

**FORMULACIÓN DE UNA ESTRATEGIA PARA EL MANEJO INTEGRAL DEL AGUA
RESIDUAL CON PERSPECTIVA DE REÚSO AGRÍCOLA DEL RESTAURANTE
ESCOLAR DE LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA LA HERRADURA,
CORREGIMIENTO SAN JORGE LA HERRADURA, ALMAGUER, CAUCA.**



**TRABAJO DE GRADO DE PREGRADO
YENNY MARGOTH RUANO SOLANO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE RECURSOS NATURALES Y DEL MEDIO AMBIENTE EIDENAR
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2025**

**FORMULACIÓN DE UNA ESTRATEGIA PARA EL MANEJO INTEGRAL DEL AGUA
RESIDUAL CON PERSPECTIVA DE REÚSO AGRÍCOLA DEL RESTAURANTE
ESCOLAR DE LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA LA HERRADURA,
CORREGIMIENTO SAN JORGE LA HERRADURA, ALMAGUER, CAUCA.**

YENNY MARGOTH RUANO SOLANO

DIRECTORES:

Ph. D. Carlos Arturo Madera Parra

Ph. D. Andrés Fernando Echeverri Sánchez

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE RECURSOS NATURALES Y DEL MEDIO AMBIENTE EIDENAR
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2025**

Dedicatoria

A Dios y a la virgencita por llenarme de sabiduría, fe y la fuerza espiritual que necesite en muchas ocasiones.

A mi madre Aliria, por su amor, sacrificio y apoyo incondicional, me dan fuerzas cuando las necesito, su ejemplo y presencia me impulsan a ser mejor cada día.

A mi padre Emiro, por su apoyo y amor, por ser un símbolo de resiliencia y superación.

A mi hermanito Alberth, para que no deje de luchar por sus sueños a pesar de las grandes dificultades que la vida pueda tener.

A mi hermanita Yuliana, que siempre me apoyo y confió en mí.

A mi tío Angel, por sus palabras de sabiduría y crecimiento personal.

A mi familia, por siempre confiar en mis capacidades.

A todas aquellas personas y amigos que estuvieron en los buenos y malos momentos, quienes me brindaron su amistad y compañía.

Agradecimientos

Mi más profundo agradecimiento a Dios, por darme fortaleza, sabiduría y salud para superar obstáculos y circunstancias que se me presentaron a lo largo de este sueño. Su guía y bendición han sido fundamentales en cada paso de este camino.

A mi familia, por su amor, apoyo incondicional, sacrificios y sus palabras de aliento.

A mis amigos y compañeros de estudio por sus palabras de aliento cuando las necesité y por hacer de este proceso una experiencia enriquecedora y valiosa.

A mi director, Carlos Madera y codirector, Andres Echeverry, grandes maestros quienes confiaron en mí, me acompañaron y guiaron en este proceso, compartiendo su conocimiento y brindando herramientas para culminar este sueño.

A mis profesoras y profesores símbolos de grandeza por sembrar en mi vida invaluable aprendizajes.

A la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente EIDENAR, por brindarme la oportunidad de formarme académicamente. Su excelencia y compromiso con la educación han sido pilares fundamentales en mi desarrollo profesional.

A la Universidad del Valle que es y será siempre mi “alma mater” a la que le debo todo.

Agradezco a la Institución Educativa La Herradura por abrirme las puertas y permitirme trabajar con docentes y estudiantes, contribuyendo con su tiempo, información y recursos para la realización de esta investigación.

A la Alcaldía de Almaguer Cauca por su apoyo económico para poder desarrollar esta investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas e instituciones que contribuyeron con su tiempo y recursos para la culminación de mi proceso académico y de esta investigación. A todos ustedes, mi más sincera gratitud.

TABLA DE CONTENIDO.

1	INTRODUCCIÓN.....	12
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
3	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	16
4	OBJETIVOS.....	18
4.1	Objetivo General.....	18
4.2	Objetivos Específico.....	18
5	MARCO TEÓRICO.....	19
5.1	Agua residual.....	19
5.2	Tratamientos de aguas residuales.....	20
5.3	Reúso de agua residual.....	21
5.4	Seguridad alimentaria.....	22
5.4.1	Huerto escolar.....	23
5.4.2	Programa de Alimentación Escolar (PAE):.....	23
5.5	Criterios de calidad del agua para riego.....	23
5.6	Marco normativo.....	25
6	METODOLOGÍA.....	26
6.1	Localización de la zona de trabajo.....	26
6.2	Caracterización del manejo del agua residual.....	28
6.2.1	Muestreo del AR proveniente del restaurante escolar.....	32
6.2.2	Sistematización y análisis de la información.....	33
6.3	Formulación de una alternativa tecnológica.....	33
6.3.1	Preselección de las tecnologías de tratamiento de agua residual.....	33

6.4	Plan de cultivos.....	38
6.4.1	Caracterización del clima.....	38
6.4.2	Necesidad de Riego Neta.....	40
6.4.3	Índice de Langelier.	42
6.4.4	Toxicidad, sodicidad y salinidad.....	44
7	RESULTADOS Y ANALISIS	45
7.1	Descripción de la zona de estudio.....	45
7.1.1	Perfil de la Comunidad	45
7.1.2	Perfil de la Institución Educativa.....	47
7.2	Gestión del agua.....	51
7.2.1	Abastecimiento de agua	51
7.2.2	Saneamiento e Higiene	53
7.2.3	Restaurante escolar	56
7.2.4	Producción de agua residual en el Restaurante escolar	59
7.2.5	Huerta escolar	60
7.2.6	Análisis del muestreo del agua residual del restaurante escolar.....	63
7.3	Alternativa tecnológica de tratamiento.....	65
7.3.1	Selección de tecnología de tratamiento.....	65
7.3.2	Fichas técnicas de las tecnologías de tratamiento.....	67
7.3.3	Selección comunitaria de la alternativa de tratamiento.....	68
7.3.4	Caudal de diseño	70
7.3.5	Dimensionamiento de la trampa grasa.....	71
7.3.6	Dimensionamiento del humedal subsuperficial de flujo horizontal	73
7.4	Plan de cultivos.....	77

7.4.1	Parámetros agroclimáticos.....	77
7.4.2	Calidad de agua para riego.....	82
8	CONCLUSIONES.....	87
9	RECOMENDACIONES	89
10	REFERENCIAS.	91
11	ANEXOS.....	99

LISTA DE FIGURAS.

<i>Figura 1:</i>	<i>Ubicación Geográfica Corregimiento San Jorge La Herradura.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2:</i>	<i>Vista satelital cabecera corregimental San Jorge La Herradura coordenadas 1°52'13"N 76°52'46"W y elevación de 1.715,51 m.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3:</i>	<i>Taller elaboración de cartografía con representantes de grado noveno, decimo y once.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4:</i>	<i>Realización cartografía con personal encargado del comedor escolar</i>	<i>30</i>
<i>Figura 5:</i>	<i>Presentación de encuestas modalidad física, grado sexto.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 6:</i>	<i>Sistema de ventilación donde se identifica la conexión del agua residual gris y aguas negras.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 7:</i>	<i>Muestra y medición de pH in situ.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 8:</i>	<i>Muestra, ubicación ingreso a la cocina, restaurante escolar.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 9:</i>	<i>Cartografía de la cabecera corregimental La Herradura.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 10:</i>	<i>Ubicación sede escuela y colegio de la Institución Educativa La Herradura.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 11:</i>	<i>Planta baja a mano derecha, ubicación de grado noveno, decimo y once, y espacio para herramientas</i>	<i>48</i>
<i>Figura 12:</i>	<i>Cuarto de herramientas.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 13:</i>	<i>Tercer edificio, grado séptimo, sexto A y B.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 14:</i>	<i>Tienda de la Institución</i>	<i>48</i>
<i>Figura 15:</i>	<i>Cuarto edificio, grado octavo A y B.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 16:</i>	<i>Baños de la institución.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 17:</i>	<i>Chiva o bus escalera encargado del transporte de estudiantes.....</i>	<i>49</i>

Figura 18: Cartografía de la cabecera del corregimiento de San Jorge La Herradura.	51
Figura 19: Calidad del agua del acueducto.....	52
Figura 20: Tipo de tratamiento aplicado al agua para consumo en los hogares de los estudiantes.	52
Figura 21: Procedencia del agua consumida por los estudiantes durante la jornada escolar.....	52
Figura 22: Consumo de agua directamente de las llaves en la institución educativa.	52
Figura 23: Disposición final del agua residual en los hogares de los estudiantes.	53
Figura 24: Vertimiento al aire libre cultivo de café.	54
Figura 25: Vertimiento al aire libre, zona de guadua.	54
Figura 26: Baños para hombres y mujeres, colegio.	55
Figura 27: Vista general baños para mujeres	55
Figura 28: Vista general baños hombres.....	55
Figura 29: Lavamanos y baldes para agua.	55
Figura 30: Distribución del área de la escuela y ubicación del restaurante escolar (cocina, comedor).	56
Figura 31: Restaurante escolar, en horario de desayuno.	57
Figura 32: Ubicación de los recipientes de los alimentos y los residuos.	57
Figura 33: Cuarto de almacenamiento de alimentos y ollas.	58
Figura 34: Canastas con alimentos como papa, cebolla, papa, plátano.	58
Figura 35: Cocina, durante el proceso de lavada y preparación de alimentos.	58
Figura 36: Condiciones en las que se encuentra el lavaplatos.	58
Figura 37: Distribución del área del colegio y ubicación de la huerta escolar.	60
Figura 38: Espacio en la parte de atrás de las aulas de clase destinado para la siembra de plantas medicinales....	61
Figura 39: Trabajo comunitario padres de familia para la limpieza y arado de la huerta.	61
Figura 40: Principales causas por las que deja de funcionar la huerta escolar.	61
Figura 41: Huerta escolar mes de agosto.	62
Figura 42: Huerta escolar mes de noviembre.....	62
Figura 43: Adecuación de lote para siembra (grado once) y árboles frutales.	63
Figura 44: Configuración de los trenes de tratamiento presentados a la comunidad escolar.	69

Figura 45: Maquetas humedal subsuperficial de flujo horizontal en grava y plástico, escala 1:10.	69
Figura 46: Jornada participativa de selección de tecnología de tratamiento.	69
Figura 47: Plano acotado trampa grasa, vista superior y frontal.	73
Figura 48: Plano acotado humedal subsuperficial de flujo horizontal, detalles, vista frontal y superior.	77
Figura 49: Precipitación efectiva vs meses del año.	78
Figura 50: Variación mensual de la evapotranspiración del cultivo.	79
Figura 51: Variación mensual evapotranspiración del cultivo de referencia.	79
Figura 52: Variación mensual de la Necesidad de Riego Neta (NRn).	80
Figura 53: Comparación demanda, oferta, balance mensual acumulados.	81

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1: Principales posibilidades de reúso de aguas residuales municipales.	22
Tabla 2: Criterios de calidad de agua para riego: amenazas y parámetros importantes en la calidad de agua para riego en el suelo, plantas, infraestructura de riego y salud humana.	24
Tabla 3: Marco normativo para el reúso de agua residual tratada.	25
Tabla 4: Parámetros de diseño Trampa grasa.	35
Tabla 5 : Datos específicos de las estaciones Bolívar y El Rodeo.	38
Tabla 6: Tabla de factores índice de Langelier.	43
Tabla 7: Indicadores que describen la tendencia del agua a producir corrosión y formación de incrustaciones por saturación con carbonato de calcio.	43
Tabla 8: Matriz para evaluar el riesgo de salinidad.	44
Tabla 9: Número de estudiantes matriculados por grado.	49
Tabla 10: Resultados prueba de laboratorio de agua residual gris del restaurante escolar.	63
Tabla 11: Clasificación agua residual QDO y DBO ₅	65
Tabla 12: Resultados caudal de diseño.	70
Tabla 13: Dimensiones finales del diseño de la trampa grasa.	71
Tabla 14: Calidad de agua del efluente del tratamiento preliminar con trampa grasa.	72

Tabla 15: Órdenes de magnitud de la conductividad hidráulica (k_s) en función del tipo de material granular utilizado como sustrato en un humedal construido de flujo subsuperficial.	74
Tabla 16: Parámetros principales considerados en el diseño del humedal.	74
Tabla 17: Remoción de DBO y TRH.	75
Tabla 18: Dimensiones del humedal subsuperficial de flujo horizontal.	75
Tabla 19: Diámetro tubería de entrada y salida del humedal.....	75
Tabla 20: Parámetros y porcentajes de remoción esperados según autores.	76
Tabla 21: coeficiente del cultivo (K_c)	78
Tabla 22: Balance hídrico mensual, considerando el área máxima a regar.	80
Tabla 23: Parámetros, coeficientes y resultado del Índice de Langelier.	82
Tabla 24: Resultados del análisis para concentración de cloro y sodio en el agua residual gris sin tratamiento.	83
Tabla 25: Categoría de riesgo asociado al requerimiento de yeso puro por metro cúbico de agua.	83
Tabla 26: Sales presentes en el agua gris sin tratamiento, evaluación para riego.....	84
Tabla 27: Calidad teórica esperada en el efluente de la trampa de grasa + humedal horizontal subsuperficial.	85

RESUMEN

El corregimiento de San Jorge La Herradura se encuentra ubicado en el municipio de Almaguer, al sur del departamento del Cauca, Colombia. Esta comunidad enfrenta un problema común en zonas rurales de Colombia: la falta de tecnologías para el tratamiento de agua potable y residual. En este contexto, el presente trabajo de grado estuvo orientado al manejo integral del agua residual gris del comedor escolar de la institución educativa. Para ello, se desarrolló una metodología que incluyó revisión de literatura, visitas de reconocimiento, caracterización del agua residual gris, gestión del recurso hídrico, consultas a la comunidad mediante entrevistas, encuestas y talleres, análisis de la calidad del agua gris, selección y dimensionamiento de las tecnologías de tratamiento y estudio de la demanda y oferta hídrica de la zona.

Se identificó que la institución genera aproximadamente 2,590 litros de agua residual gris al día, los cuales son vertidos al aire libre, sin ningún tratamiento. El análisis de calidad de agua gris indicó que algunos de los parámetros no cumplen con lo estipulado en la Resolución 0631 del 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) estos son Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), grasas y aceites. Por otra parte, respecto a lo estipulado sobre el reúso del agua gris en riego agrícola la mayoría de los parámetros medidos cumplen la normatividad colombiana y los límites establecidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Además, se identifica un nivel de riesgo MEDIO asociado a la salinidad, un riesgo BAJO de corrosión e incrustación y no hay riesgo toxicológico, de igual manera, el resultado presenta un valor de Coliformes Totales (CT) igual a 12500 MNP/100 ml. Parámetros como DBO y DQO, presentaron altas concentraciones, aunque no son regulados para el riego de cultivos. A nivel climatológico, se identificó que en la región la precipitación medida en mm/mes es baja entre mayo y septiembre, mientras que, entre enero y abril, octubre y diciembre es alta. Para noviembre la precipitación cubre la Necesidad de Riego neta de los cultivos (mm/mes), por lo que no se requiere riego adicional.

Con base a los resultados, se seleccionó un tren de tratamiento conformado por una trampa de grasa y el humedal subsuperficial de flujo horizontal en grava, en conjunto con un tanque de almacenamiento que permita mejorar la distribución del agua tratada. Con base en el análisis de la calidad teórica del efluente tratado, se determinó la viabilidad técnica del uso de dicha agua para el riego de la huerta escolar. De igual manera, la comunidad estudiantil lleva a cabo un proceso de transición al riego por goteo para cultivos como cebolla larga, frijol, maíz y tomate de mesa.

PALABRAS CLAVE: Reúso de agua, Tratamiento de agua residual gris, humedal construido subsuperficial de flujo horizontal, trampa de grasa.

1 INTRODUCCIÓN.

El ser humano desarrolla diversas actividades cotidianas que, junto con la producción industrial son las principales fuentes generadoras de agua residual a nivel mundial. Gran parte de esta agua residual es vertida sin tratamiento previo en cuerpos receptores como ríos, mares, suelos y otros ecosistemas, los cuales son afectados, ya que no disponen de la capacidad de neutralizar esta carga contaminante. Para el caso de fuentes de agua dulce, esta contaminación reduce su calidad para el consumo y aumenta la posibilidad de que el ser humano adquiriera enfermedades (Rodríguez, 2017).

En un comunicado de prensa el Banco Mundial (2020) afirma que a nivel mundial el 80% del agua residual se vierte al ambiente sin tratamiento, en concordancia con esta problemática la Organización de las Naciones Unidas Agua (ONU-agua [UN-water por sus siglas en inglés], 2024) afirma que para el 2022 el 42% del agua residual domestica fue vertida sin un tratamiento adecuado. En el caso de Colombia, durante el mismo año, solamente se trató de manera segura el 19% del agua residual generada (Corficolombiana, 2024). En el departamento del Cauca, de un total de 117 plantas de tratamiento de agua residual municipal ubicadas en los 42 municipios solo 48 PTAR funcionan adecuadamente (Molina, 2021).

Para el caso del municipio de Almaguer-Cauca, solo se cuenta con una planta de tratamiento de agua residual ubicada en la cabecera municipal, que, de acuerdo con información tomada del Plan de Desarrollo Municipal de la Alcaldía de Almaguer, Cauca (PDT Almaguer, 2023) no cuenta con un correcto funcionamiento, pero se tienen proyectos enfocados a mejorar el proceso de tratamiento, asimismo, conforme a la plataforma de Datos Abiertos (2024), el sistema alcantarillado de la misma esta instalada para menor o igual a 2500 usuarios, además, Administración Pública Cooperativa de Agua Potable y Saneamiento Básico de Almaguer Cauca confirma un total de 687 usuarios para el 2023 en la cabecera del municipio (PDT Almaguer, 2023).

Respecto a la reutilización de agua tratada a nivel mundial, la capacidad instalada se estima por debajo de 250 millones de metros cúbicos por día, lo que equivale aproximadamente el 8% del volumen total de extracción de agua dulce destinado para uso industrial y doméstico (Banco Mundial, 2025). En el caso de Colombia, aunque la norma autoriza el uso de agua residual en los sectores agrícola e industrial, actualmente no se dispone de información consolidada sobre volúmenes de reúso o recirculación (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2023).

Por estas razones, resulta fundamental implementar tecnologías de tratamiento que contribuyan a la reducción de la carga contaminante del agua residual, y con ello, mitigar su impacto sobre los cuerpos receptores. Una alternativa que ha cobrado especial relevancia es el tratamiento del agua residual con fines de reúso, proceso que requiere cumplir parámetros específicos de calidad e higiene. Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2022) el agua tratada puede destinarse para usos urbanos, protección contra incendios, actividades agrícolas, restauración de hábitat y procesos industriales. Asimismo, en 1989 la Organización Mundial de la Salud (OMS) reconoció oficialmente el riego agrícola como el primer uso reconocido y establecido

del agua residual tratada (Cosín, 2017), estableciendo así precedentes que resplandan la importancia del reúso del agua residual tratada en el riego agrícola.

A nivel normativo, en Colombia el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente, s.f) destaca la Ley 373 de 1997, promulgada por el Congreso de la República, que establece la obligatoriedad del uso de agua que fue utilizada en actividades que generen efluentes líquidos, esclareciendo que su implementación puede contribuir en el uso eficiente del recurso hídrico, reducción de la contaminación, disminución de la demanda de agua en las zonas con oferta limitada y la prevención de conflictos por el agua. Adicional, la norma colombiana incluye la Resolución 1256 de 2021 de Minambiente, que define los criterios de calidad para el uso de agua residual en riego agrícola, estos se deben complementar con los lineamientos establecidos en el Decreto 1076 de 2015 del Sector de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que regula la calidad del agua cruda destinada a fines agrícolas.

En este contexto, el presente trabajo de grado se desarrolló en la Institución Educativa la Herradura, ubicada en la cabecera del Corregimiento San Jorge la Herradura, zona rural del municipio de Almaguer, Cauca. La institución cuenta con un servicio de restaurante escolar para los estudiantes, generando un volumen aproximado de 2.590 litros diarios de agua residual gris, proveniente de las actividades de preparación de alimentos. Además, dispone de una huerta escolar con un área total de 937 m², destinada a la producción de alimentos tanto para la venta como para el autoconsumo en el restaurante. Por otra parte, de acuerdo con datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2010) esta región del departamento del Cauca presenta un régimen de lluvias bimodal, lo que implica que las áreas destinadas para la agricultura experimentan una demanda hídrica alta durante los periodos de baja precipitación.

De tal manera, este trabajo de grado planteó la formulación de una estrategia que permita el manejo integral del agua residual gris del restaurante escolar con fines de reúso. Para ello se desarrollaron actividades como la cuantificación de la producción de agua residual gris, se caracterizó el efluente del restaurante, se definió la oferta y demanda hídrica de la huerta escolar, aspectos que permitieron formular la tecnología de tratamiento adecuada para promover el reúso del efluente en el riego de la huerta, adicional, se realizó el planteamiento de un plan de cultivos y se evaluaron otros usos.

Finalmente, mediante la implementación de una metodología rigurosa en el contexto de la institución educativa, que incluyó actividades con jornadas de convivencia, aplicación de instrumentos de recolección de datos (encuestas y entrevistas), realización de talleres y charlas informativas, análisis de la calidad del agua, revisión bibliográfica y participación activa de la comunidad estudiantil, se llevó a cabo la selección del tren de tratamiento, conformado por una trampa de grasa y un humedal subsuperficial de flujo horizontal. A partir del análisis de la calidad teórica del efluente tratado y de los registros climatológicos se determinó la viabilidad técnica del uso del agua tratada para el riego de la huerta escolar, conforme al sistema de tratamiento propuesto y la demanda hídrica de la huerta escolar.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Las diferentes actividades humanas han conllevado a que se produzcan las denominadas aguas residuales, éstas son de procedencia doméstica e industrial principalmente. Según un estudio realizado por Jones et al. (2021), se estima que a nivel mundial se producen 359 mil millones de metros cúbicos de agua residual anualmente; en este estudio se aprecia que en Latinoamérica la producción anual varía desde 0,1 a 1 millón de metros cúbicos de agua residual al año. Para el 2020 el 45% de las aguas residuales domésticas generadas en el mundo llegaron a cuerpos receptores sin tratamiento alguno, además, según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022), se estima que al menos 10% de la población mundial consume alimentos regados con agua residual cruda

El agua residual sin tratamiento en los cuerpos receptores genera impactos ambientales relacionados con factores físicos, biológicos, socioeconómicos y culturales, algunos de estos son las emisiones de gases en su mayoría con presencia de mal olor, cambios en las propiedades fisicoquímicas y uso del suelo, alteración de la calidad del agua, fragmentación de hábitats, paisaje, salud y seguridad, entre otros, (Fernández, 2022).

Por otra parte, en la actualidad aproximadamente el 70% del agua dulce extraída en el mundo se utiliza en el sector agrícola; sin embargo, se evidencia la mala gestión y uso del agua en este sector, ya que existe poca inversión en mantenimiento de sistemas de riego y drenaje, causando ineficiencia en el uso del recurso hídrico (Banco Mundial, 2022). Igualmente, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2020), afirma que está problemática se agrava aún más debido a la actual situación del cambio climático, que aumenta posibilidad de estrés hídrico, lo que podría afectar la producción agrícola futura

Se debe agregar que, según el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA, 2016) solo un pequeño porcentaje del agua es designado para suplir necesidades básicas del ser humano como consumo, saneamiento e higiene, en comparación al volumen suministrado para riego. Además, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020) en el informe sobre el Estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación - 2020, asevera que el déficit hídrico y escasez del agua son unos de los principales retos que afectan la producción agrícola y alimentaria, por lo que se ha potenciado el uso de fuentes no convencionales como la desalinización del agua y la reutilización.

En este sentido, se estima que en el mundo más de 30 millones de hectáreas, 10% del área de regadío, son regadas con aguas residuales sin tratar o parcialmente tratadas, por lo que es vital potenciar la evaluación del reúso seguro de agua residual en la agricultura, además, reutilizar el agua en la agricultura representa un gran beneficio debido a la disminución del estrés ejercido sobre las reservas de agua dulce (FAO, 2020). Por otro lado, el uso del agua residual tratada ha ido en aumento en las últimas décadas, utilizada principalmente para el riego de cultivos, parques, zonas deportivas, cementerios, y otros a excepción del consumo humano y de ganado, todo esto se ha llevado a cabo con la finalidad de regular la explotación del recurso hídrico (Navarro y Zamudio, 2016).

Es importante recalcar que utilizar agua residual tratada en el riego de cultivos representa variedad de beneficios como el suministro constante, aporte continuo de nutrientes, disminución de gastos de fertilización y favorece el equilibrio ecológico, también se puede considerar algunas desventajas como lo son la dificultad de aceptación por los agricultores por los miedos a posibles efectos a la salud, infraestructura para su traslado, tratamiento, evaluación previa de parámetros y otros relacionados con la calidad del agua que puedan causar el deterioro del sistema de riego y los suelos (Navarro y Zamudio, 2016).

Por lo anterior, se orientó el estudio hacia la Institución Educativa La Herradura, ubicada en el corregimiento de San Jorge La Herradura, municipio de Almaguer, departamento del Cauca. Esta decisión se fundamentó en observaciones realizadas durante visitas previas, en las que se evidenció que en época de verano las precipitaciones son bajas, lo cual limita significativamente el desarrollo de actividades agrícolas en la huerta escolar. Adicionalmente, se identificó una gestión inadecuada de las aguas residuales a nivel del corregimiento.

La Institución Educativa tiene 239 estudiantes, considerando los grados desde preescolar hasta once, además, cuenta con 18 personas que hacen parte del personal administrativo, docentes y servicios generales. También se presta el servicio de restaurante escolar, en el cual se preparan diariamente 204 desayunos y almuerzos para los estudiantes. Como resultado, se genera un total de 2.590 litros de agua residual gris diaria.

A la fecha, estas aguas se conectan al sistema de alcantarillado de la cabecera del corregimiento, el cual descarga sin tratamiento en dos puntos de vertimiento a cielo abierto ubicados en la parte baja del corregimiento. Esta situación ha afectado negativamente a la comunidad, generando problemas como malos olores, contaminación del suelo y de fuentes hídricas, así como el deterioro de los ecosistemas. Por otra parte, en los hogares de las veredas normalmente se cuenta con soluciones individuales de pozos sin recubrimiento o vertimiento de agua residual sin tratamiento en quebradas y lotes baldíos.

La Institución Educativa dispone de un área de 937 m² destinada a actividades agrícolas, principalmente al desarrollo de una huerta escolar en la que se cultivan especies como cilantro, tomate, maíz, frijol, lechuga, arveja, habichuela, cebolla, entre otros. El sistema de riego implementado corresponde prioritariamente al riego por goteo, especialmente durante la época de verano debido a las condiciones de desabastecimiento hídrico que afectan la zona.

Finalmente, los problemas específicos abordados en este proyecto corresponden, por una parte, a la generación de aguas residuales grises provenientes del restaurante escolar, las cuales están siendo vertidas sin tratamiento previo, y por otra, al desabastecimiento del recurso hídrico en la huerta escolar, lo que interrumpe el desarrollo continuo de los cultivos durante el calendario académico. En respuesta a esta problemática, se desarrolló un análisis técnico en la institución educativa orientado a la identificación de una tecnología de tratamiento que permita el reúso del agua residual del restaurante para el riego de la huerta. Esta solución busca no solo disminuir la carga contaminante de los vertimientos, sino también contribuir a la mitigación del déficit hídrico en el área de cultivo.

3 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.

Como lo menciona Palacios (2021) en el “Estudio sobre la viabilidad del cultivo del mango regado con agua residual tratada”, donde evalúa dos tipos de mangos “Keitt” (tolerante) y “Ewais” (susceptible), en las pruebas los cultivos fueron regados con agua residual tratada y un porcentaje de ácido salicílico utilizado para proteger a la planta de estreses abióticos (salinidad). Palacios concluye que un 50% de agua residual tratada con 50% de agua potable para el riego es la mejor opción para el crecimiento de las plantas, puesto que un 100% de agua residual tratada puede resultar en nutrientes excesivos para las plantas, además, el mejor rendimiento se observó en el caso de la utilización del ácido salicílico el cual mejora las condiciones fitosanitarias del riego y cultivo. Es importante considerar que la demanda de agua residual tratada para el riego de cultivos aumenta en zonas donde la época de verano es acompañada de “sequía” o bajas precipitaciones.

En este orden de ideas, en el caso de Colombia, Valle del Cauca, Polania y Tolorza (2020) en el trabajo de grado titulado “Evaluación del potencial de reúso de aguas residuales tratadas en la PTAR de el Cerrito para riego en cultivos de caña de azúcar”, examinaron la oferta y demanda hídrica de la zona, así como la calidad agronómica del efluente de la PTAR del Cerrito. Además, se realizó el análisis sobre el potencial comercial de reúso del agua residual para riego. A partir de esta investigación se concluyó, que en algunos casos las precipitaciones de la zona suplían la demanda hídrica de los cultivos. En cuanto a la calidad agronómica del efluente se determinó que existe un potencial para reutilización en riego agrícola, aunque está sujeto a mejoras en los procesos de remoción de huevos de helminto, finalmente un 50% de los pequeños y medianos productores presentaron interés en emplear el agua residual para riego.

Atendiendo al problema identificado, la reducción de la carga contaminante presente en las aguas residuales grises, así como la posibilidad de aprovechamiento mediante el reúso para riego de cultivos, adquiere gran relevancia en zonas rurales donde los sistemas de tratamiento son deficientes o inexistentes, y donde se presentan periodos prolongados de escasez hídrica. En este contexto, el tratamiento y reúso de estas aguas representa una estrategia clave para mitigar los impactos ambientales negativos, preservar la salud pública y optimizar la disponibilidad de agua para actividades productivas. Adicionalmente, es fundamental considerar la disposición y el compromiso de las comunidades en estos proyectos, ya que de su participación dependen en gran medida la apropiación y uso adecuado de las tecnologías implementadas.

Por otra parte, en el Plan de Desarrollo Municipal de la Alcaldía de Almaguer, Cauca (2023) la población se encuentra expuesta a un riesgo MEDIO debido a la calidad del agua para consumo, calidad relacionada con la contaminación e inadecuado tratamiento de las aguas residuales de las viviendas de la cabecera municipal y de las zonas rurales.

Además, en el corregimiento de San Jorge La Herradura, de acuerdo con información tomada del IDEAM (2010), régimen de precipitaciones predominante en esta zona del Cauca es de tipo bimodal caracterizada por una temporada de verano seca, es decir, baja precipitación en los meses de junio, julio y agosto y una temporada de lluvia marcada en los meses de octubre, noviembre y diciembre. Durante la época de verano se presenta la escasez de lluvias, lo que genera dificultades en el abastecimiento de agua para riego de cultivos y huertas en la comunidad.

Se debe de agregar que en la institución educativa del corregimiento se implementa el sistema de huerta escolar, la cual cuenta con un área total de 937 m², donde es muy común la siembra de cultivos como maíz, lechuga, tomate de mesa, arveja, cilantro, frijol, habichuela, entre otros. Se logró identificar que la institución normalmente detiene la siembra en la huerta en los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre debido a la poca disponibilidad del recurso hídrico para su riego. Además, en la institución educativa se preparan diariamente un estimado de 408 platos de alimentos, que incluye desayunos y almuerzos, beneficiando un total de 204 estudiantes, y generando 2.590 litros de agua residual gris al día.

Por otra parte, en la comunidad no se han realizado estudios sobre el posible diseño y construcción de una planta de tratamiento de agua residual para el sistema de alcantarillado, además, el conocimiento sobre alternativas que permitan el reúso de estas aguas para el riego de huertas es limitado en la comunidad, a pesar de que esta información facilitaría el reúso y abastecimiento de agua para los cultivos principalmente en épocas de verano. Por lo que, en el presente trabajo de grado, se evaluó la generación de agua residual en el restaurante escolar con el objetivo de reutilizarla para riego en la huerta de la institución educativa. Esto se logró mediante la colaboración activa de la comunidad educativa, la participación en la selección de una tecnología para el tratamiento de esta agua y otras actividades.

En consecuencia, esta propuesta genera importantes beneficios, puesto que permite reducir la presencia de patógenos en el agua residual que podrían representar un riesgo para la comunidad y contribuir en la disminución de la contaminación en los puntos donde actualmente se realizan los vertimientos del alcantarillado. Adicionalmente, este proyecto presenta un potencial de mejorar la oferta hídrica para la huerta escolar, la cual a lo largo del año llega a presentar problemas de desabastecimiento de agua, información que se puede evidenciar en los resultados.

Finalmente, este proyecto se encamino a brindar conocimiento a la comunidad vinculada a la institución educativa sobre la gestión integral del agua y sistemas de tratamiento de agua residual. A través de este proyecto la comunidad educativa puede observar la aplicación práctica de estas técnicas que mejoraran su situación actual y brindan a futuro la obtención de beneficios tanto económicos, sociales y educativos.

4 OBJETIVOS.

4.1 OBJETIVO GENERAL.

Formular una estrategia de manejo integral del agua residual con perspectiva de reúso agrícola del restaurante escolar de la Institución Educativa la Herradura, Almaguer, Cauca-Colombia.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICO.

- Caracterizar el manejo del agua residual del comedor escolar de la Institución Educativa la Herradura.
- Seleccionar una alternativa tecnológica para el tratamiento del agua residual del comedor con perspectiva de reúso agrícola.
- Proponer un plan de cultivos para la huerta escolar asociado a la calidad teórica del agua que producirá la alternativa tecnológica seleccionada.

5 MARCO TEÓRICO.

5.1 AGUA RESIDUAL.

El ser humano tiende a generar residuos ya sea sólidos o líquidos. Estos últimos se conocen como las aguas residuales. En Colombia la Resolución 1256 del 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible define las aguas residuales como “las aguas utilizadas o servidas, de origen doméstico o no doméstico” (Minambiente, 2021). Además, según Metcalf & Eddy (1995) se consideran aguas residuales aquellas que la comunidad descarta una vez han sido contaminadas durante diferentes usos.

El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2014) define las aguas residuales como “aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado” y las clasifica como aguas residuales domésticas, municipales e industriales.

- **Aguas Residuales Domesticas (ARD):** Aquellas de origen residencial y comercial, con presencia de desechos fisiológicos, provenientes de la actividad humana (OEFA, 2014).
- **Aguas residuales industriales:** Aquellas que tienen origen en un proceso de productividad industrial, pueden ser también de actividades mineras, energéticas, agroindustriales, entre otras (OEFA, 2014).
- **Aguas residuales municipales:** Aquellas ARD que pueden llegarse a mezclar con aguas de drenaje pluvial o aguas de origen industrial que deben de ser previamente tratadas para permitir su ingreso al alcantarillado de tipo combinado (OEFA, 2014).

Por su parte la Resolución 0631 del 2015 de Minambiente, clasifica la procedencia de las aguas residuales como Aguas Residuales Domesticas (ARD) y Aguas Residuales no Domesticas (ARnD), la primera compete a aquellas aguas de descargas de retretes y servicios sanitario, de aseo personal como duchas y lavamanos, de áreas de cocinas y cocinetas, de lavado de elementos de aseo, pisos, paredes y ropa. El segundo incluye a aquellas aguas residuales procedentes de comercios, industrias y servicios que no estén incluidas en las ARD. Algunos conceptos que se deben de tener en cuenta en el contexto de ARD son los definidos por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2023):

- **Aguas grises:** Se denominan aguas grises a aquellas aguas residuales generadas por actividades domésticas como el baño, el lavado de ropa, la limpieza y la cocina (PNUMA, 2023):
- **Aguas negras:** Se entiende por aguas negras a las aguas residuales provenientes de los inodoros o sanitarios. Estas contienen orina y heces humanas, junto con los patógenos asociados, y pueden incluir además residuos de productos farmacéuticos u otros contaminantes biológicos y químicos potencialmente peligrosos (PNUMA, 2023):
-
- **Aguas servidas:** efluente constituido por aguas negras (excretas, orina y heces) lodos) y aguas grises (aguas residuales de cocina y baño) (PNUMA, 2023).

5.2 TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES.

Romero (2010) define el tratamiento de aguas residuales como “una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como finalidad eliminar contaminantes presentes en el agua efluente del uso humano”. El propósito fundamental de estos procesos es obtener un efluente de calidad que permita su reutilización o disposición final segura a cuerpos de agua superficiales. Es fundamental considerar las definiciones clave relacionadas con el tratamiento de aguas residuales, tal como se presentan en el informe Progreso en el tratamiento de las aguas residuales, elaborado por el Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (UN-Hábitat) y la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021).

- **Tratamiento independiente:** Infraestructura para el tratamiento preliminar, tratamiento, infiltración o descarga de aguas residuales domésticas de hogares en poblaciones que no están conectados a un sistema de captación de aguas residuales (por ejemplo, tanques sépticos). (UN-Hábitat & OMS, 2021).
- **Pretratamiento de aguas residuales:** es una etapa inicial fundamental en el proceso de depuración de aguas residuales, consistente en la remoción de componentes como grasas, aceites, arenas, fibras y residuos sólidos gruesos. Su implementación previa a la conducción o tratamiento principal es esencial para prevenir obstrucciones en las tuberías, reducir el desgaste abrasivo de los equipos y prolongar la vida útil de las tecnologías de tratamiento instaladas (Tilley *et al.*, 2018).
- **Tratamiento primario de aguas residuales:** Consiste en la aplicación de procesos físicos, químicos o una combinación de ambos, orientados a la remoción de sólidos en suspensión y a la reducción parcial de la carga orgánica. Este tratamiento permite disminuir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del afluente en al menos un 20 % antes de su descarga (UN-Hábitat & OMS, 2021).
- **Tratamiento secundario de aguas residuales:** Es el proceso que se aplica después del tratamiento primario, generalmente de naturaleza biológica, aunque también puede incluir otros métodos secundarios. Su objetivo principal es lograr una reducción de al menos el 70 % en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y del 75 % en la demanda química de oxígeno (DQO). Este tratamiento puede incluir tecnologías convencionales como lodos activados, filtros percoladores o lagunas facultativas, entre otros (UN-Hábitat & OMS, 2021).
- **Tratamiento terciario de aguas residuales:** Es una etapa avanzada del proceso de depuración que incluye operaciones físicas, químicas o biológicas orientadas a la remoción de nutrientes (como nitrógeno y fósforo), u otra sustancia contaminante que afecte la calidad o el uso específico del agua (contaminación microbiológica, color, etc.) (UN-Hábitat & OMS, 2021).

En este sentido el Compendio de Sistemas y Tecnologías de Saneamiento (Tilley *et al.*, 2018) considera las siguientes tecnologías para el pretratamiento y tratamiento de aguas residuales.

Pretratamiento:

- Rejillas
- Desarenador
- Trampa de grasa.

Tratamiento:

- Sedimentador
- Tanque Imhoff
- Reactor anaerobio con deflectores (ABR por sus siglas en inglés)
- Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA)
- Lagunas de estabilización
- Laguna aireada
- Humedal artificial de flujo superficial (HFS)
- Humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial
- Humedal artificial de flujo vertical
- Filtro percolador
- Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA)

5.3 REÚSO DE AGUA RESIDUAL.

En la Resolución 1256 del 2021 se define el reúso del agua residual como aquel uso que se le da al agua residual tratada, diferente al uso inicial que las generó (Minambiente, 2021). Por otra parte, utilizar agua residual tratada permite que el recurso original no tenga que ser utilizado o sea desviada para otros usos, además, otros productos derivados del tratamiento de las aguas residuales pueden ser utilizados como mejoradores de suelo o generación de energía (Rodríguez *et al.*, 2020), **Tabla 2.**

Es importante considerar algunos conceptos importantes en el campo del reúso del agua residual definidos por Metcalf & Eddy (1995):

- **Recuperación de aguas residuales:** Someter el agua residual a un tratamiento o proceso con el fin de permitir su reúso. Normalmente incluye el transporte y distribución del agua tratada hasta el lugar de su utilización.
- **Reutilización Directa:** Es usar el agua residual tratada y transportarla desde la planta de tratamiento hasta el lugar de reutilización, que deba de llegar antes a un cuerpo receptor de agua natural. Normalmente este término se incluye para actividades de riego agrícola y de espacios verdes.
- **Reutilización del agua residual:** Metcalf & Eddy (1995) definen la reutilización del agua residual como el “uso de aguas residuales para usos beneficiosos tales como el riego agrícola o la refrigeración industrial”

Tabla 1: Principales posibilidades de reúso de aguas residuales municipales.

Tipo de reúso	Aplicación
Reúso urbano (cuidado especial)	Riego de parques públicos, divisiones de carreteras, áreas verdes, campos, protección contra fuegos, uso sanitario, lavado de vehículos.
Reúso agrícola	Irrigación de cultivos.
Restauración de hábitat	Creación de pantanos, restauración y recarga de agua subterránea.
Procesos industriales	Generación de energía eléctrica a partir del efluente, calor y gas metano. Extracción de nutrientes, la producción textil, la industria papelera, refinerías de petróleo, calefacción y refrigeración y en plantas siderúrgicas

Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2022).

Además, en Colombia la Resolución 1256 del 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en su artículo 5 menciona que los posibles usos que se le pueden dar al agua residual tratada son agrícola e industrial.

Por otra parte, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2017) establece el concepto del “uso adecuado a los fines”, el cual establece que la intensidad del tratamiento del agua debe corresponder a los requerimientos de calidad asociados al uso final. En este contexto, el reúso de aguas residuales tratadas para riego representa un desafío, ya que es frecuente que dicha práctica se realice de forma informal y sin planificación, empleando aguas residuales sin tratar o parcialmente tratadas. El enfoque técnico busca promover un uso seguro y planificado del recurso, teniendo en cuenta factores como los nutrientes presentes en el agua de riego, la posible contaminación microbiológica, la afectación al sistema de riego, la calidad del agua exigida por el cultivo, entre otros.

5.4 SEGURIDAD ALIMENTARIA.

En 1996, en la Cumbre Mundial de Alimentación (CMA), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) define la seguridad alimentaria como "el derecho de toda persona a tener acceso a alimentos sanos y nutritivos, en consonancia con el derecho a una alimentación apropiada y con el derecho fundamental de toda persona a no padecer hambre" y se cumple cuando todas las personas de un hogar, población o comunidad tienen acceso tanto económico como físico a los alimentos necesario para un desarrollo saludable y una vida plena (FAO, 2005).

5.4.1 Huerto escolar.

Normalmente los huertos escolares son utilizados para educación, capacitación agrícola y una manera de obtención de ingresos, con el paso de los años se ha venido cambiando este punto de vista, pues estos también permiten que los niños comprendan a profundidad sobre la importancia de cultivar alimentos enfocados hacia una buena alimentación y generar sensibilización hacia el medioambiente. Los huertos escolares pueden llegar a ser un punto de inicio para la salud y seguridad alimentaria de un país (FAO, 2010).

A nivel nacional, el Ministerio de Educación Nacional (2005) estableció estrategias para la inclusión de componentes ambientales en los procesos educativos, dando origen a los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE). Estos proyectos buscaban fortalecer la comprensión de problemas ambientales locales, y fomentar la formación orientada hacia el desarrollo sostenible, lo que promueve la implementación de infraestructura destinada para proyectos ambientales, como puntos ecológicos, viveros, huertos escolares y laboratorios.

En el ámbito legislativo, la Ley 115 de 8 de febrero de 1994 del Congreso de la República contempla dentro de los objetivos comunes de todos los niveles educativos promover la enseñanza de la protección del ambiente, la ecología y la preservación de los recursos naturales.

En este contexto se resalta las acciones desarrolladas en la Institución Educativa la Herradura, tales como la implementación del huerto escolar, la siembra de árboles frutales o plantas medicinales, así, uso de energías renovables mediante paneles solares, y el interés en llevar a cabo un proyecto de aprovechamiento de agua residual gris.

5.4.2 Programa de Alimentación Escolar (PAE):

El Ministerio de Educación Nacional (MEN) desarrolla el Programa de Alimentación Escolar (PAE) con la finalidad de fomentar la permanencia escolar de niños, niñas y adolescentes en áreas rurales y urbanas, facilitando el acceso a una ración de alimentos diario durante todo el calendario escolar, además, incluye los esfuerzos para la atención integral de los estudiantes (MEN, 2014).

5.5 CRITERIOS DE CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO.

Baeza (2017) define la calidad del agua como las condiciones relacionadas con sus características físicas, químicas y biológicas, tanto en su estado natural como después de alteraciones antrópicas. este concepto se aplica principalmente al agua destinada para el consumo humano, y en Colombia, uno de los principales indicadores es el Índice de Calidad del Agua (ICA) (IDEAM, 2025). Sin embargo, para determinar la calidad de agua requerida para riego, se deben de considerar otros aspectos, ya que pueden identificarse afectaciones relacionadas con la estructura y composición del suelo, así como con el sistema de riego.

Entre las consideraciones más importantes se encuentran: (a) salinidad de suelos, (b) sodicidad de suelos, (c) cambios en la estructura del suelo, (d) disminución de la permeabilidad, (e) toxicidad de plantas por iones específicos y (f) daños a la infraestructura de riego, como la corrosión o las

incrustaciones (Department of Water Affairs and Forestry, 1996). Además, es importante considerar que el agua utilizada para riego puede representar un riesgo tanto para los seres humanos como para las plantas (Barona, 2022).

Por lo anterior se realizó la **Tabla 2**, la cual resumen algunos de los parámetros más importantes a considerar en la evaluación sobre la calidad del agua para riego. Se aclara que, para el caso de las afectaciones al suelo, plantas e infraestructura de riego se reportaron las amenazas potenciales y sus respectivos parámetros. Respecto a las afectaciones a los humanos se mencionarán los parámetros relacionados con la presencia de parásitos y los exigidos por la normativa colombiana.

Tabla 2: Criterios de calidad de agua para riego: amenazas y parámetros importantes en la calidad de agua para riego en el suelo, plantas, infraestructura de riego y salud humana.

SUELO		
Amenaza	Parámetro	Referencias
Salinización de los suelos	CEw (dS m ⁻¹) / Solubilidad de sales (mmolc l ⁻¹)	(Echeverri, Pérez, Angulo, & Urrutia, 2015)
Sodicidad de los suelos	- CEw (dS/m) vs RAS⁰ - Carbonato Sódico Residual (CSR) (meq/l) - PSS (%)	(Ayers & Westcot, 1985) (Simsek & Gunduz, 2007) (K. R. Singh <i>et al.</i> , 2019) Wilcox (1955)
PLANTAS		
Toxicidad por iones específicos	- Cloruros (mg/l) - Porcentaje de Sodio Soluble - Cadmio (mg/l) - Cromo (mg/l) - Hierro (mg/l) - Manganeso (mg/l) - Plomo (mg/l)	K. R. Singh <i>et al.</i> (2019) y Tartabull & Betancourt (2016) Department of Water Affairs and Forestry (1996) y el Simsek & Gunduz (2007)
INFRAESTRUCTURA DE RIEGO		
Obturación de emisores	- SST (mg/l) - Sólidos Disueltos (mg/l) - Fe (mg/l) - Manganeso (mg/l) - Nitrógeno total (mg/l) - pH	Department of Water Affairs and Forestry (1996)
Afectación de infraestructura (incrustación o corrosión)	- Índice de Langelier - pH - Amonio (NH₄) (mg/l) - Sulfatos (SO₄²⁻) (mg/l) - Magnesio (mg/l)	Department of Water Affairs and Forestry. 1996 (Department of Water Affairs and Forestry. 1996) FAO, 1985, Biczók (2011)
HUMANOS		
Parámetro		Referencias
Parámetros microbiológicos	Coliformes Totales (UFC/ml)	Word Health Origination 2021

usados para el riesgo de afectación a la salud Humana.	• Esterococos (UFC/ml) • E. Coli genérica (E. coli CFU)			
Parámetros definidos en la norma colombiana.	Berilio	Hierro	Coliformes fecales	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible
	Cadmio	Zinc	Coliformes	
	Cobalto	Sodio	termotolerantes	
	Cobre	Manganeso	Esterococos	
	Cromo	Molibdeno	fecales	Resolución No. 1207 del 2014.
	Vanadio	Boro	Helmintos	
	Níquel	Selenio	parásitos humanos	
	Plomo	Cloruros	Protozoos	
	Antimonio	Fluoruros	parásitos humanos	Resolución No. 1256 del 2021.
	Mercurio	Sulfatos	Salmonella sp.	
	Litio	Coliformes	Fenoles totales	
	Conductividad eléctrica	totales	Cianuro Libre	
	Hidrocarburos totales	Nitratos		Decreto 1076 del 2015.

Fuente: Adaptado de Barona 2022.

5.6 MARCO NORMATIVO.

En Colombia se han promulgado diversas resoluciones y normas que protegen el medio ambiente, así como los usos que se le pueden dar al agua potable, otras que regulan el vertimiento de aguas residuales y las actividades permitidas para el reúso del agua residual tratada, también existen algunas normas internacionales que se deben de considerar en este contexto de reúso de agua residual tratada. En la **Tabla 3**, se presentan la normatividad que regula el reúso del agua residual.

Tabla 3: Marco normativo para el reúso de agua residual tratada.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (Resolución 1256 de 2021)	“Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones”
Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (Resolución 1207 de 2014)	“Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas” (Considerando que ya fue derogada en el artículo 8 de la resolución 1256 del 2021 del Minambiente, se utiliza solo como guía).
República de Colombia. (Decreto 1076 de 2015)	“Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”
Departamento Nacional de Planeación (DNP) (CONPES 3934)	“Política de crecimiento verde”

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (Minvivienda) (Resolución 0330 del 2017)	“Reglamentación técnica del sector de agua potable y saneamiento básico – RAS” modificada parcialmente por la resolución 0799 de 2021.
Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (Minvivienda) manuales de buenas prácticas de ingeniería Títulos del RAS, TÍTULO J.	“Alternativas Tecnológicas en Agua y Saneamiento para El Sector Rural”, propone desarrollos alternativos para los proyectos de suministro de agua y saneamiento básico para el área rural.
Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 1985)	“Calidad del agua para la agricultura”
Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (Resolución 0631 del 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 de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”

6 METODOLOGÍA.

Este trabajo de grado se realizó con una metodología que constó de tres fases, con el fin de dar respuesta a cada uno de los objetivos específicos. La primera fase se centró en el diagnóstico que implicó una investigación de campo específicamente con la comunidad educativa. La segunda fase fue la selección y dimensionamiento de una tecnología de tratamiento del agua del restaurante escolar apropiada para reutilizar el agua residual en el riego de cultivos y la propuesta de reúso en otros usos. La tercera fase se enfocó en la elaboración de un plan de cultivos basado en la calidad teórica del efluente, el análisis climatológico y la selección participativa de la comunidad. Cada fase incluyó actividades específicas con el fin de garantizar el cumplimiento de los objetivos.

6.1 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE TRABAJO.

El corregimiento San Jorge La Herradura, se encuentra ubicado al sur occidente de la cabecera municipal de Almaguer, el municipio se encuentra al sur del departamento del Cauca, a una altitud entre 1.700 metros sobre el nivel del mar y una temperatura entre los 18°C a 24°C. El corregimiento se encuentra conformado por las veredas de El Chilco, Garbanzal, Guayacanes, Higuerrillos, La Mesa, Pitayas, Sauce y Puente (Alcaldía Almaguer, 2012). En la **Figura 1** se puede observar la división política de Almaguer Cauca y la ubicación del corregimiento de San Jorge La Herradura, señalado con el punto rojo.



Figura 1: Ubicación Geográfica Corregimiento San Jorge La Herradura.
Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (SIGAC, 2014)

En la cabecera del corregimiento se encuentra ubicada la Institución Educativa La Herradura, la cual ofrece educación de básica primaria y secundaria (grado cero a once de bachillerato). Para el año de 2023 contaba con 230 estudiantes, además, tiene el restaurante escolar que prepara diariamente alrededor de 200 desayunos y 200 almuerzos, por otra parte, la institución también tiene en sus instalaciones una huerta escolar con un área 937 m² para el cultivo de hortalizas como cilantro, tomate, maíz, cebolla larga, habichuela y frijol, entre otros, esta huerta es parte integral de la educación y alimentación de los estudiantes.

A su vez la Gobernación del departamento del Cauca en el decreto 0696 de abril del 2022, determina que la sede principal de la Herradura pertenece a las instituciones educativas de difícil acceso ubicadas en el territorio nacional. En la **Figura 2** se observa la vista satelital de la cabecera corregimiento La Herradura.



Figura 2: Vista satelital cabecera corregimental San Jorge La Herradura coordenadas $1^{\circ}52'13''N$ $76^{\circ}52'46''W$ y elevación de 1.715,51 m.

Fuente: Google Earth, 2021.

Es importante resaltar, que el departamento del Cauca, desde hace varias décadas enfrenta problemas de orden público, presentándose situaciones muy difíciles, un caso específico fue lo sucedido en el mes de agosto del año 2022 donde en el corregimiento de la Herradura se presentaron hostigamientos y enfrentamientos entre grupos armados de las disidencias Carlos Patiño y el ELN, lo que generó el desplazamiento y confinamiento de aproximadamente 300 personas (Defensoría del Pueblo, 2022), esto dificulta el desarrollo de planes y proyectos que contribuyan a mejorar las condiciones de vida de la comunidad.

6.2 CARACTERIZACIÓN DEL MANEJO DEL AGUA RESIDUAL.

En esta fase se llevó a cabo un diagnóstico que permitió analizar y conocer desde un contexto externo e interno la gestión del agua, funcionamiento de la huerta y del restaurante en la institución educativa, algunos de los componentes se llevaron a cabo en la comunidad en general, pero la mayoría se centraron en la institución.

Como parte del proceso, se realizaron las visitas de reconocimiento dirigidas principalmente a la comunidad. Previamente se llevaron a cabo diálogos con los líderes con el fin de obtener autorización necesaria para efectuar los recorridos e ingreso a determinados espacios. El propósito de esta actividad fue identificar aspectos generales de la comunidad, tales como su distribución, ubicación, comercios, instituciones, sitios de recreación, economía, así como su sistema de agua y saneamiento, entre otros.

Luego, se llevó a cabo la visita de reconocimiento en la institución educativa, donde se realizó un trabajo más exhaustivo con estudiantes, docentes, personal administrativo y el personal encargado del restaurante escolar, que permitió profundizar en actividades internas de la institución como horarios de clase, actividades de docentes y estudiantes, uso del agua, manejo del comedor, entre otros. Se menciona que todo el proceso de reconocimiento de la institución educativa se llevó a cabo durante dos semanas, **Figura 3**.

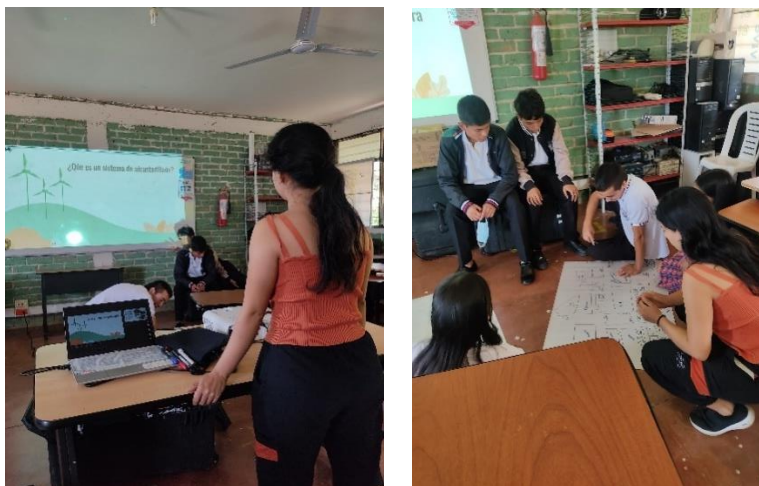


Figura 3: Taller elaboración de cartografía con representantes de grado noveno, decimo y once.

Fuente: Autor.

Durante esta etapa, se realizaron entrevistas, encuestas, talleres y consultas que permitieron profundizar en el contexto y funcionamiento de lugares fundamentales como la huerta escolar, donde se enfocó en temas como el uso del agua para riego, tipos de cultivos y mantenimiento. **(Figura 4 y 5)**. También, se consultó sobre el funcionamiento del restaurante escolar, en el cual se trató temas como el proceso llevado a cabo para la preparación de los desayunos y almuerzos, el aseo del lugar, uso del agua, almacenamiento y compra de los alimentos. Además, fue importante desarrollar estas actividades enfocadas en conocer las prácticas sobre el uso y gestión del agua en la institución educativa.

Es relevante señalar que las encuestas fueron diseñadas con preguntas claras, concisas y de fácil comprensión, tal como se detalla en el **ANEXO 1**. En el caso de los estudiantes, se incluyeron el grado sexto a once, correspondientes al área escolar donde se localiza la huerta. Para los estudiantes de los grados sexto, séptimo y octavo se aplicó un formato de encuesta menos complejo, ajustado a su nivel de comprensión, distinto al utilizado para los docentes, personal administrativo, personal de cocina, personal de aseo y los estudiantes de los grados noveno, décimo y once.



Figura 4: Realización cartografía con personal encargado del comedor escolar
Fuente: Autor.



Figura 5: Presentación de encuestas modalidad física, grado sexto.
Fuente: Autor.

Durante el desarrollo de la aplicación de las encuestas, se presentaron ajustes en la modalidad inicialmente planteada, la cual contemplaba su aplicación de forma virtual. Estos cambios fueron necesarios debido a limitaciones como la falta de correos electrónicos institucionales para los estudiantes, restricciones en la disponibilidad de espacios adecuados para el diligenciamiento de los formularios y el limitado acceso y manejo de herramientas TIC's por parte de algunos miembros de la comunidad educativa. En consecuencia, para los grados sexto, séptimo y noveno, las encuestas se aplicaron en formato físico (papel), mientras que, para los docentes, el personal de servicios generales, el personal del restaurante escolar y los estudiantes de octavo, decimo y once, se utilizó la herramienta Google Forms como medio de aplicación virtual.

Asimismo, se alcanzó la meta proyectada de cobertura, equivalente al 50 % de la población objetivo. De una muestra estimada en 199 personas, se logró encuestar a 161 individuos, incluyendo estudiantes, docentes, personal administrativo, de aseo y cocina, lo que representa un porcentaje de participación del 80,9 %.

Las jornadas de talleres y charlas se realizaron de manera diferenciada según el público objetivo, debido a la disponibilidad de horarios de clase, complejidad de los temas tratados y finalmente por los horarios en que se disponían los alumnos por parte del rector. En el caso del personal encargado de la cocina, se desarrollaron sesiones exclusivas, mientras que para los docentes y estudiantes se llevaron a cabo actividades con la participación de dos o tres representantes por curso, desde sexto hasta once, distribuidos en dos jornadas distintas.

Por otra parte, las entrevistas semiestructuradas se realizaron de forma individual con actores clave, incluyendo al rector de la institución, las dos personas responsables de la preparación de los alimentos, el docente encargado del comedor escolar, el docente responsable de la huerta escolar, y dos representantes estudiantiles de los grados séptimo, noveno y once (seis estudiantes en total). Cabe resaltar que, dependiendo del perfil del entrevistado, se realizaron adaptaciones en el contenido de las preguntas con el fin de adecuarlas a su campo de conocimiento y experiencia, garantizando así la pertinencia y calidad de la información recolectada, es decir, la complejidad de las entrevistas y los temas tratados variaban significativamente cuando se aplicaron a estudiantes de séptimo grado en comparación con las aplicadas a los docentes, y aun así en el caso de los

estudiantes, surgían dudas sobre conceptos o era necesario aclarar la finalidad de la entrevista y las preguntas realizadas.

Durante esta fase, se estimó el volumen de aguas residuales generadas en el restaurante escolar. Para ello, inicialmente se consultó al personal de cocina respecto al volumen aproximado de agua utilizada diariamente en la preparación de alimentos. Cabe señalar que no fue posible realizar una medición directa del caudal de aguas grises generadas, debido a que la tubería del lavaplatos está conectada directamente al sistema de alcantarillado, el cual también recibe las descargas provenientes de los inodoros (**ver Figura 6**). Por lo tanto, se optó por estimar el volumen de agua residual gris a partir del consumo de agua utilizado específicamente para el lavado, limpieza de alimentos y utensilios, asumiendo que dicho volumen corresponde al efluente generado.



Figura 6: Sistema de ventilación donde se identifica la conexión del agua residual gris y aguas negras.

Fuente: Autor.

Para este procedimiento, se determinó el caudal de las llaves del lavaplatos mediante el método volumétrico, utilizando un recipiente de 10 litros. Con este valor y empleando un cronómetro, se evaluó durante dos días consecutivos el tiempo de uso de las llaves mientras se realizaban las actividades de preparación, servicio del desayuno y lavado de vajilla y utensilios. Los datos obtenidos fueron utilizados para estimar el volumen de aguas residuales grises generadas, como se muestra en la **Ecuación 1**, tomada del manual de medición de caudales del Instituto Privado de Investigación Sobre el Cambio Climático (ICC, 2017). Esta medición se realizó el miércoles 2 y viernes 4 de agosto de 2023, en el horario comprendido entre las 6:30 a. m. y las 11:30 a. m.

$$Q = \frac{V}{t}$$

Ecuación 1

$$V = Q * t$$

(ICC, 2017)

Donde:

V: Volumen de agua residual generado en el restaurante escolar, durante la preparación de alimentos (lt).

t: tiempo estimado de funcionamiento de las llaves (seg).

Q: Caudal de funcionamiento de las llaves (lt/s).

6.2.1 Muestreo del AR proveniente del restaurante escolar.

El muestreo de agua residual se hizo con el fin de tener una base sobre parámetros fisicoquímicos y microbiológicos necesarios para la selección de tecnologías. Los recipientes y materiales para el traslado del agua residual fueron proporcionado por el Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales de la Universidad del Valle, mismo que se encargó de llevar a cabo el análisis de las muestras.

Con base en lo anterior, la caracterización de las aguas residuales se llevó a cabo mediante un muestreo puntual, tal como se observa en las **Figuras 7 y 8**. La toma de muestras se realizó en una única ocasión, directamente en la parte inferior del lavaplatos del comedor escolar. El volumen total recolectado fue de 10,45 litros, distribuidos de la siguiente manera:

- Recipiente de 2 litros Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Total Kjeldahl.
- Recipiente de 3,75 litros DBO, Bicarbonato, cloruro, sulfatos, alcalinidad, nitrato y Fósforo reactivo total (ortofosfatos).
- Recipientes de 2 litros todos los parámetros relacionados con metales.
- 2 recipientes de un litro para aceites y grasas.
- Recipiente ámbar de 250 ml par DQO.
- Dos bolsas estériles whirl-pak de 100 ml para coliformes fecales y totales.

La muestra fue recolectada en horas de la mañana, entre las 10:00 a.m. y las 10:40 a.m. del 14 de noviembre de 2023, coincidiendo con el horario en que se realiza el lavado de los recipientes utilizados durante el desayuno. Para la medición de parámetros in situ, se empleó un recipiente de 15 litros en el cual se sumergieron los equipos de medición: pH-metro Hanna HI8314, oxímetro Hanna 98193 y conductímetro WTW 3130.

Los parámetros medidos in situ fueron: Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto, pH y la temperatura. Los parámetros evaluados en el laboratorio fueron: Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química se Oxígeno (DQO), Aceites y Grasas, Calcio Total (Ca), Sodio Total (Na), Magnesio (Mg), Potasio Total (K), Bicarbonatos, Cloruro, Sulfato, Alcalinidad, Nitrato, Nitrógeno Amoniacal, Nitrógeno Kjeldahl, Fósforo reactivo total (ortofosfatos), Coliformes Totales y Fecales.



Figura 7: Muestra y medición de pH in situ.
Fuente: Autor.



Figura 8: Muestra, ubicación ingreso a la cocina, restaurante escolar.
Fuente: Autor.

6.2.2 Sistematización y análisis de la información.

Finalmente, se realizó la sistematización de la información recolectada, lo que permitió estructurar de manera adecuada las actividades posteriores, facilitando la identificación de datos clave para la formulación de la alternativa tecnológica y la propuesta del plan de cultivos.

6.3 FORMULACIÓN DE UNA ALTERNATIVA TECNOLÓGICA.

Esta segunda fase se enfocó en reconocer y caracterizar aquellas tecnologías empleadas en el tratamiento de agua residual y agua residual gris, que permitiera el reúso del efluente tratado, principalmente en riego de cultivos.

6.3.1 Preselección de las tecnologías de tratamiento de agua residual.

La preselección se realizó mediante el uso de estrategias de análisis multicriterio, las cuales consideraron aspectos ambientales, sociales y económicos, respecto a la calidad del agua fue importante considerar aquellos parámetros que permitían el reúso del agua y no afectarían los suelos, los cultivos, la salud humana, el sistema de riego y medio ambiente. Los criterios considerados para la selección de la tecnología de tratamiento fueron los siguientes:

- Tipo de tratamiento ofrecido por la tecnología, enfocado al parámetro al que se desea hacer remoción (SST, DBO, DQO, GYA, etc.)
- Limitaciones de área.
- Consumo de energía.
- Generación de olor.
- Vectores.

Adicionalmente, se evaluaron posibles afectaciones relacionadas con fenómenos de corrosión, incrustación y toxicidad, las cuales podrían comprometer la funcionalidad del sistema de riego, así como la calidad del suelo y de los cultivos.

La selección de tecnologías se llevó a cabo considerando tecnologías recomendadas por la literatura, debido a que la comunidad no tiene establecidos sistemas de tratamiento. Por lo que se utilizaron libros como el Compendio de Sistemas y Tecnologías de Saneamiento (Tilley *et al.*, 2018), Greywater Management in Low and Middle-Income Countries (Morel & Diener, 2006) y tesis como Estado del arte de los sistemas sépticos para el tratamiento del agua residual en zonas rurales (Campo, 2022), de los cuales se obtuvo el siguiente listado de tecnologías de tratamiento:

- Pretratamiento: Rejillas, trampa grasa, trampa grasa con deflectores y desarenador.
- Tratamiento: Sedimentador, Tanque Imhoff, Reactor anaerobio con deflectores (ABR por sus siglas en inglés), Tanque séptico, Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), Lagunas de estabilización, Laguna aireada, Humedal construido de flujo superficial (HFS), Humedal construido subsuperficial de flujo horizontal (grava o plástico), Humedal construido de flujo vertical, Filtro percolador, Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA).

Una vez recopilada la información sobre las tecnologías disponibles, se aplicó un filtro de selección basado en parámetros críticos y esenciales que debe cumplir la alternativa tecnológica propuesta. Estos criterios fueron establecidos a partir del análisis contextual realizado durante la fase diagnóstica. Dimensionamiento de la tecnología de tratamiento de agua residual.

A partir de la revisión bibliográfica y los talleres realizados donde se describen los talleres de selección, se identificó la tecnología de tratamiento que cuenta con la aprobación de la comunidad educativa y se ajusta a criterios económicos, ambientales y sociales. Se procedió con el dimensionamiento.

En este sentido, el cálculo del caudal se llevó a cabo considerando el volumen de agua residual gris generado en el comedor escolar, además, se consideró las horas de funcionamiento de restaurante escolar, **Ecuación 2**.

$$Qd = \frac{V_{AR}}{T * 3.600} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

Qd: Caudal del diseño (L/s)

V_{AR}: Volumen de agua residual generada en el comedor escolar (L)

T: Tiempo de funcionamiento al día del comedor (h)

3.600: factor de conversión de horas a segundos.

6.3.1.1 Trampa grasa.

Para el diseño de la trampa grasa es importante tener en cuenta los parámetros de diseño expuestos en la **Tabla 4**.

Tabla 4: *Parámetros de diseño Trampa grasa*

Tiempo de retención mínimo	2,5 minutos
Relación largo ancho del área superficial	Entre 1:1 a 3:1
Profundidad	Min 0,35 metros

Fuente: (Resolución 799, 2021)

De la **Tabla 4** es importante tener en cuenta que se recomienda un Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) de 30 min con el fin de garantizar un tiempo adecuado para la flotación y separación de aceites y grasas, además de posibles sólidos presentes en el agua, lo que garantiza una mejor eficiencia de remoción (Madera, 2021).

El caudal de diseño fue el calculado en el ítem 7.4.2 *Dimensionamiento de la tecnología de tratamiento de agua residual*.

El volumen de la trampa grasa se calculó con la **Ecuación 3**.

$$Vol = Q * TRH \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

Vol: Volumen de la trampa grasa (m³)

Q: Caudal de diseño (m³/min)

TRH: Tiempo de retención hidráulica (min).

Área útil de la trampa grasa se define a partir de la **Ecuación 4**.

$$A = \frac{Vol}{h} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

A: área (m²)

Vol: volumen (m³)

h = profundidad (m)

Para definir el ancho y largo de la trampa grasa se tomó la relación de largo/ancho es 1:2, por lo que el ancho se define con la **Ecuación 5** y el largo con la **Ecuación 6**.

$$a = \sqrt{\frac{A}{2}} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$b = a * 2 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

a: ancho (m)

b: largo (m)

6.3.1.2 Humedal subsuperficial de flujo horizontal en grava.

Para el diseño del humedal se tuvo en cuenta las ecuaciones y procedimiento recomendado por García & Corzo (2008). Se debe de tener en cuenta la concentración de salida de la trampa grasa. Primero se realiza en cálculo de la concentración de fondo, **Ecuación 7**.

$$C * = 3,5 + 0,053 * C_o \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

C*= Concentración de fondo.

C_o= Concentración de afluente.

Para este caso de diseño se tiene un limitante de área, el cual no puede sobrepasar un área de 30 m², por esta razón de la **Ecuación 8** se despeja la concentración final a partir de un área inicial ya establecida.

$$S = \frac{Q}{K_A} * \ln\left(\frac{C_o - C *}{C_1 - C *}\right) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$C_1 = C * + \frac{C_o - C *}{e^{\frac{S * K_A}{Q}}}$$

Donde:

C*= Concentración de fondo (mg/L)

C_o= Concentración de afluente (mg/L)

S = Área superficial (m²)

Q = Caudal ($m^3/día$)

C_1 = Concentración del efluente (mg/L)

e = Número Euler (exponencial)

K_A = Constante cinética de primer orden (m/d).

En este sentido García & Corzo (2008) recomiendan un valor para K_A de 0,08 m/d si el sistema a dimensionar se considera para eliminar DBO para una concentración de DBO_5 menor de 250 mg/L, en caso de tener una mayor concentración, se recomienda reducir K_A en un 20%.

También, se procede a calcular el tiempo de retención hidráulica, **Ecuación 9**.

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{\varepsilon * S * h}{Q} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

t = tiempo de retención hidráulica (día)

V = Volumen del humedal (m^3)

Q = Caudal ($m^3/día$)

ε = Porosidad (%)

S = Área superficial (m^2)

h = Profundidad (m)

Para el dimensionamiento de la tubería de ingreso y de salida del humedal, se asume una velocidad de ingreso y con el caudal ya determinado ítem 6.4.2 *Dimensionamiento de la tecnología de tratamiento de agua residual*, se calcula el diámetro de ingreso **Ecuación 10**. y se recalcula la velocidad de salida, **Ecuación 11**.

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * V} * 1,55} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

D = diámetro (“)

Q = Caudal (L/s)

π = constante matemática Pi.

V = Velocidad (m/s)

1,55 factor de conversión a diámetro en pulgadas

$$V = \frac{4 * Q}{\pi * D^2} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

V = Velocidad (m/s)

Q = Caudal (m^3/s)

π = constante matemática Pi

6.4 PLAN DE CULTIVOS.

En esta fase se desarrollaron diferentes actividades que permitieron analizar cómo puede afectar la calidad del agua residual gris sin tratamiento al sistema de riego, cultivos y suelo, basándose en los resultados de la calidad del agua ítem 7.4.2 *Calidad de agua para riego*. Lo que permitió determinar si es necesario llevar a cabo un tratamiento del agua residual gris enfocada al riesgo asociado al cultivo, suelo o sistema de riego.

También se llevó a cabo un balance hídrico que permitió proponer un plan de cultivos, adecuado a la demanda y preferencia de la institución educativa. Este plan de cultivos también abarcó el área máxima de riego por mes, cultivos potenciales que puedan ser sembrados. De los resultados climatológicos se determinó aquellas épocas donde abundan lluvias, de modo que el agua residual tratada puede ser desviada para otros usos o incluso almacenada, se debe de tener en cuenta que el agua residual tratada a pesar de tener una menor carga contaminante, se debe de tener total cuidado y atención en el caso de periodos largos de almacenamiento debido a la alta posibilidad de generar olores o la proliferación de mosquitos, en este caso se recomienda que al agua almacenada, se adicione hipoclorito de sodio o como se conoce a nivel local, límpido.

6.4.1 Caracterización del clima.

Para realizar la caracterización del clima se llevó a cabo la investigación sobre el comportamiento climatológico en la cabecera corregimiento San Jorge La Herradura, con el fin de definir los periodos de lluvias, de verano o de “sequía”, así como la tasa de Evapotranspiración del Cultivo de Referencia (ET_o).

Lo anterior fue importante debido a que los cultivos de la huerta escolar se encuentran a cielo abierto, es decir, no presentan cobertura en plástico u otros materiales, en consecuencia, en las épocas de intensas lluvias no es necesario utilizar el agua residual tratada para el riego.

Para establecer estos periodos y realizar el cálculo del balance hídrico se procedió con la búsqueda de información, por lo que se realizó el sondeo en la plataforma DHIME del IDEAM para ubicar las estaciones más cercanas al corregimiento de la Herradura, luego se procedió con la solicitud de datos al portal del IDEAM y la Federación de Cafeteros. De la información solicitada se obtuvo respuesta por parte del IDEAM sobre dos de las estaciones consultadas, ver **Tabla 5**.

Tabla 5 : Datos específicos de las estaciones Bolívar y El Rodeo.

Datos	Descripción	
Nombre de estación y código	BOLIVAR [52025010]	EL RODEO [52020050]
Municipio y departamento	Bolívar - Cauca	Bolívar - Cauca

Categoría	Climática Ordinaria	Pluviométrica
Longitud	-77,00	-76,99
Latitud	1,83	1,88
Altitud	1.591,00	1.400,00
Estado	Activa	Activa
Tecnología	Convencional	Convencional
Fecha de instalación	Junio 15, 1971	Febrero 15, 1967

Fuente: (IDEAM, 2024)

De las anteriores estaciones se trabajó con los datos de la estación Bolívar con el fin de procesar información de una única estación. Con lo anterior, se estableció un periodo de tiempo de 26 años y se procedió a seleccionar el método para el cálculo de la Eto.

Para la selección del método de cálculo de la ETo primero se evaluó la ecuación sugerida por la FAO Penman-Monteith, la cual se descartó puesto que en los datos obtenidos de las estaciones no se contaba con la variable Velocidad del viento para el periodo de tiempo establecido. Por esta razón se llevó a cabo el cálculo de la ETo con la ecuación de García y López (1970), **Ecuación 12** para la cual se contó con las variables requeridas en el periodo de tiempo establecido.

$$ETo = [1.21 * 10^{Ft} * (1 - 0.01Hr)] + 0.21 * T - 2.3 \quad \text{Ecuación 12}$$

Ft es el factor de temperatura el cual se define con la **Ecuación 13**.

$$Ft = \frac{7.45 * T}{234.7 + T} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

ETo: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Hr: Humedad relativa (%)

T: Temperatura media mensual (°C)

Ft: Factor de temperatura

Con la información anterior fue necesario realizar la estimación de datos faltantes para el rango de años de 1994 al 2019, mediante el método del promedio histórico mensual el cual no genera una alteración del promedio de los datos. Este procedimiento fue realizado para la humedad relativa, temperatura y precipitación mensual. Finalizada la estimación de datos se procedió a calcular la ETo.

Una vez recopilada toda la información se procede a realizar el análisis de los datos utilizando el método de probabilidad de Weibull, probabilidad de excedencia, donde el primer paso consiste es ordenar las columnas de las bases de datos de la ETo (**Anexo 5**) y de la precipitación mensual (**Anexo 4**) de mayor a menor. Posteriormente, para cada año, se asigna un valor **m** relacionado con el número de orden según la magnitud del evento y se aplica la **Ecuación 14**.

$$P(\%) = \frac{m}{N + 1} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

P (%): Probabilidad empírica de Weibull

m: Orden de magnitud del evento

N: Número de datos observados

Con los resultados de la probabilidad empírica se selecciona el conjunto de datos para llevar a cabo los cálculos posteriores. En este caso, para la precipitación total mensual se eligen los datos relacionados a una P (%) del 70% debido a que en planeación de riego representan un escenario medianamente crítico, pero no llegan al extremo, es decir, los datos con menos lluvias.

Por otro lado, para la ETo se seleccionan los datos asociados a una P (%) del 50%, debido a que se recomienda un escenario medio, sin llegar al extremo, es decir, los datos que presentan mayor evapotranspiración o poca evapotranspiración.

Por otra parte, la Evapotranspiración del Cultivo (ETc) se estimó en función de los cultivos seleccionados para el plan cultivos. Este proceso que se llevó a cabo en ítem 6.5.2 *Necesidad de Riego Neta*.

6.4.2 Necesidad de Riego Neta.

Con el fin de calcular la Necesidad de Riego Neta (NRn) fue necesario realizar el cálculo de Evapotranspiración del cultivo (ETc) y la Precipitación Efectiva (Pe).

Para llevar a cabo el cálculo de ETc (**Anexo 7**) se utilizaron los resultados de la ETo correspondientes a la selección del ítem 7.4.1 *Parámetros agroclimáticos* y los cultivos recomendados en la fase del diagnóstico, 7.4 *Plan de cultivos*. La ETc se calculó con la **Ecuación 15**.

$$ETc = Kc * ETo \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

ETc: Evapotranspiración del cultivo (mm/mes).

Kc: Coeficiente del cultivo (adimensional)

ETo: Evapotranspiración de cultivo de referencia.

De la formula anterior el coeficiente Kc para la mayoría de los cultivos fue tomado de la guía: Evapotranspiración del Cultivo (FAO, 2006). Para el caso del cilantro el valor de Kc se tomó del artículo: Respuesta fisiológica de cilantro (*Coriandrum sativum* L.) a la disponibilidad de agua en el suelo (Mejía *et al.*, 2014).

Para el cálculo de la Pe (**Anexo 6**) se utilizó la **Ecuación 16**, en este caso de los datos del análisis de probabilidad de excedencia se tomó los valores mensuales que representan el 70% del total de datos.

$$Pe = P \left(\frac{125 - (0,2 * P)}{125} \right) \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

Pe: Precipitación efectiva (mm/mes)

P: Precipitación (mm/mes)

Con lo anterior se procede al cálculo de la NRn, **Ecuación 17**.

$$NRn = ETc - Pe \quad \text{Ecuación 17}$$

Con el resultado de NRn (**Anexo 8**) para cada cultivo seleccionado, se realiza un promedio y se aplica la **Ecuación 18**. Donde 0,97 representa el porcentaje de eficiencia de la conducción y 0,9 es el porcentaje de eficiencia del sistema de riego recomendado, en este caso, riego por goteo, este proceso se lleva a cabo con el fin de garantizar la oferta hídrica adecuada.

$$NRt = \frac{NRn}{0,97 * 0,9} \quad \text{Ecuación 18}$$

Con la información anterior y el área a regar se realiza el cálculo la demanda hídrica de la huerta escolar, **Ecuación 19**.

$$Vdh = NRt * a \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

Vdh: Volumen de demanda hídrica en la huerta escolar (L/mes) por el total del área.

a: Área a regar (m²)

Luego, se determina la oferta hídrica mensual que tiene en cuenta el volumen de agua residual generado en el restaurante escolar y un aproximado de días hábiles al mes que se cocina, **Ecuación 20**. Y se determina el balance hídrico mensual, **Ecuación 21**.

$$Vo = \frac{V_{AR} * Dh}{1000} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

Vo: Volumen de oferta hídrica (m³)

V_{AR}: Volumen de agua residual generado en el comedor (L)

Dh: Aproximado de días hábiles que se trabaja (20 días)

$$Bm = Vo - Vdh \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde:

Bm: Balance hídrico mensual (m³)

A partir de la información anterior se realizó el cálculo de la demanda y la oferta acumulada, con la finalidad de garantizar que el balance mensual acumulado sea positivo, y confirmar la viabilidad del proyecto.

Por último, se menciona que se consideró un valor de NRn promedio de todos los cultivos presentados por la institución, pero con el fin de proponer un plan de cultivos se realizó cambios en esta información de acuerdo con la capacidad máxima de área a regar y los resultados del taller número dos que especifican la prioridad sobre cuatro cultivos en la huerta.

6.4.3 Índice de Langelier.

Para realizar el cálculo del índice de Langelier, **Ecuación 22**, el cual indica el peligro de corrosión, inicialmente se realizó el cálculo de la dureza usando el software para el cálculo directo de la dureza de la empresa Pure Aqua, INC. (s.f), a partir de los valores de concentración correspondientes al calcio y magnesio.

$$I.L = pH + T + D + A - 12,5 \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:

I.L: Índice de Langelier

T: Coeficiente de temperatura

D: Coeficiente de dureza

A: Coeficiente de Alcalinidad

12,5 coeficiente correspondiente a solidos totales disueltos, utilizado normalmente para el agua de riego.

Para la ecuación anterior es importante tener los resultados de la temperatura (°C) y la concentración de alcalinidad y dureza (mg/L), para conocer el factor correspondiente a cada uno de los datos e incluirlos en la ecuación. Ver **Tabla 6**.

Tabla 6: *Tabla de factores indice de Langelier.*

Temperatura (°C)	Factor Temperatura (TF)	Dureza Cálcica (mg/L CaCO ₃)	Factor Dureza (HF)	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	Factor Alcalinidad (AF)
0	0	5	0.7	5	0.7
4	0.1	25	1.4	25	1.4
8	0.2	50	1.7	50	1.7
12	0.3	75	1.9	75	1.9
16	0.4	100	2.0	100	2.0
20	0.5	150	2.2	150	2.2
24	0.6	200	2.3	200	2.3
28	0.7	250	2.4	250	2.4
32	0.7	300	2.5	300	2.5
36	0.8	400	2.6	400	2.6
40	0.9	500	2.7	500	2.7
50	1	1000	3.0	1000	3.0

Fuente: HANNA instruments (s.f)

Al finalizar el cálculo del índice de Langelier, se comparó el resultado con la información de la **Tabla 7**, la cual permite evaluar el peligro de corrosión al que se pueden encontrar expuestos los sistemas conducción, de tratamiento o de riego.

Tabla 7: *Indicadores que describen la tendencia del agua a producir corrosión y formación de incrustaciones por saturación con carbonato de calcio.*

LSI level	Indication
LSI < -2	Corrosion is intolerable
-2 < LSI < -0.5	Corrosion level is serious
-0.5 < LSI < 0	No formation of scale but a slight corrosion
LSI = 0	Neutral
0 < LSI < 0.5	Marginal corrosion and formation of scale
0.5 < LSI < 2	Non-corrosive with formation of scale

Fuente: (Wasonga *et al.*, 2024)

6.4.4 Toxicidad, sodicidad y salinidad.

Se evaluó el peligro de la toxicidad relacionada con el Sodio (Na) y Cloro (Cl), mediante la comparación de los valores del análisis fisicoquímico del agua residual gris sin tratamiento con los valores permisibles para riego por la FAO (1985) y por la Resolución 1256 del 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Por otra parte, para el análisis por el riesgo de salinización de los suelos se comparó el valor de Conductividad Eléctrica (CEw), obtenido en análisis del agua residual gris, con el valor permitido para riego por la FAO (1985) y la Resolución 1256 del 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

También se realizó un análisis más detallado de sodicidad y salinidad mediante el uso del modelo de Solsariego (Villafañe, 2011) el cual permite pronosticar los niveles de sodicidad y salinidad en el suelo (Echeverri *et al.*, 2015).

Por lo anterior, la sodicidad se asocia con la cantidad de yeso que debe de añadirse al agua de riego, esta cantidad se evalúa mediante la estrategia de Solsariego de Villafañe (2011). En cuanto a la salinidad, que está relacionada con la concentración de sales (CEw), el análisis también permitió asociar los datos al tipo de sales presentes en el agua de riego. Con la información sobre el contenido de sales en el agua de riego, se llevó a cabo la evaluación cualitativa del riesgo de salinidad, **Tabla 8**, mediante la comparación de CEw y la solubilidad de las sales (Echeverri *et al.*, 2015). Fue necesario determinar la solubilidad de las sales mediante una búsqueda bibliográfica.

Tabla 8: Matriz para evaluar el riesgo de salinidad

$EC_w \text{ dS m}^{-1}$	Solubility of salts in water (mmolc l ⁻¹)		
	>5,000	5,000-1,000	<1,000
0 - 0.25	L	L	VL
0.25 - 0.7	M	M	L
0.7 - 3.0	H	M	M
>3.0	VH	H	H

Fuente: (Echeverri *et al.*, 2015)

De la tabla anterior el riesgo de salinidad se define: muy alta (VH), alta (H), media (M), baja (L), muy baja (VL).

7 RESULTADOS Y ANALISIS

7.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

7.1.1 Perfil de la Comunidad

El corregimiento de San Jorge La Herradura está ubicado en el municipio de Almaguer Cauca, Colombia. Según datos en el Plan de desarrollo Municipal de Almaguer 2024-2027 (Alcaldía Municipal de Almaguer Cauca, 2023) se estima que para el 2024 el municipio cuenta con 19.648 habitantes, donde 50,4% que equivale a 9.910 habitantes de la población son mujeres y 49,6% de que equivale a 9.738 habitantes de la población son hombres. Además, se tiene que 1.056 personas (5,4%) habitan en la zona urbana y 18.592 habitantes (94,6%) residen en la zona rural.

Durante el recorrido de reconocimiento en la comunidad de la cabecera del Corregimiento de San Jorge La Herradura, se logró observar que consta aproximadamente de 22 cuadras distribuidas de forma irregular, cuya distribución se resaltó en la cartografía realizada con los estudiantes de grado séptimo, noveno y décimo (ver **Figura 9**).



Figura 9: Cartografía de la cabecera corregimental La Herradura.

Fuente: Estudiantes.

Estas cuadras cuentan con variedad de comercios y entidades, algunos establecimientos son las tiendas de barrio, graneros, restaurantes, tiendas de ropa, talleres de mantenimiento de vehículos motorizados, panaderías, entre otros. Para el caso de instituciones, se tiene el centro de salud, centro educativo Zacudete asignado a la zona por considerarse zona roja, el jardín infantil, la institución educativa primaria y bachillerato. Algunos lugares de recreación a destacar son la piscina, parques, centros recreativos infantiles, canchas de fútbol y baloncesto.

Aunque la comunidad no es muy grande, se notó que cuenta con variedad de establecimientos, que aportan a la economía del corregimiento, lo cual es más notable los viernes y domingos, ya que son los días en que se activa el comercio y que a nivel local se le conoce como días de mercado.

En cuanto a la dinámica económica local, se identificó que, además del comercio, la principal fuente de ingresos para la comunidad está representada por la actividad agrícola, especialmente el cultivo y comercialización del café. En menor proporción, se desarrollan cultivos de caña panelera y granos como frijol, maíz, arveja, garbanzo, entre otros productos de menor escala. Adicionalmente, un porcentaje pequeño de la población se desempeña en labores docentes, tanto en la institución educativa local como en escuelas ubicadas en veredas y municipios aledaños. Por otro lado, en los últimos años, algunos habitantes de la zona rural del corregimiento han accedido a contratos laborales relacionados con la extracción legal de oro.

El centro de salud dispone de una infraestructura básica que incluye un área techada destinada a la espera de los pacientes, una sala para la atención de emergencias, un espacio asignado a la recepción y gestión de historias clínicas, un consultorio médico, un consultorio odontológico que también brinda servicios de higiene oral, además, cuenta con el funcionamiento de la droguería. La prestación de servicios médicos, odontológicos y de higiene oral se realiza de manera regular de lunes a sábado, en un horario comprendido entre las 8:00 a.m. y las 4:00 p.m.

De acuerdo con la información proporcionada por la enfermera del centro de salud, se identifican diversas patologías prevalentes según el grupo etario. En niños menores de tres años, las consultas más frecuentes están asociadas a cuadros de rinofaringitis y diarrea. En adolescentes mayores de 15 años, se reportan con frecuencia niveles elevados de triglicéridos y colesterol relacionados con hábitos alimentarios inadecuados. En adultos a partir de los 30 años, predominan enfermedades crónicas no transmisibles como la hipertensión arterial y la diabetes. En personas mayores de 60 años existe una alta incidencia de enfermedades respiratorias como la Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC) y la neumonía. Asimismo, en adultos mayores de 70 años, se vuelve recurrente la atención médica por episodios de diarrea.

En relación con la mortalidad, en niños menores de tres años, la principal causa de fallecimiento corresponde a la neumonía. Por su parte, en adultos mayores de 40 años, las causas más frecuentes de mortalidad incluyen el cáncer gástrico, los Accidentes Cerebrovasculares (ACV) y los eventos cerebrovasculares hemorrágicos.

También se notó que gran parte de la población joven una vez terminado el bachillerato se desplaza a ciudades como Popayán, Santiago de Cali y Nariño, principalmente, para desarrollar actividades de ventas en comercios o trabajador doméstico, en pocos casos se desplacen para continuar la educación superior.

El corregimiento está conformado por el centro poblado La Herradura y por las veredas Chilco, Garbanzal, Guayacanes, Higüerillos, La Mesa, Pitayas, Sauce y Puente, en cada una de las veredas se pueden encontrar establecimientos educativos para primaria.

En el segundo edificio (**Figura 12**), se encuentra un área amplia subdividida en cubículos que albergan las oficinas de rectoría, coordinación, secretaría y atención psicológica. Asimismo, este bloque contiene la sala de sistemas y la sala de profesores.

El tercer edificio aloja tres aulas asignadas a los grados séptimo, sexto A y sexto B (**Figura 13**). También contiene un cuarto adaptado como tienda escolar (**Figura 14**), cuya operación está a cargo de personal externo que realiza un pago mensual a la institución por su uso.

El cuarto edificio, ubicado en la parte superior del terreno institucional, contiene las aulas correspondientes a los grados octavo A y B (**Figura 15**). A su costado izquierdo se encuentran las instalaciones sanitarias, diferenciadas por sexo (**Figura 16**).

Adicionalmente, la institución, en convenio con la Alcaldía del municipio de Almaguer, contrata de manera externa un vehículo tipo chiva o bus escalera para el transporte de estudiantes provenientes de veredas alejadas (**Figura 17**).



Figura 11: Planta baja a mano derecha, ubicación de grado noveno, decimo y once, y espacio para herramientas
Fuente: Autor.



Figura 12: Cuarto de herramientas.
Fuente: Autor.



Figura 13: Tercer edificio, grado séptimo, sexto A y B.
Fuente: Autor.



Figura 14: Tienda de la Institución
Fuente: Autor.



Figura 15: Cuarto edificio, grado octavo A y B.
Fuente: Autor.



Figura 16: Baños de la institución.
Fuente: Autor.



Figura 17: Chiva o bus escalera encargado del transporte de estudiantes
Fuente: Autor.

A su vez la institución educativa para el mes de noviembre del 2023 contaba con un total de 239 estudiantes desde preescolar hasta grado once, distribuidos por grado como se observa en la **Tabla 9**.

Tabla 9: Número de estudiantes matriculados por grado.

Grado en la Institución	Estudiantes
Cero (preescolar)	12
Primero	16
Segundo	7
Tercero	5
Cuarto	7

Grado en la Institución	Estudiantes
Quinto	11
Sexto	39
Séptimo	21
Octavo	38
Noveno	26
Decimo	29
Once	28
Total, de estudiantes	239

Fuente: Secretaría Institución educativa La Herradura, 2023.

La institución educativa cuenta con un equipo docente conformado por 11 profesionales responsables de impartir clases a los grados entre sexto y once. En el área administrativa se desempeñan cuatro personas: rector, coordinador académico, profesional en psicología y secretaria. En cuanto al personal de servicios generales, se dispone de dos ecónomas encargadas de la preparación de los alimentos en el restaurante escolar y una persona responsable de las labores de limpieza y aseo de las instalaciones.

El calendario académico de la institución se extiende desde finales del mes de enero hasta el mes de noviembre, con recesos establecidos durante la Semana Santa, un receso intersemestral de aproximadamente tres semanas entre junio y julio, y una semana adicional en el mes de octubre.

Finalmente, a partir de las observaciones realizadas en la comunidad educativa, se determina que el entorno institucional presenta varias condiciones favorables para el desarrollo académico de los estudiantes, como lo es el acceso a las aulas, la interacción con el cuerpo docente es accesible y no se evidencian fuentes significativas de contaminación ambiental, tales como ruido excesivo o presencia de olores ofensivos. Pero se presentan grandes deficiencias higiénicas y sanitarias, como la falta de agua potable, jabón de lavado de manos, un sistema de tratamiento de agua residual y condiciones de salubridad evidenciadas en el comedor escolar principalmente en la zona de lavado de los alimentos y utensilios.

Además, a pesar de que los docentes realizan gran esfuerzo por garantizar la educación y bienestar de los estudiantes se deben de tener en cuenta algunas dificultades como la falta de recursos y el acceso a educación de calidad, lo que se refleja en casos como la no presencia de laboratorios, el poco acceso a las TIC'S de estudiantes de primaria y de grados como sexto y séptimo. De igual forma, es de resaltar el compromiso de los docentes por enseñar de manera creativa y demostrar a sus estudiantes nuevas formas de aprender.

7.2 GESTIÓN DEL AGUA

7.2.1 Abastecimiento de agua

En la cabecera del corregimiento la mayoría de los hogares, instituciones y comercios obtiene su suministro de agua de la red de acueducto local, por lo que la escuela, colegio y el restaurante de la institución educativa La Herradura también se abastecen de esta red.

Por otra parte, de acuerdo con la información adquirida con la JAC la red de acueducto tiene dos bocatomas que están ubicadas aproximadamente a 20 kilómetros de distancia hasta los tanques de almacenamiento, donde el nombre de las fuentes de abastecimiento es el río Ruiz y la quebrada Martínez. Una vez cerca, a la cabecera se encuentran tres tanques de almacenamiento ubicados en diferentes lugares en la parte alta de las montañas como se puede observar en la cartografía realizada con la comunidad estudiantil y personal de servicios generales, **Figura 18**. Uno de los tanques de almacenamiento cuenta con un volumen de 96 m³ y está ubicado a una distancia aproximada de 300 metros del centro poblado, los otros dos de los tanques tienen un volumen de 30 m³ y están ubicados a una distancia de 100 metros del centro poblado del corregimiento.

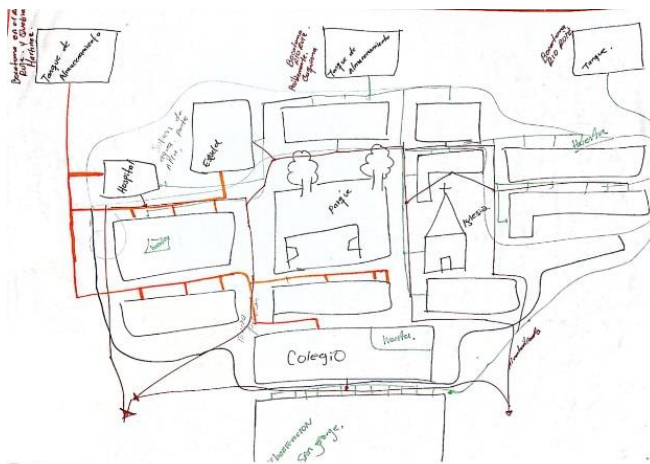


Figura 18: Cartografía de la cabecera del corregimiento de San Jorge La Herradura.

Fuente: estudiantes decimo grado y personal encargado del restaurante escolar.

De acuerdo con la información obtenida durante la visita de campo, entrevistas y talleres, se evidenció que la red de abastecimiento de agua del corregimiento no cuenta con un sistema de potabilización, lo que implica que el recurso hídrico que llega a la comunidad corresponde a agua cruda. Esta situación compromete la calidad del agua distribuida a los hogares, instituciones educativas y establecimientos comerciales, haciendo que no sea apta para el consumo humano directo sin un tratamiento previo. Asimismo, a partir de los testimonios obtenidos y el análisis desarrollado con la comunidad educativa, se evidenció que la fuente de captación, la bocatoma y las líneas de conducción pueden estar expuestas a contaminación por contacto con excretas de animales o humanos, residuos sólidos y posibles lixiviados de agroquímicos, situación que puede representar un riesgo significativo para la salud pública.

Esta percepción se encuentra respaldada por los resultados de las encuestas aplicadas a la comunidad educativa, en las cuales el 77% de los encuestados calificó la calidad del agua como regular, el 14% como buena y el 9% como mala (ver **Figura 19**). En consecuencia, el 87,23% de los encuestados manifestó que, en sus hogares, el agua destinada al consumo es hervida como una medida de tratamiento (ver **Figura 20**).

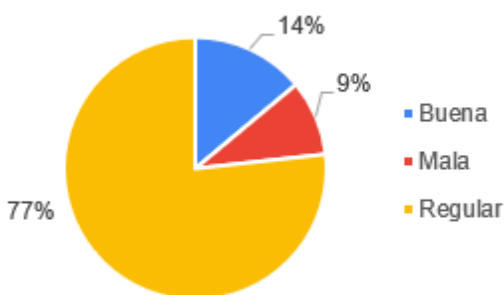


Figura 19: Calidad del agua del acueducto.

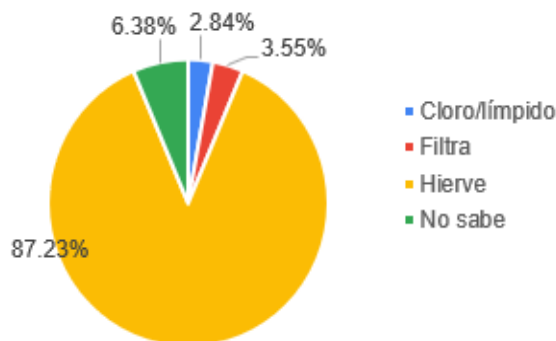


Figura 20: Tipo de tratamiento aplicado al agua para consumo en los hogares de los estudiantes.

Con base en lo anterior, se evidenció que la institución educativa no cuenta con un sistema propio de potabilización, razón por la cual el agua que se distribuye a través de las redes internas corresponde a agua cruda. En este contexto, se considera adecuado que los estudiantes deban abastecerse de agua potable por medios alternativos, ya sea llevándola desde sus hogares o adquiriéndola envasada. Esta situación se ve reflejada en los resultados de las encuestas aplicadas (ver **Figura 21**), donde el 44,58% de los encuestados manifestó adquirir agua embotellada en las tiendas durante la jornada escolar, el 23,49% indicó consumir agua directamente de las llaves de la institución, y el 11,45% señaló traer el agua desde sus viviendas. No obstante, se identificó que el 49,40% de los encuestados ha consumido en algún momento agua directamente de las llaves de la institución educativa (ver **Figura 22**), lo que representa un riesgo potencial para la salud, dada la ausencia de tratamiento adecuado del recurso hídrico.

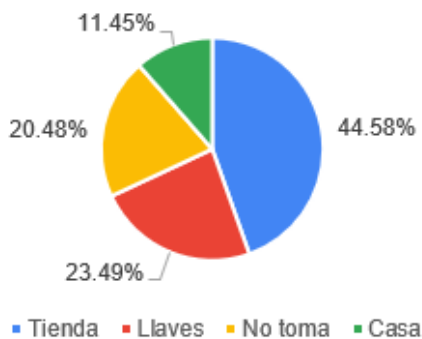


Figura 21: Procedencia del agua consumida por los estudiantes durante la jornada escolar.



Figura 22: Consumo de agua directamente de las llaves en la institución educativa.

7.2.2 Saneamiento e Higiene

En relación con el sistema de saneamiento del corregimiento, se identificó que las viviendas ubicadas en el centro poblado cuentan con conexión a un sistema de alcantarillado combinado. En consecuencia, la escuela, el colegio y el restaurante escolar de la Institución Educativa La Herradura también se encuentran conectados a dicho sistema. Por otro lado, las viviendas situadas en las veredas no disponen de conexión a redes de alcantarillado, por lo que emplean soluciones individuales o recurren a vertimientos a cielo abierto. Los sistemas individuales, según lo observado en el trabajo de campo y lo reportado en entrevistas con la comunidad, consisten generalmente en excavaciones en el suelo con dimensiones aproximadas de 1 metro de ancho, 1,5 metros de largo y 1,5 metros de profundidad.

Así mismo, de 161 encuestados el 27% afirma, que en sus hogares el agua residual va al alcantarillado, el 27% dice no tener conocimiento sobre cómo es la disposición final del agua residual en su hogar, el 21% afirma que dispone del agua residual en pozo de absorción, el 17% afirma que dispone del agua residual en tanque séptico y un 8% afirma que el agua residual de su hogar la dispone al aire libre (**Figura 23**).

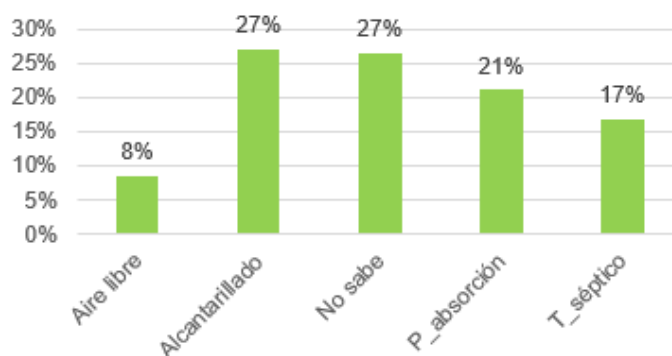


Figura 23: Disposición final del agua residual en los hogares de los estudiantes.

De la anterior información es importante aclarar, que en la mayoría de los hogares de la comunidad se le conoce con el nombre de tanque séptico a un hoyo que se hace de manera empírica, este hoyo tiene aproximadamente dos metros de profundidad por un metro y medio de largo y ancho, sin ningún tipo de recubrimiento. Por lo tanto, no cumple con los requerimientos mínimos para catalogarse como tanque séptico, que de acuerdo con el Título J del RAS (2017) debe ser mínimamente una estructura aislada o estanca que evite infiltraciones al suelo, que garantice que el agua residual permanezca dentro del tanque para que pueda culminar el proceso de tratamiento y depuración, el cual puede ser construido con mampostería de piedra o ladrillo, concreto simple o reforzado, o se puede adquirir en el comercio ya fabricados.

Respecto al sistema de alcantarillado combinado ubicado en la cabecera del corregimiento, éste cuenta con una antigüedad aproximada de 25 años, según lo comentado por la comunidad, además la tubería es de material Gres y generalmente tiene un diámetro de 6” a 8”.

Por otra parte, es importante aclarar que el alcantarillado no tiene planta de tratamiento de agua residual, por lo tanto, vierte a cielo abierto, **Figuras 24 y 25**, estos se encuentran ubicados en dos sitios en la parte baja de la cabecera. Como consecuencia en los últimos años los vertimientos han afectado casas y cultivos ubicados en zonas cercanas. Cabe señalar que algunos de los principales problemas reportados es la generación de malos olores y la contaminación de las fuentes de agua, quebradas y cultivos.

Es importante señalar que, durante el recorrido realizado en la zona de reconocimiento de vertimientos, se evidenció que el sistema de alcantarillado presenta deficiencias estructurales, ya que en varios tramos la tubería se encuentra expuesta y, en algunas secciones, muestra rupturas visibles. Esta condición incrementa el riesgo de infiltración y contaminación del entorno, además de comprometer el adecuado transporte de las aguas residuales.



Figura 24: Vertimiento al aire libre cultivo de café.

Fuente: Autor.



Figura 25: Vertimiento al aire libre, zona de guadua.

Fuente: Autor.

Hay que mencionar, que los habitantes del sector reportan que algunas personas “sin escrúpulos” dañan intencionalmente las tuberías con el fin de utilizar el agua residual para regar cultivos. Además, en otros casos, reportan que se utiliza el agua contaminada de las quebradas para regar cultivos de huertos como cilantro, cebolla, tomate, entre otros. Esta práctica, aunque representa un riesgo para la salud, a la vez demuestra la aceptación por parte de la comunidad del uso de agua residual para riego.

Con base en lo anterior, se evidencia que en la comunidad no se realiza una adecuada gestión de las aguas residuales domésticas, lo que genera impactos negativos tanto en la salud pública como para el ambiente. En este contexto, se hace necesario implementar estrategias de manejo y tratamiento que contribuyan a mitigar dichas afectaciones y promuevan una gestión integral del recurso hídrico.

Respecto a las condiciones saneamiento e higiene en la institución educativa se cuenta con personal encargado del aseo de los baños, patios y corredores. Los baños están ubicados en la parte superior del colegio (**Figura 26**). El área de los baños cuenta con 4 unidades sanitarias y tres lavamanos para mujeres (**Figura 27**) y 3 unidades sanitarias para hombres, con dos orinales y tres lavamanos, (**Figura 28**), cabe mencionar que estos baños son tanto para estudiantes, como docentes, personal administrativo y del aseo. En general se tiene un total de 9 unidades sanitarias para toda comunidad del colegio, población total de 197 personas. En los baños se identifica que no hay disponibilidad de jabón para manos, lo que dificulta garantizar condiciones higiénicas para estudiantes como personal docencia y administrativo, **Figura 29**.

Asimismo, se observa que en los inodoros hay fallas en el sistema hidrosanitario que permiten el riego de agua constante por goteo, por lo que se ha optado por ubicar debajo de los lavamanos recipientes como baldes para la recolección del agua.



Figura 26: Baños para hombres y mujeres, colegio.

Fuente: Autor.



Figura 27: Vista general baños para mujeres

Fuente: Autor.



Figura 28: Vista general baños hombres.

Fuente: Autor.



Figura 29: Lavamanos y baldes para agua.

Fuente: Autor.

7.2.3 Restaurante escolar

El restaurante escolar se encuentra ubicado en el mismo sector donde están localizadas las aulas de clase de la escuela, como se indica en la **Figura 30**, a una cota topográfica superior con respecto a las instalaciones del colegio. Opera habitualmente durante ocho horas diarias, con un horario de 6:30 am a 2:30 am. La preparación de alimentos está a cargo de dos personas, comúnmente conocidas en la zona como ecónomas, quienes en la mayoría de los casos son mujeres del corregimiento.

La institución educativa cuenta con el apoyo del Programa Alimentación Escolar (PAE) que contribuye para el funcionamiento del restaurante escolar. Según la información proporcionada por el rector, el PAE asigna 2.000 pesos por estudiante, monto que debe cubrir los gastos de la compra de alimentos perecederos y no perecederos, la adquisición de implementos de aseo, incluyendo jabones, y el pago de las ecónomas. Sin embargo, este presupuesto normalmente no cubre todos los gastos del restaurante escolar, por lo que a nivel interno se ha implementado una contribución de los estudiantes mediante dos cuotas anuales de 40.000 pesos cada una.

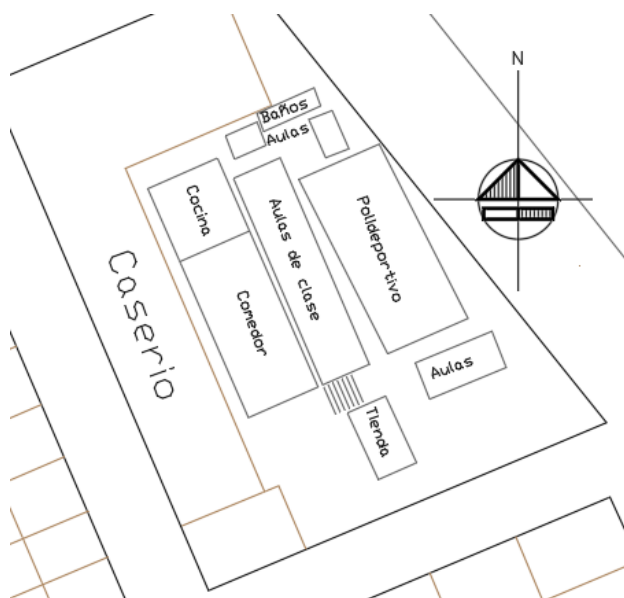


Figura 30: Distribución del área de la escuela y ubicación del restaurante escolar (cocina, comedor).

Fuente: Adaptado plano en AutoCAD Alcaldía de Almaguer- Cauca (2012)

Actualmente, de acuerdo con la información suministrada por el área secretaría de la institución al restaurante escolar asisten 204 de los 239 estudiantes matriculados, los cuales pagan la cuota semestral, la mayoría de ellos no residen en la cabecera del corregimiento, si no que viven en veredas cercanas. No obstante, se logró identificar que, no todos los estudiantes asisten diariamente, lo que llega a generar pérdidas de entre 10 y 20 comidas al día, este comportamiento se ve identificado principalmente en los estudiantes del colegio.

Para reducir el desperdicio de alimentos por inasistencia, los docentes implementan estrategias como, pasar un listado el día anterior para confirmar la asistencia al restaurante, supervisar la presencia de los estudiantes en los horarios del desayuno y almuerzo, y realizar recomendaciones para el uso adecuado del restaurante. En la **Figura 31** se puede observar el restaurante escolar en un horario normal de funcionamiento y en la **Figura 32** algunos de los residuos de alimentos que dejan los estudiantes.



Figura 31: Restaurante escolar, en horario de desayuno.

Fuente: Autor.



Figura 32: Ubicación de los recipientes de los alimentos y los residuos.

Fuente: Autor.

En relación con los alimentos preparados en el restaurante escolar, el Programa de Alimentación Escolar (PAE) suministra un plan alimentario establecido. Sin embargo, debido a las limitaciones presupuestarias, se ha prescindido de ciertos productos, especialmente las fuentes proteicas como las carnes. Adicionalmente, algunos alimentos incluidos en el plan no son consumidos por la mayoría de los estudiantes, lo que ha llevado al personal encargado a omitir su preparación; un ejemplo es el caso de las ensaladas, las cuales fueron eliminadas del menú de desayunos. Los alimentos que se preparan con mayor frecuencia incluyen arroz, lentejas, arvejas, pastas, frijoles, guisos con papa y carne desmechada o picada, así como arroz con pollo. En cuanto a los almuerzos, predominan las sopas de arroz, pastas y maíz, caldos, sancocho y mazamorra.

Respecto al almacenamiento de los alimentos la institución cuenta con una habitación, **Figura 33**, cerca del comedor y cocina, donde se guardan los alimentos en recipientes con tapas y canastas, **Figura 34**, y también se suelen ubicar ollas y otros materiales necesarios para la preparación de alimentos. Para el caso de las carnes y frutas se cuenta con una nevera de 360 litros de volumen de almacenamiento.



Figura 33: Cuarto de almacenamiento de alimentos y ollas.

Fuente: Autor.



Figura 34: Canastas con alimentos como papa, cebolla, papa, plátano.

Fuente: Autor.

La preparación de alimentos se lleva a cabo en estufas de gas y eléctricas. Para este proceso, se utiliza agua cruda, es decir, sin tratamiento, proveniente del acueducto, pero en casos de fallas y en épocas de baja precipitación, se opta por nacimientos de agua. Esta misma agua se emplea para el lavado de los platos, vasos, cubiertos, ollas y otros utensilios (**Figura 35**). Para la preparación de los jugos y el consumo, las ecónomas afirman que se deja desde el día anterior agua hervida y almacenada en un recipiente plástico con tapa.

Por otro lado, el lavaplatos o lugar destinado para el lavado de los utensilios de la cocina no cuenta con adecuadas condiciones sanitarias (**Figura 36**). Esto se debe, principalmente al tipo de material utilizado, que no es el recomendado para lugares donde realiza la preparación de alimentos, puesto que se encuentra recubierto con azulejo el cual tiene una deficiente impermeabilización y presenta manchas y fracturas en varias partes. Estas condiciones pueden convertirse en un foco de contaminación de alimentos y de los recipientes como ollas, platos, cucharas, vasos y otros instrumentos utilizados en la cocina.



Figura 35: Cocina, durante el proceso de lavada y preparación de alimentos.

Fuente: Autor.



Figura 36: Condiciones en las que se encuentra el lavaplatos.

Fuente: Autor.

Durante las prácticas de lavado de alimentos en el restaurante escolar, generalmente se utiliza agua cruda. En ciertos casos, cuando los alimentos que presentan adherencia de tierra u otros sólidos difíciles de remover solo con agua, se emplea jabón en crema para facilitar su remoción. Para la limpieza de los utensilios y recipientes de cocina, se utiliza regularmente jabón en crema, siendo la marca Axion la más comúnmente empleada.

Asimismo, se identificó el uso frecuente de límpido, particularmente de marcas como Patojito o Multiusos, en las actividades de lavado de utensilios y limpieza de la cocina. Esta práctica puede contribuir a elevadas concentraciones de cloro y sodio en el agua residual gris, lo que representa un desafío para su tratamiento y un riesgo potencial en su reutilización para riego, debido a posibles efectos fitotóxicos en los cultivos. En este sentido, se recomienda la implementación progresiva de productos de limpieza biodegradables o ecológicos, evaluando su viabilidad en función de la disponibilidad de recursos económicos y la aceptación por parte del personal encargado.

7.2.4 Producción de agua residual en el Restaurante escolar

Como resultado de las consultas realizadas al personal encargado de la preparación de alimentos comentaron que se puede llegar a consumir un aproximado de 2.100 litros diarios de agua para la preparación del desayuno y almuerzo de los estudiantes.

Asimismo, los resultados obtenidos mediante la observación continua del proceso de preparación del desayuno indica que este proceso, por sí solo, puede generar hasta 1.295 litros de agua residual gris, por lo tanto, se considera que durante la preparación de ambas comidas se genera un total de 2.590 litros de agua residual gris.

Es importante aclarar que la cantidad de desayunos y almuerzos preparados corresponden a la cantidad de estudiantes matriculados y realizan el pago de la cuota ya mencionada en el ítem 7.2.3 *Restaurante escolar*. Para los 204 estudiantes que asisten al restaurante escolar, se estima que en la preparación de los desayunos y almuerzo se generan aproximadamente 12,69 litros de agua residual gris por estudiante. Por lo tanto, la preparación del desayuno y almuerzo por separado generan aproximadamente 6,34 litros de agua residual gris.

7.2.5 Huerta escolar

La huerta escolar está ubicada dentro del colegio de la Institución Educativa la Herradura, donde se desarrollan los cursos del colegio 6° a 11°, (**Figura 37**).

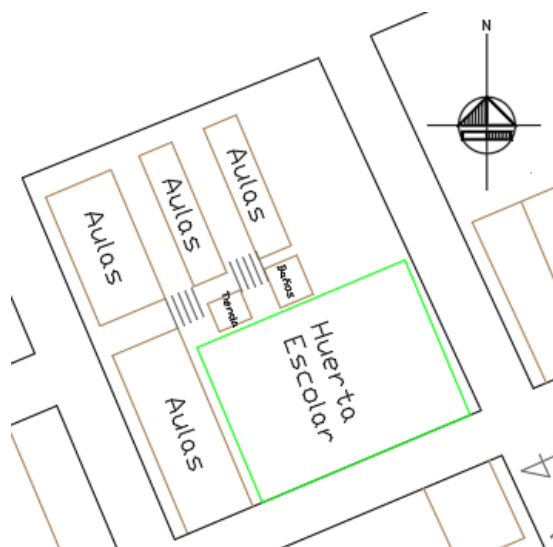


Figura 37: Distribución del área del colegio y ubicación de la huerta escolar.
Fuente: Editado, plano AutoCAD Alcaldía de Almaguer- Cauca (2012).

La huerta cuenta con un área cultivable aproximada de 937 m², información suministrada por el docente encargado de la huerta. Según la información recolectada con el docente del área agrícola y el rector, los cultivos más frecuentes en la huerta son: zanahoria, cilantro, acelga, frijol, maíz, alverja, habichuela, lechuga, cebolla larga y tomate. Otros cultivos, sembrados con menor frecuencia son el pimentón, orégano, remolacha, Batavia y espinaca. Además, entres los salones de clase se pueden observar pequeñas áreas destinadas para la siembra de plantas medicinales, **Figura 38**, con el propósito de fomentar el conocimiento sobre este tipo de medicina natural. Algunas de estas plantas son la sábila, el romero, limoncillo, ruda, salvia, ajenojo, albaca y limón.

Por otra parte, varios de los cultivos de la huerta escolar se destinan para el consumo en el restaurante escolar, mientras que otra parte se vende a particulares. Esto contribuye a la seguridad alimentaria de los estudiantes y genera recursos económicos para la institución. El docente de proyectos agrícolas afirmó solo tener información relacionada con las ganancias generadas por la venta de cebolla larga, en este caso un total de 200 mil pesos en un lapso de 8 meses, excluyendo el consumo de cebolla larga realizado en el restaurante escolar. Respecto a otros cultivos los docentes encargados no cuentan con información puntual relacionada con la cantidad generada ni ganancias adquiridas.

A su vez, el manejo de la huerta está a cargo del docente de proyectos agrícolas y los estudiantes de grado noveno en adelante. Sin embargo, después de largos periodos de inactividad, la preparación del terreno, especialmente el arado, se realiza por medio de trabajo comunitario con los padres de familia de los estudiantes, **Figura 39**. Por su parte, el proceso de enriquecimiento

del suelo es una labor a manos de los estudiantes, quienes utilizan abono orgánico como estiércol de vaca, gallinaza o compost. Además, tanto la siembra como el riego también están a cargo de los estudiantes. El docente encargado menciona que se ha intentado implementar la rotación de cultivos con el fin de no degradar el suelo.



Figura 38: Espacio en la parte de atrás de las aulas de clase destinado para la siembra de plantas medicinales.
Fuente: Autor.



Figura 39: Trabajo comunitario padres de familia para la limpieza y arado de la huerta.
Fuente: Autor.

Se identifica que en la institución hay temporadas donde la huerta escolar deja de funcionar, por lo que de las 80 personas a quienes se les aplicó el formato de encuesta N2 se les consultó la principal razón de esta situación y el 33% considera que la huerta ha dejado de funcionar por poco mantenimiento, el 30% por falta del recurso hídrico para el riego de los cultivos, el 23% por falta de compromiso de los estudiantes y el 14% por fallas en el sistema de riego, **Figura 40**.

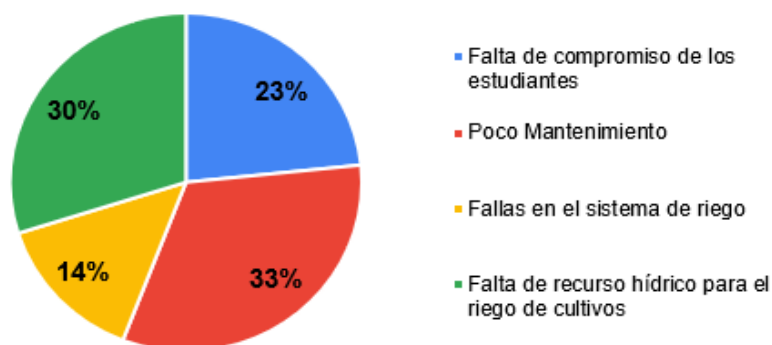


Figura 40: Principales causas por las que deja de funcionar la huerta escolar.

Durante las entrevistas, muchos afirmaron que los meses de junio, julio, agosto y septiembre presentan pocas lluvias, lo que dificulta cultivar la huerta, esta situación se evidencia en las **Figuras 41 y 42**, donde en agosto se observa la falta de cultivos y un suelo árido, mientras que en noviembre la huerta tiene varios cultivos y mayor humedad en el suelo. En contraste, para el mes

de mayo de 2023 se cultivó tomate, frijol y arveja, mientras que en los meses de julio, agosto y septiembre solo sembró cebolla larga en la huerta, ya que es la única que resiste la baja precipitación de la zona en ese periodo.



Figura 41: Huerta escolar mes de agosto.
Fuente: Autor.



Figura 42: Huerta escolar mes de noviembre.
Fuente: Autor.

Cabe mencionar que la institución por temporadas realiza la cría de cuyes o de pollos que se ubican en un galpón adjunto al área de la huerta, además, cuenta con un lote que de acuerdo a la información suministrada por el docente del curso de proyectos agrícolas tiene un área de 3900 m² y está ubicado aproximadamente a un kilómetro de la institución, el cual se estaba adecuando para la siembra de árboles frutales y café, (**Figura 43**). A su vez, tienen gran interés en implementar un tratamiento a pequeña escala para el agua residual que proviene de la tienda escolar ítem 7.1.2 *Perfil de la Institución Educativa*. Lo que demuestra una visión de la institución por los proyectos agrícolas y la sustentabilidad.



Figura 43: Adecuación de lote para siembra (grado once) y árboles frutales.
Fuente: Autor.

7.2.6 Análisis del muestreo del agua residual del restaurante escolar.

Los resultados del análisis del agua residual gris proveniente del restaurante escolar de la Institución Educativa la Herradura se pueden observar en la **Tabla 10**.

Tabla 10: Resultados prueba de laboratorio de agua residual gris del restaurante escolar.

Parámetro	Resultado	Unidad
Bicarbonatos (HCO_3^-)	225	mg CaCO_3 /L
Alcalinidad	253	mg CaCO_3 /L
Calcio total (Ca)	128	mg Ca/L
Cloruro (Cl^-)	37,8	mg Cl^- /L
Conductividad eléctrica (in situ)	600	uS/cm
DBO_5	1.325	mg O_2 /L
DQO reflujo cerrado	2.954	mg O_2 /L
Fósforo reactivo total (ortofosfatos)	0,677	mg P-PO_4^{-3} /L
Aceites y Grasas	849	mg/L
Nitrato	< 1,15	mg / N-NO_3 /L
Nitrógeno amoniacal	6,3	mg N-NH_3 / L
Nitrógeno Kjeldahl	19,5	mg N-NH_3 / L
Oxígeno disuelto (in situ)	6,06	mg O_2 /L
pH (in situ)	6,81	Unidades
Sulfato (SO_4^{--})	168	mg SO_4^{-2} / L
Temperatura (in situ)	21,1	°C
Magnesio (Mg)	33	mg Mg /L

Parámetro	Resultado	Unidad
Potasio total (K)	5,5	mg K/L
Sodio total (Na)	63,3	mg Na/L
Coliformes totales	12.100	NMP / 100 ml
Coliformes fecales	<2	NMP / 100 ml

Fuente: Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales de la Univalle (2023).

Los resultados de la **Tabla 10**, se compararon con los niveles máximos permisibles en agua residual para el reúso en riego de cultivos, identificados dentro de la normatividad nacional y se considera los niveles expuestos por la FAO (1985). Durante este proceso se logró identificar que la mayoría de los parámetros cumple o no se encuentran dentro de las restricciones. Este es el caso de la conductividad eléctrica, un parámetro importante para evitar el proceso de salinización de los suelos, los resultados reportan un valor de 600 uS/cm o 0,6 ds/m, este valor es menor a 0,7 ds/m recomendado por la FAO (1985) y menor a 1,500 uS/ cm recomendado en la Resolución 1256 del 2021 y de manera informativa se compara con la Resolución 1207 del 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, derogada en el artículo 8 de la resolución 1256 del 2021 del Minambiente.

Para el caso de los bicarbonatos con una concentración de 225 mg CaCO₃/ L o 3,6 meq/L la FAO (1985) establece un grado de restricción de uso moderado para concentraciones entre 1,5 y 8,5 meq/L, a nivel nacional la normatividad no tiene en cuenta la concentración de bicarbonatos como criterio para el uso del agua en riego. La presencia de estos bicarbonatos se puede deber al tipo de jabón utilizado para el lavado, por lo que se recomienda la transición al uso de jabones ecológicos.

En lo que respecta los coliformes totales con una concentración de 12.100 NMP/100 ml, el Decreto Único Ambiental (1076, 2015) determina un valor máximo permisible de 5.000 NMP/100 ml, por lo que la tecnología de tratamiento debe de considerar un alto porcentaje de remoción de coliformes totales en el agua para riego.

Otro parámetro importante para considerar es la concentración de aceites y grasas, la cual, según el análisis, alcanza los 849 mg/L. De acuerdo con la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que regula la calidad del agua en vertimientos puntuales, el límite máximo permisible es de 20 mg/L. Aunque no se mencione este parámetro en la normativa en un contexto de reúso de agua residual para riego, es fundamental garantizar su adecuada remoción. De lo contrario, puedo generar problemas como transferencia de oxígeno de la atmosfera al volumen de agua, la transferencia de oxígeno del agua a los microorganismos, la demanda química y biológica de oxígeno y el taponamiento de tuberías y accesorios (HIDRIKA, 2023), llegando a impactar directamente en la eficiencia del tratamiento. Igualmente puede afectar el suelo causando erosión, pérdidas de fertilidad del suelo y destrucción de hábitats animales (Corporación del Valle del Cauca [CVC], (2022).

Asimismo, se realizó un análisis adicional de la DQO y DBO, obteniendo valores de 2.954 mg O₂/L y 1325 mg O₂/L, respectivamente. Estos resultados se compararon con los límites establecidos en la normatividad vigente para vertimientos en cuerpos hídricos.

En el caso del agua residual del restaurante escolar, la carga contaminante de DBO₅ es de 8,24 kg/día y está en la categoría de aguas residuales domésticas. De acuerdo con la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que establece valores máximos permisibles según el origen del agua residual y su carga contaminante, los límites permitidos son 180 mg O₂/L para DQO y de 90 mg O₂/L para DBO₅, concluyendo que el agua residual gris no es apta para vertimientos en fuentes hídricas.

Por otro lado, el valor de DBO₅ supera los 400 mg/L, y el de DQO excede los 1.000 mg/L, por lo que el agua residual proveniente del restaurante escolar se clasifica como fuerte o alta de acuerdo con los autores mencionados en la **Tabla 11**.

Tabla 11: Clasificación agua residual QDO y DBO₅.

Parámetro	Concentración (mg/L)	Clasificación	Autor
DQO	1.200	Alta	López <i>et al.</i> (2017)
	750	Media	
	500	Baja	
	1.000	Fuerte	Metcalf & Eddy (1995)
	500	Media	
	250	Débil	
DBO ₅	560	Alta	López <i>et al.</i> (2017)
	350	Media	
	230	Baja	
	400	Fuerte	Metcalf & Eddy (1995)
	220	Media	
	110	Débil	

Se debe de mencionar que la normatividad nacional sobre calidad de agua para reúso en riego no se considera la DBO y DQO como parámetros de control. Del mismo modo, la FAO (1985), tampoco tiene en cuenta estos parámetros. Esto se podría deberse a que la DBO y DQO se utilizan comúnmente para monitorear contaminantes sobre cuerpos hídricos, debido al alto consumo de oxígeno en el proceso de degradación y la posible presencia de sustancias tóxicas o de difícil degradación que pueden afectar el cuerpo de agua receptor. En el ámbito agrícola, estos factores no son indicativos directos de si el agua es apta o no para riego.

7.3 ALTERNATIVA TECNOLÓGICA DE TRATAMIENTO.

7.3.1 Selección de tecnología de tratamiento

Los primeros criterios considerados fue la principal función de la tecnología, donde se descartaron aquellas tecnologías que generalmente se utilizan para remoción de sólidos gruesos, partículas de arena o sólidos suspendidos relacionados con agua residual doméstica, debido a que el agua

residual gris que proviene del restaurante escolar no tiene estas características, por lo que se descartaron las rejillas, desarenador, sedimentador, tanque séptico, reactor anaerobio con deflectores (ABR) y tanque Imhoff.

También, se consideró el criterio del área, puesto que la disponibilidad de un predio dentro de la institución educativa es solo de 30 m², por lo que se descartaron aquellas tecnologías que en su diseño necesitan de grandes áreas, caso lagunas de estabilización y la laguna aireada.

Otro criterio importante es el consumo de energía, donde en la institución destacaron poder contar con una tecnología que no dependa de la energía eléctrica debido a los constantes cortes de energía en la comunidad y los costos de funcionamiento que puede representar, por lo que se descartaron la laguna aireada, humedal artificial de flujo vertical, filtro percolador, y el RAFA.

En este sentido, también se consideró un criterio ambiental importante como es la generación de olores, debido a que la tecnología de tratamiento estará instalada dentro de la institución educativa cerca de las aulas, por lo que se podrían ver afectados los estudiantes, por esta razón se descartaron tecnologías de tratamiento que generaran olores, asociados principalmente a los tratamientos anaerobios como el tanque séptico, RAFA y el FAFA. Otro factor ambiental considerado fue la reproducción de vectores, en este caso, mosquitos, los cuales pueden afectar las condiciones de salud de los estudiantes, por esta razón se descartó el humedal artificial de flujo superficial, el cual tiende a ser un ambiente propicio para este vector.

Finalmente, para realizar el taller participativo con la comunidad estudiantil, se presentaron las tecnologías, que más se adecuan al contexto particular de la entidad educativa, donde, la trampa grasa (con y sin deflectores) es la tecnología de pretratamiento seleccionada, la cual puede presentar algunos olores pero fue necesario colocarla como opción de pretratamiento debido a la cantidad de grasas y aceites presentes en el agua gris del restaurante, por lo que es clave una tecnología que permita una adecuada remoción de este parámetro. Así mismo, el humedal subsuperficial de flujo horizontal en grava o plástico fue otra tecnología que más se adecua a las condiciones de la institución.

El taller se realizó con los estudiantes de grado noveno y docentes de la institución educativa, en el taller se entregó un formato de calificación, **Anexo 2**, en el cual participaron 5 docentes, el rector y 24 estudiantes, a partir de la presentación realizada el grupo suministro una calificación de cero a cien a cada una de las combinaciones de tratamiento. Durante el desarrollo del taller se explicó funcionamiento de las tecnologías, porcentajes de remoción de parámetros críticos en el tratamiento, pre-dimensionamiento, operación y mantenimiento.

Con lo anterior es importante mencionar que también se llevó a cabo en conjunto un análisis de la remoción en parámetros criterios y de importancia en el tratamiento, tanto fisicoquímicos y microbiológicos, para este análisis fue necesario realizar una comparación entre los resultados del análisis de laboratorio y la normativa establecida para el reúso de agua residual en riego, a partir de esta comparación se descarta aquellos parámetros que cumplen los niveles máximos permitidos y se realiza una búsqueda bibliográfica que permita evaluar la efectividad de remoción de las tecnologías seleccionadas sobre los parámetros que no cumple.

7.3.2 Fichas técnicas de las tecnologías de tratamiento.

Trampa de grasa.

Definición: El objetivo de la trampa de grasa es atrapar aceites y grasas de fácil eliminación, es decir, aquellos componentes livianos que se acumulan sobre la superficie del agua, su uso es generalmente para sistemas de tratamiento de aguas grises. Estas son cámaras hechas de ladrillo, concreto o plástico, y es importante la ubicación de una tapa con el fin de evitar la liberación de los malos olores (Tilley *et al.*, 2018).

El tiempo de retención hidráulica es proporcional al tamaño de la trampa de grasa, el cual entre más grande puede garantizar una mejor eliminación de arenilla o sólidos presentes mediante sedimentación. El tiempo mínimo de retención hidráulica es de 15 min hasta más de 30 min con el fin de garantizar que la grasa y aceites se enfríen lo suficiente, se separen y floten (Morel & Diener, 2006). Se recomienda que la ubicación de la trampa de grasa este cerca del lugar de generación de agua residual con el fin de evitar la obstrucción del sistema de conducción (Tilley *et al.*, 2018).

Operación y mantenimiento: La trampa grasa al ser una tecnología de pretratamiento, debe de estar monitoreada de manera constante, y limpiarse al menos una vez por semana, esto permite un adecuado funcionamiento y evita problemas de olores y fallas aguas abajo del sistema de saneamiento, a la vez la grasa extraída debe de disponer de manera adecuada, ya sea en reciclaje o en un hueco impermeable ubicado en una zona que no pueda afectar cultivos (Tilley *et al.*, 2018).

Ventajas:

- Costos de operación y capital relativamente bajos.
- Reducción del riesgo de deteriorar tecnologías posteriores de tratamiento y/o conducción.
- Mayor durabilidad y vida útil de los equipos de saneamiento.
- Eliminación eficiente de grasas y aceites.

Desventajas:

- Requiere mantenimiento frecuente.
- Si no se sella adecuadamente puede generar olores.
- Remover los sólidos y las grasas no es agradable, se debe de tener un cuidado especial en este proceso.
- Baja eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales y DBO.

Humedal subsuperficial de flujo horizontal.

Definición: consisten en un lecho revestido con material impermeable, relleno de grava, arena o materiales alternativos con el PET, plantado con vegetación de humedal. A medida que el agua fluye horizontalmente a través del humedal, el material de filtrado filtra las partículas y los microorganismos degradan la materia orgánica, el material filtrante (Tilley *et al.*, 2018).

Durante el diseño se debe tener en cuenta que el tamaño de la grava debe de ser adecuada para garantizar el flujo del agua, pero no demasiado grande para impedir un tratamiento eficiente, además, se recomienda ubicar un tamaño más grueso tanto en la zona de entrada y salida, para garantizar una distribución uniforme del agua (Morel & Diener, 2006). Es importante un adecuado funcionamiento de los tratamientos preliminares para evitar obstrucciones en el área filtrante.

Operación y mantenimiento: Se debe tener en cuenta que durante la etapa de crecimiento es importante eliminar las malas hierbas que pueda competir con la vegetación del humedal, además, se recomienda limpiar la grava de la zona de entrada cada 6 meses con el fin de evitar obstrucciones que afecten el tratamiento, limpiar por la zona exterior la tubería de distribución cada 6 meses y finalmente cortar las plantas cada 4 a 6 meses sin cortar los brotes que estén emergiendo. Además, la grava debe de ser reemplazada totalmente cada 10 años (Tilley *et al.*, 2018).

Ventajas:

- Alta reducción de DBO, sólidos suspendidos y patógenos.
- No tiene los problemas de generar vectores como zancudos.
- No requiere energía eléctrica.
- Bajos costos de operación.

Desventajas:

- Requiere un terreno grande.
- Poca remoción de nutrientes.
- Riesgo de obstrucciones, dependiendo del pretratamiento y el tratamiento primario.
- Periodo inicial largo antes de trabajar a capacidad plena.
- Requiere experiencia en diseño y construcción.

7.3.3 Selección comunitaria de la alternativa de tratamiento.

Durante selección de la tecnología de tratamiento comunitaria, la presentación que se realizó a los estudiantes y docentes de la Institución Educativa La Herradura, utilizó herramientas pedagógicas que facilitaron la comprensión de las tecnologías preseleccionadas, mediante la presentación de diapositivas y maquetas de las unidades de tratamiento propuestas, **Figura 45 y 46**. Para realizar la presentación y el taller se tuvieron en cuenta los siguientes trenes de tratamiento:

- Trampa grasa con deflectores y humedal subsuperficial de flujo horizontal con material filtrante en plástico.
- Trampa grasa con deflectores y humedal subsuperficial de flujo horizontal con material filtrante en grava.
- Trampa grasa sin deflectores y humedal subsuperficial de flujo horizontal con material filtrante en grava.
- Trampa grasa sin deflectores y humedal subsuperficial de flujo horizontal con material filtrante en grava.

En la **Figura 44** se puede evidenciar de manera grafica el trazado de los trenes de tratamiento seleccionados.

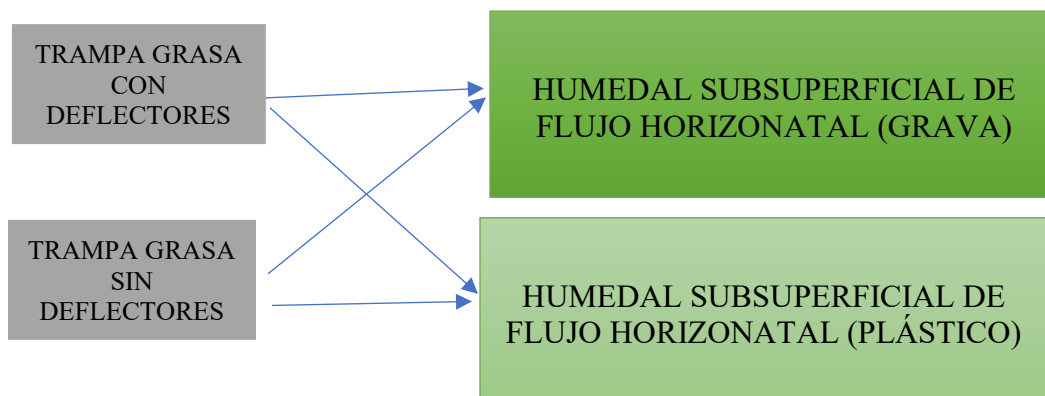


Figura 44: Configuración de los trenes de tratamiento presentados a la comunidad escolar.



Figura 45: Maquetas humedal subsuperficial de flujo horizontal en grava y plástico, escala 1:10.
Fuente: Autor.



Figura 46: Jornada participativa de selección de tecnología de tratamiento.
Fuente: Autor.

Posterior a la presentación y el taller, se recopiló información relevante a través del formato de calificación entregado, **Anexo 2**. Este formato permitió identificar la tecnología de tratamiento preferida por la comunidad, **Anexo 3**. A partir de los resultados, se descartó por completo el tren de tratamiento que incluía el humedal subsuperficial de flujo horizontal con plástico, debido a que la comunidad señaló que en la zona hay mucha disponibilidad de grava, facilita la implementación de una tecnología con este material.

Por otro lado, el en tratamiento preliminar no se evidencio una preferencia significativa entre los dos trenes de tratamiento con mayor puntaje. Por esta razón, se decidió descartar la tecnología que incluye la trampa grasa con deflectores, debido a que es una tecnología que tiene pocas experiencias en Colombia y en la región.

Finalmente, el tren de tratamiento seleccionado es la trampa grasa sin deflectores y el humedal subsuperficial de flujo horizontal en grava.

Además, el funcionamiento del tren de tratamiento es a gravedad por las ventajas de ubicación entre el restaurante y la huerta escolar, debido a la diferencia de altitud. Según datos tomados de Google Earth (2021) el restaurante escolar está ubicado a los 1.743 m.s.n.m y el colegio, específicamente área en donde se espera ubicar la tecnología está a una altitud de 1720 m.s.n.m, una diferencia de 23 metros, lo que puede garantizar un buen funcionamiento a gravedad.

7.3.4 Caudal de diseño

El caudal de diseño tuvo en cuenta el volumen de agua residual gris generado en el restaurante escolar y las horas de funcionamiento del restaurante (**Tabla 12.**) se considera un volumen mayor al mencionado en el ítem 7.2.4 *Producción de agua residual en el restaurante escolar* debido a que pasando el valor a m³ se aproxima a los 2,6 m³, en los cálculos.

Tabla 12: Resultados caudal de diseño.

Datos	Resultado	Unidad
Volumen generado diario	2600	litros
	2,6	m ³
Tiempo de trabajo	8	horas
Caudal del diseño	325,0	L/h
	0,09	L/s

Con base en el tiempo de funcionamiento del restaurante escolar, se evaluó la viabilidad de implementar tanques para mejorar la eficiencia en el uso del agua residual gris. La primera opción consideró ubicar un tanque de amortiguación entre la trampa grasa y el humedal, con el fin de optimizar la distribución del caudal y aumentar la eficiencia de tratamiento del humedal. La segunda alternativa tuvo en cuenta la posibilidad de incorporar un tanque almacenamiento para el agua tratada, permitiendo regular su distribución para el riego, y en caso de lluvia, almacenarla cuando el riego no sea necesario, es importante considerar que el almacenamiento debe de ser por periodos cortos o aplicar un proceso de desinfección con cloro para evitar la generación de olores, generación de contaminantes o vectores.

Se descartó la instalación del tanque de amortiguación debido a la poca disponibilidad de espacio y recursos para la implementación en conjunto con el tanque de almacenamiento. Además, después de un análisis se concluye que el tanque de almacenamiento presenta mayor prioridad, la importancia de este último radica en que durante la temporada de lluvias permite almacenar el agua tratada para su aprovechamiento en otras actividades, mientras que, en época de verano permite una mejor distribución del agua para el riego a lo largo del día.

En este sentido, el tanque de almacenamiento propuesto debe de tener una capacidad recomendada de 2600 litros, que es el volumen generado por día en el restaurante escolar. No se opta por un mayor volumen de almacenamiento, debido a la limitada disponibilidad de espacio en el colegio, de igual forma si existe la posibilidad de aumentar el volumen de almacenamiento, es recomendable para suplir los meses en que hay muy poca precipitación.

Finalmente, el tren de tratamiento dispone de una trampa grasa, humedal subsuperficial de flujo horizontal y tanque de almacenamiento de agua tratada.

7.3.5 Dimensionamiento de la trampa grasa

La tecnología de tratamiento consta de una caja rectangular, en la cual se recomienda realizar en ladrillo o concreto impermeabilizado y con una tapa plástica que evite la salida de olores, cuenta con una capacidad aproximada de 0,162 m³. La tubería de entrada y salida de un diámetro de 4", sumergidas y con una diferencia de altura que garantice el flujo y que el material graso flote, las dimensiones se pueden observar en la **Tabla 13**. Para el diseño se consideró un tiempo de retención hidráulico de 30 minutos, con el fin de garantizar el tiempo adecuado para la sedimentación de sólidos seleccionado del rango recomendado entre 15 a 30 min (Morel & Diener, 2006).

Es importante destacar, que las dimensiones finales de largo y ancho de la trampa grasa se definieron con el objetivo de facilitar proceso de mantenimiento, considerando que este estaría a cargo de estudiantes de grados superiores (decimo y undécimo), así como padres de familia o docentes.

Tabla 13: Dimensiones finales del diseño de la trampa grasa.

Datos	Resultados	Unidad
Caudal	0,09	l/s
Volumen	0,16	m ³
Profundidad útil (h)	0,6	m
Borde libre (bl)	0,3	m
Profundidad total	0,9	m
Ancho (a)	0,5	m
Largo (b)	1	m
Diámetro de la tubería de ingreso y salida	4	"
Sumergencia del tubo de entrada	0,15	m
Diferencia de nivel entre la tubería de entrada y salida	0,10	m
Sumergencia del tubo de salida	0,45	m

Por otro lado, se realizó una investigación sobre la eficiencia de la trampa grasa en la remoción de algunos de los contaminantes criterio mencionados en el ítem 8.2.6 *Análisis del muestreo del agua residual del restaurante escolar*. En este sentido Morel & Diener (2006), mencionan que una trampa de grasa puede remover aproximadamente el 20% de DBO, el 20% de solidos suspendidos totales, menos del 10% del nitrógeno total y alrededor del 70% de las grasas y aceites presentes en el agua residual. Este último es el parámetro más relevante ya que su control es fundamental para garantizar el adecuado funcionamiento del tratamiento y sistemas de conducción.

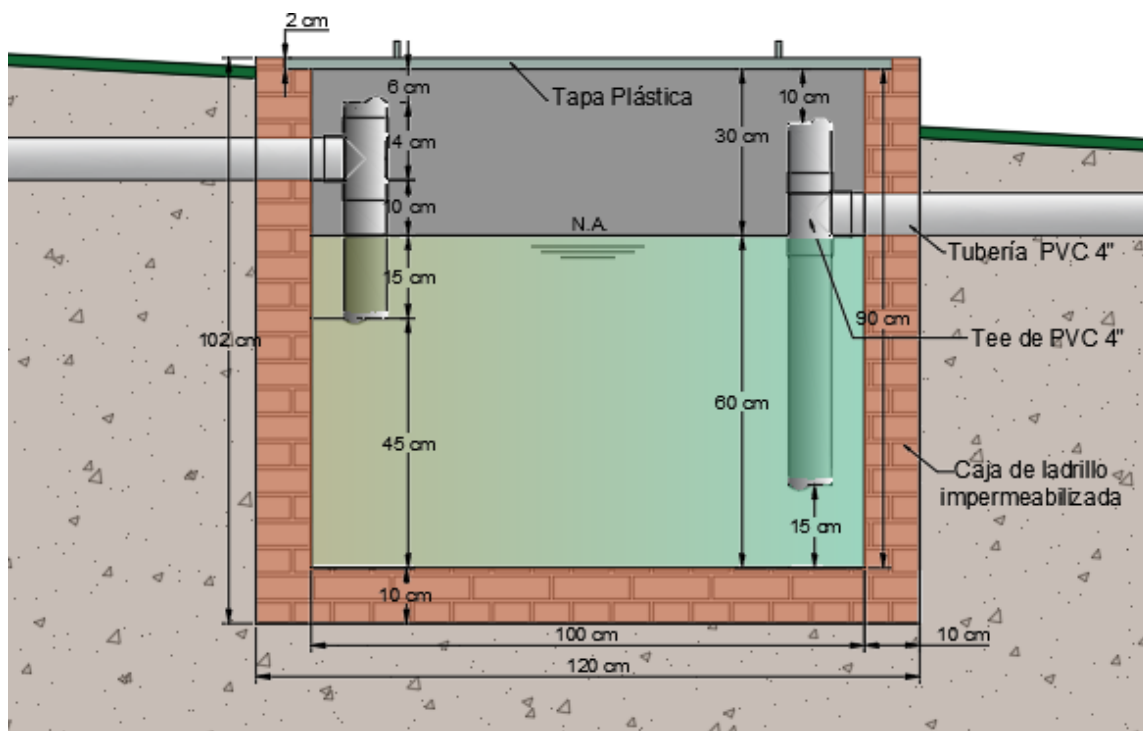
Considerando los valores de remoción mencionados y los resultados presentados en el ítem 8.2.6 *Análisis del muestreo del agua residual del restaurante escolar*, luego del tratamiento preliminar en la trampa de grasa la calidad del agua a la salida presente mejoras considerables, principalmente en la remoción de aceite y grasas, los datos finales se presentan en la **Tabla 14**. Esta información es importante para llevar a cabo el diseño del humedal de flujo horizontal subsuperficial.

Tabla 14: Calidad de agua del efluente del tratamiento preliminar con trampa grasa.

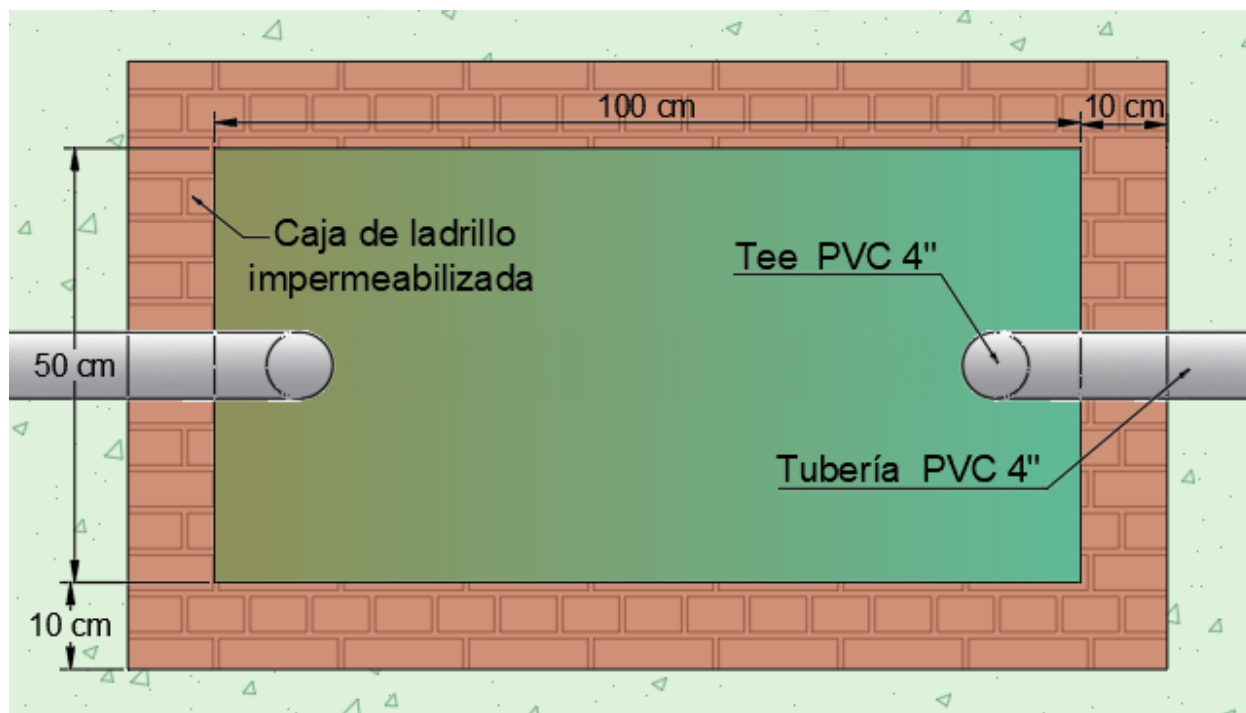
Parámetro	% Remoción	Afluente	Efluente
DBO (mg/L O ₂)	20%	1.325	1.060
Aceites y Grasas (mg/L)	70%	849	254,7

Fuente: Morel & Diener (2006).

En la **Figura 47** se puede evidenciar el plano con el debido acotamiento del diseño con las dimensiones propuestas para la trampa grasa.



Corte transversal



Vista Superior

Figura 47: Plano acotado trampa grasa, vista superior y frontal.

Fuente: Autor.

7.3.6 Dimensionamiento del humedal subsuperficial de flujo horizontal

Esta estructura se diseñó como parte final del tratamiento, logrando así una mayor remoción y eficiencia en el tratamiento del agua residual. Debido a que es una tecnología efectiva en la eliminación de contaminantes orgánicos, nutrientes y patógenos, en estos sistemas se utilizan plantas emergentes que tienen sus raíces sumergidas, este caso heliconias de acuerdo con lo sugerido por los docentes de la institución, así mismo, presentan un medio filtrante compuesto por materiales como grava y arenas.

Es importante mencionar que de acuerdo con la literatura y el contexto de la comunidad también se recomendó como vegetación para el humedal el *Costus spicatus* (caña agría), *Phragmites australis* (carrizo), *Typha angustifolia* (junco menor) y la *Heliconia*, todos basándose en que con especies endémicas de la zona y que normalmente crecen en zonas de nacimientos o lagos. Los docentes de la institución sugirieron y optaron por las heliconias debido a que la flor es ornamental y después de su cosecha puede ser vendida para decoración o ramos, esta preferencia es adecuada, considerando que el humedal estará ubicada dentro del área de la institución educativa, además, las raíces de las heliconias cuentan con una profundidad de aproximadamente 60 cm, lo que permite un humedal con una profundidad que facilita el mantenimiento y optimizar la distribución del espacio.

Se debe de tener en cuenta la porosidad del tipo de sustrato, **Tabla 15**, para este caso se selecciona las rocas pequeñas, que tienen tamaño efectivo D_{10} (mm) de 128, porosidad (%) entre 38-45 y una conductividad hidráulica K_s ($m^3/m^2 \cdot d$) de 50.000 a 250.000. Además, se recomienda la implementación de rocas de mayor tamaño en el ingreso y salida de la tubería.

Tabla 15: Órdenes de magnitud de la conductividad hidráulica (k_s) en función del tipo de material granular utilizado como sustrato en un humedal construido de flujo subsuperficial.

Tipo de sustrato	Tamaño efectivo D_{10} (mm)	Porosidad (%)	Conductividad hidráulica K_s ($m^3/m^2 \cdot d$)
Arenas graduadas	2	28-32	100-1000
Arenas gravosas	8	30-35	500-5000
Gravas finas	16	35-38	1000-10 000
Gravas medianas	32	36-40	10 000-50 000
Rocas pequeñas	128	38-45	50 000-250 000

Fuente: García & Corzo (2008).

Los parámetros principales que se tuvieron en cuenta para esta estructura se presentan en la **Tabla 16**. Para el caso de las heliconias se recomienda una profundidad mínima para las raíces de 30 cm (Donoso, 2017), por lo que se selecciona una profundidad de 60 cm, lo cual también permite garantizar un tiempo de retención hidráulico de 1 día.

Tabla 16: Parámetros principales considerados en el diseño del humedal.

Parámetro	Dato	Unidad
Entrada de DBO (C_o)	1.060,00	g/m ³
	1.060,00	mg/L
Caudal	0,09	L/s
	7,80	m ³ /d
Relación largo ancho	1; 2	
Pendiente	1	%
Planta	Heliconias	
Profundidad	0,60	m
Grava	Rocas pequeñas	
Porosidad	38 - 45	%
Temperatura	21,1	°C

Considerando, que la concentración de entrada es 1.060 mg/L mayor a 250 mg/L, la constante K_A pasa de cero 0,08 m/d a 0,064 m/d de acuerdo con lo recomendado por García & Corzo (2008). En el dimensionamiento de la tecnología es importante tener en cuenta que existe una restricción de área de un máximo de 30 m², por lo que la tecnología no se diseñó de acuerdo con la concentración de salida esperada si no al área superficial disponible. En la **Tabla 17**, se puede observar los resultados relacionados con la remoción de DBO y el TRH, relacionados con el área máxima permitida.

Tabla 17: Remoción de DBO y TRH.

Concentración de fondo (DBO c*)	59,68	mg/L
S (área superficial)	30	m ²
Constante cinética de primer orden (K _A)	0,06	m/d
Concentración de salida (C1)	841,13	mg/l
%Remoción	21%	
Tiempo de retención hidráulico (TRH)	1,04	días

Finalmente, se dimensiona el humedal de acuerdo con la relación largo ancho seleccionada 1:2.
Tabla 18.

Tabla 18: Dimensiones del humedal subsuperficial de flujo horizontal.

Ancho	4	m
Largo	8	m
Área Superficial real	32	m ²
Profundidad (longitud raíces heliconias)	0,6	m
Borde libre	0,2	m
Altura total	0,8	m
Volumen	19,2	m ³

La tubería de ingreso se define a partir del caudal y la velocidad asumida de 0,5 m/s, y debido a que es bajo el caudal se determina que la tubería de ingreso y salida es igual a ¾" o 0,75", ver **Tabla 19.**

Tabla 19: Diámetro tubería de entrada y salida del humedal.

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal de diseño de los humedales	0,090	L/s
	0,00009	m ³ /s
Velocidad asumida	0,5	m/s
Diámetro Tubería de ingreso y salida	0,75	pul
	19,1	mm
	0,0191	m
Velocidad real	0,3167	m/s

Para el caso de ubicar las macrófitas, se recomiendan la ubicación de 4 a 6 por m², en este caso se seleccionan 4 macrófitas por m², por lo que se deben de sembrar un total de 128 plantas.

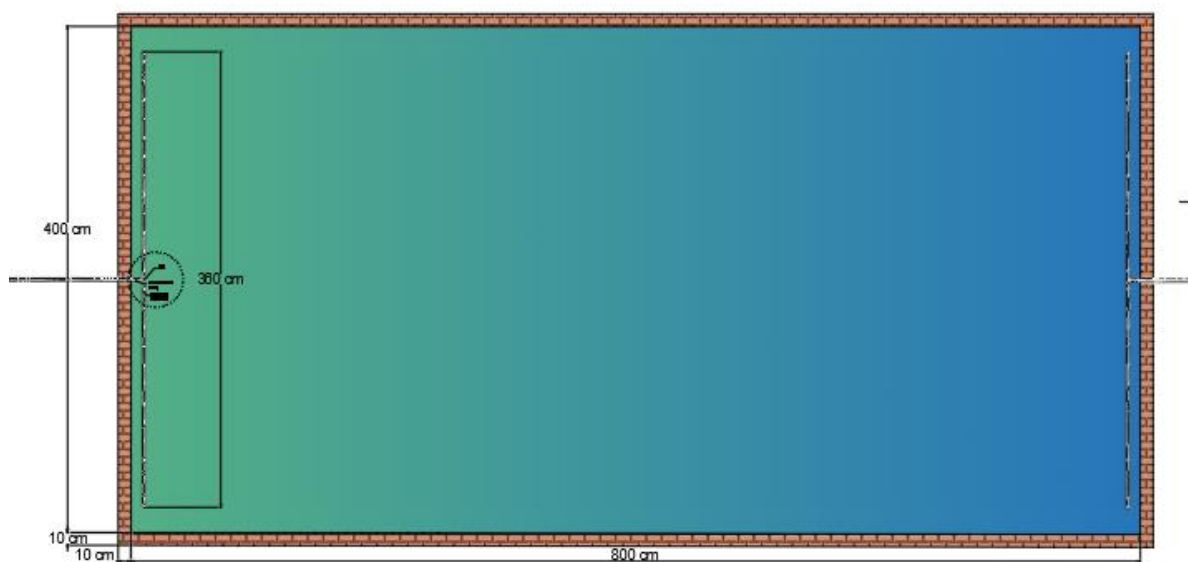
En cuanto a la remoción de parámetros, varias experiencias han reportado altos porcentajes de eliminación para algunos de los parámetros considerados criterio, evaluados para el uso de agua gris sin tratamiento en el riego de cultivos. Teniendo en cuenta dichas experiencias, en la **Tabla 20** se presenta la calidad del efluente estimada, en función de las eficiencias reportadas por diferentes estudios.

Tabla 20: *Parámetros y porcentajes de remoción esperados según autores.*

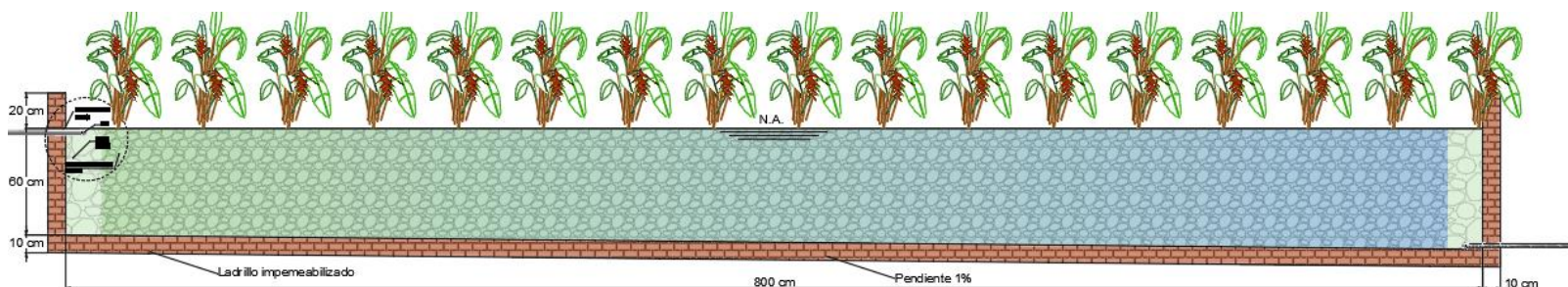
Parámetro	%Remoción	Afluente	Efluente	Fuente
DBO (mg O ₂ /L)	21%	1.060	837,4	Diseño García & Corzo, (2008)
	80-90%	1.060	212	Morel & Diener, (2006)
Coliformes totales (NMP/100ml)	71,43%	12.100	3.456,97	Chikogu <i>et al.</i> , (2023)
	91%	12.100	1.089	Ojeda <i>et al.</i> , (2013)
DQO (mg O ₂ /L)	81,67%	2.954	541,4682	Chikogu <i>et al.</i> , (2023)
Conductividad (uS/cm)	53%	600	282	Ojeda <i>et al.</i> , (2013)

Con la información de la **Tabla 20**, se identifica que la mayoría de los parámetros mejoran significativamente la calidad en el efluente.

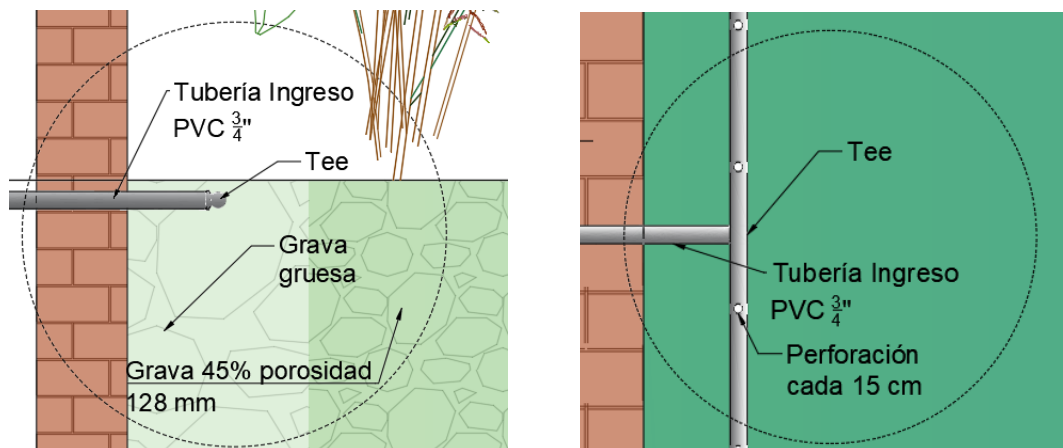
En la **Figura 48** se puede evidenciar el plano con el debido acotamiento del diseño propuesto del humedal subsuperficial de flujo horizontal.



Vista superior



Corte Transversal



Detalles corte transversal y detalles vista superior

Figura 48: Plano acotado humedal subsuperficial de flujo horizontal, detalles, vista frontal y superior.
Fuente: Autor.

7.4 Plan de cultivos.

Para llevar a cabo un plan de cultivos, se tuvieron en cuenta varios factores como los parámetros agroclimáticos que consideran principalmente la disponibilidad de agua para riego de la huerta escolar y los parámetros relacionados con la calidad del agua para el riego que evaluó las posibles afectaciones que se puedan generar tanto al sistema de riego, como el suelo y los cultivos. Además, se tuvo en cuenta los cultivos seleccionados por la comunidad de la institución educativa, los cuales en este caso fueron el maíz, frijol, tomate de mesa y cebolla larga, información necesaria para el desarrollo de la evaluación de la demanda hídrica y por ende del balance hídrico. Por otro lado, es importante mencionar que este análisis se lleva a cabo considerando un riego por goteo, criterio que se encuentra en transición en la institución educativa.

7.4.1 Parámetros agroclimáticos.

Para el desarrollo adecuado del plan de cultivos, se consideraron diversos parámetros agroclimáticos, entre ellos la Precipitación mensual, Evapotranspiración de referencia (ET_o), Precipitación efectiva (Pe), Evapotranspiración del cultivo (ET_c) y necesidades reales de cultivo (NR_c), cuyos procesos de cálculo y valores se detallan en los **Anexos 4, 5, 6, 7 y 8**,

respectivamente. Conforme a lo establecido en la metodología, ítem 6.4 *Plan de cultivos*, se construyeron las **Figuras 49, 50, 51 y 52**.

La **Figura 49** presenta la variación de la Precipitación Efectiva (Pe) a lo largo de un año, donde se observa una disminución no lineal durante los meses de junio, julio y agosto, así como un incremento significativo en octubre y noviembre, superando los valores registrados en los primeros meses del año (enero a abril).

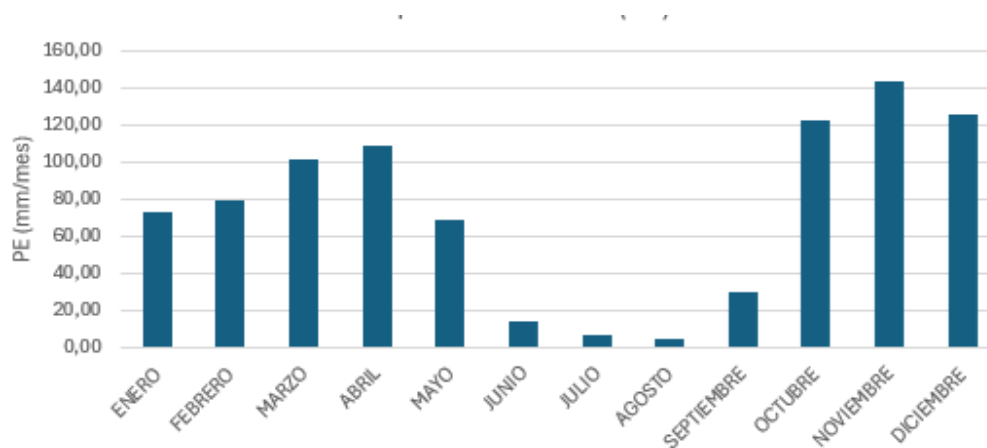


Figura 49: Precipitación efectiva vs meses del año.

Además, en la **Figura 50** se muestra la variación mensual de la Evapotranspiración del cultivo (ETc) para diferentes coeficientes de cultivo (Kc) relacionados con los cultivos seleccionados para el plan de cultivos, **Tabla 21**.

Tabla 21: coeficiente del cultivo (Kc)

Cultivo	Kc
Frijol	1,20
Maíz	1,20
Cebolla larga	1,00
Tomate de mesa	1,15

Fuente: FAO (2006).

Se logra identificar que la ETc para todos los cultivos presenta fluctuaciones a lo largo del año, es decir, con aumentos y disminuciones alternadas entre meses. Para los meses de mayo y junio, se observa un incremento significativo, con una reducción en julio y mantiene una tendencia de aumento progresivo hasta el mes de diciembre, este comportamiento se puede deber principalmente a la radiación solar y las condiciones del clima en esos meses. Este mismo comportamiento se puede evidenciar para la ET_o, (**Figura 51**).

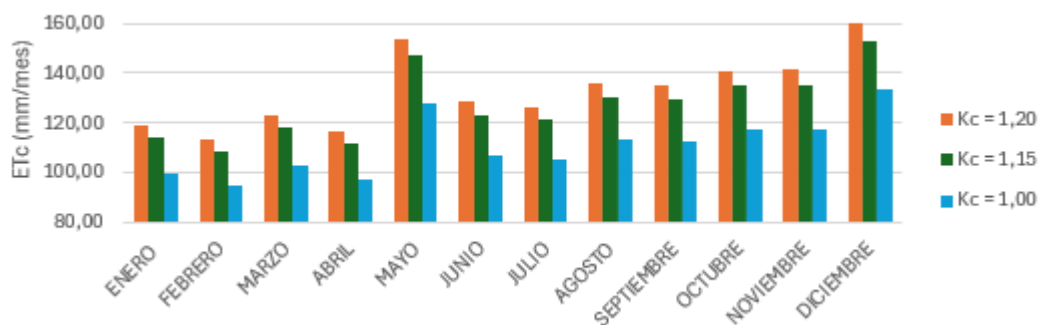


Figura 50: Variación mensual de la evapotranspiración del cultivo

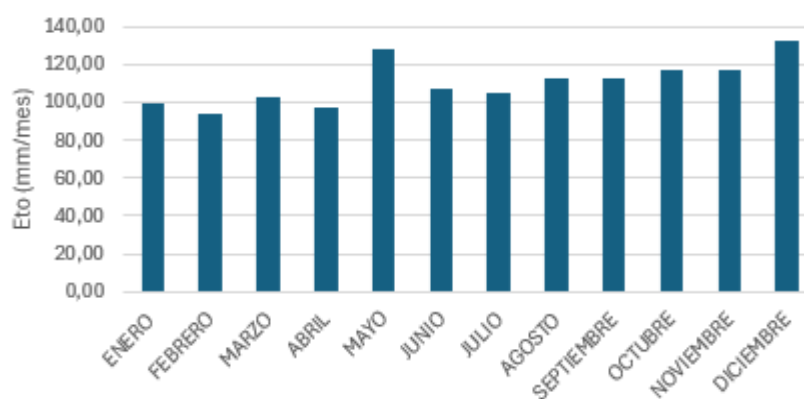


Figura 51: Variación mensual evapotranspiración del cultivo de referencia.

En la **Figura 52**, se presenta la variación mensual de la Necesidad de Riego Neta (NRn) para cada uno de las Kc relacionados con los cuatro cultivos seleccionados. Donde se observa que para los meses de enero, febrero y diciembre la NRn es baja, con valores en un rango de 10 a 40 mm/mes, para los meses de marzo, abril, octubre y noviembre la NRn es cero para algunos de los cultivos y por debajo de 20 mm/mes para otros cultivos. En contraste, durante los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre la NRn es significativamente mayor, con valores superiores a los 80 mm/mes, lo que indica una alta demanda hídrica en estos meses.

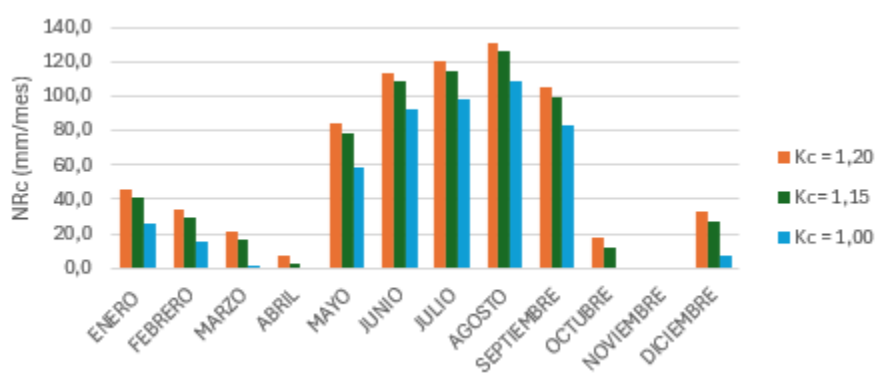


Figura 52: Variación mensual de la Necesidad de Riego Neta (NRn)

La información anterior coincide con los datos suministrados por los estudiantes y docentes, ítem 8.2.4 *Huerta escolar*, puesto que, en los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre, se identifica que la precipitación disminuye hasta un valor mínimo de 4,76 mm/mes, lo que refleja la necesidad de agua para riego que garantice un adecuado funcionamiento en la huerta escolar.

Con la información anterior, se llevó a cabo un análisis que permitió determinar el área a regar, de acuerdo con la demanda y oferta hídrica. En la **Tabla 22**, se puede observar el área recomendada para riego de acuerdo con la NRn de cada mes, es decir, en los meses en que hay menos necesidad de riego es mayor el área que se puede regar con la oferta hídrica del restaurante escolar y viceversa. Además, se tuvo en cuenta el área total de la huerta, en este caso 937 m², es importante considerar esta información debido a que en algunos meses la necesidad de riego es bastante baja, lo puede llegar a permitir el riego de áreas mayores a la de la huerta escolar, esto se puede ver reflejado en el volumen de agua sobrante para algunos meses.

Tabla 22: Balance hídrico mensual, considerando el área máxima a regar.

Mes	NRn (L/mes)	Área (m ²)	Volumen demanda (m ³ /mes) * m ²	Oferta (m ³ /mes)	Balance mensual (m ³ /mes) * m ²
Enero	45,7	937,0	42,8	53,6	10,8
Febrero	32,1	937,0	30,1	53,6	23,5
Marzo	17,2	937,0	16,1	53,6	37,5
Abril	5,0	937,0	4,7	53,6	48,9
Mayo	87,7	611,0	53,6	53,6	0,0
Junio	122,8	436,5	53,6	53,6	0,0
Julio	129,8	413,0	53,6	53,6	0,0
Agosto	142,3	377,0	53,6	53,6	0,0
Septiembre	112,6	476,0	53,6	53,6	0,0
Octubre	13,8	937,0	12,9	53,6	40,7
Noviembre	0,0	937,0	0,0	53,6	53,6
Diciembre	28,9	937,0	27,1	53,6	26,5

De la **Tabla 22** se puede observar que, para los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre la NRn es alta, por lo cual el volumen de agua proveniente del restaurante escolar no es suficiente para el riego del área de la huerta escolar, por lo que para cada mes se realiza la propuesta del área máxima a regar considerando la oferta y demanda hídrica, entonces se recomiendan las siguientes áreas de riego para cada mes, mayo 611 m², junio 436,5 m², julio 413 m², agosto 377 m² y septiembre 476 m².

Por otro lado, durante los meses de enero, febrero, marzo, abril, octubre y diciembre la demanda hídrica es baja, por lo que el agua disponible desde el comedor escolar no solo es suficiente para abastecer toda el área de la huerta, sino que también genera un volumen sobrante que no es requerido para el riego. En contraste, en noviembre la NRn es cero, lo que indica que todo el volumen de agua residual tratada que proviene del restaurante escolar debe destinarse a otros usos.

Por lo anterior, se propone que en los meses donde la oferta hídrica es superior a la demanda hídrica, se realice el uso del agua tratada para llenar los tanques de los inodoros y el riego de jardines, se debe mencionar que, en caso de destinar el agua residual tratada para lavado de patios y corredores, se debe de evaluar el tratamiento de desinfección con cloro en el tanque de almacenamiento. También, es importante considerar que la opción más viable es usar el agua tratada en el riego del predio que tiene la institución destina para la siembra de frutales y café, la cual se ubica a aproximadamente medio kilómetro de la institución y que debido a la topografía de la zona permite un funcionamiento a gravedad.

Variando la información anterior, se realizó la **Figura 53**, la cual evalúa la viabilidad del proyecto mediante la evaluación de la acumulación de agua en función de la oferta y la demanda, considerando un área de riego de 650 m² para todos los meses. Los resultados muestran que en todos los casos la oferta acumulada es mayor que la demanda acumulada, lo que permite garantizar un riego continuo del área evaluada, siempre que se contemple la posibilidad de almacenamiento de agua. Además, el balance mensual acumulado indica que garantizar un adecuado almacenamiento, puede ampliar la superficie de riego, especialmente en los meses de mayor demanda hídrica.

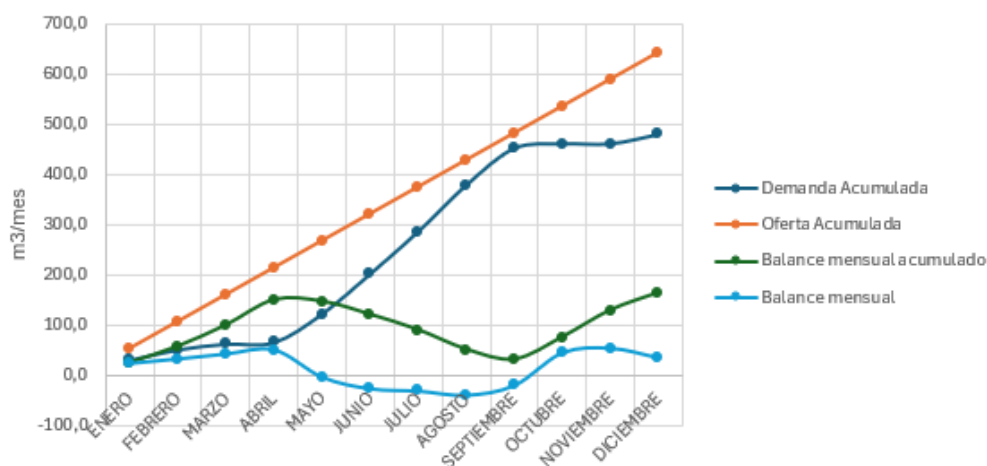


Figura 53: Comparación demanda, oferta, balance mensual acumulados.

7.4.2 Calidad de agua para riego.

Durante el proceso de evaluación de la calidad del agua se presentaron diversas limitaciones, principalmente asociadas a restricciones presupuestarias. Lo más adecuado habría sido realizar al menos dos muestreos, con el fin de obtener datos promedio que brindaran mayor confiabilidad a los resultados. Sin embargo, los recursos disponibles no permitieron ejecutar esta estrategia.

Adicionalmente, la accesibilidad a laboratorios certificados en zonas cercanas representó otro desafío. Debido a la ausencia de instalaciones acreditadas en el municipio, por lo que fue necesario trasladar las muestras hasta el departamento del Valle del Cauca para su análisis, lo que implicó mayores costos logísticos y tiempos de procesamiento.

En el análisis de la calidad de agua para riego, se calculó el índice de Langelier con el objetivo determinar si el agua gris sin tratar puede generar afectaciones relacionadas con la corrosión e incrustaciones. Estos fenómenos se asocian principalmente con fallos y obstrucciones en el sistema de conducción, la estructura de la tecnología de tratamiento de agua y el sistema de riego. El resultado presentado en la **Tabla 23**, muestra que el valor calculado del índice de Langelier es de -0,10 y según los valores de referencia de la **Tabla 7: Indicadores que describen la tendencia del agua a producir corrosión y formación de incrustaciones por saturación con carbonato de calcio. Item 6.4.3 Índice de Langelier**, el resultado indica que no se forman incrustaciones, pero si una ligera corrosión, por lo tanto, no se consideró como un parámetro criterio a tener en cuenta para el sistema de riego.

Tabla 23: Parámetros, coeficientes y resultado del Índice de Langelier.

Parámetro	Valor	Und
pH	6,81	Uni
Temperatura	21,1	°C
Dureza	455,51	mg/l
Alcalinidad	253	mg/l
Coefficiente IL	Valor	
C. Temperatura	0,53	-
C. Dureza	2,66	-
C. Alcalinidad	2,41	-
Indice de Langelier (IL)	-0,10	-

Respecto a los problemas de toxicidad en los cultivos relacionados con la calidad del agua gris sin tratar para riego, se tuvieron en cuenta la concentración de Sodio (Na) y Cloro (Cl) y se compararon con los valores máximos permitidos por la normatividad, **Tabla 24**, los resultados evidencian que no existe peligro de toxicidad relacionada con estos dos parámetros puesto que ambas concentraciones se encuentran por debajo del nivel máximo permitido para agua de riego.

Tabla 24: Resultados del análisis para concentración de cloro y sodio en el agua residual gris sin tratamiento.

Resultado			Normativa		
Parámetro	Valor	Unidad	FAO 1985 Rangos habituales	Res. 1256 del 2021 Calidad de aguas residuales uso agrícola	Resolución 1207 del 2014 agua residual para uso agrícola
Cloruro (Cl ⁻)	37,8	mg/L	-	300 Cl - mg/l	300 Cl - mg/l
	1,06	meq/L	< 3 meq/l	-	-
Sodio (Na)	63,3	mg/L	-	200 mg Na / l	200 mg Na / l
	2,75	meq/L	<3 meq /l	-	-

Mediante el uso del programa de Solsariego (Villafañe, 2011), se evaluó el peligro de sodicidad en el suelo a partir del riego con el agua gris sin tratar. Los resultados indican que para evitar este peligro hay que agregar 32,68 gramos de yeso puro por cada metro cubico de agua, y de acuerdo con la clasificación de Villafañe (2011), **Tabla 25**, la categoría de riesgo es bajo, y aunque la recomendación es aplicar la dosis de enmienda indicada, en este caso solo se tiene en cuenta como una forma de clasificar este peligro, más no se va a llevar a cabo la aplicación, por lo que no representa un alto riesgo para el riego de cultivos sin el tratamiento del agua, por otro lado, se debe de considerar la posibilidad de realizar adecuaciones directamente en el suelo y tener en cuenta que el tratamiento aplicado al agua residual puede representar una mejoría a este parámetro.

Tabla 25: Categoría de riesgo asociado al requerimiento de yeso puro por metro cubico de agua.

Requerimientos de yeso puro en el agua de riego (g m ⁻³)	Categoría del riesgo	Recomendaciones de manejo
0	Muy bajo	Ninguna limitación de uso por sodio
0 - 86	Bajo	Aplicar la dosis de enmienda indicada
86 - 215	Medio	Aplicar la dosis, pero practicar un solo ciclo de riego por año
215 - 387	Alto	Mezclar con otra agua para reducir la dosis de enmienda
>387	Muy alto	Descartar el agua o mezclarla con otra que baje el riesgo de sodio

Fuente: Villafañe (2011)

Asimismo, el programa se Solsariego (Villafañe, 2011), proporciona resultados sobre las posibles sales presentes en el agua de riego, expresadas en milimol por litro. Estos resultados se obtienen a partir de la conductividad eléctrica, el pH y la concentración de cationes y aniones. Con esta información, se determina el porcentaje que representa cada sal en el agua de riego, **Tabla 26**.

Posteriormente, se investiga la solubilidad de cada de una las sales identificadas y se calculó la solubilidad ponderada, con el fin de comparar el resultado con la

Tabla 8: Matriz para evaluar el riesgo de salinidad del ítem 6.5.4 Toxicidad, sodicidad y salinidad.

Tabla 26: Sales presentes en el agua gris sin tratamiento, evaluación para riego.

Sales presentes (Villafañe, 2011)	Solubilidad						Peligro
	Fuente solubilidad	g/ 100 ml a 20 °C	mmol/L	%	Solubilidad ponderada	Cew (ds/m)	FAO (1985)
Ca (HCO ₃) ₂	Chemistry learner (s.f).	16,6	1.024	44,7%	457,3	0,6	Bajo
Ca (SO ₄)	(OMS) y Organización Internacional del Trabajo (OIT) (2009)	0,2	15	33,0%	5,0		
NaCl	Merck KGaA (sf)	35,8	6.125,6	12,9%	788,0		Echeverri et al., 2015
MgSO ₄	(OMS) y Organización Internacional del Trabajo (OIT) (2010)	30	2.492,4	7,8%	193,6		Medio
			TOTAL	98,3%	1.443,9		

La solubilidad ponderada es igual a 1.443,9 mmol/L por lo que al comparar con lo sugerido por Echeverri *et al.* (2015), el riesgo por salinidad asociado al riego del suelo con el agua residual gris sin tratar es medio y de acuerdo con los rangos establecidos por la FAO (1985) la conductividad eléctrica (Cew) representa un riesgo bajo, es decir, el agua gris sin tratamiento no representa un riesgo para el riego de cultivos, aunque se debe mencionar que estos valores pueden disminuir con el tratamiento del agua residual que se propone.

Finalmente, de acuerdo con la investigación realizada sobre la eficiencia de remoción del tren de tratamiento seleccionado, se realiza la **Tabla 27**, a partir de datos de eficiencias más críticos tomados de los autores citados en los ítems 7.2.4 *Dimensionamiento de la trampa grasa* y 7.3.5 *Dimensionamiento del humedal subsuperficial*, en la tabla se relaciona la calidad teórica esperada en el efluente del tren de tratamiento.

Tabla 27: Calidad teórica esperada en el efluente de la trampa de grasa + humedal horizontal subsuperficial.

Parámetro	Afluente	Eficiencia de remoción	Efluente
		Trampa de grasa + humedal horizontal subsuperficial	
DBO (mg/L O ₂)	1.325	20% + 21%	837,4
Aceites y Grasas (mg/L)	849	70%	254,7
Coliformes totales (NMP/100ml)	12.100	71,43%	3.456,97
Conductividad (uS/cm)	600	53%	282
DQO (mg O ₂ /L)	2.954	81,67%	541,4682

De acuerdo con la información de la **Tabla 27** el parámetro de coliformes totales presenta una remoción teórica del 71,43% y una concentración en el efluente de 3.456,97 NMP/100ml lo que teóricamente garantiza que cumpla lo establecido en el Decreto Único Ambiental (1076, 2015) el cual determina un valor máximo permisible de 5.000 NMP/100 ml.

Aunque la normativa vigente para el reúso de agua tratada no establece límites específicos para la concentración de aceites y grasas, el efluente del sistema de tratamiento presenta un valor elevado (254,7 mg/L), lo cual representa un riesgo potencial para la calidad del agua reutilizada. Por ello, se recomienda instalar un sistema de rejillas o malla filtrante en la entrada de la trampa de grasa, con el fin de retener sólidos y reducir la carga de aceites y grasas. Esta medida contribuye a mejorar la calidad del afluente y optimizar el desempeño del sistema. Es fundamental realizar la limpieza diaria de este dispositivo para evitar obstrucciones y asegurar su funcionamiento eficiente.

Debido a la posible presencia de microorganismos en el efluente tratado, es fundamental considerar llevar a cabo el proceso de desinfección con hipoclorito de sodio en el tanque de almacenamiento, principalmente evaluando la viabilidad económica. El agua tratada puede utilizarse para llenar los tanques de los inodoros y para labores de limpieza en pasillos y corredores, garantizando debidas medidas de protección, además, es importante resaltar que los periodos de almacenamiento no sean superiores a 3 o 4 días, se realice con la combinación de agua lluvia, la cual minimice la concentración microbiológica. En cuanto al riego, se recomienda emplear sistemas por goteo o subsuperficiales, con el propósito de minimizar el contacto directo del agua residual con las personas y los cultivos. Además, es importante programar el riego en horarios fuera de la jornada escolar o cuando los estudiantes se encuentren en clase, para reducir riesgos sanitarios.

Dado que el efluente presenta valores elevados de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), se aconseja evitar el contacto directo del agua residual con los productos agrícolas. Por esta razón, se recomienda implementar de manera estricta el riego

por goteo, con el fin de evitar que el agua entre en contacto con el cultivo y así reducir los riesgos para la salud.

Con los datos anteriores, se evidencia que el sistema de tratamiento propuesto (trampa de grasa más humedal horizontal subsuperficial con grava), mejora teóricamente de manera significativa la calidad del afluente del agua residual gris por lo que es viable y se recomienda el reúso para el riego de cultivos, llevando a cabo un adecuado control sanitario.

Para replicar esta tecnología en otros territorios, es fundamental que las zonas seleccionadas presenten condiciones similares a las del área estudiada, especialmente en aspectos como altitud, clima y la posibilidad del funcionamiento por gravedad del sistema. Estas variables influyen directamente en la eficiencia y viabilidad de la implementación.

No obstante, existen limitaciones importantes que deben ser consideradas, una de ellas es la necesidad de realizar pruebas iniciales de calidad del agua, ya que factores como los hábitos alimenticios de la población o el tipo de jabones utilizados en el lavado pueden alterar significativamente las características del agua residual, estos cambios tienen la capacidad de requerir ajustes en el tipo de tratamiento aplicado.

Además, este proceso implica una inversión adicional en presupuesto, así como la selección y posible redimensionamiento de la tecnología empleada. Por lo tanto, la implementación resulta más viable en contextos donde tanto el agua cruda utilizada para lavar y cocinar, como los hábitos de lavado y alimentación sean similares a los del caso de estudio original.

8 CONCLUSIONES

El análisis de la situación del manejo del agua residual en la institución educativa permite concluir de manera general que es necesario llevar a cabo la implementación de una tecnología de tratamiento de agua residual gris, en este caso se selecciona el tren de tratamiento conformado por trampa de grasa y humedal subsuperficial de flujo horizontal, el cual mitiga el impacto ambiental derivado del vertimiento de agua residual sin tratamiento y suple la demanda hídrica de la huerta escolar.

La estimación del volumen de agua residual gris generado en el comedor escolar se realizó a partir del consumo de agua utilizado específicamente para el lavado, limpieza de alimentos y utensilios. De acuerdo con el personal de la cocina, este proceso puede alcanzar un consumo aproximado de 2.100 litros de agua diarios. Además, los resultados evidencian que durante la preparación de los desayunos se generan en promedio 1.295 litros de agua residual gris, mientras que para el proceso de preparación de desayunos y almuerzos en conjunto alcanza un total de 2.590 litros. Esto equivale a una producción aproximada de 12,69 litros de agua residual gris por estudiante y de 6,34 litros el proceso de preparación por separado de un almuerzo y un desayuno.

El control, la siembra y el riego de la huerta escolar está a cargo del docente de proyectos agrícolas y los estudiantes de grado noveno, decimo y once, además, en algunos casos el arado se realiza por medio de trabajo comunitario con los padres de familia, esto evidencia el contacto directo de los estudiantes con la huerta escolar, por lo que es importante garantizar una calidad de agua adecuada que evite la proliferación de contaminantes o posibles problemas de salud al personal que realiza el mantenimiento de la huerta.

La evaluación de los parámetros de calidad del agua residual gris, comparados con los límites establecidos en la normativa nacional y en las recomendaciones de la FAO (1985), evidenció que la mayoría se encuentra dentro de los valores permitidos. Por otro lado, el valor de DBO₅ supera los 400 mg/L, y el de DQO excede los 1,000 mg/L, por lo que el agua residual proveniente del restaurante escolar se clasifica como fuerte o alta [(López et al., 2017) & (Metcalf & Eddy, 1995)]. Además, se identificaron excedencias significativas en coliformes totales, 12.100 NMP/100 ml, frente al límite de 5.000 NMP/100 ml del Decreto 1076 de 2015. En aceites y grasas el valor de 849 mg/L, muy por encima del máximo de 20 mg/L establecido en la Resolución 0631 de 2015. Finalmente, la conductividad eléctrica presentó un valor de 0,6 dS/m, inferior al máximo recomendado por la FAO (0,7 dS/m) y por la normativa colombiana de 1.5 dS/cm Resoluciones 1256 de 2021 & 1207 de 2014 del Minambiente. Estos resultados fueron la base fundamental para definir que la tecnología seleccionada debía priorizar una alta eficiencia en la remoción de microorganismos, materia organica, grasas y aceites.

El sistema de tratamiento integrado de agua residual gris, conformado por una trampa grasa y un humedal subsuperficial, permite alcanzar de manera teórica la calidad de agua recomendada para riego. Además, cumple con la normatividad colombiana y criterios establecidos por la FAO (1985). De esta manera se recomienda el uso del agua residual gris tratada para riego, lo que

contribuye a mitigar el impacto generado por la escasez del recurso hídrico, principalmente durante los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

La tecnología de tratamiento seleccionada corresponde a una solución que se ajusta a las condiciones específicas de la institución escolar y su entorno. Esta alternativa resulta adecuada considerando los recursos disponibles, ya que los materiales requeridos para su construcción como varilla, ladrillo, cemento, grava, PVC y grava son de fácil acceso y pueden adquirirse localmente a costos razonables. Además, al no requerir un sistema de bombeo, se eliminan gastos adicionales asociados a la operación. Su diseño y funcionamiento permiten una operación y mantenimiento sencillos, lo cual facilita que estas actividades puedan ser ejecutadas por estudiantes de grados superiores, docentes o padres de familia, promoviendo así la apropiación comunitaria del sistema.

Según el diagnóstico realizado en la comunidad estudiantil, la huerta escolar se encuentra en un proceso de transición del sistema de riego por aspersión al sistema de riego por goteo. En este contexto, se prioriza la siembra de cultivos como maíz, frijol y arveja debido a su alta resistencia a las condiciones climáticas del periodo de verano y la poca posibilidad de exposición directa con el agua de riego, así como cultivos de ciclo corto como la cebolla larga y el tomate de mesa, lo que facilita tanto su consumo directo como su comercialización.

Durante la realización del plan de cultivos, se identificó que el volumen de agua residual generado en el restaurante escolar suple la demanda hídrica de la huerta escolar para los meses de enero, febrero, marzo, abril, octubre, noviembre y diciembre, logrando así regar los 937 m² de la huerta e incluso permitiendo su reúso en otras actividades como lavado de pasillos, vaciado de inodoros, entre otros. Por el contrario, no se logra garantizar el riego del área total de la huerta para los meses de mayo, junio, agosto y septiembre.

Con base en la evaluación de los parámetros de corrosión e incrustación donde el IL es igual a -0,1 donde el riesgo es bajo, en el caso de la toxicidad el Na y Cl están por debajo de los niveles máximos permitidos, por lo que no hay riesgo por toxicidad, para la sodicidad se debe tener en cuenta realizar adecuaciones al suelo pero no significa un riesgo para los cultivos y finalmente la salinidad del agua residual gris sin tratamiento es de 1,443.9 mmol/L lo que indica un riesgo medio, pero que puede verse mejorado significativamente con el tratamiento, por lo que se determina que el agua residual gris no representa un riesgo significativo para su reúso en aplicaciones de riego.

9 RECOMENDACIONES

Es fundamental desarrollar un proyecto orientado a la implementación de un sistema de potabilización de agua para su uso en el restaurante escolar, ya que permitiría reducir los costos asociados al consumo de gas o energía utilizados actualmente para hervir el agua, así como optimizar el tiempo destinado a dicha actividad. Asimismo, la potabilización del agua contribuye a minimizar el riesgo de enfermedades en la comunidad educativa, al garantizar el suministro de agua apta para el consumo humano. Adicionalmente, se sugiere evaluar la viabilidad del proyecto en extender este sistema a toda la institución educativa, con el fin de asegurar el acceso seguro al recurso hídrico por parte de toda la población estudiantil.

Se recomienda un proyecto de mejoramiento de las instalaciones del área de cocina y comedor escolar, debido a que las condiciones sanitarias actuales son inadecuadas. En particular, se identificó que la cocina no está construida con materiales aptos para áreas de preparación de alimentos, lo cual representa un riesgo para la inocuidad alimentaria. Adicionalmente, el lavaplatos existente presenta un avanzado estado de deterioro asociado a su antigüedad y uso continuo. Con el objetivo de mejorar las condiciones de salubridad e higiene, se sugiere la instalación de un lavaplatos fabricado en acero inoxidable, material que cumple con los estándares sanitarios y cuya disponibilidad en el mercado facilita su adquisición e implementación.

Con el fin de obtener resultados más precisos sobre la calidad del agua residual destinada al riego, es fundamental realizar un análisis más detallado de los parámetros críticos, que permita contrastar los datos obtenidos en diferentes momentos y detectar posibles variaciones significativas. Durante la investigación, se identificaron valores elevados de DBO y DQO, posiblemente asociados a múltiples factores, entre ellos la calidad del agua suministrada por el acueducto que abastece el restaurante escolar. En este contexto, es ideal desarrollar una estrategia de monitoreo de la calidad del agua residual, que incluya un análisis tanto del afluente como del efluente del sistema de tratamiento. Esta medida permitiría identificar con mayor precisión las fuentes de carga orgánica y establecer acciones correctivas eficaces para optimizar la calidad del efluente reutilizado.

Se recomienda llevar a cabo un análisis técnico-ambiental que valore los impactos ambientales y sociales generados en las zonas donde se están realizando los vertimientos al aire libre. Esto permitirá la reducción de posibles enfermedades derivadas de la contaminación por heces fecales, que pueden estar presentes en los cultivos regados aguas abajo o las fuentes hídricas.

Es importante desarrollar un estudio epidemiológico en la comunidad que permita identificar enfermedades derivadas del consumo de agua no potable, como las Enfermedades Diarreicas Agudas (EDA). Se recomienda debido a que en las encuestas realizadas 49,4% de los encuestados afirman tomar el agua directamente de la llave, lo cual puede ser un alto indicador de la presencia de enfermedades relacionadas con agua contaminada.

Es fundamental que para el inicio de los recesos y vacaciones académicas se realice siempre la limpieza de la trampa de grasa con el fin de evitar inconvenientes relacionados con malos olores, además, en el caso del humedal es importante que para el receso a mitad de año (julio-agosto) se realice un control del nivel del agua para prevenir que le evapotranspiración y poca presencia de precipitación sequen por completo el humedal.

De acuerdo con lo evaluado en el trabajo de grado, se recomienda la implementación de un tanque de almacenamiento de agua residual gris tratada, que permita suplir una parte de la demanda hídrica de la huerta escolar, en los meses de mayo y junio donde la precipitación es bastante baja y la oferta generada en el restaurante escolar no es suficiente para suplir el riego de los cultivos en la institución, pero se debe tener en cuenta no almacenar por periodos extensos y debido a la posibilidad de microorganismos en el efluente se recomienda la posible utilización de hipoclorito de sodio para desinfección.

Se recomienda la implementación progresiva de productos de limpieza biodegradables o ecológicos, evaluando su viabilidad en función de la disponibilidad de recursos económicos y la aceptación por parte del personal encargado de la cocina, con el fin de minimizar el impacto generado por el agua residual gris y que permite optimizar el funcionamiento del tren de tratamiento.

Aunque la normativa vigente para el reúso de agua tratada no establece límites específicos para la concentración de aceites y grasas, el efluente del sistema de tratamiento presenta un valor elevado (254,7 mg/L), lo cual representa un riesgo potencial para la calidad del agua reutilizada. Por ello, se recomienda instalar un sistema de rejillas o malla filtrante en la entrada de la trampa de grasa, con el fin de retener sólidos y reducir la carga de aceites y grasas. Esta medida contribuye a mejorar la calidad del afluente y optimizar el desempeño del sistema. Es fundamental realizar la limpieza diaria de este dispositivo para evitar obstrucciones y asegurar su funcionamiento eficiente.

Se recomienda implementar sistemas de riego por goteo o subsuperficial, con el objetivo de minimizar el contacto directo del agua residual con las personas y los cultivos. Asimismo, es fundamental programar el riego en horarios no escolares o cuando los estudiantes se encuentren dentro de las aulas, para reducir posibles riesgos sanitarios. Dado que el efluente presenta valores elevados de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), se aconseja evitar su contacto directo con las plantas comestibles, por esta razón, se sugiere limitar el uso del agua residual tratada al riego de cultivos como maíz, frijol, arveja y tomate de mesa. En el caso específico del tomate, se recomienda aplicar estrictamente el riego por goteo, con el fin de evitar que el agua entre en contacto con el fruto y así reducir los riesgos para la salud.

10 REFERENCIAS.

- Alcaldía Municipal de Almaguer Cauca. (2012). *Plan de Desarrollo Municipal “avancemos juntos” 2012-2015*. Departamento del Cauca. Colombia. [documento en línea]. <https://1library.co/document/4yr07xjy-plan-de-desarrollo-municipal-avancemos-juntos-vigencia.html>
- Alcaldía Municipal de Almaguer Cauca. (2023). *Plan de Desarrollo Municipal “Juntos haciendo historia” 2024-2027*. Departamento del Cauca. Colombia. [documento en línea]. <https://repositorioidim.esap.edu.co/handle/20.500.14471/28635>
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water Quality for Agriculture*. FAO irrigation and drainage paper. ISBN 92-5-102263-1
- Baeza, E. (2017). *Calidad del Agua*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Chile. [documento en línea]. <https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/23747/2/Calidad%20del%20Agua%20Final.pdf>
- Banco Mundial. (2020). *El agua residual puede generar beneficios para la gente, el medioambiente y las economías, según el Banco Mundial*. [Comunicado de prensa]. [documento en línea]. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-resource-that-can-pay-dividends-for-people-the-environment-and-economies-says-world-bank#:~:text=El%20agua%20residual%20del%20mundo,el%20D%C3%ADA%20Mundial%20del%20Agua>
- Banco Mundial. (2022). *Riego Resiliente frente al clima* [Comunicado de prensa]. [Documento en línea]. <https://www.bancomundial.org/es/topic/climate-resilient-irrigation#:~:text=En%20la%20agricultura%20se%20ocupa,y%20reducci%C3%B3n%20de%20la%20pobreza>.
- Banco Mundial. (2025). *Cerrar el ciclo: ¿Qué hacemos para reutilizar el agua?* [Comunicado de prensa]. [documento en línea]. <https://blogs.worldbank.org/es/voices/closing-the-loop---water-we-doing-on-reuse--#:~:text=Sin%20embargo%2C%20la%20capacidad%20mundial,para%20uso%20dom%C3%A9stico%20e%20industrial>
- Campo Usuga, J.F. (2022). *Estado del arte de los sistemas sépticos para el tratamiento del agua residual en zonas rurales*. [tesis de grado, Universidad de Antioquia]. Medellín, Colombia. Repositorio Institucional. [documento en línea]. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/b8ecf45f-0661-4c8d-803a-f7a6fb8b7533/content>
- Chemistry Learner. (s.f). *Calcium Bicarbonate*. [documento en línea]. <https://www.chemistrylearner.com/calcium-bicarbonate.html>
- Chikogu, V., Korkor, H., Amposah, E., Obiekwe, M. (2023). *Comparative analysis of greywater pollutant removal efficiency with horizontal free water surface flow wetland with other wetland technologies*. Heliyon, 9(7), e17637. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17637>

- Cosín, C. (2017). *Reutilización, la gran asignatura pendiente a nivel mundial*. iAgua. [documento en línea]. <https://www.iagua.es/blogs/carlos-cosin/reutilizacion-gran-asignatura-pendiente-nivel-mundial>
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC. (2022). *Informe regional aceite de cocina usado – ACU*. [documento en línea]. <https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2025-02/INFORME%20REGIONAL%20PB%202021%20ACEITE%20DE%20COCINA%20USADO.pdf>
- Corfi colombiana. (2024). *Una mirada al sector de agua potable y saneamiento: logros y retos hacia adelante*. [documento en línea]. <https://investigaciones.corfi.com/documents/38211/0/22-03-2024.%20Informe%20Agua%20potable%20y%20saneamiento%20comentarios%20AJUST.pdf/44b6b441-eab5-412e-4c18-120c932448ee>
- Congreso de la Republica. (1994). *Ley 115 de febrero 8 de 1994. Por la cual se expide la ley general de educación*. [Documento en línea]. Bogotá D.C. https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-85906_archivo_pdf.pdf
- Defensoría del Pueblo. (2022). *Defensoría del Pueblo emite Alerta de Inminencia por confrontaciones entre grupos armados en el Macizo Caucaño*. Colombia. [documento en línea]. <https://www.defensoria.gov.co/-/defensor%C3%ADa-del-pueblo-emite-alerta-de-inminencia-por-confrontaciones-entre-grupos-armados-en-el-macizo-caucano>
- Departamento Nacional de Planeación - DNP. (2018). Consejo Nacional de Política Económica y Social - CONPES 3934. Política de Crecimiento Verde. Ministerio de Bogotá D.C., Colombia. [documento en línea]. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/conpes-3934-de-2018/>
- Department of Water Affairs and Forestry. (1996). *South African Water Quality Guidelines*. Second Edition. Volume 4: Agricultural Use: Irrigation. ISBN: 0-7988 -5342 -5. [documento en línea]. https://www.dws.gov.za/iwqs/wq_guide/edited/Pol_saWQguideFRESHIrrigationvol4.pdf
- Echeverri Sánchez, A., Pérez, C. F., Angulo Rojas, P. A., & Urrutia Cobo, N. (2015). *A Methodological Approach for Assessing Soil Salinity Hazard in Irrigated Areas. Case Study: The rut Irrigation District*, Colombia. *Revista Ingenierías Universidad De Medellín*, 15(29), 13–26. <https://doi.org/10.22395/rium.v15n29a1>
- Fernandez, L. (2022). *Evaluación de impactos de aguas residuales en la calidad del agua del canal Galindona, Nueva Cajamarca - San Martin 2022*. [tesis de grado, Universidad César Vallejo]. Lima, Perú. Repositorio Institucional. [documento en línea]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/104164/Fernandez_ML-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA). (2016). *Gestión del agua para uso agrícola*. [documento en línea]. https://www.ifad.org/documents/38714170/40264252/Scaling+up+note+on+n+agricultural+water+management_s.pdf/48fdd255-cce7-44de-a4db-5324b8d19db9

- García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*. Llibre. [documento en línea]. <http://hdl.handle.net/2117/2474>
- García, J. & López, J. (1970). *Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial adaptada al trópico*. Centro de Investigaciones Agronómicas. *Agronomía Tropical*. 20(5):335-345. [documento en línea]. http://www.sian.inia.gob.ve/revistas_ci/Agronomia%20Tropical/at2005/arti/garcia_j.htm
- Google Earth. (2021). [Cabecera corregimental San Jorge La Herradura]. Recuperado el 1 de junio del 2023. [Mapa]. https://earth.google.com/web/search/La+Herradura,+Almaguer,+Cauca/@1.86978011,-76.87865702,1726.60811832a,451.8791919d,35y,43.5111962h,44.91258251t,-0r/data=CigiJgokCchZTwJ3_wJAEQWQPIsprd4_GQbg_9yMulLAIffWFj-HulPA?hl=es-419
- Gobierno de Colombia (2024). Datos Abiertos de Colombia. [plataforma en línea] Bogotá D.C. <https://www.datos.gov.co/en/widgets/cbdg-g4tc>
- HANNA instruments. (s.f). *Equilibrio del agua. Índice de Langelier*. [documento en línea]. <https://www.hannainst.es/blog/790/equilibrio-del-agua-indice-de-langelier>
- HIDRIKA. (2023).). *No de más vueltas, la grasa y el aceite en su PTAR es su mayor problema, ¿cómo reducir su impacto?* [documento en línea]. <https://www.linkedin.com/pulse/de-m%C3%A1s-vueltas-la-grasa-y-el-aceite-en-su-ptar-es-mayor-hidrika/>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022*. Ideam. 464 pp. [documento en línea]. https://www.andi.com.co/Uploads/ENA%202022_compressed.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2025). *Índice de Calidad del Agua en corrientes superficiales (ICA)*. (Hoja metodológica versión 1.3). [Documento el Línea]. https://bart.ideam.gov.co/indiecosistemas/ind/agua/hm/HM_ICA.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2010). Cauca. http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/cauca_texto.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2024). *Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos: Almaguer Cauca*. [Mapa]. Geoportal. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Instituto Privado Sobre el Cambio Climático (ICC), (2017). Manual de medición de caudales. [Documento en línea]. Guatemala. <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2023/03/064.pdf>
- Jones, E. G., Van Vliet, M. T. H., Qadir, M., & Bierkens, M. F. P. (2021). *Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse*. *Earth System Science Data*, 13(2), 237-254. <https://doi.org/10.5194/essd-13-237-2021>

- Mejía de Tafur, M., Marín. G. y Menjivar. J. (2014). *Respuesta fisiológica de cilantro (Coriandrum sativum L.) a la disponibilidad de agua en el suelo*. Acta Agronómica, 63(3), 246–252. <https://doi.org/10.15446/acag.v63n3.39826>
- Merck KGaA. (s.f). *Tabla de solubilidad del agua a temperatura*. [documento en línea]. https://www.sigmaaldrich.com/CO/en/support/calculators-and-apps/solubility-table-compounds-water-temperature?srsIid=AfmBOoqM2LaZR8t7P5SqRFYfWTGkAbdqR9nGZY9B_aX4O0LUMh4w_nxB
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización*. Volumen II. McGraw Hill. Tercera Edición. Volumen II. ISBN: 84-481-1606-2 [documento en línea]. https://www.academia.edu/45529169/INGENIERIA_DE_AGUAS_RESIDUALES_TRATAMIENTO_VERTIDO_Y_REUTILIZACION_Volumen_II_Metcalf_y_Eddie
- Ministerio de Educación Nacional (MEN). (2014). *Enfoque del Programa de Alimentación Escolar (PAE)*. Bogotá D.C., Colombia. [documento en línea]. https://mineducacion.gov.co/1621/articles-235135_archivo_pdf_enfoque_PAE.pdf
- MinAmbiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). (2015). *Decreto 1076 de mayo 26 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Bogotá D.C., Colombia. [documento en línea]. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/decreto-1076-de-2015/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2021). *Resolución 1256 del 2021 Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones*. Bogotá D.C., Colombia. [documento en línea]. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2014). *Resolución 1207 del 2014 Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales Tratadas*. Bogotá D.C., Colombia. [documento en línea]. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/7.-Anexo-7-Resolucion-1207-de-2014.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2015). *Resolución 0631 del 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 de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones*. Bogotá D.C., Colombia. [documento en línea]. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio - MVCT. (2017). *Resolución 330 del 2017 Modificada parcialmente por la resolución 799 de 2021*. Bogotá D.C., Colombia. [documento en línea]. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/abece-compilatorio-rev-sspd-1jalp-1.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio - MVCT. (2021). *Resolución 0779 del 2021 Por la cual se modifica la Resolución 0330 de 2017*. Bogotá D.C., Colombia. [documento en línea]. https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/0799_2021.pdf

- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (Minvivienda). (2017). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico Título J: Alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural*. [Documento en línea]. https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulo_j_vf.pdf
- Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (s.f). *Vertimientos y reúso de aguas residuales*. [Archivo en Línea] <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/calidad/vertimientos-y-reuso-de-aguas-residuales>
- Ministerio de Educación Nacional (2005). *Educación para el desarrollo sostenible*. [Artículo en línea], periódico. <https://www.mineducacion.gov.co/1621/article-90893.html>.
- Molina, Y. L. (2021). *Análisis del funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas (ptard) ubicadas en los 42 municipios del departamento del cauca*. [tesis de grado, Uniautónoma del Cauca]. Popayán, Colombia. Repositorio Institucional. [documento en línea]. <https://repositorio.uniautonomia.edu.co/bitstream/handle/123456789/555/T%20IA-P%20172%202021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Morel, A. & Diener, S. (2006). *Greywater Management in Low and Middle-Income Countries, Review of different treatment systems for households or neighbourhoods*. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). Dübendorf, Switzerland. ISBN: 978-3-906484-37-2. [documento en línea]. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/MOREL%20and%20DIENER%202006%20Greywater%20Management.pdf
- Navarro, A. & Zamudio, A. (2016). *Reutilización de agua para la agricultura y el medioambiente*. Agua Y Territorio Water and Landscape, (8), 80-92. <https://doi.org/10.17561/at.v0i8.3298>
- Ojeda, L., Romero, S., Reyes, J., Gallegos, R. y Herrera A. (2013). *Evaluación de la depuración de agua gris en un humedal artificial a escala piloto*. Sistemas de humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua: memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el Manejo, Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua, Morelia, Michoacán, México. [documento en línea]. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/sistemas-de-humedales/files/assets/common/downloads/publication.pdf
- ONU-Hábitat & OMS. (2021). *Progresos en el tratamiento de las aguas residuales. Estado mundial y necesidades de aceleración del indicador 6.3.1. de los ODS. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos*. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat) y Organización Mundial de la Salud (OMS), Ginebra. https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/10/sdg6_indicator_report_631_progress-on-wastewater-treatment_2021_es.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2020). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2020: agua y cambio climático, datos y cifras*. [documento en línea]. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372876_spa

- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. [documento en línea]. <https://repositorio.oefa.gob.pe/handle/20.500.12788/287>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1985). *Calidad del agua para la agricultura*. [documento en línea]. <https://www.fao.org/4/t0234e/T0234E00.htm#TOC>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. [documento en línea]. <https://openknowledge.fao.org/items/0be0a38b-e0b2-4c47-9919-14f016def7de>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2010). *Nueva política de huertos escolares*. [documento en línea]. <https://www.fao.org/publications/card/es/c/1398695e-7c14-590c-9b9a-04052fbe58c9>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2020*. Roma. <https://doi.org/10.4060/cb1447es>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2005). *El Derecho a la Alimentación. Directrices voluntarias: en apoyo de la realización progresiva del derecho a una alimentación adecuada en el contexto de la seguridad alimentaria nacional*. [Documento en Línea] Roma. <https://www.fao.org/4/y7937s/Y7937S00.htm#TOC>
- Organización Mundial de la Salud (OMS) & Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2009). *Fichas internacionales de seguridad química (ICSC): sulfato de calcio (anhidro)*. [documento en línea]. https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=1589&p_version=2
- Organización Mundial de la Salud (OMS) y Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2009). *Fichas internacionales de seguridad química (ICSC): sulfato de magnesio*. [documento en línea]. https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=1197&p_version=2
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2022). *Saneamiento*. [documento en línea]. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/sanitation>
- Palacios, A. (2021). *Estudio sobre la viabilidad del cultivo del mango regado con agua residual tratada*. [tesis de grado, Universidad de Almería]. Almería, España. Repositorio Institucional. [documento en línea]. <https://repositorio.ual.es/handle/10835/13334>
- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (WWAP). (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. París, UNESCO. [documento en línea]. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247683_spa

- Polonía, C. & Tolorza, D. (2020). *Evaluación del potencial de reúso de aguas residuales tratadas en la PTAR de el Cerrito para riego en cultivos de caña de azúcar*. [tesis de grado, Universidad del Valle]. Cali, Colombia. Repositorio Institucional. [documento en línea]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/entities/publication/e53d0b5e-2f0c-4db9-85f3-f1b4309f13d2>
- Pure Aqua, INC. (s.f) *Calculadora de Dureza del agua*. [Programa en línea]. <https://es.pureaqua.com/calculadora-de-dureza-del-agua/>
- Rodríguez, H. (2017). *Las aguas residuales y sus efectos contaminantes*. [documento en línea]. <https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>
- Romero, M. (2010). *Proceso de eutrofización de afluentes y su prevención por medio de tratamiento de efluentes*. Revista Electrónica Ingeniería Primero. Pags.64 -74. ISSN: 2076-3166. [documento en línea]. https://fgsalazar.net/LANDIVAR/ING-PRIMERO/boletin17/URL_17_AMB02_TRATAMIENTO.pdf
- Rodríguez, D. Serrano, H. Delgado, A. Nolasco, D. y Saltiel, G. (2020). *De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe*. Banco Mundial, Washington, DC. [documento en línea]. <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/4f1d1637-77ce-5814-a39a-320bebe96069/content>
- Saravia, S. (2022). *Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe*. serie Recursos Naturales y Desarrollo, N° 213 (LC/TS.2022/193), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). [documento en línea]. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/3413ec71-7292-4ce7-95a8-a6b4aa53faae/content>
- Simsek, C., Gunduz, O. (2007). *IWQ Index: A GIS-Integrated Technique to Assess Irrigation Water Quality*. Environ Monit Assess 128, 277–300. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9312-8>
- Singh, K.R., Goswami, A.P., Kalamdhad, A.S. (2019). *Development of irrigation water quality index incorporating information entropy*. Environ Dev Sustain 22, 3119–3132. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00338-z>
- Tilley E., Ulrich L., Lüthi C., Reymond P., Schertenleib R., Zurbrügg C. (2018), *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento*. 2nd Revised Edition, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Dübendorf, Switzerland. ISBN: 9783906484679. [documento en línea]. https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/schwerpun kte/sesp/CLUES/Compendium_Spanish_pdfs/compendio_sp.pdf
- United Nations UN-Water. (2024). *Progress on Wastewater Treatment*. [documento en línea]. <https://www.unwater.org/publications/progress-wastewater-treatment-2024-update>
- United Nations Environment Programme. & GRID-Arendal. (2023). *Wastewater – Turning Problem to Solution*. A UNEP Rapid Response Assessment. Nairobi. [documento en línea]. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43142>.

- Villafañe, R. (2011). *Sosalriego: Un procedimiento para diagnosticar los riesgos de sodificación y salinización del suelo con el agua de riego*. Bioagro, 23(1), 57-64. [documento en línea]. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612011000100008
- Wasonga, G., Dhar, G. & Sahoo, N. (2024). *A critical review of irrigation water quality index and water quality management practices in micro-irrigation for efficient policy making*. Desalination and Water Treatment. Volume 318. ISSN 1944-3986. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100304>.

11 ANEXOS

Anexo 1: Formato de encuestas.



Universidad del Valle

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

Formulación de una estrategia para el manejo integral del agua residual con perspectiva de reúso agrícola del restaurante escolar de la Institución Educativa la Herradura, corregimiento San Jorge la Herradura, Almaguer, Cauca.

Estimado participante:

Yo, Yenny Margoth Ruano, estudiante del Programa Académico de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad del Valle, me encuentro realizando mi trabajo de investigación para optar al título. En este contexto, el trabajo está centrado en el manejo de las aguas del comedor escolar del centro educativo con fines de reúso en el riego de la huerta escolar y otros usos. Con base en lo anterior, se ha preparado una encuesta, la cual está orientada a recolectar información que permita caracterizar las prácticas de manejo en la huerta escolar, el uso del agua y generación de agua residual de la comunidad estudiantil de la institución. La Universidad del Valle agradece su amable colaboración con la investigación. El tiempo estimado para responder la encuesta es de 25 – 30 minutos.

Consentimiento firmado

Entiendo que: Mi participación es completamente voluntaria, la información que entregue es confidencial cumpliendo con la política de tratamiento de datos personales y lo establecido en la Ley 1581 de 2012 y el Decreto 1377 de 2013. La información será guardada de forma segura y será utilizada con fines exclusivos asociados a la investigación.

Sí acepto participar (___)

No acepto participar (___)

1. Sexo:

Masculino ☐

Femenino ☐

2. Edad:

Rango de edad	Marque con X
10-15 años	
16-20 años	
21-25 años	
25-30 años	
30- 40 años	
40 – 50 años	
50- 60 años	

Mayor de 60 años ☐

3. ¿Cuál es el rol que desempeña en la institución educativa?

- Estudiante ☐
- Docente ☐
- Trabajador encargado de la cocina ☐
- Trabajador encargado del aseo ☐
- Directivo ☐

4. Grado que cursa actualmente. *Responder Solo si es estudiante.*

Grado	Marque con X
9°	
10°	
11°	

Características asociadas a la gestión y manejo de agua de consumo en los hogares.

5. Completar la siguiente información sobre los usos del agua en el hogar en épocas Lluviosas (L) y en épocas Secas (S) de acuerdo con la procedencia del líquido:

Usos	Procedencia											
	Acueducto		Agua Embotellada		Agua Lluvia		Río/ Quebrada		Nacimiento		Otras fuentes	
	L	S	L	S	L	S	L	S	L	S	L	S
Bebida												
Aseo personal												
Aseo del hogar												
Cocinar												
Lavado de platos												
Lavado de ropa												
Riego de cultivos												
Riego de jardín												
Vaciado de Inodoro												
Otros Usos												

6. ¿En su hogar almacenan agua? *Si la respuesta es No sabe o No, pasar a la pregunta 11.*

- Sí ☐
- No ☐
- No sabe ☐

7. ¿Qué tipo de agua almacenan en su vivienda?

Tipo de agua almacenada	Marque con X
Acueducto	
Agua lluvia	
Nacimiento	
Río / Quebrada	
Otra, ¿Cuál?	

8. ¿Tapan los recipientes en los que almacenan el agua?

- Sí, todos. ☐
- Sí, la mayoría ☐
- Sí, solo algunos ☐
- No. ☐
- No sabe ☐

9. ¿Aplican algún tipo de tratamiento al agua que usan para beber y cocinar? *Si la respuesta es No sabe o no, pasar a la pregunta 13.*

- Sí ☐
- No ☐
- No sabe ☐

10. ¿Qué tratamiento le aplica al agua que consume?

- ☐ No sabe
 ☐ Filtra
 ☐ Hierve
 ☐ Cloro/límpido
 Otra, ¿Cuál? _____

Características asociadas a prácticas de manejo de agua residual en su vivienda.

11. ¿Con cuántos de los siguientes aparatos sanitarios cuentan en su casa?

Aparato Sanitario	No de aparatos sanitarios
Ducha	
Lavamanos	
Lavaplatos	

Lavadero	
Lavadora	
Sanitario	
Otros, ¿Cuáles?	

12. ¿Dónde disponen las excretas en su hogar?

Baño seco/ letrina/hoyo ☐ Taza sanitaria ☐ Sanitario con Tanque ☐
 Campo abierto ☐ No sabe ☐

Otro, ¿Cuál? _____

13. ¿Cómo es la disposición final del agua residual generada en su hogar?

Sistema de alcantarillado ☐ Pozo de absorción ☐ Tanque séptico ☐
 Aire libre ☐ No sabe ☐ Otro, ¿Cuál? _____

14. ¿Durante el día en qué momento cree que es importante lavarse las manos?

Al levantarse ☐ Después de ir al baño ☐ Antes de comer ☐
 Antes de cocinar ☐ Otro, ¿Cuál? _____

Características asociadas a prácticas de gestión y manejo de agua para consumo en la institución.

15. ¿En la institución educativa se almacena agua? Si la respuesta es **No sabe** o **No**, pasar a la pregunta 20.

- Sí ☐
- No ☐
- No sabe ☐

16. ¿En qué tipo de recipiente almacenan el agua?

					Otro tipo de recipiente:
Tanques	Tibungo	Galones	Garrafón	Balde	

17. ¿Tapan los recipientes en los que almacenan el agua?

- Sí, todos. ☐
- Sí, la mayoría ☐
- Sí, solo algunos ☐
- No. ☐
- No sabe ☐

18. ¿Consumes agua directamente de las llaves ubicadas dentro de la institución educativa?

- Sí ☐
- No ☐

19. ¿De dónde es el agua que consumes durante la jornada escolar?

La compra en la tienda ☐ La trae de la casa ☐ La toma de las llaves ☐
 Generalmente no tomo agua ☐ Otro, ¿Cuál? _____

20. ¿Consideras que la calidad del agua del sistema de acueducto es?

Buena ☐ Regular ☐ Mala ☐

Características asociadas a prácticas de gestión y manejo de agua para preparación de alimentos en el restaurante escolar (Enfocada principalmente a docentes, administrativos y personal de la cocina).

21. ¿Se aplica un tratamiento al agua utilizada para la preparación de los desayunos? *Si la respuesta es No o No sabe omitir la pregunta 24.*

- Sí ☐
- No ☐
- No sabe ☐

22. ¿Qué tratamiento se le aplica al agua para la preparación de alimentos?

No sabe ☐ Filtra ☐ Hierve ☐ Cloro/límpido ☐
 Otra, ¿Cuál? _____

23. Completar la siguiente información sobre los usos del agua en el restaurante escolar en épocas de épocas Lluviosas (L) y épocas Secas (S) de acuerdo con la procedencia del líquido:

Usos	Procedencia											
	Acueducto		Agua Embotellada		Agua Lluvia		Río/ Quebrada		Nacimiento		Agua Almacenada	
	L	S	L	S	L	S	L	S	L	S	L	S

Bebida												
Aseo del lugar												
Lavado de ollas												
Cocinar												
Lavado de platos												
Otros Usos												

24. ¿Cuánto tiempo lleva trabajando como cocinero/a del restaurante escolar? *Pregunta solo para el personal de la cocina.*

- Menos de un año ☐
- 1- 3 años ☐
- 3-5 años ☐
- Más de 5 años ☐

25. ¿Cuántos desayunos se preparan diariamente? *Si es estudiante omitir esta pregunta.*

- 50 a 100 ☐
- 100 a 150 ☐
- 150 a 200 ☐
- 200 a 250 ☐
- Mas de 200 ☐
- No sabe. ☐

Características asociadas a prácticas de manejo de agua residual en la institución educativa.

26. ¿Tiene conocimiento sobre que es el agua residual?

Si ☐
No ☐

27. ¿Cuál de las siguientes actividades dentro de la institución usted cree que genera mayor cantidad de agua residual?

Lavado de lavamanos e inodoros ☐ Aseo de las aulas ☐
Aseo de corredores ☐ Preparación de alimentos en la tienda ☐
Preparación de alimentos en el restaurante escolar ☐

Otro, ¿Cuál? _____

28. Aproximadamente ¿Cuántas veces va al baño durante la jornada escolar?

Nº de veces	Marcar con una X
0 a 2	
3 a 5	
5 a 7	
Más de 7 veces	

29. ¿Se lava las manos cada vez que va al baño en la institución?

- Sí ☐
- No ☐
- Algunas veces ☐

Características asociadas a prácticas de manejo de la huerta escolar y el plan alimentario.

30. ¿Desayuna en el restaurante escolar? *Si la respuesta en No, pasar a la pregunta 34.*

Sí ☐ No ☐

31. ¿Qué días consume el desayuno en el restaurante escolar?

Todos los días de la semana ☐ De lunes a jueves ☐

Otros, ¿Cuál? _____

32. ¿En su casa tienen huerta?

Sí ☐ No ☐

33. ¿Ha trabajado en alguna ocasión en la huerta de la institución educativa?

Sí ☐ No ☐

34. ¿Reconoce algunos de los cultivos sembrados en la huerta? *Si la respuesta es No, pasar a la pregunta 40.*

Sí ☐ No ☐

35. Marcar de los siguientes cultivos cuales son los que se siembran con mayor frecuencia en la huerta escolar.

Cultivo		Marcar con una X	
Remolacha		Lechuga	
Zanahoria		Batavia	

Cilantro		Espinaca	
Acelga		Cebolla larga	
Frijol		Tomate de mesa	
Maíz		Pimentón	
Alverja		Tomillo	
Habichuela		Orégano	
		Otros, ¿Cuáles?	

36. Principalmente ¿Qué se hace con los cultivos que son recolectados de la huerta escolar?

Se vende en la plaza de mercado ☐

Se vende puerta a puerta ☐

Se llevan al restaurante escolar para la preparación de los desayunos ☐

Se los llevan para la casa ☐

No sabe ☐

Otro, ¿Cuál? _____

37. ¿Por qué razón se ha llegado a detener la producción de los cultivos de la huerta?

Respuestas múltiples.

- Falta de compromiso de los estudiantes
- Falta de compromiso de los docentes
- Poco Mantenimiento
- Fallas en el sistema de riego
- Falta de recurso hídrico para el riego de cultivos
- No sabe
- Otras, ¿Cuál? _____

☐
☐
☐
☐
☐
☐

38. ¿Qué método de riego se utiliza en la huerta escolar?

- Riego por goteo
- Riego por aspersión
- Riego por gravedad
- Riego por microaspersión
- No sabe
- Otros, ¿Cuál?

☐
☐
☐
☐
☐
☐

39. ¿En que meses del año es baja o nula la presencia de lluvias? Marque con X.

Mes		Mes	
Enero		Julio	
Febrero		Agosto	
Marzo		Septiembre	
Abril		Octubre	
Mayo		Noviembre	
Junio		Diciembre	

40. ¿En qué meses del año la presencia de lluvias es alta? Marque con X.

Mes		Mes	
Enero		Julio	
Febrero		Agosto	
Marzo		Septiembre	
Abril		Octubre	
Mayo		Noviembre	
Junio		Diciembre	

Anexo 2: Formato de selección de tecnologías taller con la comunidad.

Nombre				Rol					
Alternativas	CRITERIOS DE SELECCIÓN								
	Operación y mantenimiento		Área		Infraestructura y componentes			Parametros	Cultivos
	Personal capacitado	Frecuencia de mantenimiento	Distancia mínima recomendada	área máxima para el diseño	Tipo de materiales	Facilidad optención de materiales	construcción e instalación	Remoción de parametros	lista de 4 cultivos
Trampa grasa + humedal subsuperficial horizontal grava									
Trampa grasa + humedal subsuperficial horizontal plástico									
Trampa grasa con deflectores + humedal subsuperficial horizontal grava									
Trampa grasa con deflectores + humedal subsuperficial horizontal plástico									

Anexo 3: Promedio de las configuraciones de tratamiento del formato de selección de tecnologías.

	Trampa grasa + humedal subsuperficial horizontal grava								
	Operación y mantenimiento		Área		Infraestructura y componentes			Parametros	
Número de formato	Personal capacitado	Frecuencia de mantenimiento	Distancia mínima recomendada	área máxima para el diseño	Tipo de materiales	Facilidad optención de materiales	construcción e instalación	Remoción de parametros	
1	85	83	87	90	90	89	90	87	
2	80	83	80	81	89	91	83	86	
3	85	90	92	91	85	95	85	95	
4	84	85	87	84	86	90	78	90	
5	80	85	80	81	82	87	90	86	
6	90	90	90	88	90	90	90	70	
7	90	80	70	90	80	80	90	80	
8	80	80	85	62	91	70	85	75	
9	80	80	85	91	70	88	80	90	
10	90	90	90	90	90	80	80	50	TOTAL
Promedio	84,4	84,6	84,6	84,8	85,3	86	85,1	80,9	84,4625

Formulación de una estrategia para el manejo integral del agua residual con perspectiva de reúso agrícola del restaurante escolar de la institución educativa la herradura, corregimiento San Jorge La Herradura, Almaguer, Cauca.

Trampa grasa + humedal subsuperficial horizontal plástico									
Número de formato	Operación y mantenimiento		Área		Infraestructura y componentes			Parametros	
	Personal capacitado	Frecuencia de mantenimiento	Distancia mínima recomendada	área maxima para el diseño	Tipo de materiales	Facilidad optención de materiales	construcción e instalación	Remoción de parametros	
1	87	83	87	90	90	89	90	87	
2	82	80	81	88	90	93	85	85	
3	83	80	90	93	70	96	81	86	
4	87	85	83	82	88	87	84	86	
5	82	79	81	88	75	82	91	85	
6	80	90	90	85	75	75	82	60	
7	90	80	70	90	90	80	90	80	
8	80	80	85	62	91	70	85	75	
9	80	80	90	85	70	96	80	91	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	TOTAL
Promedio	75,1	73,7	75,7	76,3	73,9	76,8	76,8	73,5	75,225

Trampa grasa con deflectores + humedal subsuperficial horizontal grava									
Número de formato	Operación y mantenimiento		Área		Infraestructura y componentes			Parametros	
	Personal capacitado	Frecuencia de mantenimiento	Distancia mínima recomendada	área maxima para el diseño	Tipo de materiales	Facilidad optención de materiales	construcción e instalación	Remoción de parametros	
1	83	79	86	85	87	75	83	90	
2	81	82	87	81	98	95	89	89	
3	84	96	96	95	98	97	82	79	
4	83	79	84	85	83	79	83	91	
5	83	86	87	81	79	85	87	90	
6	70	70	90	88	90	90	75	95	
7	90	80	70	90	80	80	90	90	
8	70	80	75	91	80	90	80	95	
9	90	80	75	94	80	82	80	89	
10	80	80	80	90	90	80	80	80	TOTAL
Promedio	81,4	81,2	83	88	86,5	85,3	82,9	88,8	84,6375

Trampa grasa con deflectores + humedal subsuperficial horizontal plástico									
Número de formato	Operación y mantenimiento		Área		Infraestructura y componentes			Parametros	
	Personal capacitado	Frecuencia de mantenimiento	Distancia mínima recomendada	área maxima para el diseño	Tipo de materiales	Facilidad optención de materiales	construcción e instalación	Remoción de parametros	
1	89	80	83	84	88	87	85	88	
2	83	81	81	80	91	98	87	82	
3	81	80	90	94	75	95	80	99	
4	40	80	79	87	81	84	85	87	
5	81	80	81	80	80	89	82	83	
6	70	70	90	85	75	75	70	87	
7	90	80	70	90	90	80	90	90	
8	70	70	95	73	90	66	69	77	
9	70	70	96	68	90	97	80	99	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	TOTAL
Promedio	67,4	69,1	76,5	74,1	76	77,1	72,8	79,2	74,025

Anexo 4: Resultados precipitación total mensual (mm/mes).

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1994	346,2	174	214,9	197,5	62,7	6,7	4,8	2,1	96,3	215,7	227,2	175,7
1995	31,1	39,3	173,3	304,7	152,5	99,3	117,2	53,6	29,6	251,7	267,6	117,3
1996	247,4	130,1	352,4	262,3	268,8	116,1	56,6	20,2	45,2	276,4	123,5	230,3
1997	209	59,9	160,2	141,1	41,2	90,2	0	0,3	36,4	168,1	220,2	115,3
1998	1,3	82,2	122,8	97,9	159,5	5,1	6,4	23	60	164,9	322,1	147,1
1999	458,5	437,3	286,3	206	154,2	155,7	6,7	5,9	237,7	250,9	384,3	418,4
2000	224,8	204,3	143,2	171,7	189,3	36	38,9	11,8	122,4	143,1	156,4	167,3
2001	84,5	139,6	156,2	53,3	100,3	14,9	5,8	0	118,6	80,6	400	377,2
2002	119,5	84,2	223,8	293,6	45,6	41,4	96,3	24,3	43,4	139,3	223,9	196,6
2003	79,9	102,1	200,8	127,1	61,5	53	18,6	40,3	96,3	335,5	184	230,1
2004	166,5	72,3	87,5	150,4	79,3	7,2	77,7	0,5	57,5	344,5	296,8	186,3
2005	117,3	169,1	145,9	200,3	161,4	16,2	27,6	10,7	79,4	274,1	255,9	292,8
2006	181,3	168,4	308,3	326,1	93,5	116,9	45,4	4,8	19,2	288,7	290,9	212
2007	61,1	23,5	224,7	329,5	179,7	25,8	46,9	50,3	14,3	434,4	274,3	318
2008	252,1	139,3	262,1	197,2	178	64,8	18,4	104,9	125,2	320,8	290,4	220,4
2009	379,2	209,2	251,1	114,4	69,6	43,9	8,6	15,8	61,4	195,3	166,1	181,6
2010	34,1	145,5	24	290,5	121,3	99,9	112,7	23,9	44,9	244,1	572,6	266,5
2011	200,4	297,1	115,1	335,7	166,6	107,4	64,2	45,8	85,5	190	369,1	272,5
2012	250,8	139	97,9	200,7	23,4	16,8	0,8	22,8	2	207,6	278,77	118
2013	30,6	164,4	126,5	196,6	184,8	37,6	28	47,4	27,2	154,1	247,6	222,9
2014	206,9	132,8	220,1	73,6	169,9	22,4	6,4	0,1	42,4	277,9	262,3	229,5
2015	76,1	71	190,3	150,4	9,5	5,7	2,8	0	17,6	128,9	128,1	0
2016	102,1	93,4	176,2	130,3	166	9,5	6,6	32,4	60	270	381,4	307,3
2017	198,6	156,2	394,4	141,4	170,6	204	14,6	49,2	11,1	257,9	163,4	215,9
2018	171,2	172,3	113,3	139,2	117,5	7,8	19,4	7,9	53,2	165,7	430,1	17,6
2019	123	130,7	128,2	228,5	117,8	14,1	30,2	0,1	31,4	210	331	259,5

Anexo 5: Resultados ETo (mm/mes).

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1994	92,31	86,56	90,77	92,94	135,41	100,69	107,05	114,96	118,72	111,53	112,59	133,86
1995	114,75	100,99	107,67	89,04	126,98	102,09	95,60	99,76	109,92	105,43	105,13	115,27
1996	90,16	82,05	93,02	92,56	130,89	100,01	103,14	112,21	108,96	109,32	110,48	133,62
1997	83,26	92,97	115,85	101,79	148,82	120,15	122,16	140,60	131,22	123,05	141,54	171,38
1998	148,03	118,70	122,33	100,78	120,92	111,29	102,46	110,06	121,67	123,61	116,79	120,01
1999	87,82	80,50	101,43	97,23	104,84	93,49	98,16	103,53	92,89	94,42	113,77	123,08
2000	84,82	81,64	90,73	91,42	104,28	111,84	100,31	107,07	91,74	101,58	101,35	119,10
2001	98,10	103,34	97,09	109,80	114,44	119,48	111,87	111,77	99,40	127,57	118,40	143,45
2002	103,99	97,76	99,98	95,94	114,84	104,97	104,48	115,29	123,80	132,94	118,87	140,01
2003	104,13	99,52	108,12	101,24	115,56	95,52	103,79	112,60	115,68	99,08	91,02	96,02
2004	100,30	101,62	115,71	96,54	113,31	96,69	93,23	122,01	113,47	137,15	105,68	138,21
2005	98,70	94,58	101,32	113,45	132,63	102,89	110,87	113,74	118,44	115,05	123,14	128,69
2006	92,05	85,68	98,23	96,48	122,93	105,29	94,20	115,42	112,00	123,48	115,47	132,26
2007	111,33	99,87	103,88	91,97	126,97	105,43	97,96	97,02	113,02	111,69	116,24	121,80
2008	96,62	77,68	96,78	86,77	118,78	92,35	90,11	94,96	88,71	106,27	94,98	96,82
2009	87,81	89,37	100,91	99,55	132,01	121,96	117,01	120,70	121,58	128,29	124,38	138,08
2010	126,77	106,90	124,84	99,57	119,94	106,54	89,46	99,95	101,83	104,79	90,68	118,35
2011	99,66	84,67	97,85	87,62	127,00	99,84	103,39	107,78	107,03	103,34	104,31	123,77
2012	90,47	85,28	111,20	93,81	155,17	115,56	112,64	117,20	132,33	135,94	136,61	138,86
2013	115,94	86,28	107,90	112,64	128,96	112,48	109,88	112,77	106,34	119,36	118,21	127,04
2014	105,73	94,13	96,02	117,11	133,91	123,81	120,91	118,36	111,16	127,16	138,89	143,31
2015	123,94	107,68	108,24	107,83	171,00	129,73	122,57	162,24	136,27	155,14	135,97	175,08
2016	126,86	126,28	113,94	104,42	141,62	107,21	112,92	116,82	120,07	124,16	124,05	143,19
2017	94,09	93,99	91,53	97,07	130,75	107,47	105,96	108,49	104,54	101,74	131,93	127,45
2018	91,15	96,39	113,00	95,64	132,05	111,22	110,00	117,82	108,87	123,09	127,54	151,47
2019	127,80	101,77	108,93	97,21	137,50	109,97	110,88	122,34	116,28	113,57	122,06	137,27

Anexo 6: Resultados Precipitación Efectiva (mm/mes).

MES	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
P (Valor)	84,5	93,4	128,2	141,1	79,3	14,9	6,6	4,8	31,4	168,1	223,9	175,7
Pe	73,08	79,44	101,90	109,25	69,24	14,54	6,53	4,76	29,82	122,89	143,69	126,31

Anexo 7: Resultados ETc (mm/mes) para cada uno de los meses.

Cultivo	Kc	ETc (mm/mes)											
Remolacha	1,05	104,26	99,19	107,92	102,12	134,62	112,38	110,61	119,06	118,29	123,25	123,59	139,86
Zanahoria	1,05	104,26	99,19	107,92	102,12	134,62	112,38	110,61	119,06	118,29	123,25	123,59	139,86
Cilantro	1,20	119,15	113,36	123,34	116,70	153,85	128,43	126,41	136,07	135,19	140,86	141,25	159,84
Acelga	1,05	104,26	99,19	107,92	102,12	134,62	112,38	110,61	119,06	118,29	123,25	123,59	139,86
Frijol	1,20	119,15	113,36	123,34	116,70	153,85	128,43	126,41	136,07	135,19	140,86	141,25	159,84
Maiz	1,20	119,15	113,36	123,34	116,70	153,85	128,43	126,41	136,07	135,19	140,86	141,25	159,84
Alverja	1,15	114,19	108,64	118,20	111,84	147,44	123,08	121,14	130,40	129,56	134,99	135,36	153,18
Habichuela	1,05	104,26	99,19	107,92	102,12	134,62	112,38	110,61	119,06	118,29	123,25	123,59	139,86
Lechuga	1,00	99,29	94,47	102,78	97,25	128,21	107,03	105,34	113,39	112,66	117,38	117,71	133,20
Batavia	1,00	99,29	94,47	102,78	97,25	128,21	107,03	105,34	113,39	112,66	117,38	117,71	133,20
Espinaca	1,00	99,29	94,47	102,78	97,25	128,21	107,03	105,34	113,39	112,66	117,38	117,71	133,20
Cebolla larga	1,00	99,29	94,47	102,78	97,25	128,21	107,03	105,34	113,39	112,66	117,38	117,71	133,20
Tomate de mesa	1,15	114,19	108,64	118,20	111,84	147,44	123,08	121,14	130,40	129,56	134,99	135,36	153,18
Pimentón	1,05	104,26	99,19	107,92	102,12	134,62	112,38	110,61	119,06	118,29	123,25	123,59	139,86

Anexo 8: Resultados NRn (mm/mes) para cada tipo de cultivo, los cultivos seleccionados y su respectivo Kc.

Cultivo	Kc	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Remolacha	1,05	31,2	19,7	6,0	0,0	65,4	97,8	104,1	114,3	88,5	0,4	0,0	13,6
Zanahoria	1,05	31,2	19,7	6,0	0,0	65,4	97,8	104,1	114,3	88,5	0,4	0,0	13,6
Cilantro	1,20	46,1	33,9	21,4	7,5	84,6	113,9	119,9	131,3	105,4	18,0	0,0	33,5
Acelga	1,05	31,2	19,7	6,0	0,0	65,4	97,8	104,1	114,3	88,5	0,4	0,0	13,6
Frijol	1,20	46,1	33,9	21,4	7,5	84,6	113,9	119,9	131,3	105,4	18,0	0,0	33,5
Maíz	1,20	46,1	33,9	21,4	7,5	84,6	113,9	119,9	131,3	105,4	18,0	0,0	33,5
Alverja	1,15	41,1	29,2	16,3	2,6	78,2	108,5	114,6	125,6	99,7	12,1	0,0	26,9
Habichuela	1,05	31,2	19,7	6,0	0,0	65,4	97,8	104,1	114,3	88,5	0,4	0,0	13,6
Lechuga	1,00	26,2	15,0	0,9	0,0	59,0	92,5	98,8	108,6	82,8	0,0	0,0	6,9
Batavia	1,00	26,2	15,0	0,9	0,0	59,0	92,5	98,8	108,6	82,8	0,0	0,0	6,9
Espinaca	1,00	26,2	15,0	0,9	0,0	59,0	92,5	98,8	108,6	82,8	0,0	0,0	6,9
Cebolla larga	1,00	26,2	15,0	0,9	0,0	59,0	92,5	98,8	108,6	82,8	0,0	0,0	6,9
Tomate de mesa	1,15	41,1	29,2	16,3	2,6	78,2	108,5	114,6	125,6	99,7	12,1	0,0	26,9
Pimentón	1,05	31,2	19,7	6,0	0,0	65,4	97,8	104,1	114,3	88,5	0,4	0,0	13,6

Cultivos seleccionados

NECESIDAD DE RIEGO NETA (NRn) (mm/mes)													
Cultivo	Kc	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Frijol	1,20	46,1	33,9	21,4	7,5	84,6	113,9	119,9	131,3	105,4	18,0	0,0	33,5
Maíz	1,20	46,1	33,9	21,4	7,5	84,6	113,9	119,9	131,3	105,4	18,0	0,0	33,5
Cebolla larga	1,00	26,2	15,0	0,9	0,0	59,0	92,5	98,8	108,6	82,8	0,0	0,0	6,9
Tomate de mesa	1,15	41,1	29,2	16,3	2,6	78,2	108,5	114,6	125,6	99,7	12,1	0,0	26,9