agua potable por parte de la municipalidad de La Unión. De esta forma, se disminuirá en gran medida la contaminación al suelo y agua de nuestro cantón.

Este proyecto forma parte de la tesis de licenciatura de un estudiante de ingeniería ambiental y cuenta con el apoyo de la municipalidad, específicamente de la Dirección de Recurso Hídrico.

Por favor brinde información lo más exacta posible para obtener un mejor resultado. Los datos serán anónimos y utilizados únicamente para generar políticas públicas y proyectos, no tendrán ninguna implicación legal para quienes completen el formulario.

\* Obligatorio

### Datos generales - Residencia

Los siguientes datos se utilizarán para relacionar la ubicación de la casa con los sectores que se encuentran definidos para el proyecto, para así proponer la mejor opción de tratamiento a su comunidad.

1. ¿Usted vive en el cantón de La Unión? (Tres Ríos, San Rafael, San Juan, Concepción, San Diego, Dulce Nombre, San Ramón, Río Azul) \*

Sí

No

2. Distrito \*

- Tres Ríos
- San Rafael
- San Juan
- San Diego
- Concepción
- Dulce Nombre
- San Ramón
- Río Azul

3. ¿Dónde se encuentra su hogar? \*

- Barrio o caserío
- Residencial
- Urbanización
- Condominio

4. Dirección aproximada (barrio, punto de referencia cercano, calle, avenida, urbanización, condominio) \*

## Datos generales - Sistema de tratamiento local

5. ¿Quién es su proveedor de agua potable? Si no está seguro seleccionar "No sé" \*

- AyA
- Municipalidad
- ASADA (Asociación administradora de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados)
- No sé

6. En su caso, ¿las aguas de lavado (grises o jabonosas) y del inodoro (negras) van al mismo lugar? Es decir, se mezclan en algún punto. \*

- Sí
- No
- Algunas sí otras no
- No sé

7. ¿Hacia dónde van esas aguas? Negras y grises \*

*Puede seleccionar más de una opción*

- Detrás de la casa o local (lejos de la calle)
- Adelante de la casa o local (cerca de la calle)
- Al costado de la casa o local
- No sé

8. ¿Tiene jardín o área verde al frente de la construcción? \*

*Dentro de la propiedad*

Sí

No

9. ¿Cuál es el LARGO (frente) aproximado del área verde en el FRENTE de su propiedad?  
En metros. \*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.  
Solo cuente lo que está DENTRO de la propiedad, no área verde de la acera.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

10. ¿Cuál es el ANCHO aproximado del área verde en el FRENTE de su propiedad? En  
metros. \*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.  
Solo cuente lo que está DENTRO de la propiedad, no área verde de la acera.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

11. ¿Tiene jardín o área verde detrás de la construcción? \*

*Dentro de la propiedad.*

Sí

No

12. ¿Cuál es el LARGO (frente) aproximado del área verde DETRÁS de su propiedad? En metros. \*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

13. ¿Cuál es el ANCHO aproximado del área verde DETRÁS de su propiedad? En metros. \*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

14. ¿Tiene jardín o área verde al lado de la construcción? \*

*Dentro de la propiedad.*

Sí

No

15. ¿Cuál es el LARGO (frente) aproximado del área verde AL LADO de su propiedad? En metros. \*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

16. ¿Cuál es el ANCHO aproximado del área verde AL LADO de su propiedad? En metros. \*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

17. ¿Dónde van las aguas negras (del inodoro) de su propiedad? \*

*Tanque séptico: es el más utilizado, normalmente formado por alcantarillas, estructuras prefabricadas o de concreto. Se ubica detrás o al frente de la propiedad. Tiene una tapa cuadrada mediana o pequeña circular.*

*Drenaje: sistema de tuberías bajo tierra para que el agua pase al suelo.*

*Vertido a río o quebrada: Tubo que llega directamente al lugar, se puede ver como sale el agua.*

*Vertido a caños: Por el caño pasa el agua de lluvia. Salida al caño frente a la propiedad, a la par de la calle, se puede ver la salida del agua. En algunos casos el caño puede estar tapado.*

*Alcantarillado sanitario: tuberías bajo tierra que recogen las aguas de un grupo de casas o propiedades y las llevan a un lugar específico. Aplica para condominios o similares donde las aguas se llevan todas al mismo lugar.*

*Sin tratamiento: la tubería va directamente al río, quebrada o caño.*

- Sin tratamiento, Vertido a río, quebrada o caño
- Tanque Séptico + drenaje
- Tanque Séptico + vertido a río o quebrada
- Tanque séptico + vertido a caños
- Alcantarillado Sanitario
- Otro
- No sé

18. ¿De qué material es su tanque séptico? \*

*En su mayoría*

*Seleccionar solo una opción.*

- Plástico
- Alcantarilla (tubos de alcantarilla)
- Cemento, concreto o blocks (construido)
- Otro

19. ¿Qué forma tiene su tanque séptico? \*

*Visto desde arriba*

- Redondo
- Rectangular
- Cuadrado

20. ¿Cuánto mide aproximadamente de lado a lado (pasando por el centro el círculo)?  
Medir a la altura del agua, no la tapa. En metros \*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

*Si no puede medirlo o no recuerda escriba 0*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

21. ¿Cuánto mide el lado del tanque séptico? En metros, lo más aproximado posible. \*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

*Se puede medir el lado sin abrir el tanque. Por el tamaño del "techo"*

*Si no puede medirlo o no recuerda escriba 0*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

22. ¿Cuánto mide el ancho del tanque séptico? En metros, lo más aproximado posible. \*

*El ancho es el lado más corto del tanque séptico*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

*Se puede medir el ancho sin abrir el tanque. Por el tamaño del "techo"*

*Si no puede medirlo o no recuerda escriba 0*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

23. ¿Cuánto mide el largo del tanque séptico? En metros, lo más aproximado posible. \*

*El largo es el lado más largo del tanque séptico.*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

*Se puede medir el largo sin abrir el tanque. Por el tamaño del "techo"*

*Si no puede medirlo o no recuerda escriba 0.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

24. ¿Cuánto es la profundidad del tanque séptico? En metros, lo más aproximado posible. \*

*La profundidad del tanque séptico es desde la tapa hasta el fondo.*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

*Si no puede medirlo o no recuerda escriba 0.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

25. ¿Cuál es el nombre y tamaño de su sistema de tratamiento de aguas? \*

*Si no conoce el nombre, trate de describirlo.*

*Si no sabe, escriba "No sé"*

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the user to provide the name and size of their water treatment system.

26. ¿Dónde van las aguas grises (de lavado, jabonosas) de su propiedad?

Si cumple varias opciones seleccione la opción para la mayoría de las aguas grises. \*

*Tanque séptico: es el más utilizado, normalmente formado por alcantarillas, estructuras prefabricadas o de concreto. Se ubica detrás o al frente de la propiedad. Tiene una tapa cuadrada mediana o pequeña circular.*

*Drenaje: sistema de tuberías bajo tierra para que el agua pase al suelo.*

*Vertido a río o quebrada: Tubo que llega directamente al lugar, se puede ver como sale el agua.*

*Vertido a caños: Por el caño pasa el agua de lluvia. Salida al caño frente a la propiedad, a la par de la calle, se puede ver la salida del agua. En algunos casos el caño puede estar tapado.*

*Alcantarillado sanitario: tuberías bajo tierra que recogen las aguas de un grupo de casas o propiedades y las llevan a un lugar específico. Aplica para condominios o similares donde las aguas se llevan todas al mismo lugar.*

*Sin tratamiento: la tubería va directamente al río, quebrada o caño.*

- Sin tratamiento, Vertido a río, quebrada o caño
- Tanque Séptico + drenaje
- Tanque Séptico + vertido a río o quebrada
- Tanque séptico + vertido a caños
- Alcantarillado Sanitario
- Reutilización (riego)
- Otro
- No sé

27. ¿El tanque séptico al que van las aguas grises es el mismo que el de las negras? \*

*Si tiene 2 tanques sépticos responda "No"*

- Sí
- No

28. ¿De qué material es su tanque séptico? \*

*En su mayoría*

*Seleccionar solo una opción.*

- Plástico
- Alcantarilla (tubos de alcantarilla)
- Cemento, concreto o blocks (construido)
- Otro

29. ¿Qué forma tiene su tanque séptico? \*

*Visto desde arriba*

- Redondo
- Rectangular
- Cuadrado

30. ¿Cuánto mide aproximadamente de lado a lado (pasando por el centro el círculo)?  
Medir a la altura del agua, no la tapa. En metros \*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

*Si no puede medirlo o no recuerda escriba 0*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

31. ¿Cuánto mide el lado del tanque séptico? En metros, lo más aproximado posible. \*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

*Se puede medir el lado sin abrir el tanque. Por el tamaño del "techo"*

*Si no puede medirlo o no recuerda escriba 0*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

32. ¿Cuánto mide el ancho del tanque séptico? En metros, lo más aproximado posible. \*

*El ancho es el lado más corto del tanque séptico*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

*Se puede medir el ancho sin abrir el tanque. Por el tamaño del "techo"*

*Si no puede medirlo o no recuerda escriba 0*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

33. ¿Cuánto mide el largo del tanque séptico? En metros, lo más aproximado posible. \*

*El largo es el lado más largo del tanque séptico.*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

*Se puede medir el largo sin abrir el tanque. Por el tamaño del "techo"*

*Si no puede medirlo o no recuerda escriba 0.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

34. ¿Cuánto es la profundidad del tanque séptico? En metros, lo más aproximado posible. \*

*La profundidad del tanque séptico es desde la tapa hasta el fondo.*

*Un metro es aproximadamente un paso largo de una persona promedio.*

*Si no puede medirlo o no recuerda escriba 0.*

Escriba un número mayor que o igual a 0.

35. ¿Cuál es el nombre y tamaño de su sistema de tratamiento de aguas? \*

*Si no conoce el nombre, trate de describirlo.*

*Si no sabe, escriba "No sé"*

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the user to provide the name and size of their water treatment system.

## Otras opciones de tratamiento

36. Si existiera una mejor alternativa para tratar sus aguas residuales, ¿la utilizaría? \*

Sí

No

37. Suponiendo que las siguientes opciones fueran más eficientes y económicas a la actual, seleccione cuáles estaría dispuesto a utilizar. \*

*Puede elegir varias opciones.*

*Tratamiento mejorado en casa: Se reparan y mejoran los tanques sépticos existentes. El agua no sale de su propiedad y pasa al suelo con una mejor calidad.*

*Planta de tratamiento grande: Se construyen instalaciones en un lugar del cantón y toda el agua es llevada ahí por tubos bajo tierra, en la calle pública. Se tiene mejor control de la calidad del agua.*

*Plantas de tratamiento locales: Se construyen instalaciones en los barrios o poblaciones y el agua del lugar es llevada ahí por tubos bajo tierra, en la calle pública. Se tiene mejor control de la calidad.*

Tratamiento mejorado en casa

Planta de tratamiento grande

Plantas de tratamiento locales

## Selección de prioridades

En esta sección se le solicitará que indique que tan importante son para usted algunas características de los sistemas de tratamiento que se considerarán.

Complete esta sección de la forma más honesta posible, pensando en lo que es más importante para USTED.

38. Para usted, con respecto a los sistemas de tratamiento a evaluar: ¿Qué tan importantes son las siguientes características? \*

*Olores e insectos: algunas alternativas podrían producir olores o insectos en su funcionamiento habitual.*

*Ruido y contaminación visual: algunas alternativas implican equipo trabajando todo el día o tener instalaciones que podrían obstaculizar la vista.*

	Nada Importante	Poco importante	Medianamente Importante	Importante	Muy Importante
Evitar olores e insectos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Evitar ruido y contaminación visual	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

39. Para usted, con respecto a los sistemas de tratamiento a evaluar: ¿Qué tan importantes son las siguientes características? \*

*Aceptación de la comunidad: que tanto le gusta a la comunidad un tipo de sistema o que tan de acuerdo están con la idea de que esa propuesta se lleve a cabo.*

*Tarifa del servicio: será lo que se debe pagar mensualmente a la municipalidad para tener el servicio de tratamiento. Estos costos son básicamente por la operación y mantenimiento de las instalaciones elegidas.*

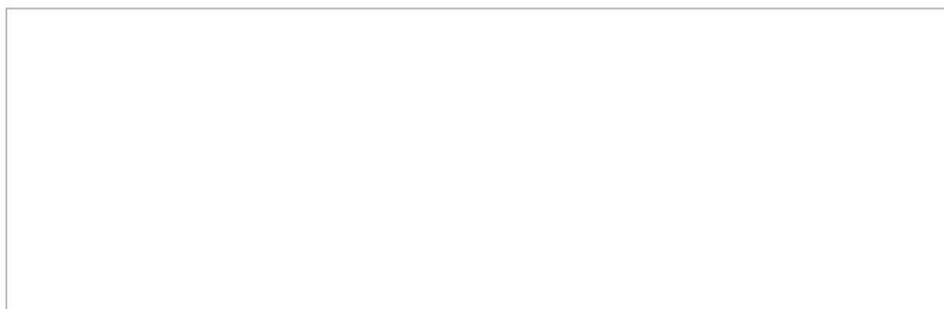
*Costos de adaptación: La inversión que cada casa deberá hacer para utilizar el sistema nuevo. Esto dependerá del estado y características de la propiedad actualmente. Son las modificaciones que deberán hacer dentro de la propiedad.*

	Nada Importante	Poco importante	Medianamente Importante	Importante	Muy Importante
Buena aceptación de la comunidad	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Baja tarifa del servicio	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bajos costos de adaptación	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

## Finalizar

40. Muchas gracias por participar de la encuesta, esta información es muy valiosa y ayudará a plantear la mejor alternativa para las aguas residuales de su comunidad. Si así lo desea puede enviar su comentario en esta sección o escribir un correo a [anortiz@estudiantec.cr](mailto:anortiz@estudiantec.cr) (<mailto:anortiz@estudiantec.cr>) con sus consultas.

Agradecemos que comparta el cuestionario con sus contactos del cantón para obtener mejores resultados.



---

Este contenido no está creado ni respaldado por Microsoft. Los datos que envíe se enviarán al propietario del formulario.

 Microsoft Forms

11/28/2021



### APÉNDICE 3: JERARQUIZACIÓN DE CRITERIOS Y SUBCRITERIOS

Como parte de las reuniones que se mantuvieron con los personeros de la municipalidad de La Unión y como resultado de la búsqueda bibliográfica se propusieron cuatro criterios básicos para la evaluación de los sistemas, estos fueron: Ambiental, Técnico, Económico y Social. Además de eso se consensuaron los subcriterios para cada uno de los cuatro criterios iniciales. La jerarquización se compuso principalmente por 3 etapas, la priorización por parte de expertos, la priorización por parte de la comunidad y la comprobación de consistencia. En varias reuniones sostenidas con personal de la Dirección de Recurso Hídrico de la Municipalidad de La Unión se conversó sobre la importancia que tendrían los criterios para la selección de los sistemas de tratamiento. Se decidió que, para los criterios y subcriterios que se deben basar en criterios técnicos, esa dirección se encargaría de definir la importancia, mientras que en los subcriterios que dependen de la percepción o preferencia de los habitantes serían ellos quienes definan las prioridades. Utilizando la escala de Saaty (Cuadro A.3.1) (Pacheco & Contreras, 2008); se realizó un taller donde se determinó la importancia de una sobre la otra. Para los criterios generales se obtuvo una mayor importancia en lo ambiental, seguido por lo económico y social, para finalizar con lo técnico (Cuadro A.3.2)

Cuadro A.3.1 Escala de Saaty

Intensidad	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra
7	Muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica
9	Extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta y totalmente clara.
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes
Recíprocos	$a_{ij}=1/a_{ji}$	Hipótesis del método

**Cuadro A.3.2 Matriz de comparación de criterios, La Unión**

Nivel 1					
Criterios Generales					
	Ambiental	Técnico	Económico	Social	Peso %
Ambiental	1,00	7,00	5,00	5,00	62,39
Técnico	0,14	1,00	0,20	0,33	5,36
Económico	0,20	5,00	1,00	1,00	17,15
Social	0,20	3,00	1,00	1,00	15,10
				Total	100

En contraste, se consultó en las encuestas para hogares realizadas, cuales subcriterios son en comparación más importantes que otros, esto únicamente para los subcriterios de Ruido y contaminación visual y Potencial producción de olores e insectos en el criterio ambiental y a aceptación, costos de operación y mantenimiento y costos de adaptación; esto ya que previamente se había decidido. Los resultados se tabulan y se les asigna un puntaje que depende de lo seleccionado en las encuestas. Los pesos de subcriterios, que incluyen tanto las escogidas por profesionales como las seleccionadas mediante puntuaciones se presentan en los cuadros A.3.3, A.3.4, A.3.5, A.3.6, A.3.7. Se calcula mediante la metodología recomendada por Pacheco & Contreras, cual es el porcentaje que corresponderá a cada criterio y subcriterio, esto también es conocido como peso. Y se comprueba que entre cada comparación se llegue a abarcar el 100%.

**Cuadro A.3.3 Matriz de comparación de subcriterios Ambientales, La Unión**

	Entorno	Generación de residuos	de Remoción de contaminantes	Peso %
Entorno	1,00	3,00	0,20	19,48
Generación de residuos	0,33	1,00	0,17	8,82
Remoción de contaminantes	5,00	6,00	1,00	71,70
			Total	100,00

**Cuadro A.3.4 Matriz de comparación de subcriterios Técnicos, La Unión**

	Nivel de complejidad	de Diseño, construcción y operación	Peso %
Nivel de complejidad	1,00	0,14	12,50
Diseño, construcción y operación	7,00	1,00	87,50
		Total	100,00

**Cuadro A.3.5 Matriz de comparación de subcriterios Económicos, La Unión**

	Costos inversión inicial	Venta de subproductos	Peso %
Costos inversión inicial	1,00	7,00	87,50
Venta de subproductos	0,14	1,00	12,50
		Total	100,00

**Cuadro A.3.6 Matriz de comparación de subcriterios Sociales, La Unión**

	Aceptación	Costos O&M	Costos adaptación	Peso %
Aceptación	1	1	1	33,33
Costos O&M	1	1	1	33,33
Costos adaptación	1	1	1	33,33
			Total	100,00

**Cuadro A.3.7 Matriz de comparación de subcriterios Ambientales, tercer nivel, La Unión**

	Potencial producción de olores e insectos	de Ruido y contaminación visual	Peso %
Potencial producción de olores e insectos	1,00	1,10	52,38

Ruido y contaminación visual	0,91	1,00	47,62
			Total 100,00

Continuando con las recomendaciones de los mismos autores, se procede a la comprobación de la consistencia, esto indica si los resultados son válidos. Para esta comprobación se realiza comprobando que el valor de la siguiente Relación de consistencia sea menor a 0,1.

$$RC = \frac{CI}{RI}$$

Donde:

CI es el Índice de consistencia

RI es el índice aleatorio

Primero, para calcular el CI se calcula el  $\lambda_{MAX}$  mediante la formula:

$$\lambda_{MAX} = V * B$$

Donde:

$\lambda_{MAX}$ : es el máximo valor propio de la matriz de comparaciones a pares.

V: es el vector de prioridades o vectores propios

B: es una matriz fila, correspondiente a la suma de los elementos de cada columna de la matriz de comparaciones a pares.

Se procede al cálculo de CI, mediante la fórmula:

$$CI = \frac{\lambda_{MAX} - n}{n - 1}$$

Donde n es el tamaño de la matriz de comparación.

Finalmente, con el mismo valor de n, se consulta el Cuadro A.3.8 para conocer el valor del RI y se procede a calcular el RC.

**Cuadro A.3.8 Índices aleatorios por tamaño de matriz**

Tamaño de la matriz, n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fuente: (Pacheco & Contreras, 2008)

Para todas las matrices antes determinadas, esta evaluación generó un valor de RC menor a 0,1; validando el peso de los subcriterios.