

**SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS BAJO CRITERIOS TÉCNICOS PARA EL
TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA CON PROPÓSITO DE REUSO EN
EL RIEGO DE CAÑA DE AZÚCAR EN DOS MUNICIPIOS DEL VALLE DEL CAUCA**

DIANA MARCELA MANQUILLO LASSO

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
SANTIAGO DE CALI 2021**

**SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS BAJO CRITERIOS TÉCNICOS PARA EL
TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA CON PROPÓSITO DE REUSO EN
EL RIEGO DE CAÑA DE AZÚCAR EN DOS MUNICIPIOS DEL VALLE DEL CAUCA**

DIANA MARCELA MANQUILLO LASSO

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título en
Ingeniería Sanitaria y Ambiental**

Directora

INÉS RESTREPO TARQUINO, PhD

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
SANTIAGO DE CALI 2021**

ACEPTACIÓN

Nota de aceptación

Director de tesis

Firma del jurado

Firma del jurado

Fecha: _____

DEDICATORIA

A mi familia Rubén Manquillo, Olga Lasso y Rubén Manquillo, por su esfuerzo, su apoyo constante e incondicional, en este proyecto tan importante para mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A la profesora y directora de mi trabajo de grado, Inés Restrepo Tarquino por su orientación, tiempo y colaboración.

A los distintos profesores y compañeros que, con sus enseñanzas y conocimientos, contribuyeron a mi formación académica.

A Miguel Jiménez, quien siempre me brindo sus conocimientos, tiempo y apoyo durante mi proceso de formación.

A la Universidad del Valle, porque a través de las distintas vivencias, me motiva cada día como persona y profesional para contribuir de manera positiva al crecimiento de mi país.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	10
3. ANTECEDENTES	12
4. OBJETIVOS	13
4.1 OBJETIVO GENERAL	13
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
5. REVISIÓN DE LITERATURA	14
5.1 Generalidades	14
5.2 Economía circular.....	14
5.3 Agua Residual	14
5.3.1 Composición típica del agua residual	14
5.3.2 Contaminantes de importancia en el tratamiento de agua residual.....	15
5.3.3 Características microbiológicas del agua residual.....	15
5.4 Agua residual tratada.....	16
5.4.1 Niveles de tratamiento del agua residual	16
5.4.2 Tecnologías de tratamiento de agua residual y sus eficiencias de remoción de los contaminantes.	16
5.5 Reúso del agua residual	21
5.5.1 Reúso de agua residual en la agricultura.....	22
5.5.2 Reúso de agua residual en el mundo	23
5.6 Criterios de calidad del agua residual para reúso en la agricultura	24
5.6.1 Normatividad de reúso en Colombia.....	27
5.7 Método de selección.....	29
6. METODOLOGÍA.....	32
6.1 Caracterizar los municipios de estudio analizando información existente	32
6.2 Identificar las características químicas, físicas y microbiológicas del agua residual en dos municipios del Valle del Cauca.....	33
6.3 Comparar las tecnologías de agua residual bajo criterios técnicos.....	34
6.4 Seleccionar alternativas tecnológicas para el tratamiento del agua residual con propósito de reúso	36
7. RESULTADOS	36

7.1 Caracterizar municipios de estudio.....	36
7.1.1 San Pedro	36
7.1.2 Florida.....	37
7.2 Características fisicoquímicas y microbiológicas del agua residual.....	40
7.2.1 San Pedro	40
7.2.2 Florida.....	45
7.3 Comparación de las tecnologías de tratamiento de agua residual bajo criterios técnicos .	49
7.4 Selección de alternativas tecnológicas para el tratamiento del agua residual con propósito de reúso.	60
8. CONCLUSIONES.....	62
9. RECOMENDACIONES	63
10. REFERENCIAS.....	64
ANEXOS	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición típica del agua residual doméstica	15
Tabla 2. Contaminantes de importancia en el tratamiento de agua residual	16
Tabla 3. Organismos patógenos potencialmente presentes en al agua residual	17
Tabla 4. Niveles de tratamiento del agua residual	17
Tabla 5. Tecnologías de tratamiento con sus eficiencias de remoción	18
Tabla 6. Características de diseño del filtro percolador	19
Tabla 7. Características de diseño	20
Tabla 8. Pautas para la interpretación de la calidad del agua para riego.....	24
Tabla 9. Calidad microbiológica del agua residual usadas para la agricultura	25
Tabla 10. Criterios recomendados de máximas concentraciones en la calidad del agua para riego.....	26
Tabla 11. Pautas sugeridas para la reutilización del agua en la agricultura y tratamiento	26
Tabla 12. Parámetros de vertimientos de agua residual doméstica en fuentes superficiales.....	27
Tabla 13. Parámetros para el reúso de agua residual tratada en cultivos.....	28
Tabla 14. Escala numérica de Saaty	30
Tabla 15. Índice de consistencia aleatoria.....	32
Tabla 16. Puntos de descarga de agua residual del municipio de Florida	38

Tabla 17. Resultado encuesta comparación criterio técnico y económico	49
Tabla 18. Resultado encuesta comparación criterio técnico y ambiental	49
Tabla 19. Resultado encuesta comparación criterio ambiental y económico	49
Tabla 20. Matriz de importancia relativa (A)	50
Tabla 21. Matriz A normalizada (A') y vector de prioridad.....	50
Tabla 22. Relación de consistencia para la evaluación de los criterios.....	50
Tabla 23. Resultado encuesta pesos subcriterios	50
Tabla 24. Evaluación de los subcriterios según los expertos.....	51
Tabla 25. Matriz disponibilidad de terreno o área, según la tecnología	53
Tabla 26. Matriz eficiencia de remoción de parámetros contaminantes.....	53
Tabla 27. Matriz costos de inversión inicial	54
Tabla 28. Matriz costos de operación y mantenimiento	54
Tabla 29. Matriz calidad microbiológica del efluente.....	55
Tabla 30. Matriz Producción de lodos	55
Tabla 31. Matriz disponibilidad de terreno área, según la tecnología	57
Tabla 32. Matriz eficiencia de remoción de parámetros contaminantes.....	57
Tabla 33. Matriz costos de inversión inicial	58
Tabla 34. Matriz costos de operación y mantenimiento	58
Tabla 35. Matriz calidad microbiológica del efluente.....	59
Tabla 36. Matriz producción de lodos.....	59
Tabla 37. Matriz de alternativas evaluada en los subcriterios por el vector de subcriterios municipio de San Pedro	60
Tabla 38. Selección de la tecnología municipio de San Pedro	60
Tabla 39. Matriz de alternativas evaluada en los subcriterios por el vector de subcriterios municipio de Florida	60
Tabla 40. Selección de la tecnología municipio de Florida	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del Departamento Valle del Cauca y sus municipios.....	11
Figura 2. Región azucarera en el Valle del Cauca.....	11
Figura 3. Filtro percolador	19
Figura 4. Biodiscos.....	20
Figura 5. Esquema representativo del proceso analítico jerárquico.....	30

Figura 6. Metodología desarrollada para escoger los dos municipios.....	32
Figura 7. Metodología para la caracterización del agua residual en los dos municipios	33
Figura 8. Ingresos y gastos totales per cápita (pesos corrientes)	36
Figura 9. Punto de descarga en la quebrada el Yeso, coordenadas geográficas N3°59'12.06" W 76°14'16.02"	37
Figura 10. Ingresos y gastos totales per cápita (pesos corrientes)	38
Figura 11. Puntos de vertimiento de agua residual en el municipio de Florida.....	39
Figura 12. Comportamiento del pH en punto de vertimiento.....	40
Figura 13. Comportamiento de la temperatura en punto de vertimiento	41
Figura 14. Análisis de DBO ₅	41
Figura 15. Comportamiento DQO.....	42
Figura 16. Comportamiento de los sólidos suspendidos totales	43
Figura 17. Comportamiento grasas y aceites	43
Figura 18. Comportamiento Coliformes fecales.....	44
Figura 19. Caudal de agua residual doméstica.....	45
Figura 20. Comportamiento del pH en el vertimiento.....	45
Figura 21. Comportamiento de la temperatura en el vertimiento	46
Figura 22. Concentración de DBO ₅ en puntos de vertimiento.....	46
Figura 23. Concentración de DQO en puntos de vertimiento.....	47
Figura 24. Comportamiento sólidos suspendidos totales.....	48
Figura 25. Esquema de centralización de los puntos de vertimiento en Florida.....	48

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
-------------	-------------

AHP	Proceso de Análisis Jerárquico
Cenicaña	Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DBO ₅	Demanda Biológica de Oxígeno después de cinco días
DNP	Departamento Nacional de Planeación
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EPA	Agencia de Protección Ambiental
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FUT	Formulario Único Territorial
IA	Índice Aleatorio
IC	Índice de Consistencia
K	Potasio
MCDA	Análisis de Decisión Multicriterio
N	Nitrógeno
OMS	Organización Mundial de la Salud
P	Fosforo
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PSMV	Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos
PTAR	Planta de Tratamiento de Agua Residual
RC	Relación de Consistencia
SST	Sólidos Suspendidos Totales
STAR	Sistemas de tratamiento de agua residual
USAID	United States Agency for International Development

RESUMEN

Las aguas residuales domésticas son una fuente alternativa para el riego de caña de azúcar en el departamento del Valle del Cauca, ya que según datos oficiales este cultivo en el departamento requiere, en un ciclo de 13 meses, aproximadamente 10.300 m³/ha de agua. Sin embargo, los municipios del departamento no cuentan en su totalidad con la infraestructura de tratamiento de agua residual necesaria para depurar los organismos y sustancias contaminantes que permitan promover su uso en estos cultivos; para así mitigar los impactos que se pueden generar al ambiente y en la salud de las personas por el uso directo del agua residual. Para cada municipio de estudio, se seleccionó una tecnología de tratamiento de agua residual, según criterios técnicos vigentes en la normatividad colombiana. La elección se apoyó sobre un modelo de selección que evalúa o pondera los criterios permitiendo establecer la tecnología más conveniente.

Palabras clave: reúso, caña de azúcar, tratamiento de aguas residuales

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional e industrial ha generado un aumento en la demanda del recurso hídrico, y por ende “el uso de agua sin restricciones ha crecido a nivel global a un ritmo de más del doble del aumento de la población en el siglo XX, hasta tal punto que en muchas regiones ya no es posible el suministro de un servicio de agua fiable. La presión demográfica, el ritmo de desarrollo económico, la urbanización y la contaminación están ejerciendo una presión sin precedentes sobre un recurso renovable pero finito” (FAO, 2013).

Una de las industrias que más sobresale en el Valle del Cauca, y con más requerimientos de agua es la industria azucarera la cual tiene alrededor de 225.560 hectáreas sembradas con caña de azúcar, y de acuerdo con Cenicaña (2018), en un ciclo de cultivo de 13 meses se requieren aproximadamente 10.300 m³/ha de agua. Esa alta presión sobre el recurso hídrico se intensifica en las épocas secas por lo cual se puede ver afectado el suministro de agua para consumo humano. Por ello, es fundamental buscar nuevas fuentes de abastecimiento para este tipo de actividades que permitan mitigar el uso de agua dulce en la agricultura.

De acuerdo con la SSPD (2018), en el estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado 2014 - 2017; se identificaron 682 sistemas de tratamiento de agua residual (STAR) en Colombia y 29 en el Valle del Cauca; esta cifra corresponde a la infraestructura física reportada, independientemente de su funcionalidad y estado operativo. En el Valle del Cauca existe potencial para el uso de las aguas residuales tratadas para riego en cultivos de caña de azúcar. El agua residual puede ser un recurso potencialmente aprovechable en la agricultura para el riego de caña de azúcar siempre y cuando se cumpla con las normativas exigidas para ese fin.

Es por ello que en este estudio se tiene como objetivo seleccionar alternativas de tratamiento de agua residual en algunos municipios del Valle del Cauca, que carecen de este, y en los cuales hay influencia de la caña de azúcar en sus tierras. Para la selección de las alternativas de tratamiento se han definido elementos importantes como las características físicas, químicas y biológicas del agua residual; además de la metodología de selección de las tecnologías, en la cual se han implementado diversos modelos que permiten optimizar el análisis de selección.

2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El Departamento del Valle del Cauca, con coordenadas 3°25'00" N 76°31'00" W, está localizado en la parte suroccidental de Colombia, limita al norte con los departamentos de Risaralda y Chocó, al oriente con Quindío y Tolima, al sur con el departamento del Cauca y al occidente con el Océano Pacífico y el Chocó. Tiene una superficie de 22.140 km² lo que representa el 1.9% del territorio nacional, está dividido en 42 municipios (URL1) (Figura 1).



Figura 1. Ubicación del Departamento Valle del Cauca y sus municipios

Fuente: Sociedad Geográfica de Colombia (2002)

En el Valle del Cauca la temperatura promedio es de 24°C, el régimen de lluvias se presenta de manera bimodal entre los meses de abril a junio y de octubre a noviembre. Este departamento se ha distinguido principalmente por la producción de caña de azúcar dado que es una región fértil y con tierras aptas para la agricultura.

La industria azucarera colombiana está ubicada en el valle geográfico del río Cauca, en esta región hay 225.560 hectáreas sembradas en caña de azúcar, de las cuales, el 25% corresponde a tierras propias de los ingenios y el restante 75% a más de 2.750 cultivadores de caña. Dichos cultivadores abastecen a 13 ingenios de la región (Cabaña, Carmelita, Manuelita, María Luisa, Mayagüez, Pichichí, Risaralda, Sancarlos, Tumaco, Ríopaila-Castilla, Incauca y Providencia) (URL 2), como se observa en la Figura 2.

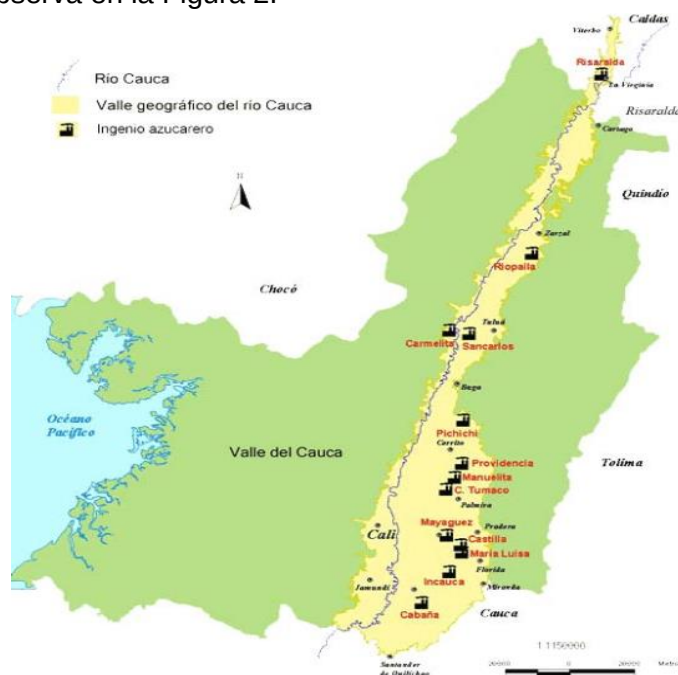


Figura 2. Región azucarera en el Valle del Cauca

Fuente: URL 2

Los agricultores a nivel mundial han visto como una gran ventaja la capacidad del agua subterránea para ofrecer un suministro flexible y a demanda para el riego. La explotación e intensificación del uso de agua subterránea ha crecido exponencialmente a lo largo de las últimas décadas. Pero también ha resultado en el agotamiento a largo plazo de los acuíferos y en la contaminación del agua subterránea (FAO, 2013).

La demanda de agua por parte de la industria de caña de azúcar en el Valle del Cauca, en un ciclo de cultivo de 13 meses oscila entre los 10.300 m³/ha y 14.000 m³/ha (Cenicaña, 2018). Lo que ha representado durante años una fuerte presión sobre el río Cauca y sus afluentes principales, especialmente los que nacen sobre la cordillera central de Colombia, así mismo sobre las aguas subterráneas de la región (Sánchez, 2011). También se ha producido una importante competencia por el recurso hídrico, la cual se acentúa en épocas de verano, en el centro y sur de la región donde se concentra la actividad cañera (Pérez *et al.*, 2011). Por ese motivo, es necesario buscar otras fuentes de abastecimiento de agua para la agricultura, ya que es la responsable del 70% de las extracciones de agua dulce y de más del 90% de su uso, la cual una vez usada no se devuelve al medio donde se ha captado, ni de la misma manera que se ha extraído (FAO, 2013).

De acuerdo a la información suministrada por la CVC, la cantidad de agua subterránea concesionada para riego de caña de azúcar en el municipio de San Pedro evidencia una demanda de uso de 2526,7 l/s; y para el municipio de Florida de 2632,33 l/s.

El uso del agua residual para riego en la agricultura es una alternativa que permite mitigar la presión que se ejerce sobre el recurso hídrico y una opción en las zonas donde se presenta escasez de agua; adicionalmente, como lo manifestó Silva *et al.*, (2008), el uso de agua residual presenta beneficios que mejoran la fertilidad a los suelos agrícolas debido al aporte de materia orgánica y nutrientes como el nitrógeno y fósforo. Pero es necesario realizar un tratamiento al agua residual antes de ser utilizada en esa actividad, ya que sin un tratamiento previo se puede ocasionar problemas al suelo, según Zamora *et al.*, (2008), debido al contenido de sales, a la contaminación con metales pesados, además de la presencia de microorganismos patógenos los cuales pueden afectar la salud de las personas que laboran en estas actividades agrícolas generando un problema de salud pública.

Es por ello necesario disponer e incrementar la cobertura de sistemas de tratamiento de agua residual en el Valle del Cauca, ya que se reportan 29 STAR de acuerdo con la SSPD (2018), en el estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado 2014 - 2017 y de esta manera disminuir la concentración de contaminantes en el agua, para así alcanzar los requerimientos exigidos por la normatividad, para su posterior uso en la agricultura.

3. ANTECEDENTES

De acuerdo con Pérez *et al.* (2011), el alto nivel de concentración del recurso hídrico en manos de los cañicultores en el Valle del Cauca se evidencia en la distribución de las concesiones de agua, tanto superficial como subterránea, para los diferentes usos en la cuenca del río Cauca. Así, para el 2008, de 92,6 millones de m³, el 64% del caudal asignado de agua superficial fue para uso cañero (59,3 millones de m³), en el caso del agua subterránea este ascendió al 88% de los 327 millones de m³ captados por los usuarios es decir (287,76 millones de m³) (CVC 2009, citado por Pérez *et al.*, 2011).

Debido a los altos requerimientos de agua necesarios en la industria de caña de azúcar, vale la pena evaluar otras fuentes de agua, como es el uso del agua residual. El reúso se remonta a tiempos antiguos en Atenas; sin embargo, el mayor crecimiento de sistemas de aplicación de aguas residuales en el suelo ocurrió durante la segunda mitad del siglo XIX, principalmente en países como Alemania, Australia, Estados Unidos, Francia, India, Inglaterra, México y Polonia (Parreiras, 2005, citado por Silva *et al.*, 2008). Entre los usos que se le han dado al agua residual tratada está la agricultura, la industria, el riego de parques y jardines, entre otros. Según Álvarez *et al.* (2006), citado por Passarini *et al.*, (2012), reutilizar las aguas residuales en la agricultura es una forma de reciclar el agua y permite reducir los impactos ambientales asociados con el suelo y a las fuentes hídricas superficiales y subterráneas en todo el mundo.

Passarini *et al.* (2012) presentó un estudio sobre la reutilización del agua residual residencial en la agricultura, estas aguas fueron tratadas por decantación y por el método de membranas filtrantes. El agua tratada fue utilizada en la irrigación de suelos recién sembrados con semillas de maíz y se comparó con el agua de abastecimiento (control). En este caso, fue medido el porcentaje de semillas germinadas con relación a las semillas germinadas por la irrigación con el agua de control. Se observó una germinación superior al 87% usando el agua reutilizada, por lo tanto, los resultados indican que si es posible usar el agua residual doméstica tratada en la agricultura.

Para lograr resultados eficientes en la utilización del agua residual es necesario realizar un tratamiento previo; para ello se debe seleccionar la tecnología adecuada para tratar las aguas residuales. De acuerdo con Galvis *et al.* (2005), la selección de una tecnología va acompañada de herramientas metodológicas que facilitan el proceso; por lo cual se pueden considerar múltiples aspectos o criterios como: lo técnico, ambiental, social y económico. Horan y Parr (1994), citado por Galvis *et al.* (2005), señala que en la metodología de selección se encuentran distintas categorías entre ellas: documentos descriptivos, listas de chequeo, matrices de solución, algoritmos y software. Además, que se tienen criterios de selección que son comunes como: objetivos de tratamiento, aspectos tecnológicos, costos, características del agua residual, impacto ambiental, entre otros.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Seleccionar alternativas tecnológicas para el tratamiento de agua residual en dos municipios del Valle del Cauca, con propósito de reúso para riego de caña de azúcar.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar dos municipios de estudio analizando información existente.
- Identificar las características físicas, químicas y microbiológicas del agua residual en dos municipios del Valle del Cauca.
- Comparar las tecnologías de tratamiento de agua residual bajo criterios técnicos.
- Seleccionar alternativas tecnológicas para el tratamiento del agua residual con propósito de reúso.

5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 Generalidades

La superficie del planeta está cubierta en un 70% por agua; el 97,5% del agua del planeta se encuentra en los océanos, el 2,5% restante es agua dulce, y se presenta en un 80% en los glaciares, 19% aguas subterráneas y solo el 1% es agua de superficie (lagos, ríos, humedales) (Cirelli, 2012). El aumento de la población y la industrialización han ejercido una presión en el recurso hídrico en términos de calidad y cantidad, generando escasez de agua en algunas partes del planeta, además de contribuir a la contaminación de las fuentes hídricas debido al vertimiento del agua residual sin un tratamiento previo.

5.2 Economía circular

La economía circular se puede definir como un modelo económico encaminado al uso eficiente de los recursos, a través de la minimización de las materias primas y de los residuos (Morseletto, 2020). Esta propone una transformación al paradigma “extraer, fabricar, consumir, eliminar”; promoviendo prácticas que permita disminuir los impactos ambientales causado por las actividades humanas (Lett, 2014). Con la economía circular se otorga a los productos o residuos desechados en las diferentes actividades de producción un valor, por lo cual se convierte en materia prima para la formación de un nuevo producto o aplicación en una nueva actividad.

El enfoque del modelo de economía circular es implementado en algunos países como España, Italia, Chipre, Grecia, Estados Unidos e Israel, entre otros; donde el agua residual doméstica recuperada se reusa en el riego para actividades agrícolas. Aunque el reúso se implementa en algunas partes del mundo, su potencial no se ha explotado en muchas áreas por el temor a los riesgos asociados con la salud pública (Voulvoulis, 2018).

5.3 Agua Residual

De acuerdo con Marsilli (2005), citado por Sánchez (2011), se entiende por aguas residuales como todas aquellas resultantes de la actividad humana, por ejemplo: doméstica, agrícola e industrial, entre otras actividades. Se conocen también como aguas servidas o aguas negras (Marsilli, 2005, citado por Sánchez (2011)) a las provenientes del uso sanitario y que transportan excretas. Las provenientes de otros usos domésticos como el lavamanos, ducha, lavado de platos y cocción de alimentos se conocen como aguas grises.

5.3.1 Composición típica del agua residual

El agua residual doméstica está compuesta en un 99.9% de agua y un 0.1% de sólidos, de los cuales el 70% son orgánicos y el 30% son inorgánicos como arenas, sales y metales; siendo éste 0.1% el que debe ser sometido a tratamiento en las plantas de tratamiento de agua residual. La composición del agua residual está en función del uso del agua de suministro y depende de las características sociales y económicas de la población, así como del clima, la cultura y del uso del suelo entre otras (Von Sperling y Chernicharo, 2005, citado por Suárez, 2010).

La caracterización del agua residual es un componente fundamental para la selección de las tecnologías. Para ello se tendrá en cuenta la composición típica del agua residual doméstica en términos físicos, químicos y biológicos. Con base a documentación facilitada por los entes interinstitucionales, literatura y documentación consultada, en la Tabla 1 se pueden observar algunos de los parámetros principales en las aguas residuales domésticas.

Tabla 1. Composición típica del agua residual doméstica

Parámetro	Unidades	Concentración*			Concentración **
		Fuerte	Media	Débil	Rango
Sólidos totales (ST)	mg/L	1.200	720	350	700 - 1350
Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/L	850	500	250	500 - 900
Sólidos en suspensión	mg/L	350	220	100	200 - 450
Sólidos sedimentables	mg/L	20	10	5	10 - 20
DBO ₅	mg/L	400	220	110	250 - 400
DQO	mg/L	1.000	500	250	450 - 800
Carbono orgánico total (COT)	mg/L	290	160	80	
Nitrógeno total	mg/L	85	40	20	35 - 60
Nitrógeno Amoniacal (NH ₃)	mg/L	50	25	12	20 - 35
Nitritos (NO ₂ -)	mg/L	0	0	0	≈ 0
Nitratos (NO ₃ -)	mg/L	0	0	0	0 - 1
Fósforo total	mg/L	15	8	4	4 - 15
Fósforo orgánico	mg/L	5	3	1	1 - 6
Fósforo inorgánico	mg/L	10	5	3	3 - 9
Cloruros	mg/L	100	50	30	
Sulfato	mg/L	50	30	20	
Alcalinidad	mg/L	200	100	50	100 - 250
Grasa y aceites	mg/L	150	100	50	
Compuestos orgánicos volátiles (COVs)	µg/L	>400	400-100	<100	
Coliformes totales	NMP/100 mL	10 ⁷ - 10 ⁹	10 ⁷ - 10 ⁸	10 ⁶ - 10 ⁷	

Fuente:

* Metcalf & Eddy, 1995

**Von Sperling, 2012

Adaptado de: Rodríguez *et al.* (2015)

En la selección de la tecnología se priorizan algunos parámetros de interés como son: caudal, DBO, DQO, Sólidos totales, Sólidos suspendidos, Nitrógeno total, Fósforo total y Coliformes, entre otros.

5.3.2 Contaminantes de importancia en el tratamiento de agua residual

En el agua residual pueden encontrarse contaminantes de interés que deben ser removidos en el tratamiento del agua residual, como se muestra en la Tabla 2.

5.3.3 Características microbiológicas del agua residual

El agua residual es una fuente de organismos patógenos como bacterias, virus entéricos y protozoos, entre otros. Estos microorganismos representan un riesgo potencial para la salud humana si entran en la cadena alimentaria, producto del riego de los cultivos con agua residual no tratada o que no cumple con las condiciones microbiológicas para reúso. En la Tabla 3 se muestran los diferentes organismos patógenos que pueden estar en el agua residual y la enfermedad que pueden generar.

Tabla 2. Contaminantes de importancia en el tratamiento de agua residual

Contaminante	Importancia
Sólidos suspendidos (SS)	Los SS, pueden generar depósitos de fango y condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia Orgánica Biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, se mide en función de la DBO y de la DQO. Si se descarga al entorno sin tratar puede llevar al agotamiento de oxígeno y al desarrollo de condiciones anaerobias.
Patógenos	Pueden transmitir enfermedades contagiosas.
Nutrientes	El nitrógeno y el fósforo son nutrientes esenciales para el crecimiento, cuando se vierten al entorno acuático fortalecen el crecimiento excesivo de algas.
Contaminantes prioritarios	Compuestos orgánicos o inorgánicos, pueden generar mutaciones, alteraciones genéticas, cáncer.
Materia orgánica refractaria	Tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento; por ejemplo: los fenoles, y los pesticidas.
Metales pesados	Son añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y es necesario eliminarlos para reutilizar el agua.
Sólidos inorgánicos disueltos	El calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua.

Fuente: Metcalf & Eddy (1995)

5.4 Agua residual tratada

Es el agua residual que ha sido sometida a operaciones o procesos unitarios de tratamiento, que permiten cumplir con los criterios de calidad requeridos para el reúso.

5.4.1 Niveles de tratamiento del agua residual

La remoción de los contaminantes en el tratamiento se hace con el propósito de adecuar el vertimiento a una calidad establecida por la norma. Los niveles de tratamiento se muestran en la Tabla 4.

5.4.2 Tecnologías de tratamiento de agua residual y sus eficiencias de remoción de los contaminantes.

Existen diferentes tecnologías de tratamiento para el agua residual, cada una de ellas con unas eficiencias de remoción distintas. Teniendo en cuenta las características del agua y según los parámetros de interés; se realizará un estudio para identificar la tecnología más eficiente que cumpla con la eficiencia esperada y que permita alcanzar los requerimientos normativos para su reúso en la agricultura, específicamente en los cultivos de caña de azúcar. En la Tabla 5 se presentan algunas tecnologías con sus respectivas eficiencias.

Tabla 3. Organismos patógenos potencialmente presentes en al agua residual

Organismo	Enfermedad	Comentario
Bacteria		
<i>Escherichia coli</i> (enteropatógena)	Gastroenteritis	Diarrea
<i>Legionella pneumophila</i>	Legionelosis	Enfermedades respiratorias agudas
<i>Leptospira</i> (150 esp.)	Leptospirosis	Leptospirosis, fiebre (enfermedad de Weil)
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea	Fiebre alta, diarrea, úlceras en el intestino delgado
<i>Salmonella</i> (~1.700 esp.)	Salmonelosis	Envenenamiento de alimentos
<i>Shigella</i> (4 esp.)	Shigelosis	Disentería bacilar
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera	Diarreas extremadamente fuertes, deshidratación
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Yersinosis	Diarrea
Virus		
Adenovirus (31 tipos)	Enfermedades respiratorias	
Enterovirus (67 tipos, p.e. polio, eco y virus Cocksackie)	Gastroenteritis, anomalías cardíacas, meningitis	
Hepatitis A	Hepatitis infecciosas	Leptospirosis, fiebre
Agente Norwalk	Gastroenteritis	Vómitos
Reovirus	Gastroenteritis	
Rotavirus	Gastroenteritis	
Protozoos		
<i>Balantidium coli</i>	Balantidiasis	Diarrea, disentería
<i>Cryptosporidium</i>	Criptosporidiosis	Diarrea
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amebiasis (disentería amélica)	Diarreas prolongadas con sangre, abscesos en el hígado y en el intestino delgado
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis	Diarrea, náuseas, indigestión
Helminthos^b		
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis	Infestación de gusanos
<i>Enterobius vericularis</i>	Enterobiasis	Gusanos
<i>Fasciola hepatica</i>	Fascioliasis	Gusanos (tercera)
<i>Hymenolepis nana</i>	Hymenolepiasis	Tenia enana
<i>Taenia saginata</i>	Teniasis	Tenia (buey)
<i>T. solium</i>	Teniasis	Tenia (cerdo)
<i>Trichuris trichiura</i>	Trichuriasis	Gusanos

Fuente: Metcalf & Eddy (1995)

Tabla 4. Niveles de tratamiento del agua residual

Nivel	Remoción
Preliminar	Sólidos en suspensión gruesos.
Primario	Sólidos en suspensión sedimentables y de materia orgánica.
Secundario	Materia orgánica en suspensión.
Terciario	Nutrientes, organismos patógenos, metales pesados, sólidos inorgánicos disueltos, sólidos en suspensión remanentes.

Fuente: Von Sperling (2012)

Tabla 5. Tecnologías de tratamiento con sus eficiencias de remoción

TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO	REFERENCIA	EFICIENCIA DE REMOCIÓN (%)									
		SST	DBO ₅	DQO	N NH ₃	N ORG	N NO ₃	N TOTAL	P PO ₄	P TOTAL	COLIFORMES
Lodo activado – aireación prolongada	Von Sperling (1996)	80–90	93–98					15–30		10–20	65 – 90
	Yáñez (1995)	70–90	60–85								90 – 95
Filtro percolador alta tasa	Metcalf & Eddy (2001)	60–85	65–80	60–80	8–15			15–30		8–12	90 – 95
	Von Sperling (1996)	85–95	80–93					30–40		30–45	60–90
Filtro percolador súper tasa	RAS (2000)	65–85	65–85	65–85	8–15	15–50				8 – 12	
Laguna aerobia	Ferrer (2009)		60–80								
	Mara (1980)		50–85								
Laguna anaerobia	Arceivala (1984)		30–70								
	RAS (2000)	20–60	50–70								90 – 99,99
Lagunas aireadas	Mara (1980)		80–95								
	Mendoza (2000)		50–60								
Lagunas facultativas	RAS (2000)	85–95	80–95								90 – 99,99
	RAS (2000)	63–75	80–90						30		90 – 99,99
Lagunas facultativas	Fair (1954)	85–95	90–95	70–80							95 – 98
	Yáñez (1995)	90–99	75–95								98 – 99,99
Lagunas maduración	Mara (1980)		80–95								
	RAS (2000)	85–95	60–80								90 – 99, 99
Laguna anaerobia – humedal	Caicedo (2005)	87–93	80–90					37–48		45 – 50	
	Liu & Liptack (2000)		85–95								
Biodiscos	Torres et al. (2006)	85–95	85–93					30–40		30 – 45	60–90
	Metcalf & Eddy (2001)	80–85	80–85	80–85	8–15			15–20		10–25	

Fuente: Rodríguez *et al.* (2015)

A continuación, se presentan algunas de las tecnologías usadas en el tratamiento de agua residual.

Filtro biológico percolador

El filtro percolador es un sistema aerobio, consiste en un lecho de material grueso, como piedras, gravas o material plástico, entre otros, sobre el cual se aplica el agua residual por medio de unos distribuidores rotativos. Posteriormente, el agua residual percola en dirección a los drenajes de fondo. La percolación del líquido permite el crecimiento bacteriano en la superficie del medio de soporte, en la forma de una película fija. Los filtros percoladores se clasifican por las cargas orgánicas o hidráulicas aplicadas (Metcalf & Eddy, 1995). En la Tabla 6 se presentan algunas características de diseño según el tipo de filtro. En la Figura 3 se presenta un Filtro percolador.

Tabla 6. Características de diseño del filtro percolador

TIPO	H [m]	CARGA HIDRAULICA [m ³ /m ² .d]	CARGA ORGÁNICA [kg DBO/m ³ .d]	MEDIO FILTRANTE	Remoción [%]
Baja carga	1,8 - 2,4	1,20 - 3,50	0,08 - 0,40	Piedra	80-90
Carga media	1,8 - 2,4	3,50 - 9,40	0,25 - 0,50	Piedra	50-70
Alta carga	0,9 - 1,8	9,40 - 37,55	0,50 - 0,95	Piedra	65-85
Muy alta carga	3,0 - 12,0	11,70 - 70,40	0,48 - 1,60	Plástico	65-80
Desbaste	0,9 - 6,0	47 - 188	1,60 - 8,00	Plástico o madera	40-65

Fuente: Metcalf & Eddy (1995)

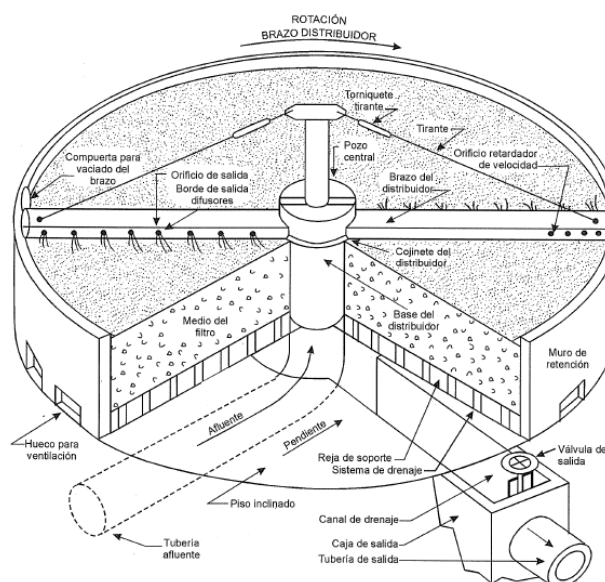


Figura 3. Filtro percolador

Fuente: Romero (1999)

Contactores biológicos rotativos (Biodiscos)

Los biodiscos son un sistema de tratamiento biológico secundario, en el cual la biomasa crece adherida a un medio de soporte de los discos, hasta formar una película biológica sobre la superficie mojada de los mismos. Este proceso consiste en una serie de discos espaciados y parcialmente sumergidos en el agua residual, instalados en un eje horizontal los cuales giran lentamente (Von Sperling, 2012). La rotación del disco induce la transferencia de oxígeno y mantiene la biomasa en condiciones aerobias; estos suelen proyectarse basándose en factores de carga hidráulica y orgánica. En la Tabla 5 se puede ver la eficiencia de remoción para distintos elementos, mientras que en la Tabla 7 se presentan algunas características de diseño y operación de los biodiscos. Cuando el agua residual tiene una temperatura inferior a los 13°C se pueden reducir los rendimientos de eliminación de materia orgánica (Metcalf & Eddy, 1995). En la Figura 4 se presenta un esquema de los biodiscos.

Tabla 7. Características de diseño

Parámetro	Cantidad	Unidad
Temperatura	13 - 32	° C
Diámetro	3,5	m
Área superficial	9200	m ²
Longitud	7,5 – 8,2	m
Velocidad	1 - 5	rpm
Área sumergida	35 - 40	%
Carga orgánica	12 - 31	g DBO/m ² d

Adaptado de: Romero (1999) y Menéndez *et al.* (2020)

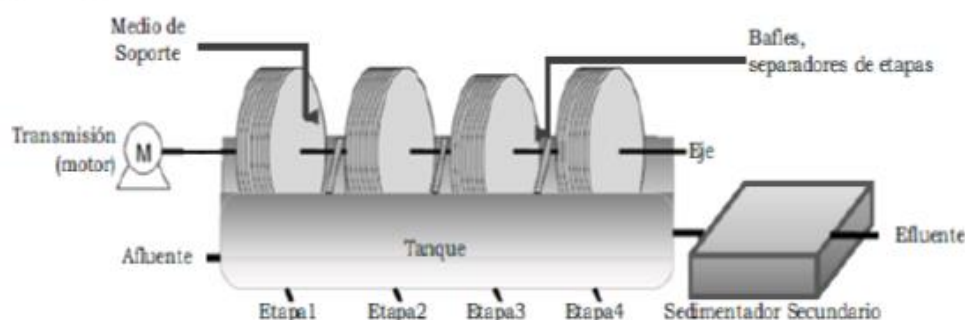


Figura 4. Biodiscos

Fuente: Menéndez *et al.* (2020)

Lagunas de estabilización

De acuerdo con Treviño y Cortés (2016), las lagunas de estabilización son una opción viable de tratamiento de agua residual comparadas con otros sistemas, ya que son fáciles de construir y operar, pero se requiere disponibilidad de terreno; son eficientes en la remoción de materia orgánica, fósforo, nitrógeno y coliformes fecales. Existen diferentes tipos de lagunas, estas pueden ser: anaerobias, facultativas y de maduración; se puede hacer combinación entre ellas para obtener mejores eficiencias en el tratamiento del agua residual.

Laguna anaerobia

Estas lagunas funcionan en ausencia de oxígeno, se diseñan para el tratamiento de residuos líquidos con alto contenido de materia orgánica. Se caracterizan por su profundidad entre 4 y 10 m, y su tiempo de retención hidráulica (TRH) que va de 20 a 50 días. Este tipo de lagunas requieren ser aisladas de zonas pobladas debido a los posibles olores que se pueden generar. Presentan buen desempeño de remoción de DBO₅ mayores al 60% a 20°C (Matsumoto y Sánchez, 2016).

Lagunas facultativas

En estas lagunas el tratamiento del agua residual se fundamenta en el tiempo de retención el cual debe ser suficientemente largo para que se desarrollen los procesos naturales de estabilización de la materia orgánica. Este tratamiento ocurre en tres zonas: una aerobia, facultativa y anaerobia (Sánchez y Matsumoto, 2012). De acuerdo con Von Sperling (2012), la profundidad oscila entre 1,5 a 2 m, con un tiempo de retención de 20 días o más.

Laguna de maduración

Su principal objetivo es la remoción de organismos patógenos, y no la remoción adicional de DBO₅. De acuerdo con Von Sperling (2012), en este tipo de lagunas predominan las condiciones ambientales adversas para estos microorganismos, ya que hay un elevado pH, radiación ultravioleta, elevado oxígeno disuelto, falta de nutrientes, entre otros; usualmente se logra una remoción total de huevos de helmintos. Las lagunas de maduración tienen una profundidad de 1 m o menos.

5.5 Reúso del agua residual

La cobertura del tratamiento de agua residual se mantuvo muy baja en América Latina y el Caribe durante décadas. Pero esta situación ha comenzado a cambiar debido a la cobertura para el tratamiento del agua residual urbana que se ha duplicado desde finales de los años noventa, alcanzando entre el 20% y el 30% del agua residual recolectada en los sistemas de alcantarillado urbano (FAO, 2017). Sin embargo, el agua residual urbana no es vista como una fuente de suministro de agua que permita reducir la presión que se ejerce sobre el ambiente y cambiar el paradigma de “tratar para verter” a “tratar para reutilizar” (FAO, 2017).

En Colombia, en la Resolución 1207 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se define el reúso como la utilización de las aguas residuales tratadas cumpliendo con los criterios de calidad requeridos para el uso al que se va a destinar. En Lavrador Filho (1987), citado por Jaramillo (2014), se entiende el reúso de agua residual como el aprovechamiento del agua utilizada una o más veces en alguna actividad para suplir las necesidades de otros usos. De acuerdo con Jaramillo (2014), el reúso se ha clasificado en diferentes categorías:

- Reúso indirecto no planeado: Este se presenta cuando el agua es utilizada y es descargada en forma diluida en los cuerpos de agua receptores y posteriormente es utilizada sin cumplimiento de criterios de calidad para los diferentes usos.
- Reúso indirecto planeado: Ocurre cuando los efluentes tratados son descargados de manera planeada a los cuerpos receptores para ser utilizados bajo el cumplimiento de criterios de calidad para el uso del recurso hídrico.
- Reúso directo planeado: Se presenta cuando los efluentes tratados son empleados directamente en alguna aplicación de reúso local cumpliendo con los criterios de calidad para el uso.
- Reúso directo no planeado: Ocurre cuando los efluentes no tratados son empleados directamente en alguna aplicación de reúso local sin cumplir con los criterios de calidad para el uso.

El reúso se puede clasificar en 8 tipos y aplicaciones de acuerdo con el sector o infraestructura que recibe el beneficio, entre ellos: urbano, industrial, agrícola, usos urbanos no potables, recargas de aguas subterráneas, recreativos, piscicultura y usos potables (Brega Filho y Mancuso, 2003, citado por Jaramillo, 2014).

Urbano: Comprende áreas verdes en parques, campos deportivos, jardines en áreas no domiciliarias, campos de golf, protección contra incendios, entre otros (EPA y USAID 2012). En Colombia en la normativa de reúso no se contempla el uso urbano, solo se presentan

disposiciones para el sector agrícola e industrial.

Industrial: Desde principios de 1990, el reúso de agua en la industria ha incrementado (EPA, 2004), debido al estrés hídrico y a la baja disponibilidad de aguas subterráneas en algunas zonas las industrias han adoptado el uso de agua recuperada para alimentación de calderas, el uso en torres de enfriamiento, inodoros y riego del sitio. Cada una con requisitos específicos de calidad del agua (EPA y USAID 2012).

En Colombia en la Resolución 1207 de 2014, los usos establecidos de agua residual tratada se presentan para actividades como:

- Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas.
- Descarga de aparatos sanitarios.
- Limpieza mecánica de vías.
- Riego de vías para el control de material particulado.
- Sistemas de redes contraincendios.

5.5.1 Reúso de agua residual en la agricultura

De acuerdo con Wang *et al.* (2019), el sector agrícola es el mayor consumidor de agua en el mundo, alrededor del 70% de los recursos hídricos son usados para el riego de este tipo de tierras. Sin embargo, con el rápido crecimiento de la población, el desarrollo económico y el aumento en la demanda de agua dulce en el sector industrial, doméstico y comercial; se ha generado un interés por el reúso de agua residual doméstica en la agricultura.

El reúso de agua residual en la agricultura, se ha convertido en una necesidad y su uso se está volviendo común en muchas partes del mundo. Por ejemplo: en Israel más del 85% del agua residual tratada se usa para riego de cultivos, en España el 71% y en California el 20%. De esta manera, se mitiga el uso de agua dulce en esta actividad y se ahorra en fertilizantes (N, P, K) y costos de energía, además que se tiene un suministro continuo independiente si hay época de sequía (Reznik *et al.*, 2017).

A pesar de los beneficios del reúso de agua residual, esta también se asocia con impactos ambientales y sociales que pueden ser perjudiciales para la salud de las personas, debido a la presencia de patógenos, metales pesados, productos farmacéuticos. En cuanto al riego con el agua residual tratada, se puede generar un cambio en las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo ya que un aumento en la salinidad del suelo puede reducir el crecimiento de las plantas y la acumulación de cloruro, sodio y boro puede ser tóxica para ellas. Por lo cual, el reúso de agua residual doméstica en la agricultura requiere de planificación e inversión, además del cumplimiento en los estándares de calidad exigidos por la normativa de cada país y de esta manera lograr un uso eficiente (Reznik *et al.*, 2017).

De acuerdo con la investigación realizada por Sánchez (2011), entre agosto de 2009 y septiembre de 2010, en la cual se reusó el efluente de la PTAR de Cañaveralejo de Cali y se evaluó el impacto en las propiedades físicas del suelo y la productividad de la caña de azúcar para la variedad CC85-92, se determinó que las características físicas del suelo, el crecimiento de la caña y la producción de azúcares (sacarosa, azúcares reductores y grados brix) no se afectó y que tampoco hubo riesgo de salinidad en el suelo, pero se identificó un riesgo moderado de sodicidad ya que si bien no se llegó a niveles altos de PSI (porcentaje de Sodio

intercambiable) en la primera etapa de riego (12 meses), es posible que el efecto acumulativo surta efecto a mediano o largo plazo; también se presenta un alto contenido de nitratos y nitritos que aunque brindan un aporte de nutrientes al suelo, se puede generar un riesgo de contaminación de aguas subterráneas en suelos de textura liviana y con métodos de riego poco eficientes (Sánchez, 2011).

5.5.2 Reúso de agua residual en el mundo

Para el año 2016, en 60 países del planeta se reportaba el reúso de agua residual. Los países que más reúsan agua residual tratada en términos de volumen son China, México y los Estados Unidos; y en términos de intensidad se encuentra Qatar, Israel y Kuwait (Tello *et al.*, 2016). A continuación, se presentan algunos casos donde el agua residual es utilizada para riego agrícola:

Sudáfrica es un país con alto estrés hídrico (40-60%) debido a los bajos volúmenes de lluvia y la alta evaporación. Para la mayoría de sus necesidades urbanas, industriales y agrícolas depende del agua superficial y para el suministro de agua rural especialmente es el agua subterránea. En Sudáfrica el riego representa aproximadamente el 62% del agua total utilizada y, por lo tanto, cualquier ahorro de agua en este sector será beneficioso para otros sectores necesitados (Adewumi *et al.*, 2010), por lo cual el uso de agua residual no tratada o parcialmente tratada ya es una práctica común para el riego de cultivos; por ejemplo, en los cultivos de uva para hacer vino donde se emplean alrededor de 94.545 ha (Mendoza *et al.*, 2019).

De acuerdo con Liberthal (2011), citado por Chen *et al.* (2017), aproximadamente dos tercios de las 661 ciudades de China encontraron problemas de escasez de agua, por lo tanto, la reutilización de agua se está aplicando para satisfacer una proporción de la demanda de agua. Las aplicaciones de reúso se consideran principalmente para usos ornamentales, usos industriales y riego agrícola, entre otros. En Beijing, para el año 2014, la tasa de reúso alcanzó el 63%. En China, el reúso de agua se ha considerado como un recurso hídrico alternativo prometedor para el uso sostenible del agua, por lo cual, la construcción y la mejora de las instalaciones de tratamiento y de reutilización de agua han entrado en un periodo de alto desarrollo en todo el país (Chen *et al.*, 2017).

En Arabia Saudita se extrae más del 80% del suministro de agua de los acuíferos y sirven principalmente al sector agrícola. Debido al aumento en la demanda de agua en los diferentes sectores, cada vez más se depende de la desalinización, por lo cual, el reúso del agua residual en combinación con las medidas de conservación del agua tiene potencial frente a las extracciones del agua subterránea y desalinizada. En Arabia Saudita se trata y reutiliza el 18% del total de agua producida; la falta de políticas e infraestructura para la recolección y tratamiento del agua residual ha limitado su reúso (Kajenthira *et al.*, 2012).

En Colombia, se tiene una superficie irrigada con aguas residuales de 1.230.193 ha, con 27% de agua residual tratada y un 73% sin tratar, por lo general diluida con agua superficial (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2011). De acuerdo con Sánchez (2011), para el Valle del Cauca el reúso de agua residual doméstica tratada en los cultivos de caña de azúcar, es viable de acuerdo con los resultados observados en su crecimiento y productividad. En la sabana de Bogotá, se presenta el riego de cultivos de hortalizas con agua residual sin tratamiento lo cual genera consecuencias negativas en las plantas, suelo y posibles efectos en la salud de las personas que consumen estos alimentos, ya que se ha encontrado la presencia de metales

pesados y coliformes (Arguello, 2011).

5.6 Criterios de calidad del agua residual para reúso en la agricultura

Con los criterios de calidad se definen los estándares que debe cumplir el agua residual tratada para ser usada como fuente de abastecimiento para riego en la agricultura, con el propósito de mitigar los impactos negativos que se puede generar al ambiente y en la salud de las personas que estén en contacto con este tipo de agua o por el consumo de alimentos regados con ellas.

Con el propósito de brindar una orientación en la calidad del agua residual para reúso, se han establecido diferentes guías para su reutilización. Entre las diferentes guías se encuentran las de la OMS (Organización Mundial de la Salud) (1989) sobre el Uso Seguro de Aguas Residuales en la Agricultura y Acuicultura, y en el año 2006 se publicaron las guías de la OMS, PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) y FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), para el reúso. También está la guía de la EPA y USAID (2012).

En las directrices para la reutilización del agua de la EPA y USAID (2012), se presentan las pautas para la interpretación de la calidad del agua usada para riego en la agricultura con el propósito de evitar daños en la calidad del suelo y en los cultivos, como se muestra en la Tabla 8.

Para garantizar la calidad en el riego de cualquier tipo de cultivo, la OMS de 1989 propuso las directrices que sugieren un límite en parámetros microbiológicos importantes en caso de reusar el agua residual en la agricultura, de acuerdo con la categoría según su uso, como se presenta en la Tabla 9.

Tabla 8. Pautas para la interpretación de la calidad del agua para riego

Problemas potenciales de riego		Unidades	Grado de restricción de riego			
			Ninguna	Ligero a moderado	Grave	
Salinidad (afecta la disponibilidad de agua del cultivo)						
Conductividad eléctrica		dS/m	<0,7	0,7 – 3,0	>3,0	
Sólidos disueltos totales		mg/L	<450	450 - 2000	>2000	
Infiltración (evaluar usando CE y RAS)						
Relación Absorción de Sodio (RAS)	0 – 3	Conductividad Eléctrica (CE)	dS/m	>0,7	0,7 – 0,2	<0,2
	3 – 6		dS/m	> 1,2	1,2 – 0,3	<0,3
	6 – 12		dS/m	>1,9	1,9 – 0,5	<0,5
	12 – 20		dS/m	>2,9	2,9 – 1,3	<1,3
	20 - 40		dS/m	>5,0	5,0 – 2,9	<2,9
Toxicidad de iones específicos (afecta a cultivos sensibles)						
Sodio (Na)						
Riego superficial		RAS	<3	3 – 9	>9	
Riego por aspersión		meq/L	<3	>3		
Cloro (Cl)						
Riego superficial		meq/L	<4	4 – 10	>10	
Riego por aspersión		meq/L	<3	>3		
Boro (B)						
		mg/L	<0,7	0,7 – 3,0	>3,0	
Varios (afecta cultivos susceptibles)						
Nitratos (NO ₃ ⁻ – N)		mg/L	<5	5 - 30	>30	
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)		meq/L	<1,5	1,5 – 8,5	>8,5	
pH			Rango normal 6.5 – 8.4			

Fuente: EPA y USAID (2012)

Tabla 9. Calidad microbiológica del agua residual usadas para la agricultura

Categoría	Condiciones del reuso	Grupo expuesto	Helmintos intestinales (huevos/L)	Coliformes fecales por 100mL
A	Riego de cultivos para consumo crudo, campos deportivos y parques públicos	Trabajadores, consumidores, usuarios	≤ 1	≤ 1.000
B	Riego de cereales, cultivos industriales, forrajes y árboles	Trabajadores	≤ 1	Sin estándar de calidad recomendado
C	Riego de cultivos la categoría B, si no hay exposición de trabajadores y del público	Ninguno	Sin aplicación	Sin aplicación

Fuente: Tello (2016)

Dependiendo de la fuente y el nivel de tratamiento, el agua residual puede contener elementos tóxicos que pueden acumularse en el suelo y los cultivos, lo cual representa una amenaza para la salud humana; metales como el zinc (Zn), cadmio (Cd), plomo (Pb), hierro (Fe), cobre (Cu) y níquel (Ni) cuando se aplican en exceso pueden causar fitotoxicidad, además de efectos en la salud de las personas (Khawla *et al.*, 2019). En la Tabla 10 se presentan las concentraciones máximas de algunos elementos de acuerdo con la EPA y USAID (2012). En la Tabla 11 se presenta el tratamiento sugerido para el agua residual de acuerdo con las condiciones del cultivo y tipo de reúso, con el propósito de obtener una calidad de agua adecuada para riego en la agricultura.

Tabla 10. Criterios recomendados de máximas concentraciones en la calidad del agua para riego

Elemento	Máximas concentraciones para riego (mg/L)	Observaciones
Aluminio	5,0	Puede causar toxicidad en suelos ácidos (pH < 5,5) y precipitado del ión en suelos alcalinos.
Arsénico	0,10	Tóxico para amplia variedad de plantas; desde 12 mg/L para el césped y 0,05 mg/L para arroz.
Berilio	0,10	Tóxico para variedad de plantas; desde 5 mg/L para col y 0,5 mg/L para frijol.
Boro	0,75	Esencial para el crecimiento de las plantas; tóxico para plantas sensibles a 1mg/L, pastos son tolerantes a 2,0 mg/L – 10 mg/L.
Cadmio	0,01	Tóxico para frijol, remolacha en 0,1 mg/L. Puede ser tóxico también para los humanos.
Cromo	0,1	No se reconoce como un elemento esencial.
Cobalto	0,05	Tóxico para los tomates a 0,1 mg/L; tiende a ser inactivo en suelos neutros y alcalinos.
Cobre	0,2	Tóxico para varias plantas de 0,1 mg/L a 1 mg/L.
Fluoruro	1,0	Inactivo en suelos neutros y alcalinos.
Hierro	5,0	No es tóxico para las plantas en suelos aireados, pero puede contribuir a la acidificación del suelo y la pérdida de fósforo y molibdeno.
Plomo	5,0	Puede inhibir el crecimiento de las células vegetales a concentraciones muy altas.
Litio	2,5	Tolerado por algunos cultivos a 5 mg/L; tóxico para cultivos cítricos a 0,075 mg/L.
Manganeso	0,2	Tóxico para algunos cultivos principalmente en suelos ácidos.
Molibdeno	0,01	No tóxico para las plantas.
Níquel	0,2	Tóxico para las plantas de 0,5 mg/L a 1,0 mg/L.
Selenio	0,02	Tóxico para las plantas en bajas concentraciones.
Vanadio	0,1	Tóxico para varias plantas en concentraciones relativamente bajas.
Zinc	2,0	Tóxico para muchas plantas, reduce su toxicidad en pH > 6,0.

Fuente: EPA y USAID (2012)

Tabla 11. Pautas sugeridas para la reutilización del agua en la agricultura y tratamiento

Tipo de reuso	Tratamiento	Calidad de agua tratada
Reuso agrícola en cultivos alimenticios no procesados comercialmente. Riego de cultivos, incluyendo los de consumo crudo.	Secundario Filtración Desinfección	pH = 6,9 – 9,0 DBO ≤ 10 mg/L ≤ 2 UNT < 1 Huevo/L No detectable Coli Fecal/100mL 1 mg/L CL ₂ residual (mínimo)
Reuso agrícola en cultivos de alimentos procesados comercialmente. Riego por ejemplo en viñedos.	Secundario Desinfección	pH = 6,9 – 9,0 DBO ≤ 30 mg/L SST ≤ 30 mg/L <200 Coli Fecal/100mL 1 mg/L CL ₂ residual (mínimo)
Reuso agrícola en cultivos no alimenticios. Riego de pastos, forrajes.	Secundario Desinfección	pH = 6,9 – 9,0 DBO ≤ 30 mg/L SST ≤ 30 mg/L <200 Coli Fecal/100mL 1 mg/L CL ₂ residual (mínimo)

Fuente: EPA (2004)

5.6.1 Normatividad de reúso en Colombia

Es importante conocer los parámetros fisicoquímicos y sus valores máximos permisibles en los vertimientos de agua residual doméstica, los cuales se presentan en la Resolución 0631 de 2015 “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas alcantarillado público y se dictan otras disposiciones” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). En la Tabla 12 se puede observar los parámetros y sus valores límites.

Tabla 12. Parámetros de vertimientos de agua residual doméstica en fuentes superficiales

Parámetro	Unidades	Agua residual doméstica (ARD) de viviendas unifamiliares o bifamiliares	Agua residual doméstica y del agua residual (ARD-ARnD) de los prestadores de servicio público de alcantarillado a cuerpos de agua superficiales, con una carga Menor o Igual a 625,00 Kg/día DBO ₅
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	200,00	180,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂		90,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	100,00	90,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,00	5,00
Grasas y Aceites	mg/L	20,00	20,00
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L		Análisis y Reporte
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L		Análisis y Reporte
Compuestos de Fósforo			
Ortofosfatos (P- PO ₄ ³⁻)	mg/L		Análisis y Reporte
Fosforo Total (P)	mg/L		Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno			
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L		Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L		Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L		Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L		Análisis y Reporte

Fuente: Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

La Resolución 1207 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible “Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas” presenta los criterios de calidad que debe cumplir el agua residual tratada para su uso en Agricultura o la Industria. Como su uso en el riego agrícola en Colombia se contemplan las siguientes actividades:

- Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal.
- Cultivos no alimenticios para humanos o animales.
- Cultivos de fibras celulósicas y derivados.
- Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes.
- Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles.

- Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos.

En la Tabla 13 se presentan los parámetros físicos, químicos, microbiológicos, entre otros; con los valores máximos permisibles para cumplir los criterios de calidad para su uso en la agricultura.

Tabla 13. Parámetros para el reúso de agua residual tratada en cultivos

Variable	Unidad de Medida	Valor Máximo Permisible
FÍSICOS		
pH	Unidades de pH	6,0 – 9,0
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	1.500,0
MICROBIOLÓGICOS		
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	1,0 * E (+5)
Enterococos Fecales	NMP/100 mL	1,0 * E (+2)
Helminthos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas/L	1,0
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	1,0
<i>Salmonella sp</i>	NMP/100 mL	1,0
QUÍMICOS		
Fenoles Totales	mg/L	1,5
Hidrocarburos Totales	mg/L	1,0
Iones		
Cianuro Libre	mg CN ⁻ /L	0,2
Cloruros	mg Cl ⁻ /L	300,0
Fluoruros	mg F ⁻ /L	1,0
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	500,0
Metales		
Aluminio	mg Al/L	5,0
Berilio	mg Be/L	0,1
Cadmio	mg Cd/L	0,01
Cinc	mg Zn/L	3,0
Cobalto	mg Co/L	0,05
Cobre	mg Cu/L	1,0
Cromo	mg Cr/L	0,1
Hierro	mg Fe/L	5,0
Mercurio	mg Hg/L	0,002
Litio	mg Li/L	2,5
Manganeso	mg Mn/L	0,2
Molibdeno	mg Mo/L	0,07
Níquel	mg Ni/L	0,2
Plomo	mg Pb/L	5,0
Sodio	mg Na/L	200,0
Vanadio	mg V/L	0,1
Metaloideos		
Arsénico	mg As/L	0,1
Boro	Mg B/L	0,4
No metales		
Selenio	mg Se/L	0,02
Otros parámetros		
Cloro Total Residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg Cl ₂ /L	Menor a 1,0
Nitratos (NO ₃ ⁻ -N)	mg/L	5,0

Fuente: Resolución 1207 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

5.7 Método de selección

Escoger la tecnología es una de las decisiones más importantes, pues permite desarrollar de manera eficiente el proceso de tratamiento o por el contrario no alcanzar los requerimientos exigidos por la normatividad, por lo cual solo se generarían gastos innecesarios. Existen diferentes modelos de selección que son un apoyo en el proceso de escoger la mejor opción.

Una de las herramientas existentes es el Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA), el cual es un conjunto de técnicas que ordena alternativas calificadas por la intensidad de las preferencias de los decisores y permite encontrar soluciones de compromiso a partir de estas preferencias. El proceso se centra en el decisor y su capacidad lógica de análisis (Raigoza, 2016). Otro de los métodos es el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) desarrollado por Thomas L. Saaty en 1980; es un procedimiento matemático creado para evaluar alternativas cuando se tienen en consideración varios criterios, y está basado en el principio que la experiencia y el conocimiento de los actores son tan importantes como los datos utilizados en el proceso. Sus funciones básicas son estructurar, medir y sintetizar (Osorio y Orejuela, 2008). Entre sus principales ventajas se tiene:

- Se puede analizar el efecto de los cambios en un nivel superior sobre el nivel inferior.
- Da información sobre el sistema y permite una vista panorámica de los actores, sus objetivos y propósitos.
- Permite flexibilidad para encarar cambios en los elementos de manera que no afecten la estructura total.
- Permite la participación de diferentes personas o grupos de interés y genera un consenso.

El AHP se ha utilizado en diversos campos de la economía, la política y la ingeniería. Este método permite asignar un valor que representa el grado de preferencia para una alternativa dada con respecto a las demás. Esos valores se pueden usar para clasificar y seleccionar alternativas basada en una estructura jerárquica (Leal, 2019). El método comienza identificando el problema que se desea resolver, luego se plantean unos criterios que definen la problemática u objetivo principal, unos subcriterios cuantificables de selección y por último se proponen unas posibles alternativas de solución. Los componentes o variables se organizan en una estructura jerárquica, donde se obtienen valores numéricos para los juicios de preferencia, y finalmente se sintetiza para determinar qué variable tiene la más alta prioridad (Pacheco y Contreras, 2008); en la Figura 5, se presenta la jerarquía del proceso AHP.

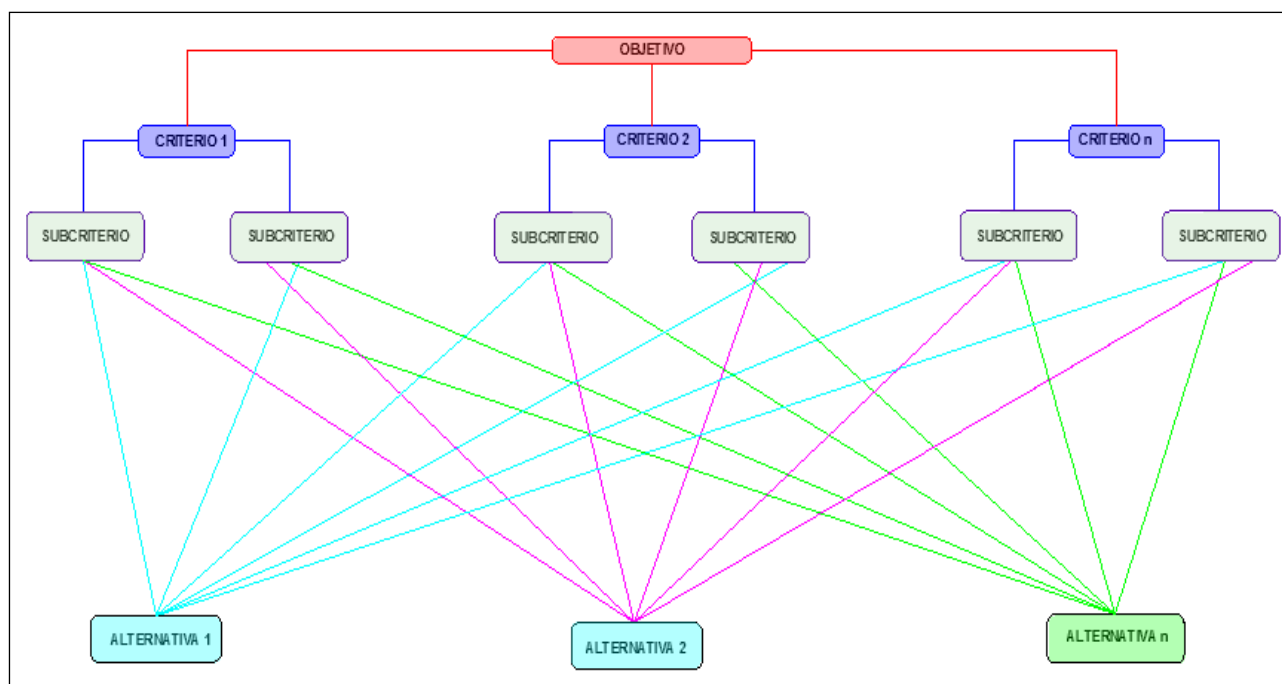


Figura 5. Esquema representativo del proceso analítico jerárquico

De acuerdo con Vásquez (2019), en el proceso de evaluación se emplea el uso de la escala numérica propuesta por Saaty (Tabla 14), la cual sirve para que las personas puedan comparar las alternativas y determinen cuántas veces es más importante un elemento sobre otro elemento, asignando un valor del 1 al 9.

Tabla 14. Escala numérica de Saaty

Escala numérica	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen de igual forma al objetivo.
3	Moderada importancia de un elemento sobre otro	El juicio y la experiencia previa favorecen levemente a un elemento en comparación con el otro.
5	Fuerte importancia de un elemento sobre otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento en comparación con el otro.
7	Muy fuerte	Uno de los elementos es fuertemente dominante.
9	Extrema importancia de un elemento sobre otro	Una alternativa domina completamente.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	Usados como valores de consenso entre dos juicios.

Fuente: Vásquez (2019); Yajure, (2015)

Estas comparaciones por pares generan una matriz **A** n por n, la evaluación se realiza de manera horizontal hasta evaluar todos los elementos entre sí, con el uso de la escala numérica mostrada en la Tabla 14. Posteriormente es necesario la normalización de los datos obtenidos dando como resultado una matriz normalizada **A'**; por último, el promedio de las filas de esta nueva matriz genera un vector de prioridad o pesos relativos **W** de los elementos comparados. El procedimiento del método se presenta en las siguientes ecuaciones (Jaramillo, 2014; Paredes *et al.*, 2010; Zeng *et al.*, 2007):

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,n} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{n,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x & y \\ \frac{1}{x} & 1 & z \\ \frac{1}{y} & \frac{1}{z} & 1 \end{pmatrix} \text{ Matriz de importancia relativa A} \quad \text{Ec. 1}$$

La x, y, z; de la matriz A representa la importancia relativa de un criterio frente a otro

$$A' = \begin{pmatrix} \frac{a_{1,1}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{1,2}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{1,n}}{\sum a_{in}} \\ \frac{a_{2,1}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{2,2}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{2,n}}{\sum a_{in}} \\ \frac{a_{3,1}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{3,2}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{3,n}}{\sum a_{in}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{1,1} & W_{1,2} & W_{1,n} \\ W_{2,1} & W_{2,2} & W_{2,n} \\ W_{3,1} & W_{3,2} & W_{n,n} \end{pmatrix} \text{ Matriz A normalizada} \quad \text{Ec. 2}$$

$$W = \begin{pmatrix} \frac{\sum W_{1,n}}{n} \\ \frac{\sum W_{2,n}}{n} \\ \frac{\sum W_{3,n}}{n} \end{pmatrix} \text{ Vector de prioridad o pesos relativos} \quad \text{Ec. 3}$$

El AHP permite identificar si la evaluación realizada por los expertos consultados es consistente o no, incorporando en el análisis un Índice de Consistencia (IC) y una Relación de Consistencia (RC), para medir la calidad de los juicios emitidos; $\lambda_{\text{máx.}}$ es el autovalor principal de la matriz de importancia relativa (A), es decir, el promedio de los valores del vector λ y λ es obtenido del producto matricial de la matriz de pesos W por la matriz de importancia relativa A por el inverso de la matriz de pesos W, y el n es el número de elementos en comparación. Se considera que un $RC < 0,1$ es aceptable, si es mayor se debe realizar nuevamente la valoración (Paredes *et al.*, 2010).

$$A \cdot W = \lambda \cdot W \quad \text{Ec. 4}$$

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx.}} - n}{n-1} \quad \text{Ec. 5}$$

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad \text{Ec. 6}$$

Los valores para el índice aleatorio (IA), están previamente determinados de acuerdo con el orden de la matriz; como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Índice de consistencia aleatoria

Orden de la matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fuente: García *et al.* (2006)

6. METODOLOGÍA

Para lograr el desarrollo de los objetivos específicos propuestos, se planteó una metodología para cada uno de ellos; como se presenta a continuación:

6.1 Caracterizar los municipios de estudio analizando información existente

En la Figura 6, se muestra la metodología desarrollada para la selección de los dos municipios de estudio; con base a la información bibliográfica consultada, entre ellos DANE (2018), Suárez (2010), Meneses (sf), entre otros.

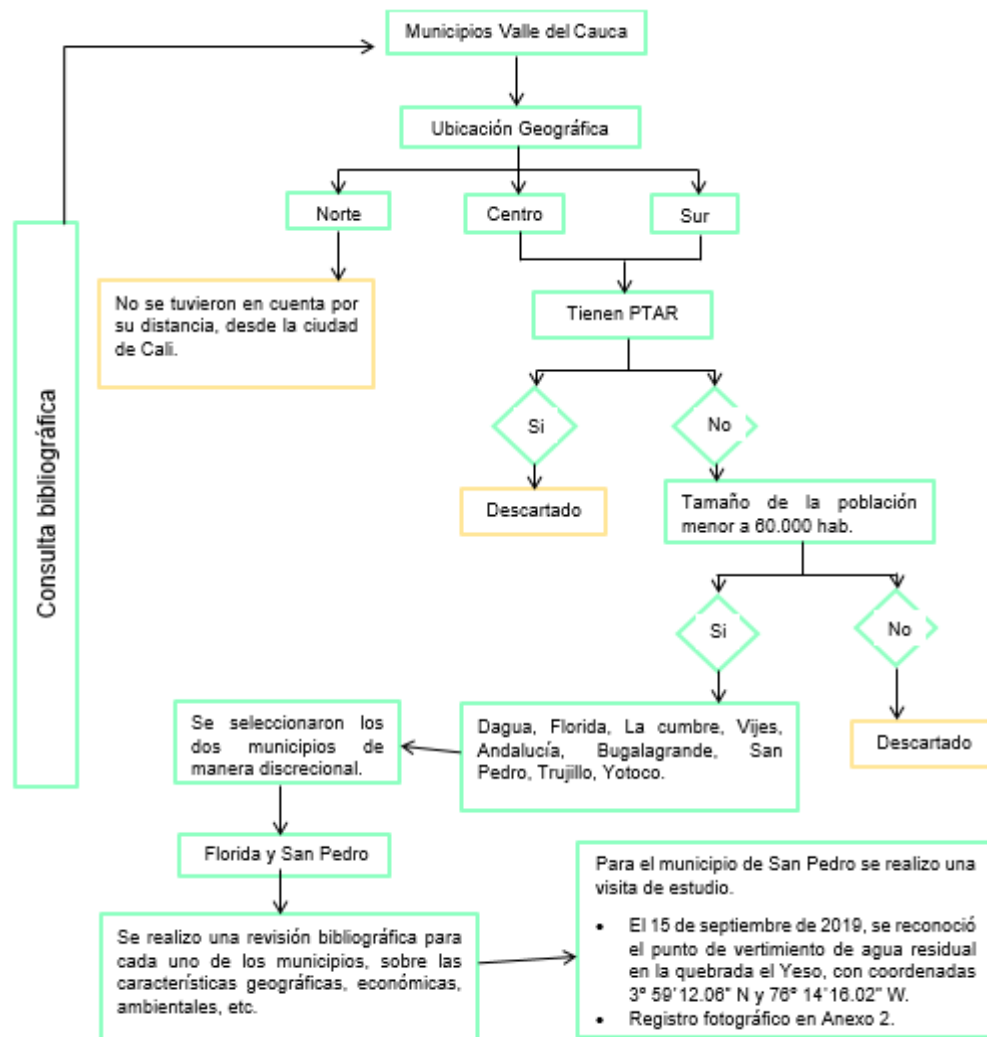


Figura 6. Metodología desarrollada para escoger los dos municipios

Para el municipio de Florida no se realizó visita a los puntos de descarga, se trabajó con la información consultada en el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) (UNIVALLE y CINARA, 2006), y con la información suministrada por las entidades de ACUAVALLE y CVC.

6.2 Identificar las características químicas, físicas y microbiológicas del agua residual en dos municipios del Valle del Cauca

En la Figura 7, se presenta el proceso metodológico seguido para la caracterización del agua residual doméstica de los municipios de estudio.

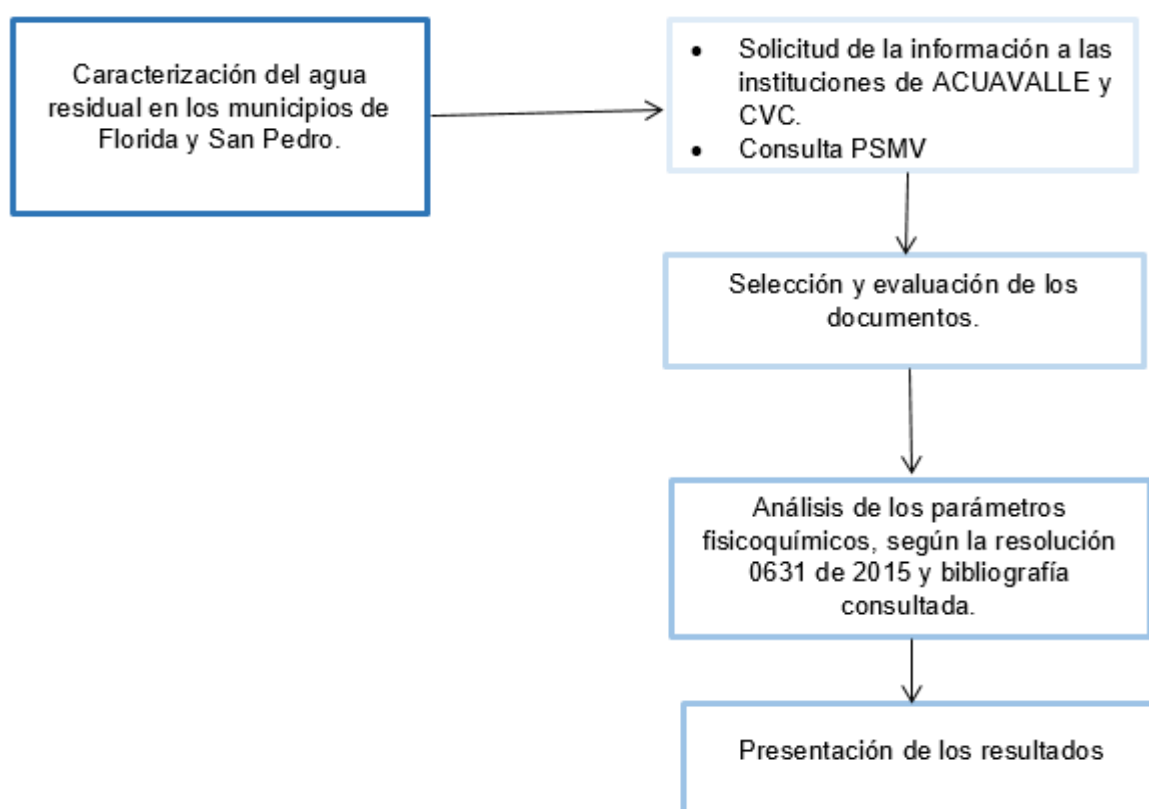


Figura 7. Metodología para la caracterización del agua residual en los dos municipios

Seleccionados los municipios de Florida y San Pedro, se realizó la solicitud de información a las instituciones de ACUAVALLE y CVC sobre la caracterización del agua residual doméstica; también se consultó los PSMV (UNIVALLE y CINARA, 2006) de ambos municipios.

Posteriormente se hizo la selección y evaluación de documentos, de los cuales se sustrajo la información relacionada con las características físicas, químicas y microbiológicas del agua residual doméstica; se ordenó la información por los años y puntos de descarga presentados, para luego tabular y graficar teniendo en cuenta bibliografía consultada y algunos de los parámetros fisicoquímicos para vertimientos, según la resolución 0631 de 2015 y sus valores máximos permisibles. La caracterización del agua residual en los municipios se realizó para definir si eran aguas aptas para un tratamiento biológico y escoger el tipo de alternativas tecnológicas a evaluar por el método de selección AHP.

De acuerdo a la información suministrada en el municipio de Florida, se trabajó con la caracterización del agua residual doméstica en el río Fraile y la quebrada Carisucio, para los años 2006 y 2007, ya que estos fueron los años con reporte en los siete puntos de vertimiento que se presentan en el municipio.

Para el municipio de San Pedro se trabajó con la caracterización del agua residual doméstica para los años 2007, 2014, 2017 y 2018 en el punto de vertimiento quebrada el Yeso.

6.3 Comparar las tecnologías de agua residual bajo criterios técnicos

Cuando se dice “bajo criterios técnicos”, no se refiere solo a la parte relacionada con la ingeniería sino al procedimiento que permite llegar al objetivo propuesto; es por ese motivo que, en el proceso metodológico del objetivo, se plantearon tres criterios (técnico, ambiental y económico), los cuales de acuerdo con el Artículo 14 de la Resolución 330 de 2017, se deben considerar en la comparación y selección de la alternativa tecnológica más viable.

Con los criterios de selección determinados se realizó una encuesta (Anexo 1), a 15 profesionales en áreas de la ingeniería sanitaria, civil, agrícola y químicos; con experiencia y conocimientos en el manejo y tratamiento del agua residual. Los expertos diligenciaron la primera parte de la encuesta en la cual se comparaban los criterios, y se evaluaban según la escala de Saaty (ver Tabla 14); se determinó cual criterio fue más importante que el otro, seleccionando la moda de los datos y posteriormente se sacó un promedio de los pesos para cada uno de los criterios seleccionados en las diferentes preguntas; con este resultado se procedió a realizar la comparación del criterio técnico con el criterio económico y ambiental de la primera fila de la matriz. Después, se inició en la segunda fila con el otro criterio para realizar la comparación y así sucesivamente con todos los elementos; hasta obtener como resultado la matriz de importancia relativa (A).

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,n} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{n,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x & y \\ \frac{1}{x} & 1 & z \\ \frac{1}{y} & \frac{1}{z} & 1 \end{pmatrix} \text{ Matriz de importancia relativa A}$$

Una vez obtenida la matriz de importancia relativa (A), se realizó su normalización; se sumó los valores en cada columna de la matriz (A) y se dividió cada uno de los elementos de la matriz (A) entre el total de la columna correspondiente; generando la matriz normalizada (A'). Luego se sacó el promedio de las filas de la matriz normalizada (A'), generando el vector de prioridad (W).

$$A' = \begin{pmatrix} \frac{a_{1,1}}{\sum a_{i,1}} & \frac{a_{1,2}}{\sum a_{i,2}} & \frac{a_{1,n}}{\sum a_{i,n}} \\ \frac{a_{2,1}}{\sum a_{i,1}} & \frac{a_{2,2}}{\sum a_{i,2}} & \frac{a_{2,n}}{\sum a_{i,n}} \\ \frac{a_{3,1}}{\sum a_{i,1}} & \frac{a_{3,2}}{\sum a_{i,2}} & \frac{a_{3,n}}{\sum a_{i,n}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{1,1} & W_{1,2} & W_{1,n} \\ W_{2,1} & W_{2,2} & W_{2,n} \\ W_{3,1} & W_{3,2} & W_{n,n} \end{pmatrix} \text{ Matriz A normalizada}$$

$$W = \begin{pmatrix} \frac{\sum w_{1,n}}{n} \\ \frac{\sum w_{2,n}}{n} \\ \frac{\sum w_{3,n}}{n} \end{pmatrix} \text{ Vector de prioridad o pesos relativos}$$

Después se hizo el producto de la matriz A por el vector W, en la cual cada uno de los valores de la primera fila de la matriz (A) se multiplica por los valores del vector de prioridad, y así sucesivamente se hizo lo mismo para las otras filas. Después se determinó λ , el cual se obtuvo del producto matricial de W por A por el inverso del vector de prioridad W. Luego se escogió el valor del índice aleatorio (IA), según el orden de la matriz (ver Tabla 15), que para este caso era de orden 3; posteriormente se sacó el promedio de los valores del vector λ y se obtuvo $\lambda_{\text{máx.}}$, luego se calculó el índice de consistencia (IC), que es la división de $\lambda_{\text{máx.}}$ menos el número de elementos en comparación (n) que en este caso es 3, dividido (n) menos 1.

$$A \cdot W = \lambda \cdot W$$

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx.}} - n}{n-1}$$

Por último, para determinar si la evaluación realizada por los expertos consultados en la primera parte de la encuesta fue consistente, según el AHP, se realizó la relación de consistencia (RC) la cual debe ser $< 0,1$; se dividió el IC entre IA.

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Para la segunda parte de la encuesta se presentó los criterios con sus respectivos subcriterios, estos subcriterios se escogieron de acuerdo a la Resolución 330 de 2017 y a lo presentado por Jaramillo (2014), donde se muestra que hacen parte de los indicadores más citados por diferentes autores según su revisión de literatura; en el componente técnico uno de los indicadores seleccionados fue la eficiencia de remoción de parámetros contaminantes (DBO, DQO, y coliformes), estos parámetros se ponderaron con la misma importancia para todos, sin ser evaluados individualmente; y en la parte ambiental la calidad microbiológica del efluente dado el uso que se le dará al agua. Luego los expertos le dieron un peso a cada uno de ellos; y se calculó el vector de prioridad para los subcriterios, multiplicando el vector de prioridad (W) de los criterios por el peso de los subcriterios.

Posteriormente se realizó las matrices para cada criterio con sus subcriterios, comparando tres tecnologías (Filtro percolador, biodiscos y lagunas de estabilización). Estas tecnologías fueron las escogidas para aplicar el método de selección, ya que con la caracterización del agua residual se tenían condiciones para implementar un sistema de tratamiento biológico, también porque de acuerdo con Suárez (2010) y la CVC citado por Meneses (sf), entre las tecnologías que predominan en el Valle del Cauca se encuentran las lagunas de estabilización y el filtro percolador; los biodiscos se escogieron para evaluar su viabilidad de implementación, dado que en el departamento se encuentran solo en el municipio de Ginebra como planta experimental.

También se eligieron estas tecnologías, teniendo en cuenta lo manifestado por Von Sperling (2012), Rodríguez *et al.* (2015) y en la Resolución 330 de 2017, donde se dice que son eficientes en la remoción de parámetros como DBO₅, DQO, SST, entre otros. En el desarrollo de estas matrices, se evaluaron los subcriterios en las alternativas tecnológicas de acuerdo a la bibliografía consultada y a la caracterización de los municipios.

6.4 Seleccionar alternativas tecnológicas para el tratamiento del agua residual con propósito de reúso

Para la selección de la alternativa tecnológica por medio del AHP, con cada uno de los vectores de prioridad de las matrices de cada municipio, se conformo la matriz de alternativas evaluada en los subcriterios y se multiplico por el vector de prioridad de los subcriterios; dando como resultado el peso de cada alternativa, y fue así, como se eligió la mejor tecnología de tratamiento de agua residual domestica para los municipios de San Pedro y Florida (Tabla 38 y 40).

7. RESULTADOS

7.1 Caracterizar municipios de estudio

Como se describió en la metodología para escoger los municipios de estudio, se tuvo en cuenta la ubicación geográfica de los municipios del Valle del Cauca, tamaño de la población, existencia de PTAR; y fue de esta manera como se seleccionaron los municipios de San Pedro y Florida para su caracterización.

7.1.1 San Pedro

El municipio de San Pedro se ubica en el centro del Valle del Cauca, limita al norte con el municipio de Tuluá, al sur con el municipio de Guadalajara de Buga, al occidente con Yotoco y al oriente con los municipios de Tuluá y Buga (URL 3); está a una altitud de 980 msnm, tiene una extensión de 240 km² y una temperatura de 23°C. De acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (2018), la población total del municipio para el año 2020 era de 17.201 y en la zona cabecera de 7.776.

Su economía radica principalmente en la agricultura, ganadería y el sector avícola (URL 3). En el boletín del Sistema de Estadísticas Territoriales de San Pedro, se presentan los ingresos y gastos per cápita del municipio, como se observa en la Figura 8.

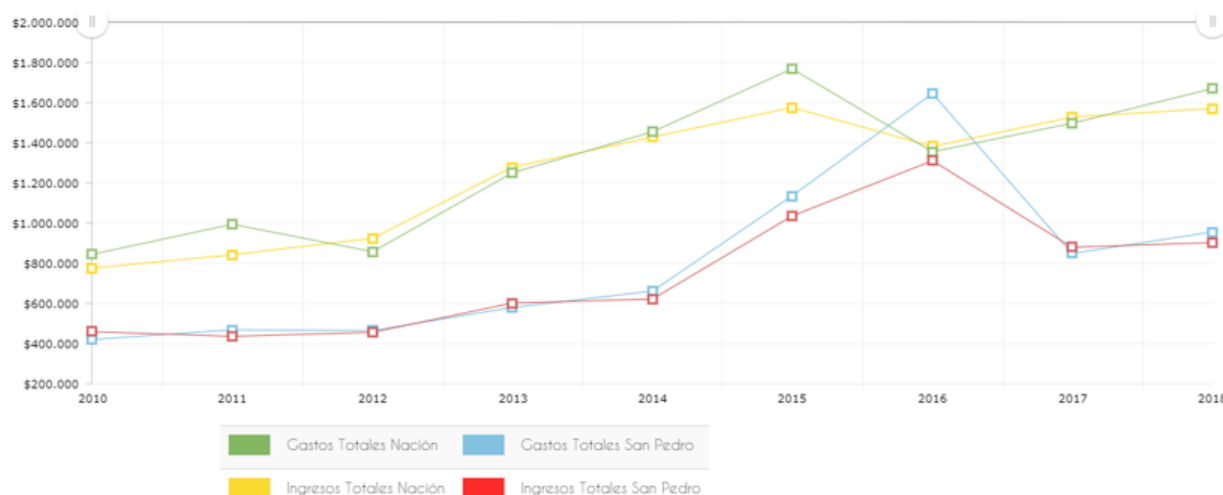


Figura 8. Ingresos y gastos totales per cápita (pesos corrientes)

Fuente: DNP a partir de información del FUT y DANE, 2010-2018 citado por el Sistema de Estadísticas Territoriales (DNP, sf)

Según la información presentada en la Figura 8, las finanzas para los años 2010 al 2018 en cuanto los gastos totales per cápita del municipio, en su mayoría, fueron superiores a los ingresos totales; lo que genera un déficit en el desarrollo de actividades u obras importantes en el municipio. La situación financiera del municipio influye en la selección de la tecnología para la implementación de una PTAR, ya que se evalúa los costos de inversión, de operación y mantenimiento.

De acuerdo con el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) (UNIVALLE y CINARA, 2006), en San Pedro el sistema de alcantarillado existente es de tipo combinado, y el agua residual es transportada a través de dos colectores primarios de 10" y 12", y un emisor final de 14" que lleva el agua a la quebrada el Yeso, que posteriormente descarga al río Cauca sin ningún tipo de tratamiento. La cobertura en el área urbana es del 95% según lo manifestado por Vallecaucana de Aguas (2016) en el Programa Agua y Saneamiento para la Prosperidad 2016- 2019. La empresa prestadora del servicio de alcantarillado es ACUAVALLE S.A ESP, la cual tiene un registro para el año 2020 de 2.152 suscriptores facturados. En la Figura 9, se puede observar el punto de vertimiento del agua residual en el municipio



Figura 9. Punto de descarga en la quebrada el Yeso, coordenadas geográficas N3°59'12.06" W 76°14'16.02"

7.1.2 Florida

El municipio de Florida se ubica en el suroriente del Valle del Cauca, limita al norte con el municipio de Pradera, al oriente con el departamento del Tolima, al sur departamento del Cauca y al occidente con el municipio de Candelaria; tiene una extensión de 378 Km², una temperatura de 24°C y la zona urbana se encuentra a una altura de 1.088 msnm (URL 4). De acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (2018), la población total del municipio para el año 2020 era de 57.961 y para la cabecera 40.411.

La economía principal del municipio radica en la agricultura, ganadería y el cultivo de caña de azúcar (URL 4). En el boletín del Sistema de Estadísticas Territoriales, de Florida, se presentan los ingresos y gastos per cápita del municipio, como se observa en la Figura 10.

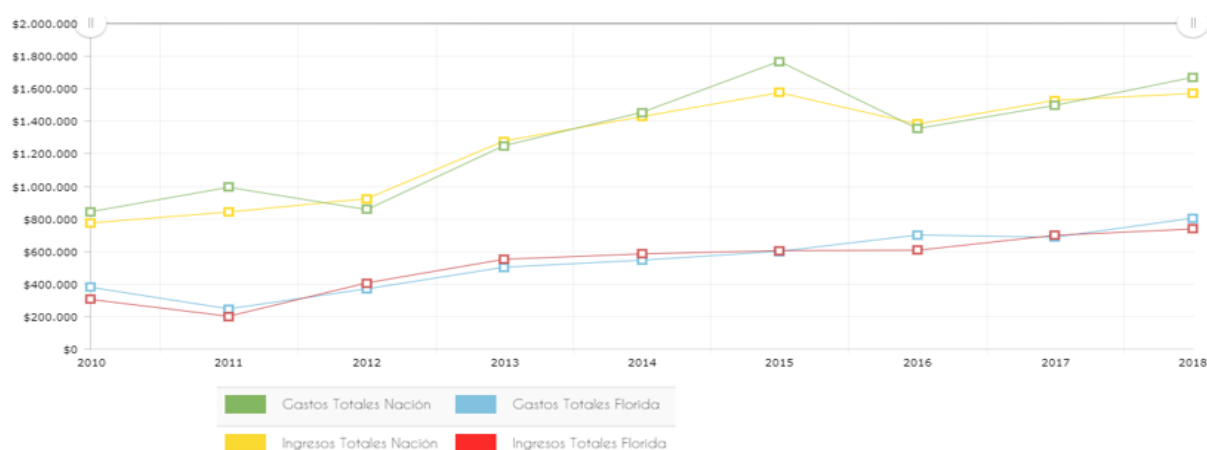


Figura 10. Ingresos y gastos totales per cápita (pesos corrientes)

Fuente: DNP a partir de información del FUT y DANE, 2010-2018 citado por el Sistema de Estadísticas Territoriales (DNP, sf).

Según la información presentada en la Figura 10, las finanzas para los años 2010 al 2018 en cuanto los gastos totales per cápita del municipio, fueron superiores a los ingresos; lo cual genera un déficit para la economía del municipio e influye en la evaluación de los costos de inversión, operación y mantenimiento de la tecnología de tratamiento.

De acuerdo con el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) (UNIVALLE y CINARA, 2006), en Florida el sistema de alcantarillado existente en el sector urbano funciona como semicombinado en época de invierno. El agua residual es transportada por un sistema de colectores que entregan a siete emisores finales los cuales llevan el agua al río Fraile y a la quebrada Carisucio sin ningún tipo de tratamiento. En total se generan siete descargas de las cuales cuatro van hacia el río Fraile y tres a la quebrada Carisucio.

En la Tabla 16, se presentan los puntos de descarga de agua residual en el municipio de Florida.

Tabla 16. Puntos de descarga de agua residual del municipio de Florida

Punto	Coordenadas geográficas	Ubicación	Fuente receptora
1	N 3°19'56.5" W 76°14'26.7"	Barrio San Jorge	Quebrada Carisucio
2	N 3°19'45.0" W 76°14'02.6"	Barrio Moncaleano	Quebrada Carisucio
3	N 3°19'40.0" W 76°13'53.7"	Escuela María Forrero	Quebrada Carisucio
4	N 3°19'17.2" W 76°14'25.6"	Margen derecha río Fraile	Río Fraile
5	N 3°19'14.6" W 76°14'25.1"	Margen izquierda río Fraile	Río Fraile
6	N 3°19'36.2" W 76°14'43.4"	Barrio La Esperanza	Río Fraile
7	N 3°19'50.8" W 76°14'52.3"	Barrio Quinamayó	Río Fraile

Fuente: Adaptado de PSMV (UNIVALLE y CINARA, 2006)

La cobertura del sistema de alcantarillado en el área urbana es del 87% según lo manifestado por Vallecaucana de Aguas en el Programa Agua y Saneamiento para la Prosperidad 2016-2019. La empresa prestadora del servicio de alcantarillado es ACUAVALLE S.A ESP, la cual tiene un registro para el año 2020 de 5.374 suscriptores facturados. En la Figura 11, se pueden observar los puntos de vertimiento del agua residual en el municipio.



Figura 11. Puntos de vertimiento de agua residual en el municipio de Florida

Fuente: PSMV (UNIVALLE y CINARA, 2006)

7.2 Características fisicoquímicas y microbiológicas del agua residual

7.2.1 San Pedro

La caracterización del agua residual del municipio de San Pedro fue en la quebrada el Yeso para los años 2007, 2014, 2017 y 2018, de acuerdo con los análisis presentados por ACUAVALLE y CVC. Se presenta los resultados para los siguientes parámetros:

pH

El potencial de hidrógeno es un indicador sobre la condición de acidez o alcalinidad del agua; su variación puede ser de origen natural, como la disolución de las rocas o por procesos antrópicos. Para un pH inferior a 7,0 unidades se considera condiciones ácidas (Von Sperling, 2012). De acuerdo con los resultados de laboratorio presentado por ACUAVALLE y CVC, el pH para el agua residual doméstica en San Pedro se encuentra dentro del rango límite permisible para vertimientos, según la Resolución 0631 de 2015, que establece un rango entre 6,0 a 9,0 unidades, como se muestra en la Figura 12, por lo cual se consideró que el pH del vertimiento para los años analizados no aportaba a la quebrada el Yeso acidez o alcalinidad.

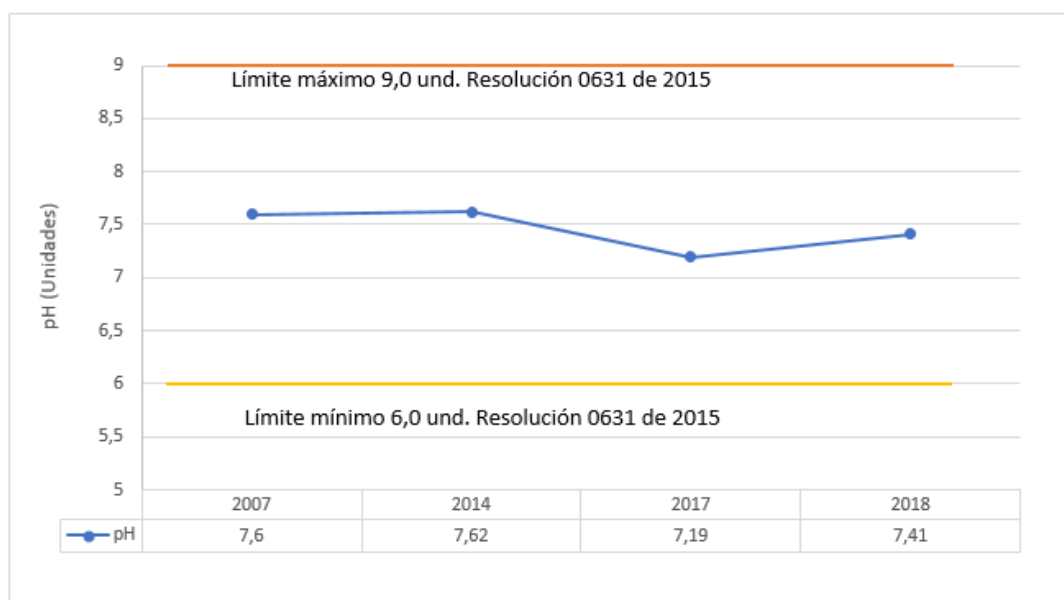


Figura 12. Comportamiento del pH en punto de vertimiento

Temperatura

La temperatura hace parte de las características físicas principales del agua residual, influye en la actividad biológica y en la velocidad de transferencia de los gases disueltos (Metcalf & Eddy, 1995). En la Figura 13 se muestra la temperatura en el vertimiento con predominio de 24°C, según la literatura, ésta cumple para el desarrollo de la actividad microbiana y también cumple con la Resolución 0631 de 2015, en la cual el valor límite máximo permisible es de 40°C.

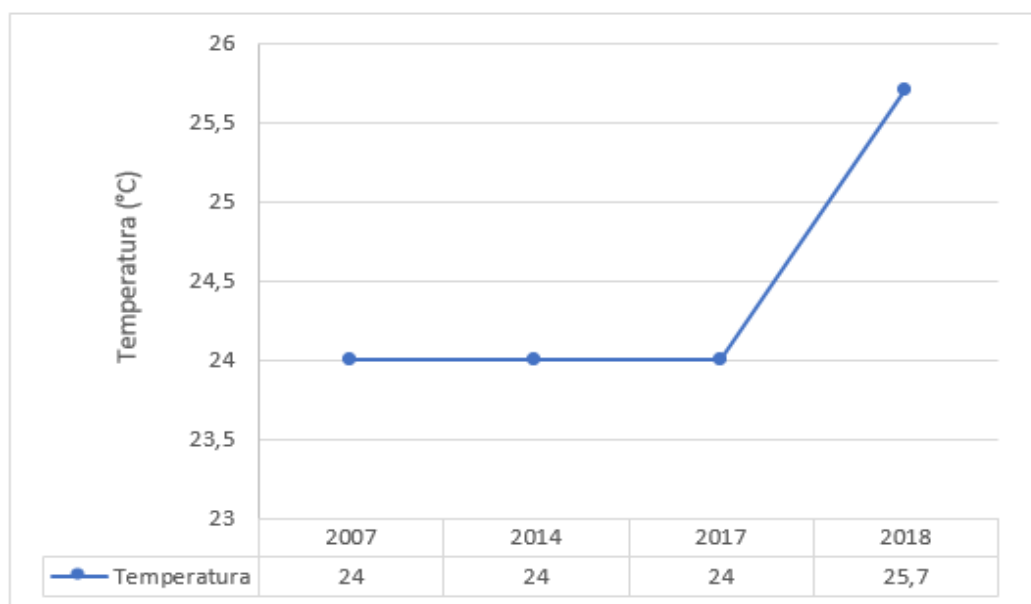


Figura 13. Comportamiento de la temperatura en punto de vertimiento

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

Este parámetro permite estimar la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos después de 5 días, en la oxidación bioquímica de la materia orgánica (Von Sperling, 2012). De acuerdo con la Guía para el Manejo, Tratamiento y Disposición Final de las Aguas Residuales Municipales (Ministerio del Medio Ambiente, 2002), se considera una alta concentración valores de 300 mg/l, media 200 mg/l y 100 mg/l baja. En la Figura 14, se muestran las concentraciones registradas de DBO₅, la cual es alta lo que puede afectar la quebrada, ya que se consume parte del oxígeno utilizado para el desarrollo de la flora y fauna, en la oxidación de la materia orgánica.

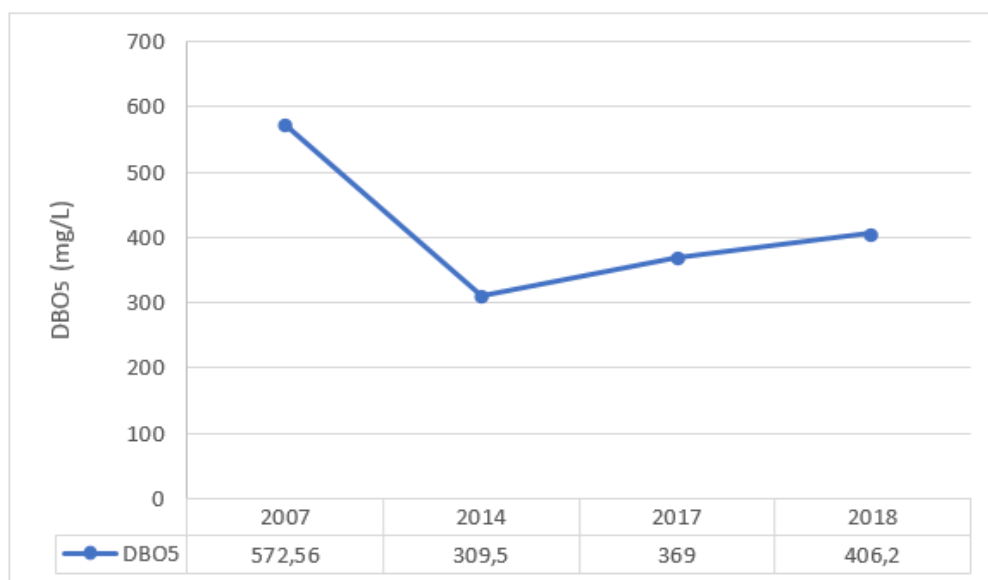


Figura 14. Análisis de DBO₅

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

De acuerdo con los resultados presentados en la Figura 15, se consideró una DQO relativamente alta ya que superan el valor de una concentración media para un agua residual municipal, de acuerdo con la Guía para el Manejo, Tratamiento y Disposición Final de las Aguas Residuales Municipales (Ministerio del Medio Ambiente, 2002), una concentración de 500 mg/l es considerada media y 1000 mg/l es alta. Por lo tanto, el contenido de materia orgánica oxidable químicamente en el agua residual es alto, y puede estar relacionado con vertimientos no domésticos.

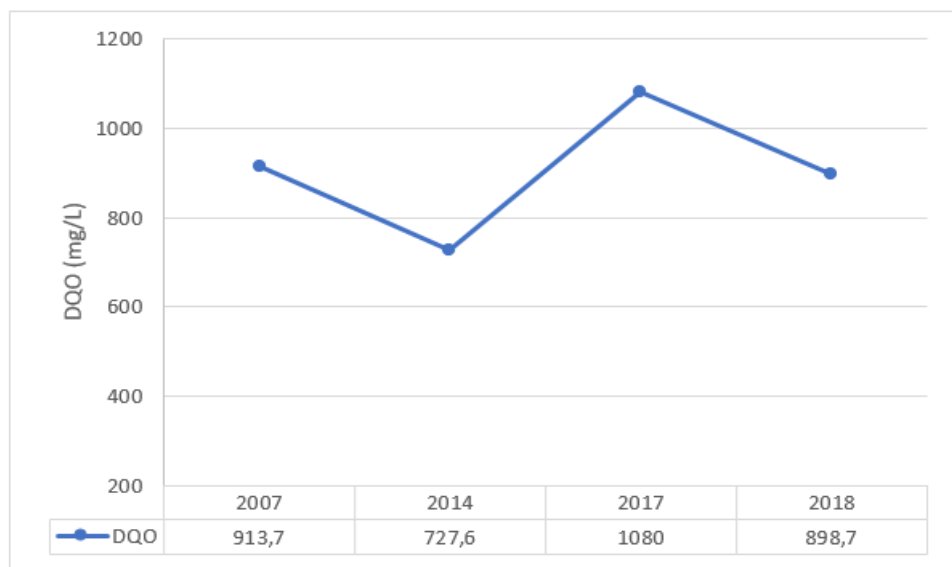


Figura 15. Comportamiento DQO

Relación DBO₅/DQO

De acuerdo con Metcalf & Eddy (1995), la relación DBO₅/DQO para el agua residual doméstica se halla en el rango de 0,4 - 0,8 y Doménech y Peral (2006) manifiestan que la relación DBO₅/DQO superiores a 0,4 el agua puede considerarse biodegradable, mientras valores inferiores a 0,2 se consideran no biodegradables. Con esta relación se puede deducir acerca de la biodegradabilidad del agua y, así, determinar si es apropiada para un tratamiento biológico. En los resultados presentados en la Figura 14 y 15, se pudo calcular que la relación DBO₅/DQO presenta valores entre 0,4 y 0,6 por lo cual se considera biodegradable y es viable el uso de una tecnología de tipo biológico.

Sólidos Suspendidos Totales (SST)

La concentración de SST se encontró por encima del límite máximo permisible (90 mg/l) según la Resolución 0631 de 2015. La Guía para el Manejo, Tratamiento y Disposición Final de las Aguas Residuales Municipales (Ministerio del Medio Ambiente, 2002) tiene la siguiente clasificación alta 500 mg/l, media 300 mg/l y baja 100 mg/l. De acuerdo con las concentraciones de SST presentadas en la Figura 16, se observa una variación entre media y alta, lo cual se puede relacionar a las actividades agrícolas y ganaderas de la zona.

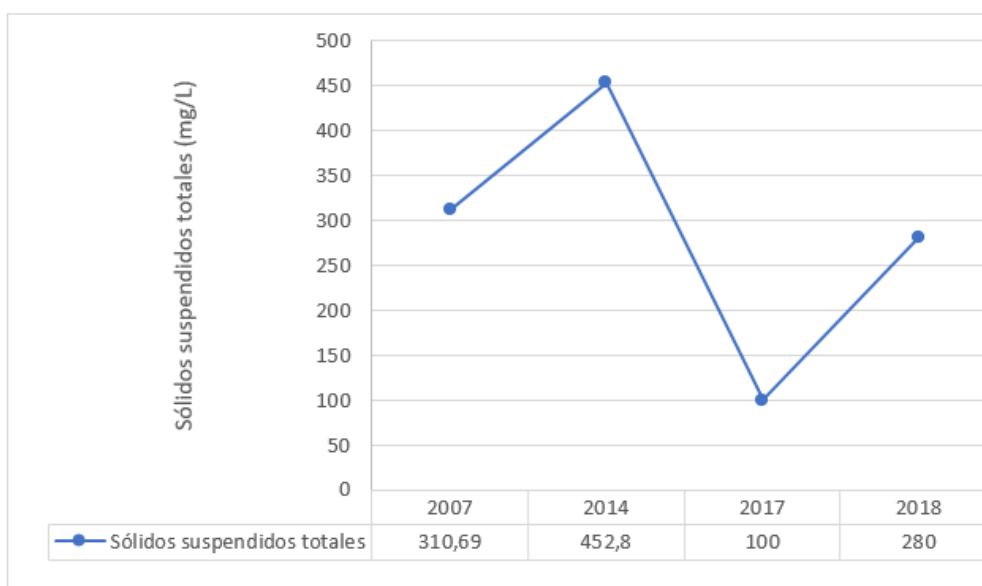


Figura 16. Comportamiento de los sólidos suspendidos totales

Grasas y Aceites

De acuerdo con Metcalf & Eddy (1995), la existencia de grasas y aceites en el agua residual puede generar problemas en la red de alcantarillado como en las plantas de tratamiento, si no se elimina el contenido de grasa antes del vertido del agua residual, ya que estas pueden interferir con la vida biológica en el agua superficial creando películas y acumulaciones de materia flotante. En la Figura 17, se presenta la concentración de grasas y aceites los cuales se encontraron por encima del límite máximo permisible contemplado en la Resolución 0631 de 2015 (20 mg/l); además de superar el valor máximo estipulado en las características típicas del agua residual municipal, según la Guía para el Manejo, Tratamiento y Disposición Final de las Aguas Residuales Municipales (Ministerio del Medio Ambiente, 2002), donde una concentración de 40 mg/L se considera alta.

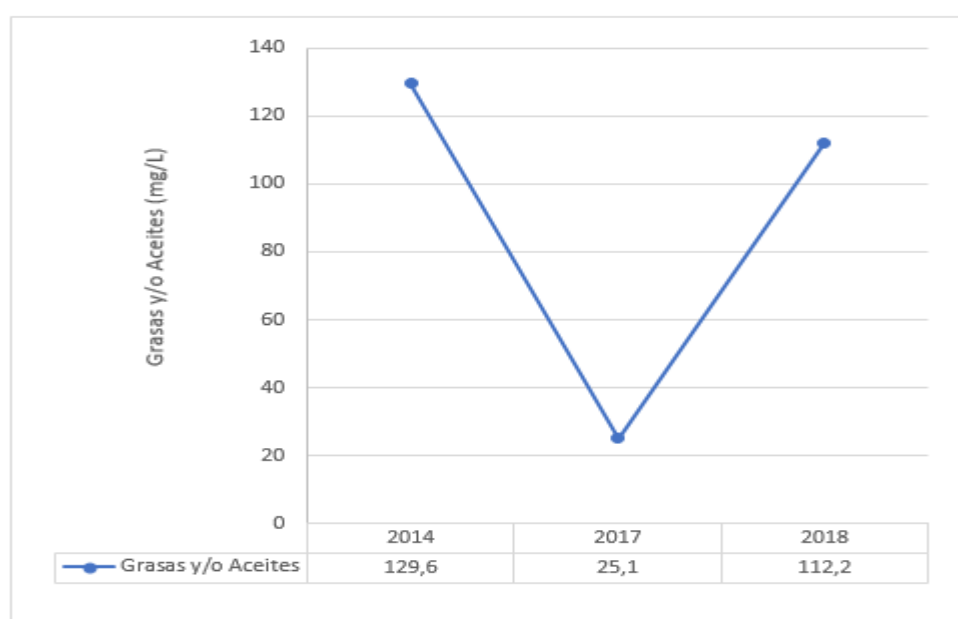


Figura 17. Comportamiento grasas y aceites

Coliformes Fecales

Los coliformes fecales son un grupo de bacterias indicadoras de organismos predominantes del tracto intestinal humano y animales; comprende el género *Escherichia*, y en menor grado especies de *Enterobacter* y *Citrobacter* (Von Sperling, 2012). De acuerdo con la Guía para el Manejo, Tratamiento y Disposición Final de las Aguas Residuales Municipales (Ministerio del Medio Ambiente, 2002), se considera una concentración media de Coliformes Fecales (NMP/100 ml) un valor de 10^7 , y alta de 10^9 ; de acuerdo con lo presentado en la Figura 18, los coliformes fecales en el vertimiento se presentan en una concentración entre media y alta.

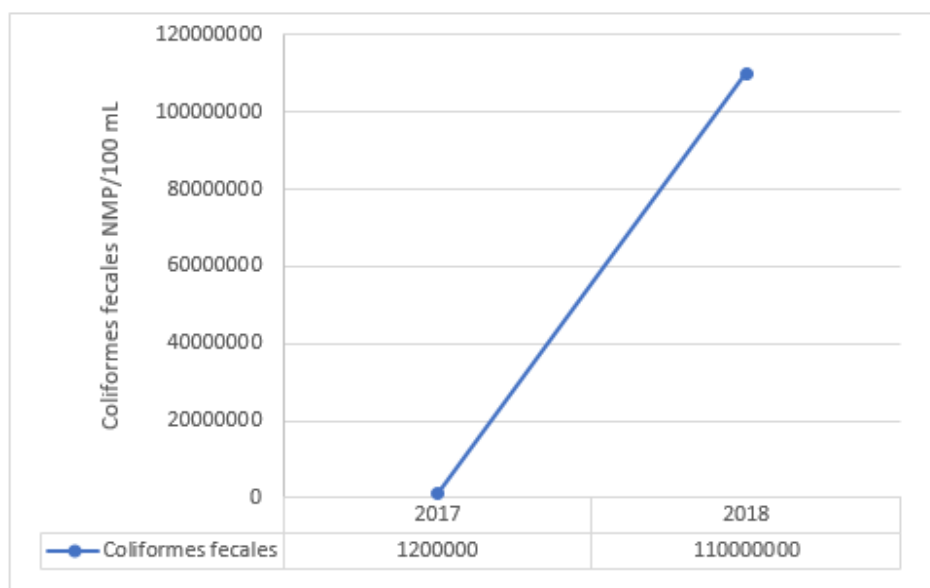


Figura 18. Comportamiento Coliformes fecales

Dado que el agua residual posteriormente tratada se va a emplear en riego, es importante considerar que el NMP de coliformes fecales no debe exceder los 100.0000 de acuerdo con la Resolución 1207 de 2014.

En el municipio de San Pedro la caracterización del agua residual para los parámetros DBO₅, DQO, SST y grasas, no cumplen con la Resolución 0631 de 2015, ya que son superiores a los límites máximos permisibles.

Caudal

El caudal de agua residual doméstica en el punto de vertimiento en la quebrada el Yeso reportado para los años 2007, 2014 y 2018, se presenta en la Figura 19.

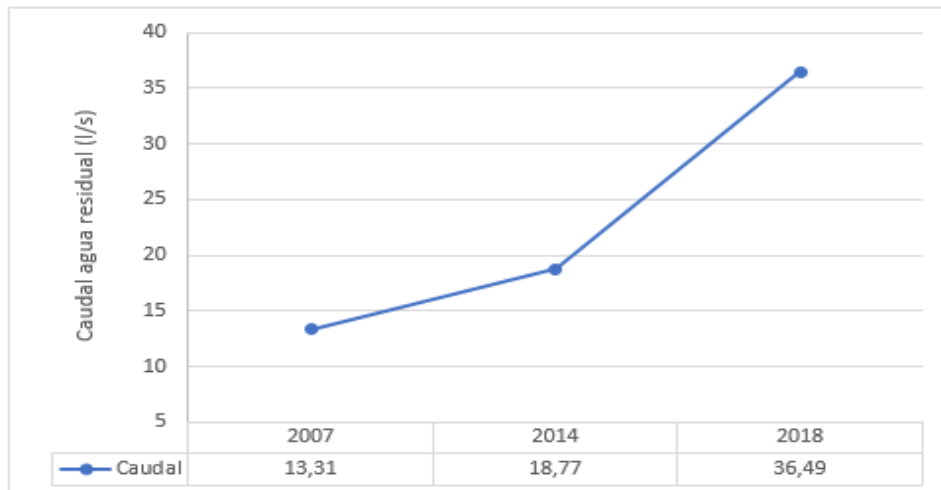


Figura 19. Caudal de agua residual doméstica

7.2.2 Florida

La caracterización del agua residual en el municipio de Florida se realizó con la información de los años 2006 y 2007 en el río Fraile y la quebrada Carisucio; ya que estos fueron los años con reporte en los siete puntos de vertimiento. Se presentan los resultados para los siguientes parámetros:

pH

El pH para el agua residual doméstica en Florida en los siete puntos de muestreo se encontró dentro del rango límite permisible para vertimientos, según la Resolución 0631 de 2015, en la cual se establece un rango entre 6,0 a 9,0 unidades, como se muestra en la Figura 20.

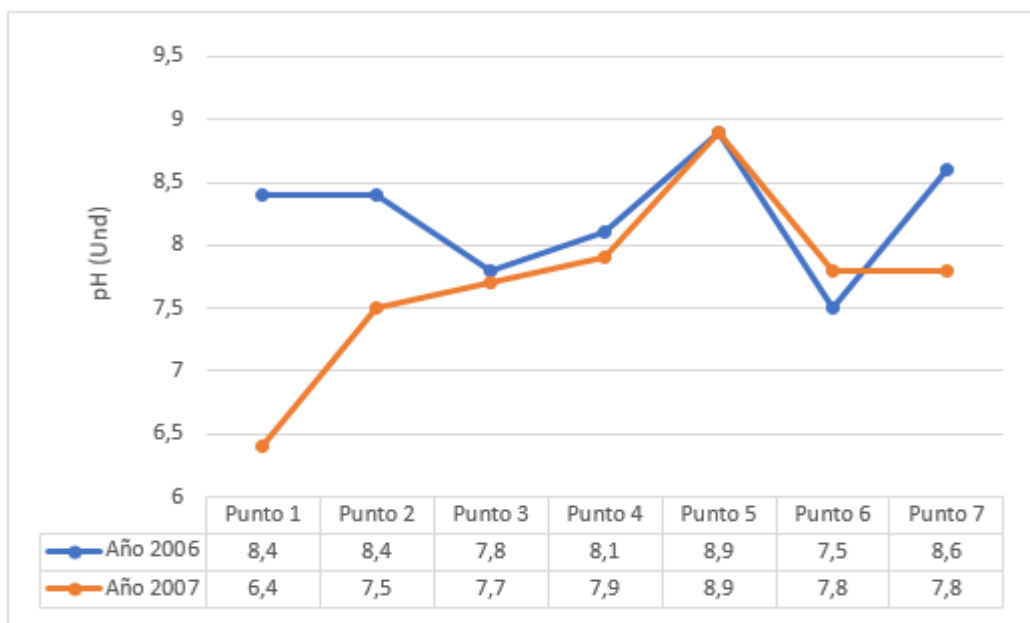


Figura 20. Comportamiento del pH en el vertimiento

Temperatura

La temperatura en los puntos de vertimiento se encontró en el rango de los 25°C a 27°C, cumpliendo con el valor máximo permisible por la norma (40°C), como se muestra en la Figura 21.

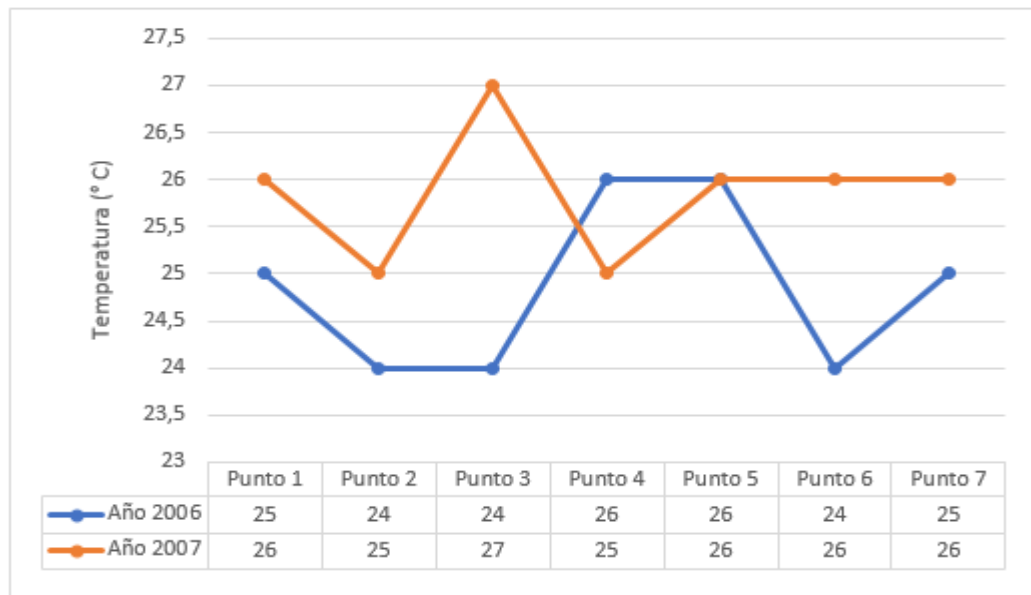


Figura 21. Comportamiento de la temperatura en el vertimiento

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

De acuerdo con los resultados presentados por ACUAVALLE en los puntos de vertimiento, la concentración de DBO₅ se considera alta, teniendo en cuenta las características típicas de un agua residual municipal según la Guía para el Manejo, Tratamiento y Disposición Final de las Aguas Residuales Municipales (Ministerio del Medio Ambiente, 2002), donde 300 mg/l es alto y 200 mg/l es medio. En la Figura 22, se muestran las concentraciones registradas.

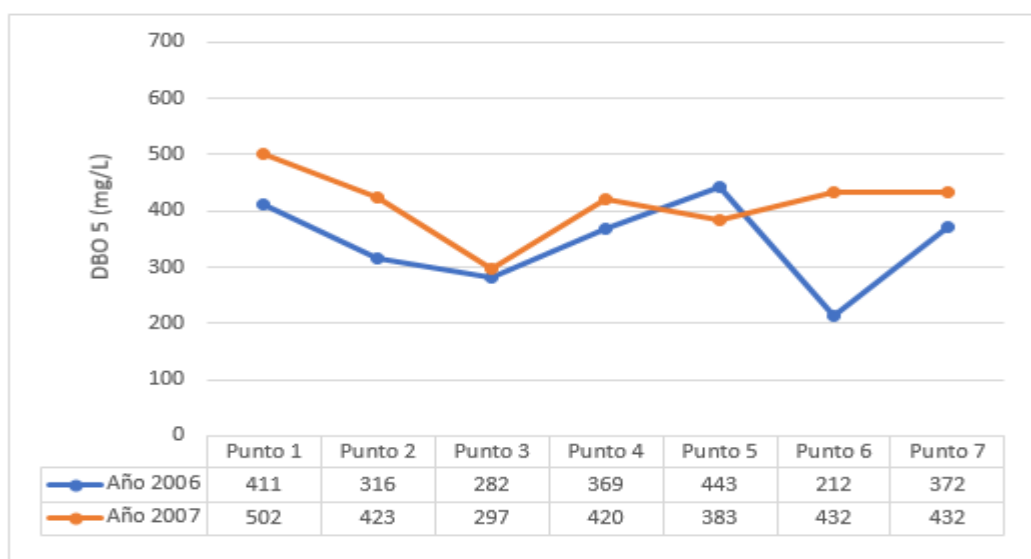


Figura 22. Concentración de DBO₅ en puntos de vertimiento

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La concentración de DQO en los puntos de vertimiento para el río Fraile y la quebrada Carisucio es alta, teniendo en cuenta las características típicas de un agua residual municipal, de acuerdo con la Guía para el Manejo, Tratamiento y Disposición Final de las Aguas Residuales Municipales (Ministerio del Medio Ambiente, 2002), donde una concentración de 1000 mg/l es alto y 500 mg/l es medio. En la Figura 23, se muestra los resultados para la DQO.

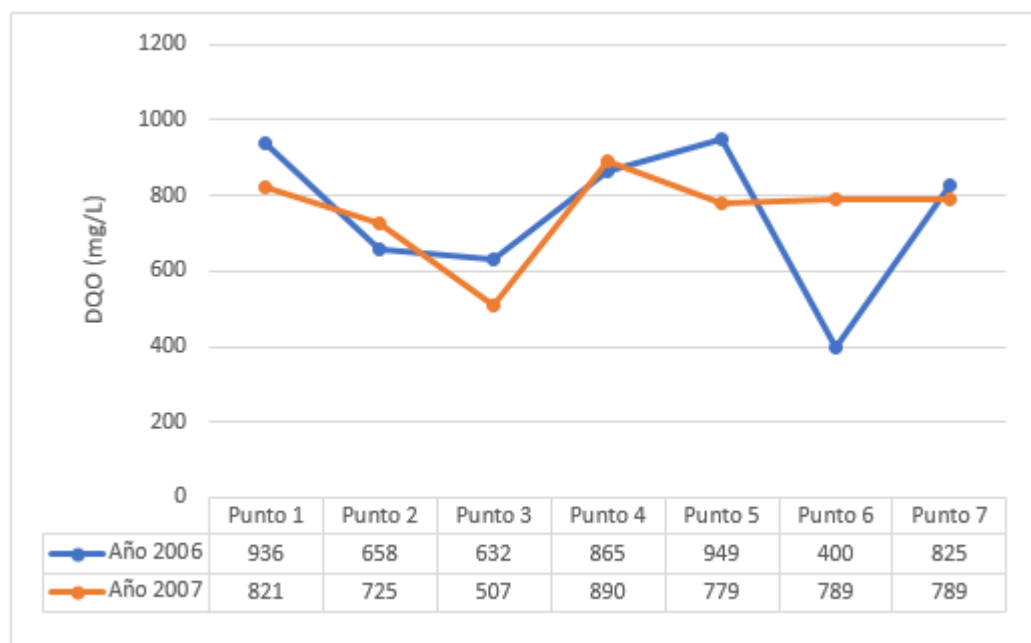


Figura 23. Concentración de DQO en puntos de vertimiento

Relación DBO_5/DQO

En los resultados presentados en la Figura 22 y 23, se puede calcular que la relación DBO_5/DQO está en un rango de 0,4 a 0,6 por lo cual se considera biodegradable, lo que permitió considerar un sistema de tratamiento biológico.

Sólidos Suspendedos Totales (SST)

La concentración de SST se encuentra principalmente en un nivel medio-alto, de acuerdo con las características típicas de un agua residual municipal presentada en la Guía para el Manejo, Tratamiento y Disposición Final de las Aguas Residuales Municipales (Ministerio del Medio Ambiente, 2002), donde 500 mg/l es alto, 300 mg/l medio y 100 mg/l bajo. El arrastre de sólidos en las zonas de cultivos agrícolas influye en el contenido de SST en el agua residual. En la Figura 24, se presenta el comportamiento de los SST en los puntos de vertimiento.

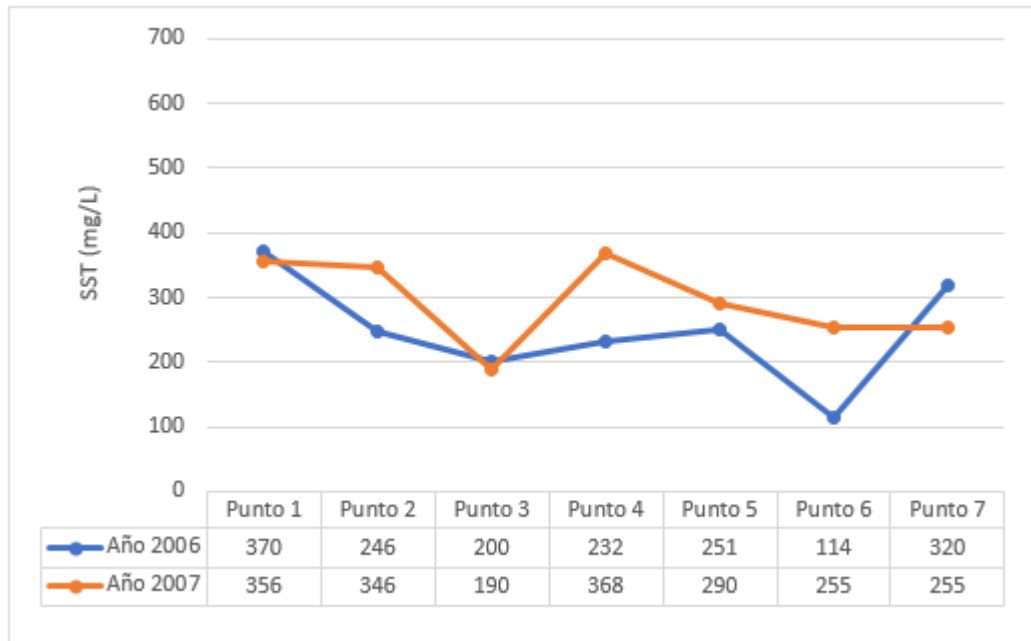


Figura 24. Comportamiento sólidos suspendidos totales

En la Figura 25, se presenta el esquema de la centralización de los siete puntos de vertimiento en la caracterización del agua residual para los parámetros DBO₅, DQO, SST; esta centralización es una propuesta solo con fines académicos, ya que en la realidad la empresa prestadora del servicio no contempla realizar esta operación por cuestiones técnicas propias del municipio.

Los parámetros analizados no cumplen con la Resolución 0631 de 2015, ya que son superiores a los límites máximos permisibles presentados en la norma.

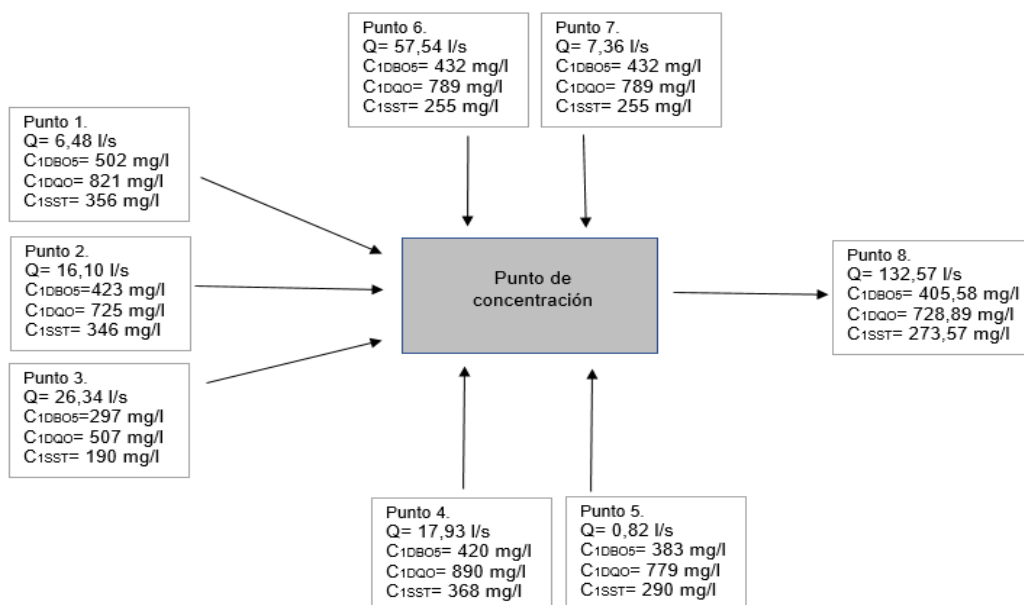


Figura 25. Esquema de centralización de los puntos de vertimiento en Florida

7.3 Comparación de las tecnologías de tratamiento de agua residual bajo criterios técnicos

El objetivo propuesto se realizó con la información suministrada por los expertos en la encuesta. A continuación, se presenta las Tablas 17,18 y 19 con los pesos asignados a los criterios por parte de los profesionales consultados, y con esta información se desarrolló la matriz de importancia relativa (A).

Tabla 17. Resultado encuesta comparación criterio técnico y económico

Expertos consultados	¿Cuál criterio es más importante el Técnico o el Económico?	¿Qué importancia tiene el criterio marcado con respecto al otro?	Definición Saaty	La moda	Promedio	Definición Saaty
1	ECONÓMICO	3	MODERADA IMP.	TÉCNICO	3	MODERADA IMP.
2	TÉCNICO	1	IGUAL IMP.			
3	TÉCNICO	3	MODERADA IMP.			
4	ECONÓMICO	9	EXTREMA IMP.			
5	TÉCNICO	3	MODERADA IMP.			
6	TÉCNICO	5	FUERTE IMP.			
7	IGUAL	1	IGUAL IMP.			
8	TÉCNICO	1	IGUAL IMP.			
9	TÉCNICO	1	IGUAL IMP.			
10	TÉCNICO	3	MODERADA IMP.			
11	TÉCNICO	7	MUY FUERTE			
12	IGUAL	1	IGUAL IMP.			
13	IGUAL	1	IGUAL IMP.			
14	TÉCNICO	5	FUERTE IMP.			
15	TÉCNICO	5	FUERTE IMP.			

Tabla 18. Resultado encuesta comparación criterio técnico y ambiental

Expertos consultados	¿Cuál criterio es más importante el Técnico o el Ambiental?	¿Qué importancia tiene el criterio marcado con respecto al otro?	Definición Saaty	La moda	Promedio	Definición Saaty
1	AMBIENTAL	3	MODERADA IMP.	AMBIENTAL	4	ENTRE MODERADA Y FUERTE IMP.
2	TÉCNICO	1	IGUAL IMP.			
3	IGUAL	1	IGUAL IMP.			
4	TÉCNICO	3	MODERADA IMP.			
5	AMBIENTAL	5	FUERTE IMP.			
6	TÉCNICO	9	EXTREMA IMP.			
7	IGUAL	1	IGUAL IMP.			
8	TÉCNICO	5	FUERTE IMP.			
9	AMBIENTAL	5	FUERTE IMP.			
10	AMBIENTAL	5	FUERTE IMP.			
11	AMBIENTAL	7	MUY FUERTE			
12	IGUAL	1	IGUAL IMP.			
13	AMBIENTAL	3	MODERADA IMP.			
14	AMBIENTAL	3	MODERADA IMP.			
15	TÉCNICO	5	FUERTE IMP.			

Tabla 19. Resultado encuesta comparación criterio ambiental y económico

Expertos consultados	¿Cuál criterio es más importante el Ambiental o el Económico?	¿Qué importancia tiene el criterio marcado con respecto al otro?	Definición Saaty	La moda	Promedio	Definición Saaty
1	AMBIENTAL	3	MODERADA IMP.	AMBIENTAL	5	FUERTE IMP.
2	AMBIENTAL	1	IGUAL IMP.			
3	AMBIENTAL	3	MODERADA IMP.			
4	ECONÓMICO	9	EXTREMA IMP.			
5	AMBIENTAL	5	FUERTE IMP.			
6	AMBIENTAL	3	MODERADA IMP.			
7	IGUAL	1	IGUAL IMP.			
8	IGUAL	1	IGUAL IMP.			
9	AMBIENTAL	7	MUY FUERTE			
10	AMBIENTAL	5	FUERTE IMP.			
11	AMBIENTAL	7	MUY FUERTE			
12	IGUAL	1	IGUAL IMP.			
13	AMBIENTAL	5	FUERTE IMP.			
14	AMBIENTAL	7	MUY FUERTE			
15	AMBIENTAL	5	FUERTE IMP.			

En la Tabla 20, se presenta la matriz de importancia relativa (A), comparación entre criterios.

Tabla 20. Matriz de importancia relativa (A)

	TÉCNICO	ECONÓMICO	AMBIENTAL
TÉCNICO	1	3	1/4
ECONÓMICO	1/3	1	1/5
AMBIENTAL	4	5	1
suma	5,33	9	1,45

Como se puede observar en la matriz de importancia relativa, el criterio Técnico es Moderadamente más importante que el criterio Económico; el criterio Ambiental es considerado entre moderado e importante con respecto al criterio Técnico, y Fuertemente importante con respecto al criterio Económico. Posteriormente se normalizo la matriz A y se determinó el vector de prioridad, como se observa en la Tabla 21.

Tabla 21. Matriz A normalizada (A') y vector de prioridad

	Matriz A normalizada (A')			Vector de prioridad (W)	W*A	(W*A)/W
	TÉCNICO	ECONÓMICO	AMBIENTAL			
TÉCNICO	0,19	0,33	0,17	0,23	0,71	3,07
ECONÓMICO	0,06	0,11	0,14	0,10	0,31	3,02
AMBIENTAL	0,75	0,56	0,69	0,67	2,11	3,17

El juicio de los expertos consultados presento coherencia ya que la relación de consistencia fue menor de 0,1 dando como resultado 0,07 (Tabla 22), cumpliendo con el límite para RC, y se continuó con el método para la selección de la tecnología de tratamiento.

Tabla 22. Relación de consistencia para la evaluación de los criterios

IA	Ianda	IC	RC
0,58	3,09	0,04	0,07

En la Tabla 23, se presentan los resultados de la segunda parte de la encuesta donde los expertos evaluaron los subcriterios. Las tres columnas resaltadas no se tuvieron en cuenta para el peso promedio, ya que fueron mal diligenciadas.

Tabla 23. Resultado encuesta pesos subcriterios

CRITERIOS	SUBCRITERIOS	PESOS ASIGNADOS POR LOS EXPERTOS															PESO PROMEDIO
TÉCNICO	Disponibilidad de terreno o área	0,4	0,2	0,4	3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,6	0,37	0,4	10	15	0,3	0,5	0,40
	Eficiencia de remoción de parámetros contaminantes	0,6	0,8	0,6	0,3	0,7	0,7	0,5	0,5	0,4	0,63	0,6	10	15	0,7	0,5	0,60
ECONÓMICO	Costos de inversión inicial	0,7	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,5	0,3	0,44	0,6	10	10	0,2	0,5	0,44
	Costos de operación y mantenimiento	0,3	0,7	0,7	0,3	0,6	0,6	0,4	0,5	0,7	0,56	0,4	20	20	0,8	0,5	0,56
AMBIENTAL	Calidad microbiológica del efluente	0,75	0,5	0,6	2	0,2	0,5	0,4	0,7	0,7	0,67	0,7	10	20	0,4	0,6	0,56
	Producción de lodos	0,25	0,5	0,4	5	0,8	0,5	0,6	0,3	0,3	0,33	0,3	10	20	0,6	0,4	0,44

En la Tabla 24, se presentan los subcriterios y el peso de la evaluación obtenido según las personas consultadas.

Tabla 24. Evaluación de los subcriterios según los expertos

CRITERIO	SUBCRITERIO	PESO
TÉCNICO	Disponibilidad de terreno o área	0,40
	Eficiencia de remoción de parámetros contaminantes	0,60
ECONÓMICO	Costos de inversión inicial	0,44
	Costos de operación y mantenimiento	0,56
AMBIENTAL	Calidad microbiológica del efluente	0,56
	Producción de lodos	0,44

Se continuó la selección valorando las tecnologías con respecto a los subcriterios según la bibliografía consultada. Entre las tecnologías se consideró lagunas de estabilización, filtro percolador y biodiscos, como se explicó en la metodología.

En cuanto a la disponibilidad de terreno, de acuerdo con Treviño *et al.* (2016) y Von Sperling (2012), el tratamiento con lagunas necesita de grandes áreas lo cual es una de las desventajas con respecto a otros sistemas; pero se considera eficiente en la remoción de parámetros como la DBO₅, y si se trata de una laguna facultativa se presenta una razonable eliminación de patógenos, mientras si es una laguna de maduración la eficiencia es alta. También Von Sperling (2012) menciona que por ser un proceso totalmente natural hay una mayor simplicidad operacional y el costo de inversión inicial es menor comparado con las otras tecnologías, siempre y cuando el precio del terreno sea bajo. Para el municipio de Florida de acuerdo con información consultada en Mitula casas (sf), el m² de tierra se encuentra alrededor de los \$80.000 pesos y en San Pedro es de \$136.000 pesos.

Por otra parte, Peña *et al.* (2000), citado por Feria y Martínez (2014), mencionan que la acumulación de lodos puede afectar el rendimiento de las lagunas, por la disminución del volumen efectivo lo cual altera la hidráulica del sistema, siendo necesario evacuarlos cada 5 a 10 años en la primera etapa de la vida útil de la laguna. De acuerdo con Von Sperling (2012), el manejo del volumen de lodo acumulado a lo largo de los años en estos sistemas de tratamiento es una labor compleja que debe ser considerada en el planteamiento del sistema.

Para los biodiscos Cortez *et al.* (2008) y Ortega *et al.* (2010) mencionan que esta tecnología tiene requisitos de área bastante bajos para su implantación, y una buena eficiencia en la remoción de DBO; Huartos (2018) dice que se presenta una remoción del 88% para DBO₅, 92% SST y 90% para DQO; en cuanto a la eficiencia de remoción de coliformes Von Sperling (2012) menciona que es baja y que los costos de implementación y operación son elevados para la realidad de América Latina. De acuerdo con Waqas y Bilad (2019), la producción de lodos es baja y Ortega *et al.* (2010) señalan que un inconveniente es que son lodos sin estabilizar.

Von Sperling (2012) menciona que los filtros percoladores tienen una buena eficiencia en la remoción de la DBO₅, y Huartos (2018) dice que se presenta una remoción del 80% para DBO₅, 70% SST y un 70% para DQO. También Von Sperling (2012) menciona que hay una baja eficiencia en la remoción de coliformes, además de presentar altos costos para su implementación. Plantea además que su requerimiento de área es relativamente bajo y que

hay una baja generación de lodos; Oakley (2011) menciona que una planta de filtros percoladores requiere de otras unidades para la estabilización de los lodos, como una sedimentación primaria y secundaria y la remoción de los lodos tendría una frecuencia de por lo menos cada mes. Huartos (2018) plantea que uno de los costos más importantes a tener en cuenta son los costos de operación y mantenimiento para garantizar el buen funcionamiento de la planta de tratamiento, además de considerar el tipo de tecnología a usar según el lugar, para así, evitar sobre costos en los usuarios.

Teniendo en cuenta la bibliografía consultada, y que en los municipios se presentan condiciones socioeconómicas similares donde las actividades principales son la agricultura y la ganadería, además que las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua residual doméstica son parecidas. Se realizó el modelo de selección para cada uno de los municipios y dada la similitud en los diferentes componentes el resultado para la tecnología de tratamiento para reúso fue el mismo. A continuación, se presentan las Tablas 25, 26, 27, 28, 29 y 30 con el desarrollo del modelo para el municipio de San Pedro y en las Tablas 31, 32, 33, 34, 35 y 36 el desarrollo del modelo para el municipio de Florida, evaluando cada uno de los criterios con sus respectivos subcriterios.

Las tecnologías se clasificaron de la siguiente manera:

- A1: Lagunas de estabilización
- A2: Biodiscos
- A3: Filtro percolador

SAN PEDRO

Criterio Técnico

En la Tabla 25, se presenta la evaluación para el subcriterio disponibilidad de terreno o área.

En la Tabla 26, se presenta la evaluación para la eficiencia de remoción de parámetros contaminantes.

Criterio Económico

En la Tabla 27, se presenta la evaluación para el subcriterio costos de inversión inicial.

En la Tabla 28, se presenta la evaluación para el subcriterio de costos de operación y mantenimiento.

Criterio Ambiental

En la Tabla 29, se presenta la evaluación para el subcriterio calidad microbiológica del efluente.

En la Tabla 30, se presenta la evaluación para el subcriterio producción de lodos.

Tabla 25. Matriz disponibilidad de terreno o área, según la tecnología

Matriz B				Matriz normalizada B'							IA	Landa	IC	RC
	A1	A2	A3		A1	A2	A3	Vector de prioridad (W)	W*B	(W*B)/W				
A1	1	1/9	1/7	A1	0,06	0,08	0,03	0,06	0,17	3,01				
A2	9	1	3	A2	0,53	0,69	0,72	0,65	2,04	3,15				
A3	7	1/3	1	A3	0,41	0,23	0,24	0,29	0,91	3,08				
Suma	17	1,44	4,14											

Tabla 26. Matriz eficiencia de remoción de parámetros contaminantes

Matriz C				Matriz normalizada C'							IA	Landa	IC	RC
	A1	A2	A3		A1	A2	A3	Vector de prioridad (W)	W*C	(W*C)/W				
A1	1	3	5	A1	0,65	0,69	0,56	0,63	1,95	3,07	0,58	3,04	0,02	0,03
A2	1/3	1	3	A2	0,22	0,23	0,33	0,26	0,79	3,03				
A3	1/5	1/3	1	A3	0,13	0,08	0,11	0,11	0,32	3,01				
Suma	1,53	4,33	9											

Tabla 27. Matriz costos de inversión inicial

Matriz D				Matriz normalizada D'										
	A1	A2	A3		A1	A2	A3	Vector de prioridad (W)	W*D	(W*D)/W	IA	Landa	IC	RC
A1	1	1/4	1/5	A1	0,10	0,06	0,13	0,10	0,29	3,02	0,58	3,09	0,04	0,07
A2	4	1	1/3	A2	0,40	0,24	0,22	0,28	0,88	3,08				
A3	5	3	1	A3	0,50	0,71	0,65	0,62	1,95	3,16				
Suma	10	4,25	1,53											

Tabla 28. Matriz costos de operación y mantenimiento

Matriz E				Matriz normalizada E'										
	A1	A2	A3		A1	A2	A3	Vector de prioridad (W)	W*E	(W*E)/W	IA	Landa	IC	RC
A1	1	7	7	A1	0,78	0,78	0,78	0,78	2,33	3,00	0,58	3,00	0,00	0,00
A2	1/7	1	1	A2	0,11	0,11	0,11	0,11	0,33	3,00				
A3	1/7	1	1	A3	0,11	0,11	0,11	0,11	0,33	3,00				
Suma	1,29	9	9											

Tabla 29. Matriz calidad microbiológica del efluente

Matriz F				Matriz normalizada F'							IA	Landa	IC	RC
	A1	A2	A3		A1	A2	A3	Vector de prioridad (W)	W*F	(W*F)/W				
A1	1	7	7	A1	0,78	0,78	0,78	0,78	2,33	3	0,58	3	0,00	0,00
A2	1/7	1	1	A2	0,11	0,11	0,11	0,11	0,33	3				
A3	1/7	1	1	A3	0,11	0,11	0,11	0,11	0,33	3				
Suma	1,29	9	9											

Tabla 30. Matriz Producción de lodos

Matriz G				Matriz normalizada G'							IA	Landa	IC	RC
	A1	A2	A3		A1	A2	A3	Vector de prioridad (W)	W*G	(W*G)/W				
A1	1	7	7	A1	0,78	0,78	0,78	0,78	2,33	3	0,58	3	0,00	0,00
A2	1/7	1	1	A2	0,11	0,11	0,11	0,11	0,33	3				
A3	1/7	1	1	A3	0,11	0,11	0,11	0,11	0,33	3				
Suma	1,29	9	9											

FLORIDA

Criterio Técnico

En la Tabla 31, se presenta la evaluación para el subcriterio disponibilidad de terreno o área.

En la Tabla 32, se presenta la evaluación para la eficiencia de remoción de parámetros contaminantes.

Criterio Económico

En la Tabla 33, se presenta la evaluación para el subcriterio costos de inversión inicial.

En la Tabla 34, se presenta la evaluación para el subcriterio de costos de operación y mantenimiento.

Criterio Ambiental

En la Tabla 35, se presenta la evaluación para el subcriterio calidad microbiológica del efluente.

En la Tabla 36, se presenta la evaluación para el subcriterio producción de lodos.

Tabla 31. Matriz disponibilidad de terreno área, según la tecnología

Matriz H				Matriz normalizada H'										
	A1	A2	A3		A1	A2	A3	Vector de prioridad (W)	W*B	(W*B)/W	IA	Landa	IC	RC
A1	1	1/7	1/5	A1	0,08	0,10	0,05	0,07	0,22	3,01	0,58	3,07	0,03	0,06
A2	7	1	3	A2	0,54	0,68	0,71	0,64	2,01	3,12				
A3	5	1/3	1	A3	0,38	0,23	0,24	0,28	0,87	3,06				
Suma	13,00	1,48	4,20											

Tabla 32. Matriz eficiencia de remoción de parámetros contaminantes

Matriz I				Matriz normalizada I'										
	A1	A2	A3		A1	A2	A3	Vector de prioridad (W)	W*C	(W*C)/W	IA	Landa	IC	RC
A1	1	3	5	A1	0,65	0,69	0,56	0,63	1,95	3,07	0,58	3,04	0,02	0,03
A2	1/3	1	3	A2	0,22	0,23	0,33	0,26	0,79	3,03				
A3	1/5	1/3	1	A3	0,13	0,08	0,11	0,11	0,32	3,01				
Suma	1,53	4,33	9,00											

Tabla 33. Matriz costos de inversión inicial

Matriz J				Matriz normalizada J'										
	A1	A2	A3		A1	A2	A3	Vector de prioridad (W)	W*D	(W*D)/W	IA	Landa	IC	RC
A1	1	1/3	1/4	A1	0,13	0,1	0,14	0,12	0,37	3,01	0,58	3,02	0,01	0,02
A2	3	1	1/2	A2	0,38	0,3	0,29	0,32	0,97	3,02				
A3	4	2	1	A3	0,5	0,6	0,57	0,56	1,69	3,03				
Suma	8,00	3,33	1,75											

Tabla 34. Matriz costos de operación y mantenimiento

Matriz K				Matriz normalizada K'										
	A1	A2	A3		A1	A2	A3	Vector de prioridad (W)	W*E	(W*E)/W	IA	Landa	IC	RC
A1	1	7	7	A1	0,78	0,78	0,78	0,78	2,33	3,00	0,58	3,00	0,00	0
A2	1/7	1	1	A2	0,11	0,11	0,11	0,11	0,33	3,00				
A3	1/7	1	1	A3	0,11	0,11	0,11	0,11	0,33	3,00				
Suma	1,29	9,00	9,00											

Tabla 35. Matriz calidad microbiológica del efluente

Matriz L				Matriz normalizada L'							IA	Landa	IC	RC
	A1	A2	A3		A1	A2	A3	Vector de prioridad (W)	W*F	(W*F)/W				
A1	1	7	7	A1	0,78	0,78	0,78	0,78	2,33	3,00	0,58	3,00	0,00	0,00
A2	1/7	1	1	A2	0,11	0,11	0,11	0,11	0,33	3,00				
A3	1/7	1	1	A3	0,11	0,11	0,11	0,11	0,33	3,00				
Suma	1,29	9,00	9,00											

Tabla 36. Matriz producción de lodos

Matriz M				Matriz normalizada M'							IA	Landa	IC	RC
	A1	A2	A3		A1	A2	A3	Vector de prioridad (W)	W*G	(W*G)/W				
A1	1	7	7	A1	0,78	0,78	0,78	0,78	2,33	3,00	0,58	3,00	0,00	0,00
A2	1/7	1	1	A2	0,11	0,11	0,11	0,11	0,33	3,00				
A3	1/7	1	1	A3	0,11	0,11	0,11	0,11	0,33	3,00				
Suma	1,29	9,00	9,00											

7.4 Selección de alternativas tecnológicas para el tratamiento del agua residual con propósito de reúso.

Una vez comparados los subcriterios con cada una de las alternativas, y conociendo el vector de prioridad (W) para cada uno de ellos; se procedió a determinar la alternativa tecnológica para cada uno de los municipios y la selección de la tecnología, como se muestra en las Tablas 37 y 38 para el municipio de San Pedro y en las Tablas 39 y 40 para el municipio de Florida.

Tabla 37. Matriz de alternativas evaluada en los subcriterios por el vector de subcriterios municipio de San Pedro

Disponibilidad de área	remoción parámetros contaminantes	Costos de inversión inicial	Costos de operación y mantenimiento	Calidad microbiológica del efluente	Producción lodo	Vector
0,06	0,63	0,10	0,78	0,78	0,78	0,09
0,65	0,26	0,28	0,11	0,11	0,11	0,14
0,29	0,11	0,62	0,11	0,11	0,11	0,05
						0,06
						0,37
						0,29

El resultado final indica el peso para cada una de las alternativas, como se puede observar en la Tabla 38.

Tabla 38. Selección de la tecnología municipio de San Pedro

A1	0,661	Lagunas
A2	0,189	Biodiscos
A3	0,150	Filtro percolador

Tabla 39. Matriz de alternativas evaluada en los subcriterios por el vector de subcriterios municipio de Florida

Disponibilidad de área	remoción parámetros contaminantes	Costos de inversión inicial	Costos de operación y mantenimiento	Calidad microbiológica del efluente	Producción lodo	Vector
0,07	0,63	0,12	0,78	0,78	0,78	0,09
0,64	0,26	0,32	0,11	0,11	0,11	0,14
0,28	0,11	0,56	0,11	0,11	0,11	0,05
						0,06
						0,37
						0,29

Tabla 40. Selección de la tecnología municipio de Florida

A1	0,663	Lagunas
A2	0,190	Biodiscos
A3	0,146	Filtro percolador

De acuerdo con los resultados obtenidos en función de los tres criterios técnico, económico y ambiental, y la importancia de cada uno de los subcriterios, la mejor alternativa de tratamiento para el agua residual en los municipios de San Pedro y Florida, fue las lagunas de estabilización con un 66%, siendo el más alto con respecto a las otras tecnologías que obtuvieron 19% para biodiscos y 15% para los filtros percoladores. A pesar de que se presenta una diferencia en el precio de la tierra en ambos municipios, y que en la evaluación del subcriterio de costos de inversión inicial para San Pedro es más alto que en Florida; hay un predominio de la tecnología de las lagunas en los subcriterios de remoción de parámetros contaminantes con un 63%, en la calidad microbiológica del efluente, en la producción de lodos y en los costos de operación y mantenimiento con un 78%, generando que el peso de selección fuera mayor para las lagunas de estabilización.

Este resultado del sistema de lagunas de estabilización es una de las mejores alternativas para la reducción de la concentración de microorganismos patógenos, lo cual es lo ideal para que el agua residual tratada sea apta para el riego de los cultivos de caña de azúcar, disminuyendo el riesgo de exposición a los trabajadores. De acuerdo con estudios y experiencias realizadas, como lo manifiesta Sorrequieta (2004), con el sistema de lagunas de estabilización se puede lograr una remoción de microorganismos como bacterias, quistes de protozoos, huevos de helmintos superior al 95%; para la remoción de los huevos de helmintos se ha recomendado un periodo de retención de 8 a 10 días (Sorrequieta 2004).

También el tratamiento con lagunas, a pesar de que requiere un área mucho mayor para la implantación, de acuerdo con Suárez (2010), es una de las tecnologías con más aplicación en las cabeceras municipales del departamento del Valle del Cauca, esto se puede relacionar con los bajos costos de operación, facilidad en el mantenimiento y operación. Para su buen funcionamiento las lagunas de estabilización deben tener un tratamiento preliminar para la remoción de los sólidos de mayor tamaño.

8. CONCLUSIONES

Se caracterizaron los municipios de San Pedro y Florida, ambos municipios sin planta de tratamiento de agua residual construida, con prácticas de reúso indirecto del agua residual doméstica en el riego de los cultivos de caña de azúcar. Con una población en la zona cabecera de 7.776 habitantes para San Pedro localizado en el centro del Valle del Cauca y Florida con 40.411 habitantes en la zona cabecera, ubicado en el suroriente del departamento.

Los resultados de la caracterización de los parámetros analizados para el municipio de San Pedro y Florida, permitió considerar la evaluación de tecnologías de tratamiento biológico, dada las condiciones de biodegradabilidad del agua.

Por medio del proceso de análisis jerárquico (AHP), es posible evaluar tecnologías de tratamiento teniendo en cuenta los criterios técnicos, económicos y ambientales y sus subcriterios. Con la evaluación de los expertos y la bibliografía consultada, se desarrolló el método donde se pudo observar el desempeño de las diferentes tecnologías evaluadas ya que este método arroja un valor cuantitativo.

El sistema de lagunas de estabilización obtuvo un puntaje de 66%, los biodiscos 19% y los filtros percoladores 15%; por lo tanto, la tecnología para el tratamiento de agua residual doméstica con propósito de reúso seleccionada para los municipios de San Pedro y Florida fueron las lagunas de estabilización.

El AHP es un método útil para la toma de decisiones multicriterio, se puede emplear para la selección de una tecnología de tratamiento de agua residual en cualquier municipio del Valle del Cauca, ya que se contemplan las condiciones propias de la zona de estudio.

Las lagunas de estabilización con respecto a las otras tecnologías, obtuvieron un puntaje superior para la calidad microbiológica del efluente, lo cual es fundamental en el agua para reúso, ya que se debe dar protección a la salud de las personas que realizan el riego en los cultivos de caña.

9. RECOMENDACIONES

Las entidades como ACUAVALLE y CVC que realizan monitoreos para determinar las condiciones fisicoquímicas en el río Fraile en el municipio de Florida, es conveniente que los muestreos se realicen en todos los puntos de vertimiento, ya que en los informes suministrados de los diferentes años, no se presentaba una información continua de los puntos de vertimiento, variaban los puntos y los parámetros analizados; no en todos se presentaban los datos de las siete descargas.

En el municipio de San Pedro es importante hacer seguimiento y tener un control en los vertimientos de las empresas que se encuentran en la zona, como avícolas, matadero, los cuales contribuyen en el aporte de grasas, la DQO; cambiando las condiciones típicas del agua residual doméstica y en su momento pueden afectar el funcionamiento de un sistema de tratamiento biológico.

En este trabajo solo se escogió la tecnología, más no el tren tecnológico del sistema de tratamiento; lo cual no es un limitante, ya que el modelo proceso analítico jerárquico (AHP) se adapta a las condiciones del usuario y se puede aumentar la complejidad de las alternativas considerando los trenes tecnológicos; así mismo, los criterios pueden abarcar dimensiones sociales, de diseño, entre otras; igualmente se pueden considerar n subcriterios en cada una de las dimensiones haciendo más robusto el modelo.

10. REFERENCIAS

Adewumi, J.R., Ilemobade, A.A., Van Zyl, J.E. (2010). Treated wastewater reuse in South Africa: Overview, potential and challenges. *Resources, Conservation and Recycling* 55: 221-231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.09.012>.

Arguello, H. (2011). Inocuidad de las hortalizas producidas en la Sabana de Bogotá: más allá de la calidad del agua. *Memorias IV Congreso Colombiano de Horticultura: Aportes de la Investigación al Desarrollo de la Horticultura Colombiana en el siglo XXI*.

CENICAÑA, Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. (2018). *Cultivo de la caña de azúcar agua*. Cali. Colombia.

Chen, Z., Wu, Q., Wu, G., Hu y H.Y. (2017). Centralized water reuse system with multiple applications in urban areas: Lessons from China's experience. *Resources, Conservation and Recycling* 117: 125–136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.11.008>

Cirelli, A.F., (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva* 11(3): 147-170- Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.

Cortez, S., Teixeira, P., Oliveira, R. y Mota, M. (2008). Rotating biological contactors: A review on main factors affecting performance. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 7(2): 155-172. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-008-9127-x>.

DANE, Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2018). Proyecciones de población 2018-2023, total nacional y departamental por área y sexo. Disponible en: <http://idsn.gov.co/site/web2/index.php/subdireccion-de-salud-publica/epidemiologia/demografia/5306-proyecciones-de-poblacion-calculadas-con-base-en-los-resultados-del-censo-nacional-de-poblacion-y-vivienda-cnpv-2018>, consultado en agosto de 2020.

DNP. (sf). Sistema de Estadísticas Territoriales. San Pedro, Valle del Cauca. Departamento Nacional de Planeación.

DNP. (sf). Sistema de Estadísticas Territoriales. Florida, Valle del Cauca. Departamento Nacional de Planeación.

Doménech, X. y Peral, J. (2006). *Química ambiental de sistemas terrestres*. España. Editorial Reverté S.A. pp 190.

EPA (2004). Guidelines for Water Reuse. En: U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, USA. Disponible en:

https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/30006MKD.pdf, consultado en agosto de 2020.

EPA y USAID. (2012). Guidelines for Water Reuse. Office of Wastewater Management, ed., Washington, D.C. Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf>, consultado en agosto de 2020.

FAO. (2013). Afrontar la escasez de agua: un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i3015s/i3015s.pdf>, consultado en agosto de 2020.

FAO. (2017). Reutilización de aguas residuales urbanas puede favorecer a la agricultura y disminuir presión sobre los recursos naturales. Oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Disponible en: <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/853862/>, consultado en agosto de 2020.

Feria, J. y Martínez, L. (2014). Tratamiento de lodos de fondo de lagunas facultativas con estabilización en condiciones de laboratorio. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia* 11(21): 113 - 122.

Galvis, A., Cardona, D. y Bernal, D. (2005). Modelo conceptual de selección de tecnología para el control de contaminación por agua residuales domésticas en localidades colombianas menores de 30.000 habitantes, SELTAR. Universidad del Valle/ Instituto Cinara.

García, J., Noriega, S. y Díaz, J. (2006). Aplicación del proceso de jerarquía analítica en la selección de tecnología agrícola. *Agronomía Costarricense* 30(1): 107-114. Universidad de Costa Rica.

Huertos, J. (2018). Análisis comparativo de tecnologías aerobias para el tratamiento de aguas residuales urbanas. Universidad Católica de Manizales. Disponible en: <https://docplayer.es/90618886-Analisis-comparativo-de-tecnologias-aerobias-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-urbanas-julian-andres-huertos-toro.html>, consultado en abril de 2021.

Jaramillo, M.F. (2014). Potencial de reúso de agua residual doméstica como estrategia para el control de la contaminación en el valle geográfico del río cauca. Tesis de maestría. Postgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Kajenthira, A., Siddiqi, A. y Anadon, L.D. (2012). A new case for promoting wastewater reuse in Saudi Arabia: Bringing energy into the water equation. *Journal of Environmental Management* 102: 184–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.023>.

Khawla, K., Besma, K., Enrique, M. y Mohamed, H. (2019). Accumulation of trace elements by corn (*Zea mays*) under irrigation with treated wastewater using different irrigation methods. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 170: 530–537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.025>.

Leal, J.E., (2019). AHP- express: A simplified version of the analytical hierarchy process method. *MethodsX* S2215016119303243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.11.021>

Lett, L.A. (2014). Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular. *Revista Argentina de Microbiología* 46: 1–2. DOI: [https://doi.org/10.1016/S03257541\(14\)70039-2](https://doi.org/10.1016/S03257541(14)70039-2).

Matsumoto, T. y Sánchez, I. (2016). Desempeño de las lagunas anaerobias con baffle divisor y facultativa de la PTAR de Santa Fe do Sul (São Paulo, Brasil). *Revista de ingenierías Universidad de Medellín* 15(29): 27- 42. DOI: <https://doi.org/10.22395/rium.v15n29a2>.

Mendoza-Espinosa, L.G., Burgess, J.E., Daesslé, L. y Villada-Canela, M., (2019). Reclaimed water for the irrigation of vineyards: Mexico and South Africa as case studies. *Sustainable Cities and Society* 51: 101769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101769>.

Menéndez, C. y Dueñas, J. (2020). Criterios de diseño y escalado de biodiscos para el tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería hidráulica y ambiental XLI* (2): 64 - 74.

Meneses, M., Moreno, C., Escobar, L., Lozano, L. (sf). Una mirada de conocimiento al saneamiento básico del Valle del Cauca, Manejo de residuos sólidos y aguas residuales domésticas.

Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización*. 3 ed. Volumen 1. McGraw-Hill, España. 125.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2011). Proyecto: Desarrollo de capacidades en el uso seguro de aguas residuales para agricultura. Disponible en: https://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/356/mod_page/content/128/Colombia_Informe%20Nacional.pdf, consultado en mayo de 2020.

Ministerio del Medio Ambiente. (2002). Guía para el Manejo, Tratamiento y Disposición Final de las Aguas Residuales Municipales. Disponible en: https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/18911/43961_55723.pdf?sequence=1&isAllowed=y, consultado en febrero de 2021.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Resolución 1207 de 2014 “Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas”.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 0631 de 2015.

Mitula casas. (sf). Lotes San Pedro Valle. Disponible en: https://casas.mitula.com.co/detalle/666/4240082614003432029/6/1/lotes-sanpedro?search_terms=lotes+san+pedro&page=1&pos=6&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=2b5732d0-1449-4f82-8e38-a65968efb3dc&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs=, consultado en mayo de 2021

Mitula casas. (sf). Lotes Florida Valle. Disponible en: <https://casas.mitula.com.co/casas/lotes-florida#:~:text=14%2F11%2F2020,Lote%20de%20terreno%20en%20venta%20en%20florida%2C%20valle%20del,por%201.243.000.000%20cop%24>, consultado en mayo de 2021

Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling* 153: 104553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>

Oakley, S. (2011). Resumen tratamiento de aguas residuales domésticas en Centroamérica un manual de experiencias, diseño, operación y sostenibilidad. Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo. Disponible en: <https://docplayer.es/15858668-Tratamiento-de-aguas-residuales-domesticas-en-centroamerica-un-manual-de-experiencias-diseno-operacion-y-sostenibilidad.html>, consultado en mayo de 2021.

OMS. (1989). Uso Seguro de Aguas Residuales en la Agricultura y Acuicultura. Disponible en: https://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/wastreusexecsum.pdf?ua=1, consultado en agosto de 2020.

OMS, PNUMA y FAO. (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Wastewater use in agriculture. Vol. 2. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/238771010_WHO_Guidelines_for_the_Safe_Use_of_Wastewater_Excreta_and_Greywater_Volume_II_Wastewater_Use_in_Agriculture, consultado en agosto de 2020.

Ortega, E., Ferrer, Y., Salas, J., Aragón, C. y Real, A. (2010). Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Ministerio Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Disponible en: <https://www.aragon.es/documents/20127/24009052/Manual+CEDEX2.pdf/32188fba-b20f-ecac-fb01-49a15e0e3cd9?t=1578648844927>, consultado en abril de 2021.

Osorio, J. y Orejuela, J. (2008). El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia et Technica* XIV (39). Universidad Tecnológica de Pereira. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/849/84920503044.pdf>, consultado en octubre de 2020.

Pacheco, J.F. y Contreras, E. (2008). Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos, Serie manuales / Naciones Unidas, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. CEPAL, Santiago de Chile.

Paredes, D., Sabas, C. y Ramírez, A. (2010). Aplicación del proceso de análisis jerárquico - AHP - en la priorización de cuencas para el monitoreo del recurso hídrico en Colombia. Universidad Tecnológica de Pereira.

Passarini, K.; Gamarra, F. y Vanalle, R. (2012). Reutilización de las aguas residuales en la irrigación de plantas y en la recuperación de los suelos. *Información Tecnológica* 23(1): 57-64.
Pérez, M.A., Peña, M.R. y Álvarez, P. (2011). Agroindustria cañera y uso del agua: análisis

crítico en el contexto de la política de agrocombustibles en Colombia. *Ambiente y Sociedad*. 14: 153–178.

Raigoza, L. J. (2016). Aplicación de métodos Multicriterio (MCDA) para planeamiento energético de largo plazo en la industria del cemento. Tesis de maestría. Posgrado en Sistemas Energéticos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

Reznik, A., Feinerman, E., Finkelshtain, I., Fisher, F., Huber-Lee, A., Joyce, B. y Kan, I. (2017). Economic implications of agricultural reuse of treated wastewater in Israel: A statewide long-term perspective. *Ecological Economics* 135: 222–233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.01.013>.

Rodríguez M. J., García U. C. y Pardo P. J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas* 19: 149 - 164. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a12>.

Romero, J. (1999). Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia.

Sánchez, A. (2011). Reúso para riego del efluente de la PTAR-C: Evaluación del potencial impacto en las propiedades físicas del suelo y la productividad de la variedad de caña de azúcar CC85-92 112. Tesis de maestría. Postgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Sánchez, I. y Matsumoto, T. (2012). Evaluación del desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales urbanas de ILHA Solteira (SP) por lagunas facultativas primarias. *Ingeniería y Desarrollo* 30(2): 199-222. Universidad del Norte.

Silva, J., Torres, P. y Madera, C. (2008). Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana* 26(2): 347-359. Universidad Nacional de Colombia.

Sociedad Geográfica de Colombia. (2002). Disponible en: https://www.sogeocol.edu.co/dptos/valle_02_ubicacion.jpg, consultado en septiembre de 2019.

Sorrequieta, A. (2004). Aguas residuales: Reuso y tratamiento. Lagunas de estabilización: una opción para Latinoamérica. Facultad de Ciencias Bioquímicas y Farmacéuticas. Universidad Nacional del Rosario.

Suárez, C. (2010). Tratamiento de aguas residuales municipales en el Valle del Cauca. Tesis de maestría. Postgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Valle. Cali, Colombia. SSPD. (2018). Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado 2014 -2017. Disponible en: https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2019/En_e/informe_sectorial-cuatrenio_2014-2017_.pdf, consultado en septiembre de 2019.

Tello, P., Mijailova, P. y Chamy, R. (2016). Uso seguro del agua para el reúso. *AIDIS*. 33

Treviño, A. y Cortés, F. (2016). Método de diseño reducido para lagunas de estabilización. *Revista mexicana en ciencias agrícolas*. 7(4). Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200709342016000400729&lng=es&nrm=iso, consultado en noviembre de 2020.

UNIVALLE, CINARA y ACUAVALLE. (2006). Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos. Diagnóstico general del sistema de alcantarillado área urbana del municipio de San Pedro.

UNIVALLE, CINARA y ACUAVALLE. (2006). Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos. Área urbana del municipio de Florida.

Vallecaucana de Aguas. (2016). Programa Agua y Saneamiento Para la Prosperidad- Plan Departamental Para el Manejo Empresarial de los Servicios Públicos de Agua y Saneamiento Básico – PAP- PDA del Valle del Cauca. Plan General Estratégico y de Inversiones, PGEI 2016-2019.

Vásquez, J. (2019). Metodología AHP-TOPSIS aplicada al mercado bursátil colombiano. Tesis de pregrado en Economía. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Von Sperling, M. (2012). Principios del tratamiento biológico de aguas residuales. Vol. 1, 1 ed. en español. Universidad de Nariño.

Voulvoulis, N. (2018). Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 2: 32–45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.005>.

Waqas, S. y Bilad, M. (2019). A Review on Rotating Biological Contactors. *Indonesian Journal of Science and Technology* 4(2): 241-256. DOI: <https://doi.org/10.17509/ijost.v4i2.18181>.

Wang, F., Yu, C., Xiong, L. y Chang, Y. (2019). How can agricultural water use efficiency be promoted in China? A spatial-temporal analysis. *Resources, Conservation and Recycling* 145: 411–418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.017>.

Yajure, C. (2015). Comparación de los métodos multicriterio AHP y AHP Difuso en la selección de la mejor tecnología para la producción de energía eléctrica a partir del carbón mineral. *Scientia et Technica Año XX*, 20(3). Universidad Tecnológica de Pereira. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84943818008>, consultado en octubre de 2020.

Zamora, F., Rodríguez, N., Torres, D. y Yendis, H. (2008). Efecto del riego con aguas residuales sobre propiedades químicas de suelos de la planicie de Coro, estado Falcón. *Bioagro*. 193 – 199.

Zeng, G., Jiang, R., Huang, G., Xu, M. y Li, J. (2007). Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis. *Journal of Environmental Management* 82: 250–259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.12.024>

Referencias de internet

URL 1. Gobernación del Valle del Cauca. Disponible en: <https://www.valledelcauca.gov.co/publicaciones/60137/mapas-y-territorios/>, consultado en junio de 2019.

URL 2. Asocaña. (sf). Disponible en: <https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215>, consultado en agosto de 2019.

URL 3. Alcaldía Municipal de San Pedro, Valle del Cauca. Disponible en: <http://www.sanpedro-valle.gov.co/municipio/nuestro-municipio>, consultado en agosto 2020.

URL 4. Florida Valle del Cauca. Recuperado el 23 de agosto de 2019. Disponible en: <http://www.florida-valle.gov.co/municipio/nuestro-municipio>, consultado en agosto de 2020.

ANEXOS

ANEXO 1. Encuesta a expertos

ENCUESTA PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA CON PROPÓSITO DE REUSO

Para la selección de la tecnología se tendrá en cuenta el criterio técnico, económico, ambiental. De acuerdo a sus conocimientos y experiencia marcar la opción que considere más apropiada con una X.

1. ¿Cuál criterio es más importante el Técnico o el Económico?

R// _____

¿Qué importancia tiene el criterio marcado con respecto al otro?

Igual importancia _____

Moderada importancia _____

Fuerte importancia _____

Muy fuertemente importante _____

Extremadamente importante _____

2. ¿Cuál criterio es más importante el Técnico o el Ambiental?

R// _____

¿Qué importancia tiene el criterio marcado con respecto al otro?

Igual importancia _____

Moderada importancia _____

Fuerte importancia _____

Muy fuertemente importante _____

Extremadamente importante _____

3. ¿Cuál criterio es más importante el Ambiental o el Económico?

R// _____

¿Qué importancia tiene el criterio marcado con respecto al otro?

- | | |
|----------------------------|-------|
| Igual importancia | _____ |
| Moderada importancia | _____ |
| Fuerte importancia | _____ |
| Muy fuertemente importante | _____ |
| Extremadamente importante | _____ |

En esta parte de la encuesta se presentan los criterios y subcriterios, asignar un porcentaje (%) al subcriterio que considere más importante.

CRITERIO TÉCNICO

- | | |
|--|-------|
| • Disponibilidad de terreno o área | _____ |
| • Eficiencia de remoción de parámetros contaminantes | _____ |
| | 100% |

CRITERIO ECONÓMICO

- | | |
|---------------------------------------|-------|
| • Costos de inversión inicial | _____ |
| • Costos de operación y mantenimiento | _____ |
| | 100% |

CRITERIO AMBIENTAL

- | | |
|---------------------------------------|-------|
| • Calidad microbiológica del efluente | _____ |
| • Producción de lodos | _____ |
| | 100% |

Adaptado de Jaramillo, M.F. (2014).

ANEXO 2. Registro fotográfico visita San Pedro

Punto de descarga quebrada el Yeso, coordenadas geográficas 3°59'12.06"N 76°14'16.02"W

