ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Título del trabajo

DISEÑO DE SISTEMA PARA LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISES EN LA IRRIGACIÓN DE CULTIVOS EN VIVIENDAS RURALES DEL CANTÓN BABA, LOS RÍOS, ECUADOR

Previo la obtención del Título de:

MAESTRÍA DE INGENERIA CIVIL CON MENCIÓN EN CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO

Presentado por:

WILLIAMS ALEXANDER CARRIEL CONTRERAS

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi familia, cuyo apoyo incondicional y cariño han sido la base de todos mis logros. A mis padres, por inculcarme valores y enseñarme a perseverar ante los retos de la vida. A mis hermanas, por ser fuente constante de motivación y aliento. También dedico este esfuerzo a mi alma mater, cuya formación durante mi grado y ahora en mi posgrado ha sido fundamental para mi crecimiento profesional y personal.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a mis profesores y tutores de la Universidad, quienes con su guía han enriquecido mi formación académica. A mis compañeros de maestría, por su apoyo y camaradería durante este proceso. Extiendo mi gratitud a las personas e instituciones que brindaron recursos y espacios para la realización de este proyecto. Finalmente, agradezco a mi familia, cuyo respaldo y compromiso han sido esenciales para alcanzar este logro.

DECLARACIÓN EXPRESA

Yo **Williams Alexander Carriel Contreras** acuerdo y reconozco que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 05 de diciembre de 2024

Firmado electrónicamente por:
WILLIAMS ALEXANDER CARRIEL CONTRERAS

Williams Alexander Carriel Contreras
C.I. 095355598-4

EVALUADORES

Firmado electrónicamente por:
SAMANTHA ELIZABETH
HIDALGO ASTUDILLO

M.Sc. SAMANTHA ELIZABETH
HIDALGO ASTUDILLO
PROFESOR DE LA MATERIA

Firmado electrónicamente por:
NADIA ROSAURA
QUIJANO ARTEAGA

M.Sc. NADIA ROSAURA
QUIJANO ARTEAGA
PROFESOR DE LA MATERIA

Firmado electrónicamente por:
ANABEL PATRICIA
CASTILLO RODRIGUEZ

M.Sc. ANABEL PATRICIA
CASTILLO RODRIGUEZ
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente proyecto aborda la problemática de la gestión de aguas grises en comunidades rurales de Ecuador, con acceso limitado al agua y deficiencias en el saneamiento que afectan la calidad de vida. El objetivo principal es diseñar un sistema sostenible de tratamiento y reutilización de aguas grises para uso en riego agrícola. Se planteó la hipótesis de que la implementación de un humedal construido, adaptado a las condiciones locales y utilizando materiales y especies vegetales de bajo costo y fácil acceso, puede reducir la dependencia de fuentes externas de agua. Este estudio se justifica por la necesidad de optimizar los recursos hídricos y mitigar riesgos ambientales en zonas rurales. El desarrollo del proyecto incluyó la caracterización inicial del agua cruda y tratada mediante análisis físicos, químicos y microbiológicos, acorde a los parámetros de calidad vigente en el país. Se diseñó, construyó y evaluó un prototipo de tratamiento utilizando jacinto de agua como principal elemento de tratamiento. Las pruebas se realizaron en etapas de tratamiento, midiendo la eficiencia del sistema. Los resultados demostraron la efectividad del sistema en mejorar la calidad del agua, con una remoción significativa de contaminantes. Se logró un cumplimiento del 87.5% de los parámetros establecidos en la normativa, mientras que el 12.5% restante mostró un cumplimiento parcial. El sistema propuesto es eficaz para tratar aguas grises en zonas rurales, pero requiere ajustes para mejorar su desempeño y cumplir completamente con la normativa.

Palabras Clave: tratamiento de aguas grises, humedales construidos, riego agrícola, sostenibilidad hídrica, comunidades rurales.

ABSTRACT

This project addresses the issue of greywater management in rural communities of Ecuador, where limited access to water and inadequate sanitation significantly impacts the quality of life. The main objective is to design a sustainable system for the treatment and reuse of greywater for agricultural irrigation. The hypothesis proposed is that implementing a constructed wetland, adapted to local conditions and utilizing low-cost, easily accessible materials and plant species, can reduce dependence on external water sources. This study is justified by the need to optimize water resources and mitigate environmental risks in rural areas. The project development included the initial characterization of raw and treated water through physical, chemical, and microbiological analyses, in accordance with the current quality parameters in the country. A treatment prototype was designed, constructed, and evaluated, using water hyacinth as the primary treatment element. The tests were conducted in treatment stages, measuring the system's efficiency. The results demonstrated the system's effectiveness in improving water quality, with a significant removal of contaminants. A compliance rate of 87.5% with the established parameters was achieved, while the remaining 12.5% showed partial compliance. The proposed system is effective for treating greywater in rural areas, but adjustments are needed to optimize its performance and fully comply with regulations.

Keywords: *greywater treatment, constructed wetlands, agricultural irrigation, water sustainability, rural communities.*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....5
RESUMEN.....I
ABSTRACT II
ÍNDICE GENERAL III
ABREVIATURAS..... VIII
SIMBOLOGÍA..... X
ÍNDICE DE FIGURAS XI
ÍNDICE DE TABLAS.....XIV
CAPÍTULO 1.....16
1. Introducción 16
1.1 Antecedentes 18
1.2 Localización..... 22
1.3 Estudios previos 24
1.4 Problemática que resolver..... 24
1.5 Justificación..... 28
1.6 Objetivos 30
1.6.1 Objetivo General..... 30
1.6.2 Objetivos Específicos..... 30
CAPÍTULO 2.....31
2. Desarrollo del proyecto.....31
2.1 Marco conceptual..... 31
2.1.1 Agua Residual..... 31
2.1.2 Tipos de agua residual..... 31
2.1.2.1 Clasificación de aguas residuales según el origen. 31
2.1.2.2 Clasificación de aguas residuales domésticas.....32
2.1.3 Características de las Aguas Residuales..... 32

2.1.4 Características Físicas de las Aguas Residuales. 33
2.1.4.1 Color 33
2.1.4.2 Olor 34
2.1.4.3 Sólidos 34
2.1.4.4 Temperatura 35
2.1.4.5 Densidad.....35
2.1.4.6 Turbiedad.....36
2.1.5 Características Químicas de las Aguas Residuales..... 36
2.1.5.1 Materia Orgánica 36
2.1.5.2 Hidratos de Carbono.....36
2.1.5.3 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) 37
2.1.5.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO) 37
2.1.5.5 Oxígeno Disuelto (OD).....38
2.1.5.6 Grasas y Aceites.....38
2.1.5.7 Potencial de Hidrógeno (pH).....39
2.1.5.8 Tensoactivos.....39
2.1.6 Características Biológicas..... 39
2.1.6.1 Microorganismos patógenos.....39
2.1.6.2 Bacterias.....40
2.1.6.3 Virus.....40
2.1.6.4 Protozoarios.....41
2.1.7 Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua residual..... 41
2.1.8 Humedales construidos (Constructed Wetland)..... 42
2.1.9 Tipos de Humedales Construidos..... 43
2.1.9.1 Humedal construido con flujo superficial.....43
2.1.9.2 Humedal construido con flujo subsuperficial.....45

2.1.9.3 Humedal construido subsuperficial de flujo horizontal (Horizontal Flow Constructed Wetland - HFCW) 45
2.1.9.4 Humedal construido subsuperficial de flujo vertical (Vertical Flow Constructed Wetland - VFCW) 47
2.1.10 Consideraciones de diseño 49
2.2 Enfoques de Diseño de los Humedales Construidos 52
2.2.1 Regla general (Rule of the thumb) 53
2.2.2 Ecuaciones de regresión 55
2.2.3 Flujo a pistón k-C* 56
2.2.4 Gráficos para cálculo por carga másica 57
2.2.5 Enfoque P-k-C* 58
2.3 Marco Legal 60
2.3.1 Constitución de la República del Ecuador 60
2.3.2 Ley Orgánica de Recursos hídricos Uso y Aprovechamiento del Agua. 60
2.3.3 Ley Orgánica de la Salud 61
2.3.4 Ley de gestión ambiental 61
2.3.5 Acuerdo 097-A Norma de Calidad Ambiental y descarga de efluentes: recurso agua. 61
2.4 Marco metodológico 63
2.4.1 Metodología secuencial (Waterfall Methodology) 63
2.4.2 Aplicabilidad de la metodología en el proyecto 63
2.4.3 Metodología del proyecto 63
2.4.3.1 Investigación y revisión de literatura y normativa 63
2.4.3.2 Diagnóstico inicial de condiciones en la comunidad rural 64
2.4.3.3 Caracterización de aguas residuales 64
2.4.3.4 Diseño de sistemas adaptados a condiciones locales 64
2.4.3.5 Construcción y evaluación del prototipo 64
2.4.3.6 Diagrama de metodología empleada 65

2.5 Trabajo de campo 66
2.5.1 Evaluación de recursos hídricos existentes 66
2.5.2 Levantamiento de información sobre los habitantes y las viviendas 66
2.5.3 Recolección de muestras de aguas grises 66
2.5.4 Evaluación de prácticas de uso del agua 67
2.5.5 Validación de tecnologías apropiadas para el contexto 67
2.6 Tabulación de datos 67
2.6.1 Organización de Datos: 67
2.6.2 Clasificación y Agrupación: 67
2.6.3 Análisis Descriptivo: 68
2.6.4 Análisis Comparativo: 68
2.6.5 Estimaciones del Tratamiento: 68
2.7 Solución por diseñar 69
2.7.1 Justificación del Diseño 69
CAPÍTULO 3 70
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 70
3.1 Resultados Esperados 70
3.2 Análisis de resultados 71
3.2.1 Encuesta realizada 71
3.2.1.1 Análisis de Sección 1: Datos Generales de la Vivienda 73
3.2.1.2 Análisis de Sección 2: Acceso y Consumo de Agua 76
3.2.1.3 Análisis de Sección 3: Aguas residuales y Saneamiento 83
3.2.1.4 Análisis de Sección 4: Satisfacción y mejoras 86
3.2.1.5 Análisis de Sección 5: Criterios de selección del sistema 87
3.2.2 Especificaciones técnicas 93
3.2.3 Análisis de la calidad del agua inicial 95
3.2.3.1 Toma de muestras del agua 95

3.2.3.2 Resultados de las muestras entregadas 98
3.3 Diseño de la solución 102
3.3.1 Evaluación de la situación actual 102
3.3.1.1 Acceso y Consumo de Agua 102
3.3.1.2 Aguas residuales y Saneamiento 105
3.3.2 Prototipo para tratamiento de las aguas grises 110
3.3.2.1 Materiales del Prototipo 110
3.3.2.2 Características del Filtro 111
3.3.2.3 Consideraciones de Implementación 114
3.3.2.4 Periodo de Adaptación 115
3.3.2.5 Puesta en Funcionamiento y Monitoreo 116
3.3.2.6 Funcionamiento del Prototipo 116
3.3.3 Diseño del Humedal Construido 124
3.3.3.1 Parámetros Considerados en el Diseño 124
3.3.4 Evaluación del prototipo 127
CAPÍTULO 4 137
4. Conclusiones Y Recomendaciones 137
4.1 Conclusiones 137
4.2 Recomendaciones 138
BIBLIOGRAFÍA 140
ANEXOS 146
ANEXO 1 – ENCUESTA REALIZADA EN LA COMUNIDAD PARA LA EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y SANEAMIENTO 147
ANEXO 2 – RESULTADOS DE ENCUESTAS REALIZADAS 152

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ONU	Organización de las Naciones Unidas
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censo
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
ODM	Objetivos de Desarrollo del Milenio
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
MAATE	Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica
UNICEF	Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia
PIB	Producto Interno Bruto
SENAGUA	Secretaría Nacional de Agua Potable y Saneamiento
ARCA	Agencia de Regulación y Control del Agua
ENAS	Estrategia Nacional de Agua Potable y Saneamiento
ASH	Agua, Saneamiento e Higiene
GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
ST	Sólidos Totales
SDT	Sólidos disueltos totales
SST	Sólidos suspendidos totales
DBO_5	Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días
DQO	Demanda Química de Oxígeno
OD	Oxígeno Disuelto
pH	Potencial de Hidrógeno
HC	Humedal construido
CW	Constructed Wetland
HCFS	Humedal construido de flujo superficial
HCSSFH	Humedal construido subsuperficial de flujo horizontal
HFCW	Horizontal Flow Constructed Wetland
HCSSFV	Humedal construido subsuperficial de flujo vertical
VFCW	Vertical Flow Constructed Wetland
IWA	International Water Association
HLR	Hydraulic Loading Rate
NT	Nitrógeno Total

PT	Fósforo Total
Q	Caudal
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundario del Ministerio del Ambiente
RAS	Relación de absorción de sodio ajustada
ICP	Plasma acoplado por inducción
UV	Ultravioleta
VIS	Visible

SIMBOLOGÍA

mg	Miligramo
g	Gramo
cm	Centímetro
m	Metro
Kg	Kilogramo
m^2	Metro cuadrado
m^3	Metro cúbico
d	día
Hab-eq	Habitante equivalente
ml	Mililitro
L	Litro
Al	Aluminio
As	Arsénico
Be	Berilio
B	Boro
Cd	Cadmio
Zn	Cinc
Co	Cobalto
Cu	Cobre
NMP	Número más probable
Cr	Cromo
F	Flúor
Fe	Hierro
Hg	Mercurio
Mn	Manganeso
Mo	Molibdeno
Ni	Níquel
Pb	Plomo
Se	Selenio
V	Vanadio
mEq	Miliequivalente
milimhos	Milimhos

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Cobertura de servicios básicos nacional del Ecuador (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2023).....19
Figura 1.2 – Porcentaje de acceso a servicios básicos según la zona a nivel nacional (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2023) 20
Figura 1.3 – Imagen satelital de la ubicación de la comunidad rural (Google, 2024) 22
Figura 1.4 – Predio de la comunicad rural (Google, 2024) 23
Figura 1.5 – Comunicad rural del cantón Baba (Carriel, 2024).....23
Figura 1.6 – Objetivos de Desarrollo Sostenible (Organización de Naciones Unidas, 2015) 25
Figura 1.7 – Registro de Gestión de Aguas Residuales (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2023, pág. 20) 26
Figura 1.8 – Cobertura de servicios básicos del cantón Baba, Los Ríos (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2023).....28
Figura 1.9 – Porcentaje de acceso a servicios básicos según la zona del cantón Baba, Los Ríos (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2023) 29
Figura 2.1 – Tipos de Humedales construidos (Hoffman, Platzer, Winker, & Von Muench, 2011, pág. 9) 43
Figura 2.2 – Humedal construido con flujo superficial (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 115) 44
Figura 2.3 – Humedal construido con flujo superficial (Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Globierno de la República de México, 2019, pág. 16) 44
Figura 2.4 – Humedal construido subsuperficial con flujo horizontal (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 117) 46
Figura 2.5 – Humedal construido subsuperficial con flujo vertical (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 119) 48
Figura 2.6 – Diagrama de metodología empleada en el proyecto (Carriel, 2024) 65
Figura 3.1 – Encuesta realizada a moradores de la comunidad rural (Carriel, 2024)....71
Figura 3.2 – Encuesta realizada a moradores de la comunidad rural (Carriel, 2024)....72
Figura 3.3 – Encuesta realizada a moradores de la comunidad rural (Carriel, 2024)....72
Figura 3.4 – Diagrama de Pregunta No. 1 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)....73

Figura 3.5 – Diagrama de Pregunta No. 2 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)....74
Figura 3.6 – Diagrama de Pregunta No. 3 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)....75
Figura 3.7 – Diagrama de Pregunta No. 4 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)....76
Figura 3.8 – Diagrama de Pregunta No. 5 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)....77
Figura 3.9 – Diagrama de Pregunta No. 5 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)....78
Figura 3.10 – Diagrama de Pregunta No. 6 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)..79
Figura 3.11 – Diagrama de Pregunta No. 6 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)..80
Figura 3.12 – Diagrama de Pregunta No. 7 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)..81
Figura 3.13 – Diagrama de Pregunta No. 7 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)..82
Figura 3.14 – Diagrama de Pregunta No. 8 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)..83
Figura 3.15 – Diagrama de Pregunta No. 9 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)..84
Figura 3.16 – Diagrama de Pregunta No. 10 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)85
Figura 3.17 – Diagrama de Pregunta No. 11 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)86
Figura 3.18 – Diagrama de Pregunta No. 12 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)87
Figura 3.19 – Diagrama de Pregunta No. 13 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)88
Figura 3.20 – Diagrama de Pregunta No. 14 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)89
Figura 3.21 – Diagrama de Pregunta No. 15 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)90
Figura 3.22 – Diagrama de Pregunta No. 16 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)91
Figura 3.23 – Diagrama de Pregunta No. 17 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)92
Figura 3.24 – Adecuación del lavadero previo a la toma de muestras en la cocina de la Vivienda No. 3 (Carriel, 2024) 95
Figura 3.25 – Adecuación del recipiente previo a la toma de muestras en la cocina de la Vivienda No. 3 (Carriel, 2024) 96
Figura 3.26 – Lavado de prendas de la Vivienda No. 3 (Carriel, 2024) 97
Figura 3.27 – Muestra de aguas de zona de lavado de la Vivienda No. 3 (Carriel, 2024) 97
Figura 3.28 – Recolección de aguas grises en Vivienda No. 3 (Carriel, 2024).....98
Figura 3.29 – Sistema de bombeo de agua de la comunidad rural (Carriel, 2024).....102
Figura 3.30 – Tanque elevado de Vivienda No.3 (Carriel, 2024).....103
Figura 3.31 – Almacenamiento de aguas en sanitario de Vivienda No. 5 (Carriel, 2024) 103
Figura 3.32 – Tanque elevado de Vivienda No.3 (Carriel, 2024).....104
Figura 3.33 – Descarga de aguas grises de Vivienda No. 4 (Carriel, 2024).....105
Figura 3.34 – Descarga de aguas grises de Vivienda No. 4 (Carriel, 2024).....106

Figura 3.35 – Zona de lavado de Vivienda No. 2 (Carriel, 2024).....107
Figura 3.36 – Pozo séptico antiguo de Vivienda No. 4 (Carriel, 2024) 107
Figura 3.37 – Descarga de aguas grises de Vivienda No. 5 (Carriel, 2024).....108
Figura 3.38 – Descarga de aguas grises de Vivienda No. 5 (Carriel, 2024).....108
Figura 3.39 – Pozo séptico actual de Vivienda No. 4 (Carriel, 2024) 109
Figura 3.40 – Chiquero de animales en Vivienda No. 4 (Carriel, 2024).....109
Figura 3.41 – Materiales empleados para la elaboración del filtro (Carriel, 2024).....111
Figura 3.42 – Prototipo construido para el tratamiento (Carriel, 2024) 112
Figura 3.43 – Prototipo de filtro subsuperficial (Carriel, 2024).....113
Figura 3.44 – Geotextil empleado en el prototipo (Carriel, 2024) 113
Figura 3.45 – Limpieza de materiales empleados en el prototipo (Carriel, 2024).....114
Figura 3.46 – Limpieza de materiales empleados en el prototipo (Carriel, 2024).....114
Figura 3.47 – Limpieza de materiales empleados en el prototipo (Carriel, 2024).....115
Figura 3.48 – Prototipo construido para el tratamiento (Carriel, 2024) 115
Figura 3.49 – Muestra de agua tratada en Día 0 (Carriel, 2024) 117
Figura 3.50 – Muestra de agua tratada en Día 1 (Carriel, 2024) 118
Figura 3.51 – Muestra de agua tratada en Día 7 (Carriel, 2024) 119
Figura 3.52 – Muestra de agua tratada en Día 9 (Carriel, 2024) 120
Figura 3.53 – Muestra de agua tratada en Día 10 (Carriel, 2024) 121
Figura 3.54 – Muestra de agua tratada en Día 18 (Carriel, 2024) 122
Figura 3.55 – Muestra de agua tratada en Día 21 (Carriel, 2024) 123
Figura 3.56 – Dimensión de humedales construidos recomendados (Brix & Arias, 2005, pág. 497) 125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 – Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, págs. 61-62).....32
Tabla 2.2 – Tipos de contaminantes en las aguas residuales (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, pág. 63) 41
Tabla 2.3 – Ventajas y Desventajas de humedales construidos con flujo superficial (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 116) ...45
Tabla 2.4 – Ventajas y Desventajas de humedales construidos subsuperficiales de flujo horizontal (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 118) 47
Tabla 2.5 – Ventajas y Desventajas de humedales construidos subsuperficiales de flujo vertical (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 120) 49
Tabla 2.6 – Tabla comparativa de consideraciones de diseño para humedales construidos (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, págs. 115-120) 49
Tabla 2.7 – Condiciones físicas y operativas en el diseño de humedales construidos (Dotro, y otros, 2017, pág. 35).....52
Tabla 2.8 – Enfoques de diseño de humedales construidos (Dotro, y otros, 2017, pág. 35) 53
Tabla 2.9 – Recomendaciones de diseño de regla general (Dotro, y otros, 2017, pág. 36) 54
Tabla 2.10 – Ventajas y Desventajas de regla general (Dotro, y otros, 2017, pág. 36).55
Tabla 2.11 – Ecuaciones de regresión para humedales construidos (Dotro, y otros, 2017, pág. 36) 55
Tabla 2.12 – Ventajas y Desventajas de las ecuaciones de regresión (Dotro, y otros, 2017, pág. 36) 56
Tabla 2.13 – Ventajas y Desventajas de Flujo a pistón k-C* (Dotro, y otros, 2017, pág. 38) 57
Tabla 2.14 – Ventajas y Desventajas de los gráficos de cálculo por carga másica (Dotro, y otros, 2017, pág. 39).....58
Tabla 2.15 – Ventajas y Desventajas del enfoque P-k-C* (Dotro, y otros, 2017, págs. 40-41) 59

Tabla 3.1 – Criterios de calidad de aguas para riego agrícola (Ministerio del Ambiente, 2015) 93
Tabla 3.2 – Parámetros de los niveles de la calidad del agua para riego (Ministerio del Ambiente, 2015) 94
Tabla 3.3 – Resultado de muestras de laboratorio (Carriel, 2024) 99
Tabla 3.4 – Caracterización de muestras del agua tratada (Carriel, 2024) 117
Tabla 3.5 – Recomendaciones de diseño de área superficial (Dotro, y otros, 2017, pág. 36) 124
Tabla 3.6 – Áreas de diseño para el humedal (Carriel, 2024) 126
Tabla 3.7 – Recomendaciones de diseño de profundidad (Dotro, y otros, 2017, pág. 71) 126
Tabla 3.8 – Resultado de muestras de laboratorio (Carriel, 2024) 128

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La escasez de agua y la contaminación de los recursos hídricos son problemáticas que afectan a numerosas comunidades alrededor del mundo, especialmente en regiones en vías de desarrollo. El crecimiento poblacional, la urbanización acelerada y las demandas crecientes de los sectores agrícola, industrial y energético han intensificado la presión sobre los recursos hídricos disponibles. Según estimaciones de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), miles de millones de personas podrían carecer de acceso adecuado al agua potable y saneamiento para el año 2030 si no se implementan medidas efectivas y sostenibles. (Organización de Naciones Unidas, 2015)

En Ecuador, estas problemáticas se evidencian con mayor notoriedad en zonas rurales como el cantón Baba, ubicado en la provincia de Los Ríos. Datos recientes del Censo de Población y Vivienda 2022 revelan que este cantón presenta una cobertura de agua potable del 56.9% y un sistema de alcantarillado del 10.1%. (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2023)

Ante este panorama, la reutilización de aguas grises emerge como una solución viable y sostenible para mitigar la escasez de agua y mejorar las condiciones de saneamiento. Las aguas grises, que representan aproximadamente el 75% del volumen total de aguas residuales domésticas, contienen niveles de contaminación significativamente menores en comparación con las aguas negras, lo que facilita su tratamiento y posterior reutilización. (Eriksson, Auffarth, Henze, & Ledin, 2002, pág. 1)

La implementación de sistemas de tratamiento de aguas grises puede proporcionar una fuente adicional de agua para actividades como el riego agrícola, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y al uso eficiente de los recursos hídricos. El presente proyecto tiene como objetivo diseñar sistemas sostenibles de recolección y reutilización de aguas grises en viviendas rurales del recinto San José, en el cantón Baba.

Mediante la evaluación de las condiciones actuales de gestión del agua en la zona y la consideración de factores geográficos, sociales y ambientales, se propone desarrollar una solución adaptada a las necesidades específicas de la comunidad. La construcción y prueba de un prototipo permitirá evaluar la viabilidad y eficiencia del sistema propuesto, así como su potencial impacto en la calidad de vida de los residentes.

Este estudio se basa en una revisión de la literatura sobre sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises, tanto a nivel nacional como internacional, y considera las normativas y estándares de calidad de agua vigentes en Ecuador. La metodología incluye la recolección y análisis de datos locales, el diseño del sistema, y la evaluación de su desempeño. Se reconocen limitaciones como la disponibilidad de recursos financieros y técnicos, así como posibles restricciones climáticas y culturales que pueden influir en la implementación y aceptación de la solución propuesta.

La importancia de este proyecto radica en su contribución al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 6, que busca garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. Además, el proyecto pretende servir como modelo replicable para otras comunidades rurales con condiciones similares, promoviendo prácticas de gestión hídrica más sostenibles. (Organización de Naciones Unidas, 2015)

Finalmente, mediante el proyecto se aborda una necesidad crítica en la gestión de recursos hídricos en zonas rurales de Ecuador, proponiendo una solución técnica y sostenible. Los resultados esperados incluyen mejoras en el acceso y calidad del agua en la comunidad, sino también aportes al conocimiento y prácticas relacionadas con la reutilización de aguas grises en contextos similares.

1.1 Antecedentes

El acceso al agua potable, el saneamiento y la higiene ha sido una preocupación global desde hace décadas, reconocida como una necesidad humana fundamental con impactos directos en la salud y el bienestar. A pesar de los avances, se proyecta que, para 2030, miles de millones de personas aún no contarán con estos servicios básicos si no se intensifican los esfuerzos. Esto prueba la urgencia de abordar estas necesidades acordes a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos en 2015. (Organización de Naciones Unidas, 2015)

El crecimiento poblacional y la urbanización han incrementado significativamente la presión sobre los recursos hídricos. Diferentes estudios demuestran que la demanda de agua supera el crecimiento demográfico, resultando en que la mitad de la población mundial experimente escasez de agua al menos un mes al año. Este fenómeno podría intensificarse debido al cambio climático, lo que ha llevado a la comunidad científica a investigar soluciones como la reutilización de aguas residuales. (Organización de Naciones Unidas, 2015)

El uso de aguas residuales para riego se ha convertido en una práctica común, ya que estas no solo proporcionan agua, sino también nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo para el desarrollo de los cultivos. Sin embargo, esta práctica conlleva riesgos significativos para la salud, como la transmisión de enfermedades causadas por bacterias y parásitos presentes en las excretas humanas. Para mitigar estos riesgos, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha recomendado el uso exclusivo de aguas residuales tratadas para riego, cumpliendo con las directrices sobre calidad microbiológica (Ayres Rachel; Mara David & Organización Mundial de la Salud, 1997, pág. 7)

Las aguas grises, que constituyen aproximadamente el 75% del volumen de las aguas residuales residenciales combinadas, han captado especial atención debido a su menor nivel de contaminación en comparación con las aguas residuales municipales, ya que no contienen heces, orina ni papel higiénico. (Eriksson, Auffarth, Henze, & Ledin, 2002, pág. 1)

Aunque se ha avanzado en la investigación sobre la reutilización de aguas residuales, persisten brechas importantes en el contexto ecuatoriano. En Ecuador, se han implementado diferentes sistemas para el tratamiento de aguas residuales, con avances en diversas regiones. Un ejemplo relevante es la publicación de un tratamiento alternativo mediante humedales construidos realizado por Carlos Matovelle el 2023, que fue aplicada a las condiciones de la Sierra, en la región andina. Estos proyectos buscan mejorar las condiciones sanitarias en estas áreas, además de generar conocimiento y expandir la literatura sobre el tratamiento de aguas residuales en el país. (Matovelle, Quinteros, & Ochoa, 2023)

Según los datos del Censo de Población y Vivienda 2022, publicados por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos de Ecuador (INEC), se han identificado los niveles de cobertura de los distintos servicios básicos a nivel nacional. La Figura 1.1 detalla los porcentajes de cobertura para servicios básicos como electricidad, agua potable, alcantarillado y recolección de basura. (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2023)

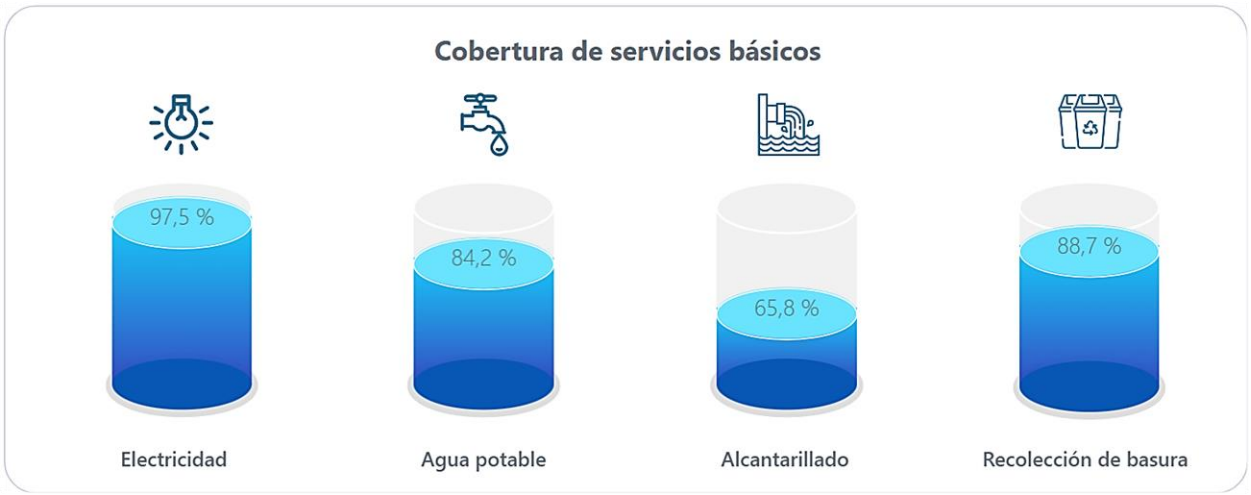


Figura 1.1 – Cobertura de servicios básicos nacional del Ecuador (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2023)

La Figura 1.2 detalla que la cobertura de servicios básicos en Ecuador muestra disparidades significativas entre las zonas urbanas y rurales, evidenciando una necesidad urgente de estudios que aborden estas desigualdades. Mientras que la cobertura de electricidad es alta y relativamente equitativa en ambas zonas 98.9% en áreas urbanas y 94.9% en rurales, existen disparidades significativas en otros servicios.

El acceso al agua potable es considerablemente mayor en zonas urbanas 93.9% en comparación con las rurales 66.9%, al igual que el alcantarillado, con un 82.7% en áreas urbanas frente a un 35.8% en rurales. La recolección de basura también muestra una diferencia, con una cobertura del 98.8% en áreas urbanas y solo el 70.8% en rurales. (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2023)

Las disparidades en el acceso a servicios básicos como el agua potable y el saneamiento en Ecuador reflejan una problemática social y cultural, donde las comunidades rurales enfrentan mayores desafíos debido a la falta de infraestructura y recursos. El acceso al agua potable y el saneamiento adecuado en zonas rurales de Ecuador ha sido un desafío. Muchas comunidades rurales carecen de infraestructura básica para el suministro de agua y el tratamiento de aguas residuales. En ciertas áreas, las fuentes de agua son limitadas y existe la posibilidad de que se encuentren contaminadas, lo que podría afectar la salud y el bienestar de la población. (Secretaría Nacional de Agua Potable y Saneamiento, 2016, pág. 38)

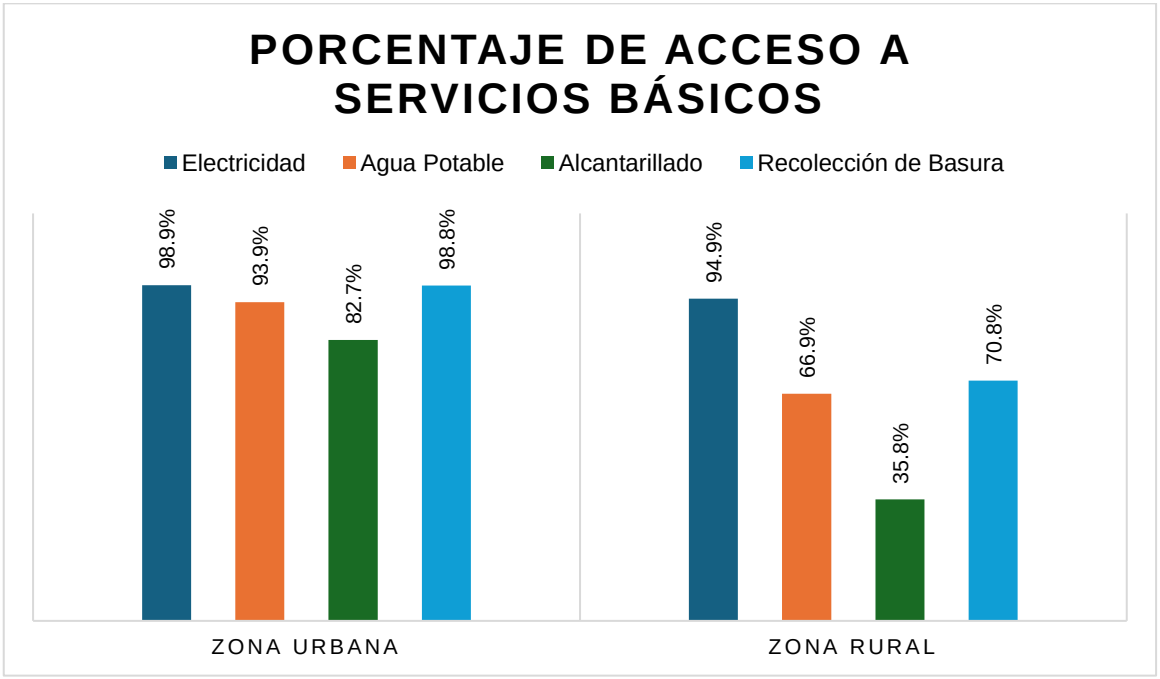


Figura 1.2 – Porcentaje de acceso a servicios básicos según la zona a nivel nacional (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2023)

La problemática del acceso desigual al agua potable y al saneamiento en Ecuador está directamente relacionada con los desafíos actuales y futuros que plantea el cambio climático. La creciente escasez de agua, agravada por la presión sobre los recursos hídricos y la falta de infraestructura en las zonas rurales, subraya la necesidad de soluciones como la reutilización de aguas residuales. (Organización de Naciones Unidas, 2015)

1.2 Localización

El cantón Baba, situado en la provincia de Los Ríos en la región Costa del Ecuador, tiene una extensión territorial de 515.5 kilómetros cuadrados y se encuentra a unos 45 minutos de Babahoyo, la capital provincial. Está compuesto por la parroquia urbana Baba y las parroquias rurales Guare e Isla de Bejucal. Limita al norte con Pueblo Viejo y Vinces, al sur con el cantón Salitre de la provincia del Guayas, al este con Babahoyo y Pueblo Viejo, y al oeste nuevamente con el cantón Vinces. (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Baba, 2019)

Figura 1.3 – Imagen satelital de la ubicación de la comunidad rural (Google, 2024)

En la Figura 1.3 se muestra la ubicación de la comunidad rural de análisis, donde se desarrollará el proyecto, está a 9,3 kilómetros de la cabecera cantonal de Baba y pertenece a la parroquia Isla de Bejucal, en concreto en el recinto San José. El predio destinado para el desarrollo del proyecto está claramente delimitado en la Figura 1.4. Esta imagen se muestra la zona donde se realizará el diseño de los sistemas para la reutilización de aguas grises en un predio de 4,300 m².

Figura 1.4 – Predio de la comunicad rural (Google, 2024)

La Figura 1.5 del predio se muestra la comunidad rural del cantón Baba, mostrando que el lote alberga diversas viviendas dispersas y se dedica al cultivo de plátano verde.

Figura 1.5 – Comunicad rural del cantón Baba (Carriel, 2024)

1.3 Estudios previos

En la localidad donde se llevará a cabo este proyecto, no se han implementado previamente iniciativas similares. Aunque existe información relacionada con la implementación de sistemas de reutilización de aguas grises en diferentes ciudades, en Ecuador, esta información es limitada. Se han identificado algunas iniciativas privadas que comercializan sistemas para la reutilización de aguas grises, pero no se cuenta con una documentación científica sobre su aplicación en la región Costa. Por lo tanto, se tomará en consideración la información de proyectos e iniciativas en países con condiciones similares, como otros países en vías de desarrollo.

Además, para la realización del proyecto, se tomarán en consideración los parámetros de evaluación de aguas establecidos en la normativa nacional, así como otros documentos relevantes que servirán para la ejecución del proyecto.

1.4 Problemática que resolver

La formulación de los ODS en la agenda de desarrollo para el año 2030, adoptada en por los estados miembros de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), representa un avance al proponer metas que buscan ampliar las ya establecidas en los anteriores Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM). (Organización de Naciones Unidas, 2015)

El objetivo 6 de los ODS se centra en garantizar que la población tenga acceso a servicios de agua y saneamiento gestionados de manera segura. A diferencia de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), que se enfocaron en medir la cobertura de servicios de agua y saneamiento. Estos cambios implican no solo tener acceso a una fuente de agua para beber, sino que también debe ser accesible desde el hogar, suficiente para cubrir las necesidades individuales, cercana a la vivienda y libre de contaminación fecal o química. (Organización de Naciones Unidas, 2015)

La calidad se refiere a los servicios de saneamiento, a la exclusividad en el uso de instalaciones sanitarias, asegurando que las aguas residuales o desechos generados reciban tratamiento adecuado. Los ODS plantean un desafío para los países miembros, en primer lugar, al requerir la creación de instrumentos adecuados para medir estos parámetros, y, en segundo lugar, al demandar la implementación de políticas públicas

que contribuyan a mejorar las condiciones de vida de las personas. (Organización de Naciones Unidas, 2015)

Figura 1.6 – Objetivos de Desarrollo Sostenible (Organización de Naciones Unidas, 2015)

En el año 2015, Ecuador se comprometió con la Agenda de Desarrollo 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), integrando los principios de esta agenda en su Plan Nacional de Desarrollo. Este compromiso implicó la implementación de estrategias y políticas que buscan abordar problemáticas para el desarrollo sostenible del país. (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2017, pág. 9)

En 2022, el 62.9 % de los municipios gestionaron agua potable y saneamiento, y todos los municipios urbanos ofrecieron servicio de agua potable. La continuidad del servicio fue entre 1 y 5 horas mayor en áreas urbanas que en rurales. Además, el 91.4 % de los municipios contaron con sistemas de tratamiento de agua para consumo, de los cuales el 86 % cumplieron la norma INEN 1108. En cuanto al saneamiento, el 46.0 % de los municipios tenían alcantarillado diferenciado (sanitario y pluvial), y el 73.3 % contaron con plantas de tratamiento de aguas residuales previo a su descarga final, mientras que el 24.0% no realizaron tratamiento alguno. (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2023, pág. 6)

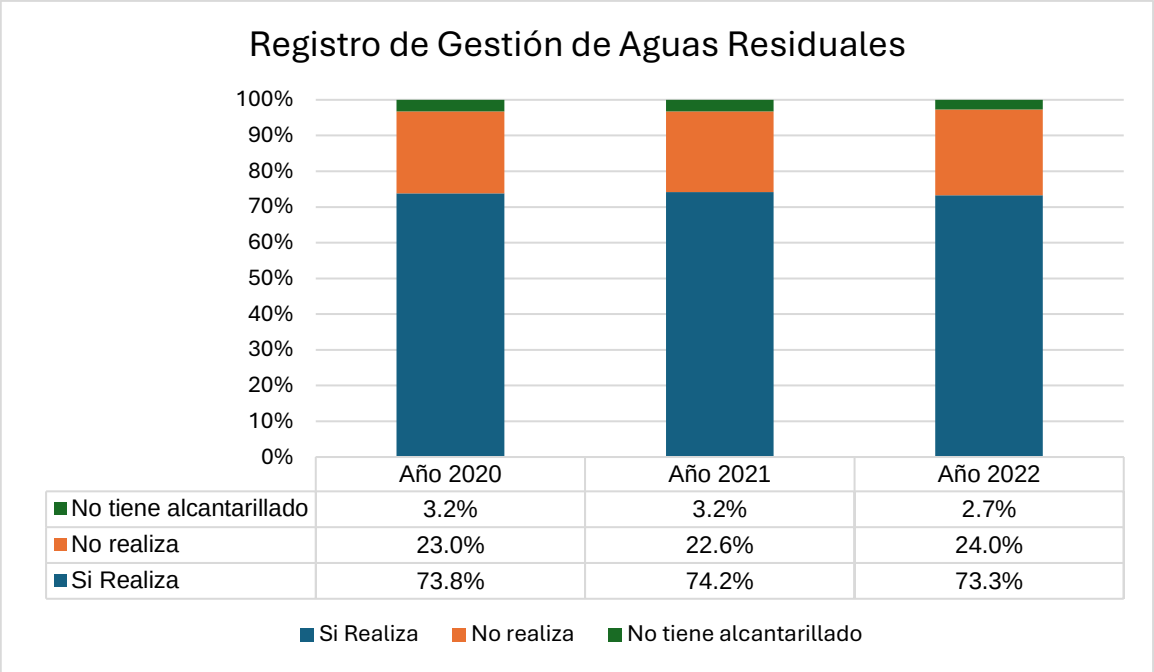


Figura 1.7 – Registro de Gestión de Aguas Residuales (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2023, pág. 20)

Aunque se han logrado avances en varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), Ecuador aún enfrenta desafíos significativos para cumplir con la Agenda 2030. Es importante el acceso a agua potable, el saneamiento y la higiene. (Naciones Unidas Ecuador, 2022, pág. 7)

La contaminación de los recursos hídricos, resultado de una gestión inadecuada de aguas residuales y residuos, afecta tanto el uso del agua como su productividad, lo que incrementa los costos de acceso y tratamiento. Esto, a su vez, repercute negativamente en el desarrollo de actividades productivas, especialmente en los sectores agropecuarios y piscícolas. (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica & UNICEF Ecuador, 2022, pág. 15)

El costo económico vinculado al acceso deficiente a servicios de agua, saneamiento e higiene se estima en 2300 millones de dólares, equivalente al 2.3% del PIB nacional. Los mayores impactos económicos se relacionan con los efectos en la salud, que ascienden a 1.3 billones de dólares. Otros impactos significativos están asociados a la gestión del recurso hídrico, en particular a los costos de tratamiento y transporte del agua. (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica & UNICEF Ecuador, 2022, pág. 17)

La emergencia sanitaria por COVID-19 ha evidenciado la importancia de contar con servicios de calidad y sostenibles de agua, saneamiento e higiene. El 32,2% de los hogares consume agua con contaminación bacteriológica. (Naciones Unidas Ecuador, 2022, pág. 17)

Las estadísticas ratifican que el tratamiento de las aguas superficiales a nivel rural es casi inexistente y usualmente se deriva de la falta de capacidad financiera y técnica de las Juntas Administradoras de Agua. (Secretaría Nacional de Agua Potable y Saneamiento, 2016, págs. 38-39)

La falta de infraestructura adecuada para la gestión del agua y las aguas residuales conduce a la sobreexplotación de recursos hídricos y a la contaminación ambiental. Es necesario desarrollar e implementar soluciones sostenibles que permitan una gestión eficiente del agua, especialmente en contextos rurales donde los recursos son limitados y la infraestructura es insuficiente.

1.5 Justificación

En el cantón Baba, provincia de Los Ríos, Ecuador, la gestión de los sistemas hidrosanitarios enfrenta serias deficiencias, como se refleja en los datos obtenidos del Censo 2022, que muestran una cobertura de agua potable del 56.9%, una cobertura de alcantarillado del 10.1% y una recolección de basura del 44.9%. (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2023)

Según la evaluación realizada por la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA) sobre los Prestadores Públicos de Servicios de Agua Potable y Saneamiento en Ecuador, el cantón Baba fue clasificado en la categoría D, indicando un nivel de eficiencia "Regular." Esto refleja que los servicios en Baba son insuficientes y presentan debilidades estructurales y de gestión, lo que afecta tanto la continuidad como la cobertura del servicio. Anteriormente, Baba estaba en la categoría C, pero su desempeño ha disminuido, lo que muestra un retroceso en la calidad del servicio. (Agencia de Regulación y Control del Agua, 2023, pág. 42)

La categoría D incluye a aquellos prestadores de servicio con un nivel de eficiencia entre el 30% y el 50%. (Agencia de Regulación y Control del Agua, 2023, pág. 10)

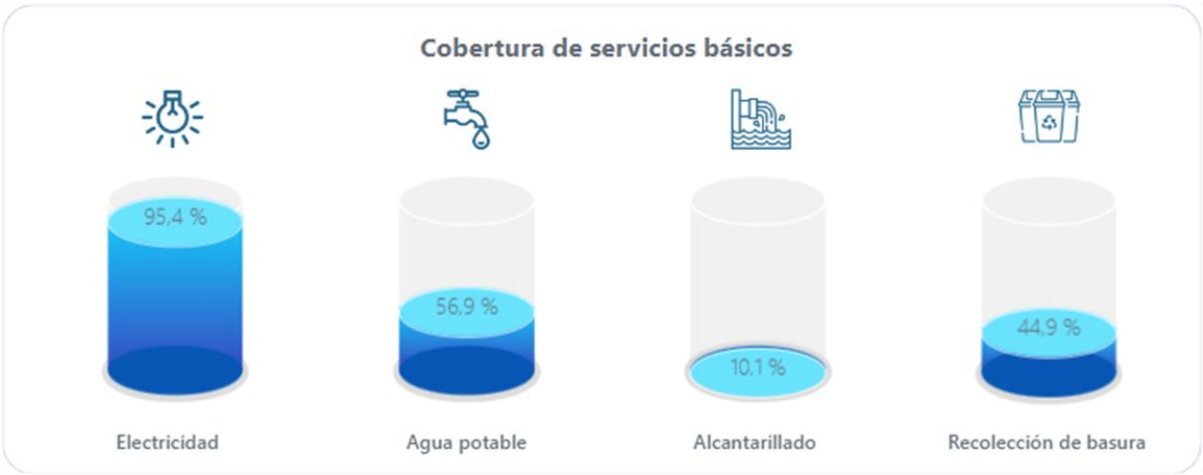


Figura 1.8 – Cobertura de servicios básicos del cantón Baba, Los Ríos (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2023)

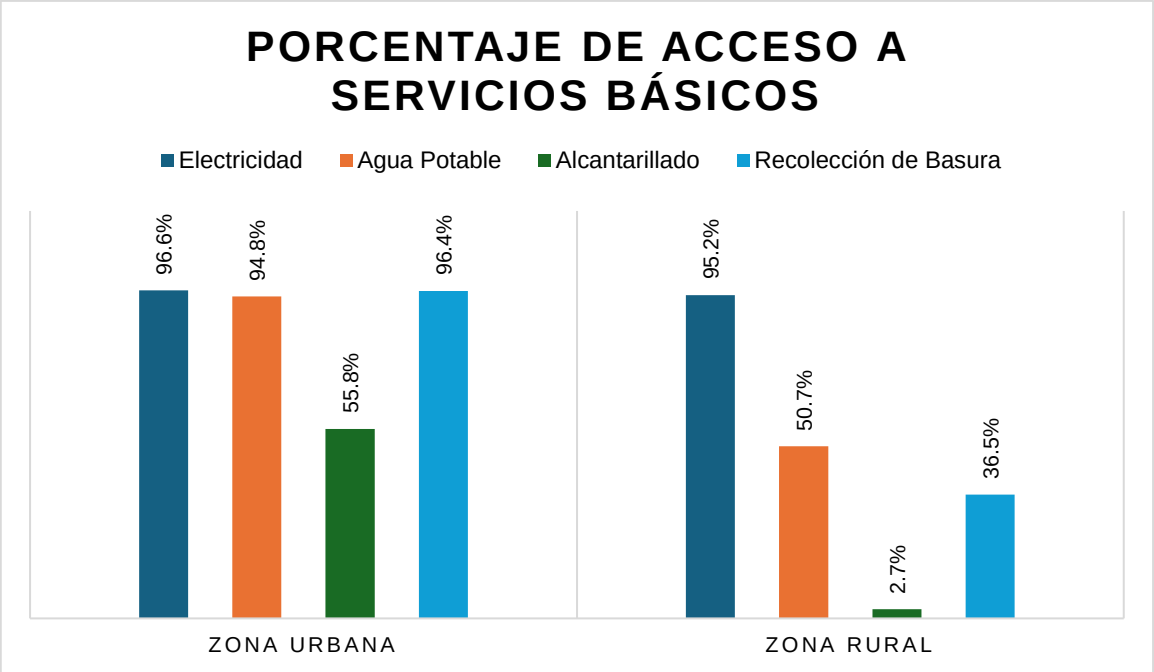


Figura 1.9 – Porcentaje de acceso a servicios básicos según la zona del cantón Baba, Los Ríos (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2023)

La sostenibilidad ambiental se aborda en el marco del Objetivo 6 de Desarrollo Sostenible, que busca garantizar el acceso seguro a servicios de agua y saneamiento para la población. El diseño de sistemas para la reutilización de aguas grises contribuye a este objetivo, apoyando la reducción del porcentaje de aguas residuales no tratadas y mejorando la sostenibilidad y calidad del recurso hídrico en la región. (Organización de Naciones Unidas, 2015)

En este contexto, el tratamiento y reutilización de aguas grises se posiciona como una solución viable para abordar la creciente escasez de agua, particularmente en países en vías de desarrollo, donde los recursos hídricos son limitados y la infraestructura pública enfrenta desafíos significativos. En diversas regiones, la recuperación de aguas residuales no solo complementa el suministro de agua, sino que se convierte en una fuente para garantizar la sostenibilidad hídrica a largo plazo.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Diseñar sistemas sostenibles de recolección y reutilización de aguas grises en viviendas rurales de Ecuador, mejorando el acceso al agua y el saneamiento, promoviendo la gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos mediante sistemas de tratamiento que permitan su uso en irrigación de cultivos.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Evaluar las condiciones existentes en la gestión del agua en la comunidad rural seleccionada, identificando las deficiencias y oportunidades en la gestión actual de recursos hídricos.

- Diseñar una solución técnica para la reutilización de las aguas residuales grises, maximizando el aprovechamiento de los recursos hídricos disponibles reduciendo la dependencia de fuentes externas de agua en zonas rurales.

- Construir un prototipo para la reutilización de aguas grises, adaptado a las condiciones geográficas, sociales y ambientales de las comunidades rurales, evaluando su viabilidad y eficiencia.

CAPÍTULO 2

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

El presente capítulo aborda los aspectos fundamentales para el desarrollo del proyecto, comenzando con el marco teórico que incluye una revisión sobre los tipos de aguas residuales, sus diferentes características y los sistemas de tratamiento aplicables. Se expondrán los distintos conceptos, con énfasis en las aguas grises. Asimismo, se explorará el marco legal vigente en el país. Finalmente, se describirá el marco metodológico adoptado para el análisis, diseño y evaluación del proyecto.

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Agua Residual

El agua residual comprende la mezcla de desechos líquidos y sólidos provenientes tanto de actividades domésticas como de empresas, incluyendo industrias y establecimientos comerciales. Este término abarca también el agua superficial, subterránea y pluvial que, de diversas maneras, ingresa a las redes de alcantarillado y se transporta a través de un sistema de desagüe. (Romero Rojas, 2004, pág. 17)

2.1.2 Tipos de agua residual

2.1.2.1 Clasificación de aguas residuales según el origen.

Comúnmente, las aguas residuales son originadas ya sea por actividades domésticas o industriales, o en algunos casos, por una combinación de ambas, tales como:

- **Aguas residuales domésticas:** Este tipo de aguas residuales se generan en áreas residenciales, comerciales e institucionales. Proceden principalmente de actividades domésticas, comercios y edificaciones institucionales. (Romero Rojas, 2004, pág. 17)
- **Aguas residuales municipales:** Se refiere a los residuos líquidos transportados por el sistema de alcantarillado de una población. Estas aguas residuales municipales son comúnmente tratadas en plantas de tratamiento destinadas a servir a la comunidad. (Romero Rojas, 2004, pág. 17)

- **Aguas residuales industriales:** Estas aguas son el resultado de los vertidos industriales que provienen de diversas actividades de manufactura llevadas a cabo por las industrias. Pueden contener una variedad de compuestos químicos y materiales específicos de los procesos industriales. (Romero Rojas, 2004, pág. 17)

2.1.2.2 Clasificación de aguas residuales domésticas.

Las aguas residuales domésticas se dividen en dos categorías principales:

- **Aguas Negras:** Las aguas residuales que se originan en inodoros, comúnmente denominadas "aguas negras", contienen excretas humanas y orina. Este tipo de aguas residuales se distingue por su alta concentración de sólidos en suspensión, nitrógeno y coliformes fecales. (Romero Rojas, 2004, pág. 17)
- **Aguas Grises:** Las aguas residuales provenientes de duchas, lavamanos y lavadoras se conocen como "aguas grises". Estas aguas grises presentan considerables cantidades de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), sólidos suspendidos, fósforo, grasa y coliformes fecales. (Romero Rojas, 2004, pág. 17)

Es esencial tener en cuenta la distinción entre estos dos tipos de aguas residuales, ya que sus características y composiciones varían significativamente, lo que afecta los procesos de tratamiento y gestión adecuada. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, pág. 60)

2.1.3 Características de las Aguas Residuales.

Las aguas residuales se distinguen por sus características físicas, químicas y biológicas. Estas propiedades, que se presentan de manera detallada en la tabla adjunta:

Tabla 2.1 – Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, págs. 61-62)

Tipo	Parámetro
Propiedades Físicas	Color
	Olor
	Sólidos

Tipo	Parámetro
Propiedades Físicas	Temperatura
	Densidad
	Turbiedad
Propiedades Químicas	Materia Orgánica
	Hidratos de Carbono
	Demanda Biológica de Oxigeno
	Demanda Química de Oxigeno
	Oxígeno Disuelto
	Grasas y Aceites
	Potencial de Hidrógeno
	Tensoactivos
Propiedades Biológicas	Microorganismos patógenos
	Bacterias
	Virus
	Protozoarios

2.1.4 Características Físicas de las Aguas Residuales.

2.1.4.1 Color

El color de las aguas residuales es un parámetro importante que refleja tanto la edad como el estado de descomposición del agua. Al inicio, las aguas residuales domésticas frescas suelen presentar un color gris, que se oscurece conforme el agua envejece y se desarrollan condiciones anaerobias, pasando de gris a negro. Este cambio de color está relacionado con la formación de sulfuros metálicos, que se generan debido a la reacción del sulfuro liberado en condiciones anaerobias con los metales presentes en el agua residual. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, pág. 85)

En el caso de las aguas residuales industriales, el color puede servir no solo para identificar el origen de la contaminación, sino también para evaluar el estado de los procesos de tratamiento, indicando si estos están funcionando correctamente o si presentan deterioro. (Romero Rojas, 2004, pág. 37)

2.1.4.2 Olor

Los olores se originan a raíz de la descomposición de la materia orgánica y la liberación de gases resultantes de este proceso. El agua residual recién descargada posee un olor característico que, aunque desagradable, resulta más tolerable en comparación con el olor de las aguas residuales sépticas. En este último caso, la presencia de microorganismos anaerobios que generan sulfuro de hidrógeno confiere el olor distintivo, debido a la reducción de sulfatos a sulfitos. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, págs. 103-104)

Cuando los olores provenientes de las plantas de tratamiento son intensos, se presentan diversos problemas para las personas, tales como una disminución en el consumo de agua, pérdida de apetito, dificultades respiratorias, náuseas, vómitos, trastornos mentales, deterioro de las relaciones humanas y una merma en el potencial de desarrollo. (Romero Rojas, 2004, págs. 62-64)

2.1.4.3 Sólidos

La materia sólida presente en el agua residual se conoce como sólidos. Estos se dividen en varias categorías según sus propiedades y métodos de medición:

- **Sólidos totales (ST):** Después de someter el agua a un proceso de evaporación y secado a 103 °C – 105°C, queda una sustancia residual, conocida como sólidos totales. (Romero Rojas, 2004, pág. 68)

  Esta categoría incluye tanto material disuelto como no disuelto, abarcando los sólidos suspendidos. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, pág. 75)
- **Sólidos disueltos totales (SDT):** Se refieren a los sólidos presentes en un filtrado que pasa a través de un filtro con un tamaño de poro nominal de 1.2 mm o menos, clasificándose como disueltos. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, pág. 75)

  También denominados residuos filtrables, los sólidos disueltos se determinan directamente o mediante la diferencia de pesos entre los sólidos totales y los sólidos suspendidos. (Romero Rojas, 2004, pág. 68)

- **Sólidos suspendidos totales (SST):** Los sólidos suspendidos totales (SST), se determinan utilizando un filtro que separa los TSS de los sólidos disueltos totales (TDS). Sin embargo, este proceso es algo arbitrario, ya que depende del tamaño de los poros del filtro utilizado. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, pág. 75)

  También conocidos como residuos no filtrables o material no disuelto, los sólidos suspendidos pueden determinarse mediante la filtración con un filtro de asbesto o fibra de vidrio en un crisol previamente pesado. (Romero Rojas, 2004, pág. 68)
- **Sólidos Volátiles (SV) y Sólidos Fijos (SF):** Es la fracción orgánica de los sólidos o porción de volatiza a temperaturas de 550 °C – 600 °C. Esta determinación se realiza para conocer la cantidad de materia orgánica presente, principalmente en aguas residuales y lodos. (Romero Rojas, 2004, pág. 68)

2.1.4.4 Temperatura

El agua residual suele tener una temperatura mayor que el agua de suministro, por la incorporación de aguas provenientes de diversas fuentes o usos, que suelen ser más cálidas. Durante la mayor parte del año, las temperaturas en las aguas residuales son superiores a las del agua común. Cuando la temperatura de las aguas residuales experimenta un aumento anormal, se propicia la proliferación de plantas acuáticas y hongos. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, pág. 87)

Las elevadas temperaturas del agua afectan la vida acuática, ya que modifican la concentración de oxígeno disuelto, la velocidad de las reacciones químicas y la actividad bacteriana. Además, la tasa de sedimentación de sólidos en aguas cálidas es mayor que en aguas frías debido a cambios en la viscosidad. (Romero Rojas, 2004, pág. 70)

2.1.4.5 Densidad

La densidad de un agua residual se define como su masa por unidad de volumen, expresada en kg/m3. Esta propiedad física es fundamental, ya que de ella depende la posible formación de lodos de sedimentación y otras instalaciones de tratamiento, convirtiéndose en un aspecto clave del agua residual. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, págs. 89-90)

2.1.4.6 Turbiedad

La turbidez es una propiedad física que influye en la capacidad de transmisión de la luz en el agua. Este parámetro se cuantifica al comparar la intensidad de la luz dispersada en una muestra de agua con la registrada en una suspensión de referencia bajo condiciones similares. Este indicador proporciona una evaluación visual del material suspendido presente en las aguas residuales objeto de análisis. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, págs. 83-84)

Por lo general, las aguas residuales exhiben turbidez, y en las aguas residuales tratadas, este factor puede ser relevante para el control de calidad. (Romero Rojas, 2004, pág. 70)

2.1.5 Características Químicas de las Aguas Residuales

2.1.5.1 Materia Orgánica

La materia orgánica en el agua residual consiste en sólidos derivados de fuentes animales, vegetales y actividades humanas vinculadas a la síntesis de compuestos orgánicos. Estos sólidos, compuestos principalmente por carbono, oxígeno e hidrógeno, y ocasionalmente por nitrógeno, pueden incluir en menor medida elementos como azufre, hierro o fósforo. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, pág. 114)

Entre las sustancias orgánicas preponderantes en el agua residual se encuentran las proteínas (40-60%), los hidratos de carbono (25-50%), y las grasas y aceites (10%). La urea, otro compuesto orgánico, también puede estar presente, aunque su descomposición es un proceso relativamente lento, por lo que es poco común hallarla en aguas residuales que no sean recientes. (Romero Rojas, 2004, pág. 60)

2.1.5.2 Hidratos de Carbono

Los hidratos de carbono están ampliamente distribuidos en la naturaleza e incluyen azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera, todos en el agua residual. Estos compuestos contienen carbono, oxígeno e hidrógeno. Es importante señalar que algunos carbohidratos, como los azúcares, son solubles en agua, mientras que otros, como los almidones, son insolubles. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, págs. 114-115)

Estos componentes orgánicos pueden desempeñar un papel significativo en la calidad del agua y su tratamiento. Los azúcares solubles pueden afectar la carga orgánica del agua, contribuyendo a su contaminación. Por otro lado, los almidones insolubles pueden formar partículas sólidas en el agua, lo que también influye en los procesos de tratamiento. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, págs. 114-115)

2.1.5.3 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), especialmente la DBO a 5 días (DBO5), es una medida comúnmente empleada para evaluar la contaminación orgánica en aguas residuales y superficiales. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, págs. 115-116)

El ensayo para determinar la concentración de materia orgánica en aguas residuales es la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) a cinco días. Este ensayo se realiza en condiciones aeróbicas a una temperatura de 20°C durante un periodo de 5 días. (Romero Rojas, 2004, pág. 38)

En aguas residuales domésticas, el valor de la DBO a 5 días, en promedio, refleja aproximadamente un 60-70% del total de la materia orgánica oxidable. Comprender estos procesos es esencial para evaluar la calidad del agua y diseñar estrategias de tratamiento efectivas. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, pág. 118)

2.1.5.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno disuelto que consume una cantidad específica de agua residual durante el proceso de oxidación. Este procedimiento utiliza agentes químicos altamente oxidantes. La determinación de la DQO es más rápida que la DBO, ya que puede completarse en una o dos horas si se realiza a temperatura ambiente, o en 30 minutos si se usa dicromato a altas temperaturas. La DQO es una medida eficiente para evaluar la carga de contaminantes orgánicos en el agua residual y proporciona resultados en un tiempo más corto en

comparación con otros métodos. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, pág. 123)

2.1.5.5 Oxígeno Disuelto (OD)

El oxígeno disuelto es un parámetro esencial en el monitoreo de aguas residuales, ya que sirve como fuente de energía para los organismos vivos. La concentración de oxígeno disuelto puede variar por diversos factores, como la captación de oxígeno en la interfaz entre el aire y el agua, la acción fotosintética generada por algas verdes, la disminución de temperatura y la dilución del agua. A medida que los microorganismos, algas y organismos macroscópicos llevan a cabo procesos de respiración, la cantidad de oxígeno disuelto puede disminuir. Además de estos factores, la temperatura, las reacciones químicas y la actividad metabólica de los organismos también afectan la concentración de oxígeno disuelto. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, págs. 102-103)

2.1.5.6 Grasas y Aceites

El término "aceites y grasas" abarca grasas, aceites, ceras y otros compuestos similares presentes en las aguas residuales. Los aceites y grasas están compuestos principalmente por ésteres de alcohol o glicerol con ácidos grasos, donde los líquidos a temperatura ambiente se denominan aceites y los sólidos, grasas. Estos compuestos provienen de alimentos como mantequilla y aceites vegetales, y su baja solubilidad reduce su degradación microbiana. Los aceites minerales, derivados del petróleo, flotan en las aguas residuales y pueden causar problemas en el tratamiento al recubrir superficies e interferir con la acción biológica. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, págs. 127-128)

En el caso de grasas y aceites de origen mineral, se requiere un tratamiento previo, ya que en su mayoría no son biodegradables y deben ser eliminados antes de someterse al tratamiento biológico. Sin embargo, aún no se ha desarrollado un método efectivo para distinguir entre grasas y aceites de origen vegetal o animal y los de origen mineral. (Romero Rojas, 2004, pág. 59)

2.1.5.7 Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH es una medida de la concentración de iones de hidrógeno en una solución, expresada como el logaritmo negativo de esta concentración. Las aguas residuales con concentraciones adversas de pH presentan desafíos significativos para el tratamiento biológico, ya que pueden alterar la biota de las fuentes receptoras y, en muchos casos, llevar a la muerte de los microorganismos. (Romero Rojas, 2004, pág. 66)

Para que un tratamiento sea eficaz y favorezca la presencia de vida biológica, los valores de pH del agua deben situarse generalmente entre 6.5 y 8.5. Es esencial mantener estos niveles dentro de este rango para garantizar la eficacia de los procesos biológicos y la salud del ecosistema acuático receptor. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, págs. 90-91)

2.1.5.8 Tensoactivos

Los tensoactivos o agentes activos de superficie son compuestos orgánicos grandes que presentan baja solubilidad en agua y son responsables de la formación de espuma en el tratamiento de aguas residuales. Estos compuestos tienen una estructura que incluye un grupo hidrofóbico y un grupo hidrofílico. Los tensoactivos se clasifican en aniónicos, catiónicos y no iónicos, dependiendo de la carga de su grupo hidrofílico. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, págs. 128-129)

Los agentes tensoactivos son compuestos que exhiben actividad superficial en soluciones acuosas, siendo moléculas de gran tamaño con un extremo altamente soluble en agua y otro extremo soluble en aceites. Por lo general, están compuestos por sales de sodio o potasio. Al entrar en contacto con el agua, los detergentes alteran su tensión superficial, dando lugar a la formación de burbujas. (Romero Rojas, 2004, pág. 57)

2.1.6 Características Biológicas

2.1.6.1 Microorganismos patógenos

Los microorganismos presentes en las aguas residuales no tratadas incluyen bacterias, hongos, algas, protozoos, helmintos, virus y otros organismos microscópicos. La principal fuente de estos microorganismos es el desecho humano. También provienen de actividades comerciales e industriales y de la infiltración y entrada de aguas

superficiales. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, pág. 140)

Aunque es poco común hallarlos en las aguas residuales debido a que ciertos microorganismos pueden provocar enfermedades graves, por precaución se asume su presencia en cantidades significativas. Afortunadamente, con independencia del tratamiento aplicado a las aguas residuales, pocos o prácticamente ningún microorganismo sobrevive, contribuyendo a garantizar la seguridad sanitaria. (Valdez & Vázquez González, 2003, pág. 42)

2.1.6.2 Bacterias

Son microorganismos unicelulares que constituyen la forma de vida más pequeña capaz de sintetizar el protoplasma a partir de su entorno y que no presentan coloración. Adoptan diversas formas, como cilíndrica o de bastón (bacilos), oval o esférica (cocos) o en espiral (espirilos). En el proceso de descomposición y estabilización de la materia orgánica, las bacterias desempeñan el papel más crucial. (Romero Rojas, 2004, pág. 31)

La mayoría de los trastornos intestinales están vinculados a enfermedades causadas por bacterias patógenas transmitidas a través del agua. (Valdez & Vázquez González, 2003, pág. 42)

2.1.6.3 Virus

Son estructuras biológicas de menor complejidad que contienen toda la información genética necesaria para su propia reproducción. Actúan como parásitos obligados, dependiendo de un huésped para albergarse, reproducirse y causar infecciones. Los trastornos en el sistema nervioso son los síntomas principales asociados a las infecciones virales. (Valdez & Vázquez González, 2003, pág. 42)

Los virus representan uno de los riesgos más significativos para la salud, y su eliminación requiere dosis de cloro que superen las cantidades normales o incluso el punto de quiebre. Por lo tanto, se hace necesario aplicar un proceso adicional de cloración a las aguas residuales para asegurar su desinfección efectiva. (Romero Rojas, 2004, pág. 71)

2.1.6.4 Protozoarios

Son organismos unicelulares más complejos que las bacterias y los virus, a pesar de pertenecer al nivel más bajo de la vida animal. Se destacan por su capacidad de adaptación a diversos entornos, distribuyéndose ampliamente en aguas naturales, y solo algunos poseen características patógenas en sistemas acuosos. (Valdez & Vázquez González, 2003, pág. 42)

Los protozoarios desempeñan un papel crucial en los ecosistemas acuáticos al actuar como consumidores de bacterias y otros microorganismos. En el tratamiento biológico de aguas residuales, su presencia es fundamental, ya que contribuyen significativamente a mejorar la calidad del agua y la eficiencia del proceso biológico. (Romero Rojas, 2004, pág. 68)

2.1.7 Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua residual

En esta sección, se detallan los contaminantes críticos que deben considerarse al llevar a cabo tratamientos específicos de aguas residuales. Tanto las normativas nacionales como internacionales establecen requisitos para la eliminación de nutrientes y contaminantes prioritarios. (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, pág. 60)

Tabla 2.2 – Tipos de contaminantes en las aguas residuales (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014, pág. 63)

Contaminante	Descripción
Sólidos en suspensión	Su presencia puede dar lugar a la formación de depósitos de lodo y crear condiciones anaeróbicas cuando las aguas residuales se liberan sin tratar en cuerpos de agua.
Materia Orgánica Biodegradable	Compuesta por proteínas, carbohidratos, grasas animales, entre otros, su descarga sin tratamiento a cuerpos receptores puede provocar la disminución del oxígeno en los recursos naturales, generando condiciones sépticas.
Patógenos	Estos agentes causantes de enfermedades contagiosas provienen de cuerpos receptores que están en contacto con las aguas residuales.

Contaminante	Descripción
Nutrientes	Elementos esenciales para el crecimiento microbiano, como nitrógeno, fósforo y carbono, que, al entrar en contacto con el agua, pueden impulsar el crecimiento no deseado de vida acuática.
Contaminantes prioritarios	Compuestos orgánicos o inorgánicos presentes en el agua residual identificados en función de su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad.
Materia orgánica refractaria	Esta forma de materia orgánica resiste los métodos convencionales de tratamiento e incluye agentes tensoactivos, fenoles y pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados se incorporan al agua residual durante actividades comerciales e industriales, y es necesario eliminarlos si se planea reutilizar el agua.
Sólidos inorgánicos disueltos	Se incorporan al agua como resultado de su uso y deben eliminarse si se pretende reutilizarla. Ejemplos de sólidos inorgánicos disueltos son el calcio, sodio y los sulfatos.

2.1.8 Humedales construidos (Constructed Wetland)

A lo largo de la historia, los humedales naturales han sido empleados para la eliminación de aguas residuales, lo que ha provocado su saturación y degradación ambiental. Como alternativa, los humedales construidos han ganado popularidad en las últimas décadas debido a su bajo costo y fácil operación. Estos sistemas de tratamiento de aguas residuales, especialmente los de flujo subsuperficial, son comunes en países desarrollados como Alemania, Reino Unido y Francia, y aunque son menos frecuentes en países en desarrollo, representan una opción eficiente y adecuada para su implementación. (Hoffman, Platzer, Winker, & Von Muench, 2011, pág. 9)

Los humedales construidos se utilizan para el tratamiento primario y secundario de aguas residuales domésticas, aguas residuales agrícolas, aguas residuales de drenaje de carbón, aguas residuales de refinerías de petróleo, abono y lixiviados de vertederos, descargas de estanques de peces, aguas residuales industriales de fábricas de pulpa y papel, fábricas textiles, procesamiento de mariscos, etc. Estos humedales son una

unidad de tratamiento de bajo costo y efectiva si se diseñan, operan y mantienen con cuidado. (Parde, y otros, 2021, pág. 2)

2.1.9 Tipos de Humedales Construidos

Los humedales construidos se clasifican de acuerdo con el régimen de flujo de agua en dos tipos principales: humedales de flujo superficial de agua libre y humedales de flujo subsuperficial. Además, estos pueden subdividirse según la dirección del flujo de agua. Esta clasificación se detalla en la Figura 2.1.

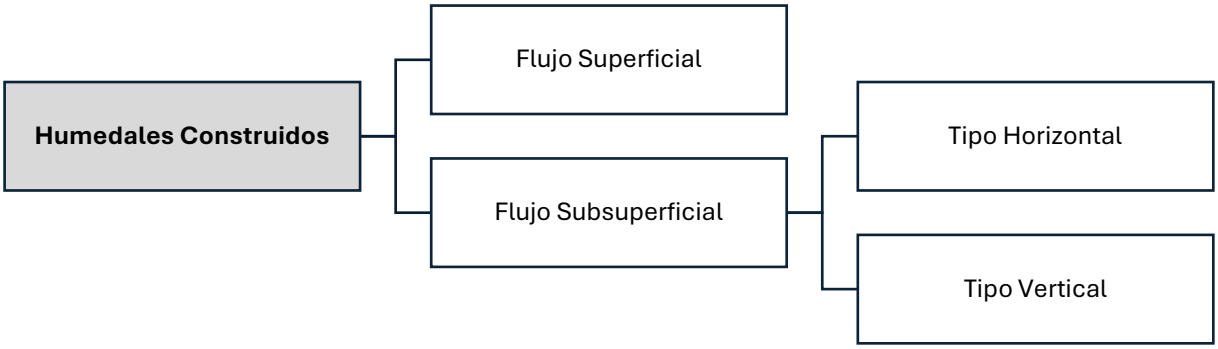


Figura 2.1 – Tipos de Humedales construidos (Hoffman, Platzer, Winker, & Von Muench, 2011, pág. 9)

2.1.9.1 Humedal construido con flujo superficial

Los sistemas de flujo superficial son un tipo de los humedales construidos, donde el agua fluye principalmente entre los tallos de las plantas y se mantiene en contacto directo con el ambiente. A diferencia de las lagunas convencionales, estos sistemas presentan una menor profundidad y poseen vegetación, lo que mejora su capacidad para tratar el agua y promover la interacción con el entorno. (Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Globierno de la República de México, 2019)

Este sistema es efectivo para prevenir inundaciones y controlar la erosión costera, además de mejorar la calidad del agua tratada. Para su funcionamiento, se pueden emplear plantas emergentes, sumergidas y flotantes. En términos de eficiencia, reduce la concentración de metales como hierro (53%), cobre (45%), zinc (52%) y plomo (52%),

además de disminuir DBO, DQO (50%-60%), sólidos suspendidos (SST) (70%-80%) y nitrógeno (50%-65%). (Parde, y otros, 2021, pág. 3)

El Humedal construido con flujo superficial se muestra en la Figura 2.2 y Figura 2.3.

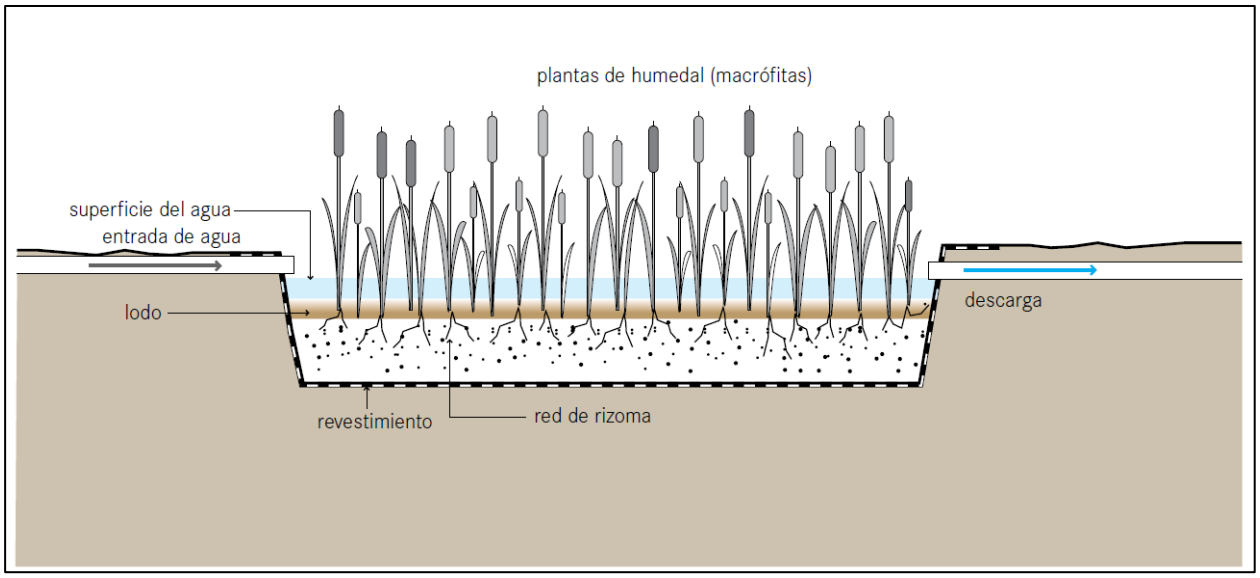


Figura 2.2 – Humedal construido con flujo superficial (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 115)

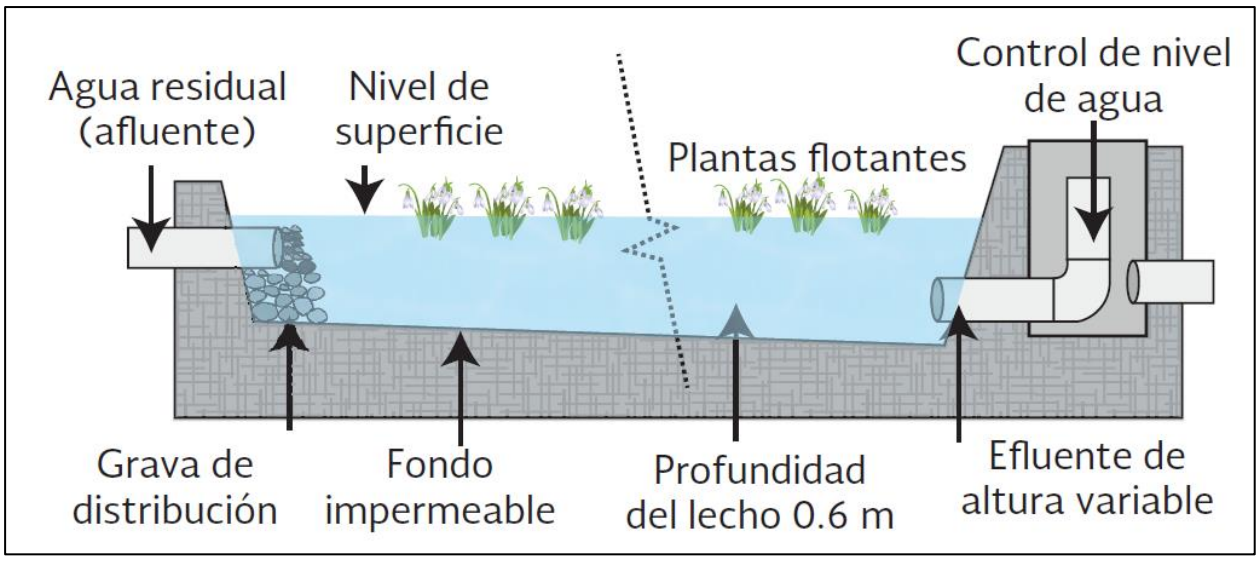


Figura 2.3 – Humedal construido con flujo superficial (Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Globierno de la República de México, 2019, pág. 16)

A continuación, se presenta una tabla que resume las principales ventajas y desventajas de los humedales construidos de flujo superficial. En la Tabla 2.3 se muestra una visión general de los beneficios y limitaciones de estos sistemas

Tabla 2.3 – Ventajas y Desventajas de humedales construidos con flujo superficial (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 116)

Ventajas	Desventajas
Estéticamente agradable y proporciona hábitat a los animales.	Puede facilitar la reproducción de mosquitos.
Alta reducción de DBO y sólidos; eliminación moderada de patógenos.	Requiere un terreno grande.
Puede ser construido y reparado con materiales localmente disponibles.	Periodo inicial largo antes de poder trabajar a capacidad plena.
No requiere energía eléctrica.	
Ningún problema real con olores si se diseña y mantiene correctamente.	
Bajos costos de operación.	

2.1.9.2 Humedal construido con flujo subsuperficial

Los sistemas de humedales flujo subsuperficial se distinguen por permitir la circulación del agua a través de un medio granular, cuya altura varía según la profundidad que alcanzan las raíces de las plantas. En estos sistemas, la vegetación se establece en el sustrato granular, y el agua interactúa directamente con las raíces. Según su diseño hidráulico, estos sistemas pueden operar con un flujo horizontal o vertical. (Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Globierno de la República de México, 2019, pág. 15)

2.1.9.3 Humedal construido subsuperficial de flujo horizontal (Horizontal Flow Constructed Wetland - HFCW)

Un humedal construido subsuperficial de flujo horizontal consiste en una cuenca rellena con materiales como grava y arena, diseñada para el tratamiento de aguas residuales mediante la plantación de vegetación típica de humedales. A medida que las aguas residuales atraviesan la cuenca de manera horizontal, el medio filtrante retiene las partículas sólidas, y los microorganismos presentes se encargan de descomponer la

materia orgánica. (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 117)

El material granular no solo actúa como un filtro físico, sino también como una superficie donde las bacterias pueden adherirse y desempeñar su función de degradación. En estos sistemas, predominan bacterias anaerobias y facultativas, aunque las plantas juegan un papel esencial al transferir oxígeno hacia sus raíces, creando microhábitats donde bacterias aeróbicas también pueden participar en la degradación de compuestos orgánicos. (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, págs. 117-118)

El Humedal construido con flujo subsuperficial horizontal se muestra en la Figura 2.4.

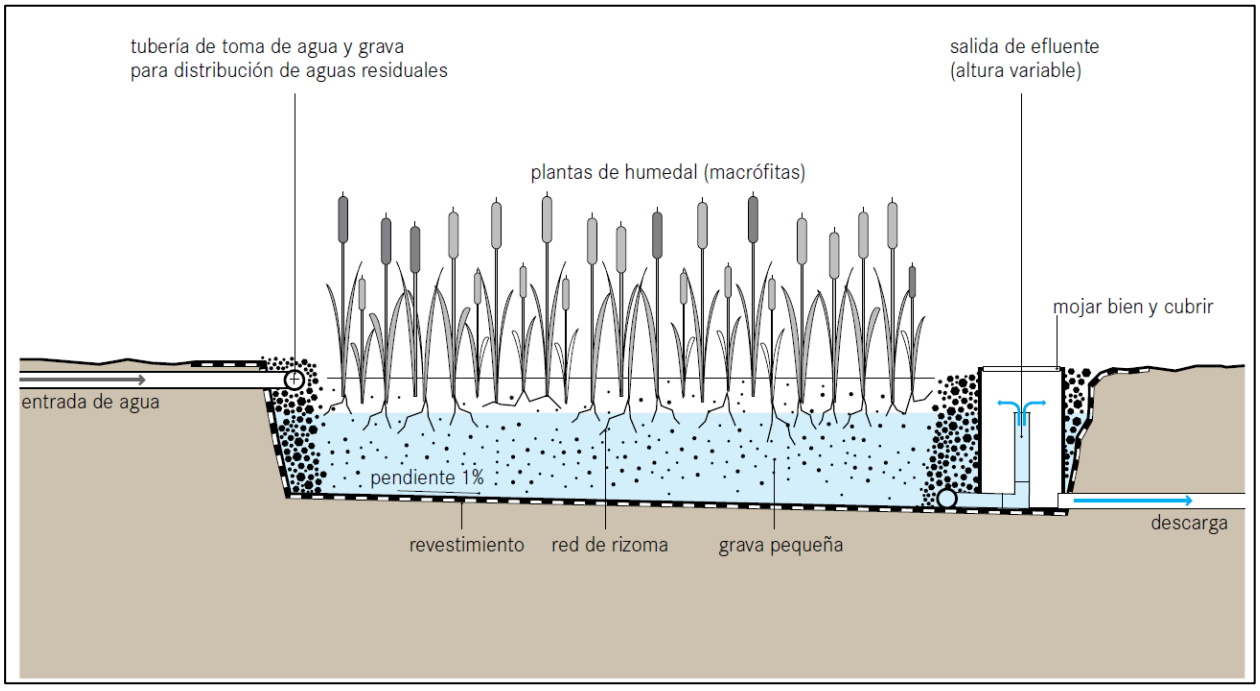


Figura 2.4 – Humedal construido subsuperficial con flujo horizontal (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 117)

El sistema es altamente eficiente en la eliminación de diversos contaminantes como demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno amoniacal, fosfatos y sólidos suspendidos totales (SST). Es aplicable al tratamiento de distintos tipos de aguas residuales, incluyendo efluentes industriales, agrícolas y mineros. Aunque requiere una mayor superficie en comparación con sistemas de flujo

vertical, presenta ventajas en cuanto a la desnitrificación, contribuyendo a la eliminación de nitrógeno de forma más eficaz. (Parde, y otros, 2021, pág. 3)

A continuación, se presenta una tabla que resume las principales ventajas y desventajas de los humedales construidos subsuperficial de flujo horizontal. En la Tabla 2.4Tabla 2.3 se muestra una visión general de los beneficios y limitaciones de estos sistemas

Tabla 2.4 – Ventajas y Desventajas de humedales construidos subsuperficiales de flujo horizontal (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 118)

Ventajas	Desventajas
Alta reducción de DBO, sólidos suspendidos y patógenos.	Periodo inicial largo antes de trabajar a capacidad plena.
No tiene los problemas de mosquitos que existen en el humedal construido de flujo superficial.	Riesgo de obstrucciones, dependiendo del pretratamiento y el tratamiento primario.
No requiere energía eléctrica.	Poca remoción de nutrientes.
Bajos costos de operación.	Requiere un terreno grande.

2.1.9.4 Humedal construido subsuperficial de flujo vertical (Vertical Flow Constructed Wetland - VFCW)

El humedal construido subsuperficial de flujo vertical consiste en un lecho filtrante que permite que las aguas residuales se distribuyan desde la parte superior y fluyan verticalmente hacia el fondo, donde son recolectadas mediante un sistema de drenaje. (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 119)

A diferencia de los sistemas de flujo horizontal, la trayectoria del agua sigue un curso descendente, lo que promueve un mayor contacto con el aire a medida que el lecho filtrante se drena y permite la entrada de oxígeno. Este ciclo de dosificación, que puede repetirse de 4 a 10 veces al día, facilita el paso del agua por fases en las que predomina la aireación, promoviendo la actividad de microorganismos aerobios que descomponen los compuestos orgánicos presentes en el agua. (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 119)

El medio filtrante en estos sistemas, además de actuar como barrera para la retención de sólidos, sirve como soporte para las bacterias y la vegetación. Las plantas en la capa superficial desarrollan un sistema radicular profundo, que contribuye a mantener la permeabilidad del lecho filtrante y proporciona un hábitat favorable para las comunidades microbianas. Estas bacterias son responsables de la degradación de la materia orgánica y de la absorción de nutrientes, beneficiando el proceso de tratamiento. (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 119)

Este tipo de humedal se caracteriza por sus condiciones predominantemente aeróbicas, lo que permite una mayor eficiencia en la nitrificación, la eliminación de demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y otros contaminantes. Aunque requiere menos área de terreno entre 1 y 3 m² en comparación con los sistemas de flujo horizontal, su mantenimiento es más demandante debido a la complejidad del proceso de dosificación y la necesidad de asegurar el buen funcionamiento de las condiciones aeróbicas. (Parde, y otros, 2021, pág. 3)

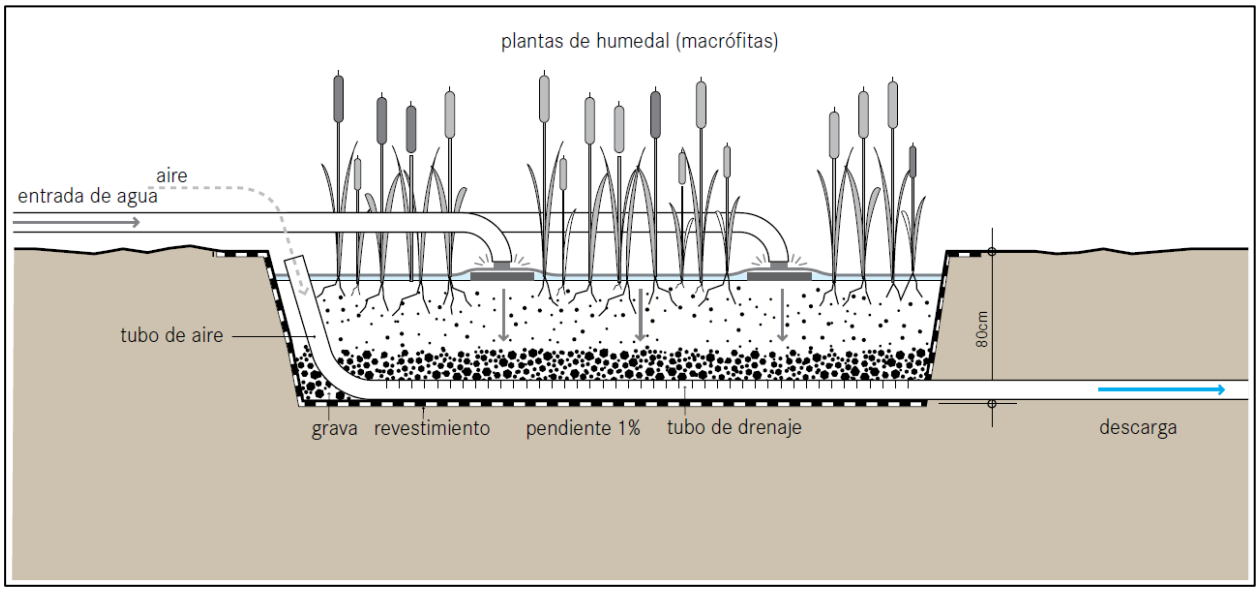


Figura 2.5 – Humedal construido subsuperficial con flujo vertical (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 119)

A continuación, se presenta una tabla que resume las principales ventajas y desventajas de los humedales construidos subsuperficiales de flujo vertical. En la Tabla 2.5 se muestra una visión general de los beneficios y limitaciones de estos sistemas

Tabla 2.5 – Ventajas y Desventajas de humedales construidos subsuperficiales de flujo vertical (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, pág. 120)

Ventajas	Desventajas
Alta reducción de DBO, sólidos suspendidos y patógenos.	Requiere un mantenimiento más frecuente que un humedal construido de flujo horizontal.
Capacidad de nitrificación debido a la transferencia de oxígeno adecuado	Puede necesitar una fuente constante de energía eléctrica.
No tiene los problemas de mosquitos que existen en el humedal construido de flujo superficial.	Periodo inicial largo antes de trabajar a capacidad plena.
Menos obstrucciones que el humedal construido de flujo horizontal subsuperficial.	No todos los repuestos y materiales están disponibles localmente.
Requiere menos espacio que el humedal construido de flujo superficial libre.	
Bajos costos de operación.	

2.1.10 Consideraciones de diseño

En esta sección se presentan las principales consideraciones de diseño de tres tipos de humedales construidos. Cada uno de estos sistemas ofrece ventajas particulares en términos de tratamiento de aguas residuales, y su diseño depende de múltiples factores, como la calidad del afluente, la capacidad de remoción de contaminantes y la vegetación utilizada. A continuación, se muestra la Tabla 2.6 que resume los principales criterios de diseño de cada tipo de humedal.

Tabla 2.6 – Tabla comparativa de consideraciones de diseño para humedales construidos (Sustainable Sanitation Alliance & International Water Association, 2018, págs. 115-120)

Criterio	Humedal de flujo superficial	Humedal subsuperficial de flujo horizontal	Humedal subsuperficial de flujo vertical
Distribución del agua	El agua se distribuye en la superficie usando vertederos o tuberías perforadas.	El agua fluye de manera uniforme a través de un lecho de grava.	El agua se aplica desde la parte superior y fluye hacia abajo a través del lecho.

Criterio	Humedal de flujo superficial	Humedal subsuperficial de flujo horizontal	Humedal subsuperficial de flujo vertical
Revestimiento	Se utiliza una barrera impermeable (arcilla o geotextil) para evitar que el agua se filtre al subsuelo.	También usa un revestimiento impermeable para evitar filtraciones.	Incluye un revestimiento impermeable y un sistema de recolección del agua.
Profundidad del agua	El agua se mantiene entre 10 y 45 cm por encima del suelo.	El agua se mantiene entre 5 y 15 cm por debajo de la superficie del lecho de grava.	El agua fluye hacia abajo a través de un lecho de grava que tiene una capa de al menos 20 cm de profundidad.
Material de filtrado	Se utiliza grava, rocas y tierra para filtrar el agua.	El lecho está compuesto de grava limpia (3-32 mm) o arena, aunque la arena es más propensa a obstrucciones.	Tiene una capa de grava para drenaje y una capa superior de arena.
Superficie requerida	Depende del objetivo del tratamiento, pero generalmente se necesita más espacio.	Se requieren entre 5 y 10 m^2 por persona equivalente (PE).	Necesita entre 1 y 3 m^2 por persona equivalente (PE), por lo que ocupa menos espacio.
Vegetación	Se plantan especies autóctonas como totora, cañas o juncos.	Se usan plantas con raíces profundas, como Phragmites australis (carrizo).	Se plantan especies como carrizo (Phragmites), totora (Typha) o hierba (Echinochloa).
Condiciones del agua	El agua está constantemente expuesta al aire y se inunda a baja profundidad.	El agua fluye debajo de la superficie del lecho de grava, sin contacto directo con el aire.	El agua se filtra verticalmente, lo que permite un mayor contacto con el aire.

Criterio	Humedal de flujo superficial	Humedal subsuperficial de flujo horizontal	Humedal subsuperficial de flujo vertical
Mantenimiento	Requiere bajo mantenimiento, principalmente la gestión de la vegetación.	Requiere un pretratamiento del agua para evitar obstrucciones en la grava.	Requiere más mantenimiento debido al sistema de dosificación y posibles obstrucciones.
Eficiencia en la eliminación de contaminantes	Buena eficiencia, depende de cómo se distribuye el agua y de la cantidad de compartimentos.	Alta eficiencia en la eliminación de DBO, DQO y nitrógeno.	Alta eficiencia en la eliminación de DBO y DQO, limitada desnitrificación.

2.2 Enfoques de Diseño de los Humedales Construidos

El diseño y dimensionamiento de sistemas de humedales construidos ha avanzado significativamente en las últimas décadas, evolucionando de reglas generales simples a métodos más complejos. Hoy en día, los enfoques modernos consideran factores clave como la tasa de carga hidráulica (Hydraulic Loading Rate - HLR), el flujo no ideal, la concentración residual de contaminantes y el efecto de la meteorización. (Dotro, y otros, 2017, pág. 35)

Para desarrollar un diseño eficaz, es crucial basarse en parámetros derivados de datos operativos de sistemas reales implementados a nivel global. Se recomienda realizar una verificación para evitar extrapolaciones de datos que podrían comprometer el desempeño del sistema. Las ecuaciones y parámetros de diseño deben aplicarse únicamente a proyectos que se encuentren dentro del rango de datos de los cuales fueron obtenidos (Dotro, y otros, 2017, pág. 35).

Tabla 2.7 – Condiciones físicas y operativas en el diseño de humedales construidos (Dotro, y otros, 2017, pág. 35)

Parámetro	Descripción
Tipo de humedal para tratamiento	Determina el tipo de sistema (flujo superficial, subsuperficial, etc.)
Concentraciones de entrada y salida	Define los niveles de contaminantes iniciales y esperados después del tratamiento
Cargas hidráulicas y másicas	Establece la cantidad de agua y masa de contaminantes que el sistema debe procesar
Tamaño, relación de aspecto y profundidad	Especifica las dimensiones y proporciones que permiten el flujo y tratamiento óptimos
Clima y variabilidad en el agua	Considera las pérdidas y ganancias de agua asociadas a condiciones climáticas
Ecología y comunidad vegetal	Define las especies vegetales que facilitan el tratamiento de contaminantes
Fracción de aguas abiertas (para flujo superficial)	Asegura áreas abiertas para la entrada de luz y proceso de tratamiento

Tabla 2.8 – Enfoques de diseño de humedales construidos (Dotro, y otros, 2017, pág. 35)

Parámetro	Descripción
Regla general (Rule of the thumb)	Diseño basado en valores empíricos y normas generales de dimensionamiento
Ecuaciones de regresión	Modelos estadísticos basados en datos históricos de rendimiento
Flujo a pistón k-C*	Enfoque que considera la tasa de degradación y concentración mínima del contaminante
Gráficos de carga	Herramienta visual para determinar capacidad de carga y tamaño óptimo
P-k-C*	Método avanzado que incluye aspectos como eficiencia de remoción en función del caudal y área del humedal

En cuanto a los enfoques de diseño, las "Reglas generales" y los "Gráficos de carga" son los únicos aplicables a humedales de flujo vertical, incluyendo los de tipo francés. Los demás métodos, en cambio, son específicos para humedales de flujo subsuperficial horizontal y de flujo superficial. Excepto el enfoque de "Regla general", los otros métodos de diseño buscan la eliminación de contaminantes específicos, para alcanzar un objetivo de calidad de agua definido. En la práctica, los sistemas de humedales para tratamiento suelen estar concebidos para remover diversos contaminantes. (Dotro, y otros, 2017, pág. 35)

2.2.1 Regla general (Rule of the thumb)

La regla general constituye un enfoque de diseño prescriptivo que se adapta a la aplicación de un humedal en una región climática o geográfica específica. Este método se emplea frecuentemente en una tecnología particular de humedal, ya sea de flujo horizontal o de flujo vertical, y suele estar respaldado por guías técnicas locales o nacionales para su implementación. (Dotro, y otros, 2017, pág. 36)

En términos generales, el diseño se aconseja en función de los requisitos de área por persona equivalente (m^2/hab-eq) o como velocidad de carga superficial (g DBO_5/m^2d o g DQO/m^2d). (Dotro, y otros, 2017, pág. 36)

La Tabla 2.9 muestra recomendaciones de diseño basadas en la "Regla general", expresadas como área de humedal requerida por persona equivalente (m²/hab-eq). Este enfoque es práctico para iniciar un diseño, especialmente cuando existe un conocimiento sólido sobre la tecnología en la región. No obstante, es crucial evitar la extrapolación de estas recomendaciones a contextos con condiciones significativamente diferentes, como la tecnología de pretratamiento, la generación de aguas residuales per cápita o el clima.

Tabla 2.9 – Recomendaciones de diseño de regla general (Dotro, y otros, 2017, pág. 36)

País	Tecnología	Área superficial	Referencias
Austria	Flujo subsuperficial vertical	4.00	(ÖNORM, 2009)
Dinamarca	Flujo subsuperficial horizontal	5.00	(Brix & Johansen, Guidelines for the Establishment of Reed Bed Systems up to 30 PE (Retningslinier for etablering af beplantede filteranlæg op til 30 PE)., 2004)
	Flujo subsuperficial vertical	3.00	
Alemania	Flujo subsuperficial vertical	4.00	(Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), 2017)
Francia	Flujo subsuperficial vertical tipo francés	2.00	(Iwema, y otros, 2005)

El enfoque de la regla general ofrece un marco sencillo para el diseño de humedales, siendo especialmente útil en situaciones donde se busca una solución rápida y accesible. Sin embargo, presenta limitaciones significativas que pueden afectar la eficacia y la sostenibilidad del sistema de tratamiento.

Tabla 2.10 – Ventajas y Desventajas de regla general (Dotro, y otros, 2017, pág. 36)

Ventajas	Desventajas
Fácil de usar	No considera las diversas prácticas de uso de agua y tecnologías de pretratamiento.
	No tiene en cuenta el flujo no ideal.
	No evalúa la geometría de la celda del humedal ni los enfoques para prevenir la colmatación.

2.2.2 Ecuaciones de regresión

Las ecuaciones de regresión son otro enfoque utilizado en el diseño de humedales construidos. Estas ecuaciones se desarrollan a partir de un extenso conjunto de datos y generalmente requieren uno o dos valores de entrada, como la concentración de entrada o la carga másica, y en algunos casos, la tasa de carga hidráulica (HLR). A partir de estos valores, se estima la concentración de efluente que se puede esperar. Sin embargo, es importante señalar que la "bondad del ajuste" de estas regresiones puede ser insatisfactoria en ocasiones. La Tabla 2.11 presenta ejemplos de ecuaciones de regresión aplicables al diseño de humedales subsuperficiales de flujo horizontal. (Dotro, y otros, 2017, pág. 37)

Tabla 2.11 – Ecuaciones de regresión para humedales construidos (Dotro, y otros, 2017, pág. 36)

Parámetro	Ecuación	Rango de entrada	Rango de salida	R^2
DBO_5	Mo = (0.13×Mi) + 0.27	6 < Mi < 76	0.32 < Mo < 21.7	0.85
	Co = (0.11×Ci) + 1.87	1 < Ci < 330	1 < Co < 50	0.74
DQO	Mo = (0.17×Mi) + 5.78	15 < Mi < 180	3 < Mo < 41	0.79
SST	Mo = (0.048×Mi) + 4.7	3 < Mi < 78	0.9 < Mo < 6.3	0.42
	Co = (0.09×Ci) + 0.27	0 < Ci < 330	0 < Co < 60	0.67
NT	Mo = (0.67×Mi) – 18.75	300 < Mi < 2,400	200 < Mo < 1,550	0.96
PT	Mo = (0.58×Mi) – 4.09	25 < Mi < 320	20 < Mo < 200	0.61
	Co = (0.65×Ci) + 0.71	0.5 < Ci < 19	0.1 < Co < 14	0.75

Donde:

- Mi y Mo son cargas másicas afluente y efluente del sistema, respectivamente, en kg/ha·d.
- Ci y Co son concentraciones afluente y efluente del sistema, respectivamente, en mg/L.

El uso de ecuaciones de regresión para el diseño de humedales construidos presenta tanto beneficios como limitaciones. A continuación, en la Tabla 2.12 se presenta una comparativa que resume las ventajas y desventajas de este método:

Tabla 2.12 – Ventajas y Desventajas de las ecuaciones de regresión (Dotro, y otros, 2017, pág. 36)

Ventajas	Desventajas
Son de fácil aplicación.	Solo son válidas si el nuevo diseño está dentro del rango de datos utilizado para desarrollarlas.
Consideran la calidad del agua de entrada	No siempre tienen en cuenta el caudal.
Incorporan inherentemente la concentración de fondo (C*) ya que se derivan de datos reales de calidad de agua.	Muchas ecuaciones se basan en sistemas de humedales grandes, lo que puede no ser aplicable a sistemas más pequeños.
	No se puede determinar el área del humedal únicamente a partir de ecuaciones que correlacionan concentración o masa.

2.2.3 Flujo a pistón k-C*

El enfoque de flujo a pistón k-C* de primer orden considera las concentraciones de entrada y salida, así como la concentración de fondo, asumiendo una hidráulica ideal de flujo a pistón. Aunque su uso ha disminuido entre los ingenieros diseñadores en la actualidad, aún se menciona con frecuencia en la literatura. (Dotro, y otros, 2017, pág. 38)

Sin embargo, la suposición de que el sistema hidráulico opera de manera ideal ha sido ampliamente cuestionada en estudios previos, lo que ha llevado a que su uso ya no sea recomendado. (Kadlec, 200, pág. 12)

A pesar de esto, la ecuación, que se adapta para incluir la concentración de fondo (C*), se puede emplear para determinar el área del humedal (A) de la siguiente manera:

Ecuación 2.1 (Dotro, y otros, 2017, pág. 38)

$$A = \frac{Qi}{K_A} \ln\left(\frac{C_o - C^*}{C_i - C^*}\right)$$

Donde:

- Co = concentración de salida o efluente, mg/L
- Ci = concentración de entrada o afluente, mg/L
- C* = concentración de fondo, mg/L
- K_A= coeficiente superficial de primer orden modificado, m/d
- Qi = Caudal del afluente, m3 /d

A continuación, en la Tabla 2.13 se presenta una tabla que compara las ventajas y desventajas del enfoque de pistón k-C*.

Tabla 2.13 – Ventajas y Desventajas de Flujo a pistón k-C* (Dotro, y otros, 2017, pág. 38)

Ventajas	Desventajas
Considera la concentración de entrada (Ci), la concentración de fondo (C*), la tasa de carga hidráulica (HLR, q) y el coeficiente de velocidad de reacción superficial (kA).	No toma en cuenta el flujo no ideal, lo que puede ser problemático al buscar alcanzar bajas concentraciones en los efluentes.
Permite incorporar un factor de corrección de temperatura (θ).	No hay claridad sobre qué valor de kA utilizar, especialmente cuando se proporciona un rango de coeficientes de velocidad de reacción.
	La premisa de un sistema hidráulico de flujo a pistón ideal ha sido ampliamente considerada inexacta, por lo que su uso ya no se aconseja.

2.2.4 Gráficos para cálculo por carga másica

El uso de gráficos de carga másica representa un enfoque adicional en el diseño de humedales construidos. Según Wallace y Knight (2006), en su manual de diseño para humedales destinados al tratamiento a pequeña escala se fundamenta en una amplia

recopilación de datos que abarca la calidad del agua de más de 1,500 humedales a nivel mundial. Esta base de datos permitió la creación de gráficos de dispersión que relacionan las tasas de carga másica del afluente con las concentraciones de los efluentes, ofreciendo una herramienta visualmente accesible para los diseñadores. (Dotro, y otros, 2017, pág. 39)

Además, este manual es pionero en integrar el concepto de tolerancia al riesgo en el diseño de humedales. Los gráficos presentan una representación de la tolerancia al riesgo, destacando líneas que corresponden a los percentiles 50, 75 y 90 de los datos recopilados. A través de estos gráficos, los diseñadores pueden seleccionar el diseño de un nuevo humedal para tratamiento a pequeña escala en función de la tasa de carga másica del afluente, la concentración de efluentes deseada y el nivel de tolerancia al riesgo aceptado. (Dotro, y otros, 2017, pág. 39)

A continuación, en la Tabla 2.14 se presentan las ventajas y desventajas de este método.

Tabla 2.14 – Ventajas y Desventajas de los gráficos de cálculo por carga másica (Dotro, y otros, 2017, pág. 39)

Ventajas	Desventajas
Incluye las concentraciones afluente y efluente (Ci y Co), y el caudal de entrada (Qi).	No incluye directamente coeficientes de velocidad de reacción (kA o kV) ni de corrección de temperatura (θ).
Los gráficos están basados en datos reales, considerando concentración de fondo (C*) y flujo no ideal.	No contempla explícitamente la geometría de la celda ni estrategias de diseño específicas para evitar obstrucciones.
Permite seleccionar el nivel de tolerancia al riesgo para adaptarse a diferentes objetivos de tratamiento.	Ajustes adicionales para minimizar riesgos de obstrucción deben realizarse por separado.

2.2.5 Enfoque P-k-C*

El enfoque P-k-C* es una ecuación cinética avanzada de primer orden, adaptada para incorporar una concentración de fondo distinta de cero, con el fin de representar de manera más precisa la degradación de contaminantes en humedales construidos para tratamiento de aguas. Estudios recientes han confirmado que el enfoque P-k-C*

representa de manera efectiva el rendimiento de los humedales en el tratamiento de aguas residuales, mejorando la precisión en comparación con modelos cinéticos previos. (Dotro, y otros, 2017, pág. 33). El área del humedal A se puede calcular con la siguiente ecuación:El área del humedal A se puede calcular con la siguiente ecuación:

Ecuación 2.2 (Dotro, y otros, 2017, pág. 39)

$$A = \frac{P \cdot Q_i}{k_A}\left(\left(\frac{C_i - C^*}{C_o - C^*}\right)^{\frac{1}{P}} - 1\right) = \frac{P \cdot Q_i}{k_v \cdot h}\left(\left(\frac{C_i - C^*}{C_o - C^*}\right)^{\frac{1}{P}} - 1\right)$$

Donde:

- Co = concentración de salida o efluente, mg/L
- Ci = concentración de entrada o afluente, mg/L
- C * = concentración de fondo, mg/L
- h = profundidad de agua del humedal, m
- kA = coeficiente superficial de primer orden modificado, m/d
- kV = coeficiente de reacción volumétrico de primer orden, 1/d
- P = cantidad aparente de tanques en serie (TIS), adimensional
- Q = caudal de entrada, m3 /d

A continuación, la Tabla 2.15 presenta las ventajas y desventajas de este método.

Tabla 2.15 – Ventajas y Desventajas del enfoque P-k-C* (Dotro, y otros, 2017, págs. 40-41)

Ventajas	Desventajas
Considera la concentración de afluentes y efluentes (Ci y Co), así como la concentración de fondo (C*)	Requiere evaluar muchas variables, algunas de las cuales cuentan con información limitada para seleccionar valores de diseño adecuados.
Integra el coeficiente de velocidad de reacción volumétrico o superficial (kA o kV) y el factor de corrección de la temperatura (θ).	El valor de P depende de la geometría de la celda del humedal, lo cual implica que debe seleccionarse cuidadosamente.
Permite al diseñador seleccionar un nivel de riesgo (50%, 80% o 90% de cumplimiento) para variables clave de diseño.	

2.3 Marco Legal

En Ecuador, hay varias normativas que rigen el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales, las establecen y regulan el Gobierno Nacional, la Asamblea Constituyente y los gobiernos seccionales. La presencia de sustancias contaminantes en el agua residual, en niveles excesivos, representa una amenaza tanto para el medio ambiente como para la salud humana. Por esta razón, es necesario contar con regulaciones ambientales que establezcan los límites máximos permisibles para dichas sustancias. Estas regulaciones abordan los parámetros que evalúan la calidad del agua a ser descargada en cuerpos hídricos. Las bases legales que se consideran son las siguientes:

2.3.1 Constitución de la República del Ecuador

La Constitución de la República del Ecuador de 2008 establece el derecho al agua como fundamental e inalienable, y la reconoce como un recurso estratégico de uso público. Garantiza el derecho a un ambiente sano y promueve la conservación y manejo integral de los recursos hídricos, priorizando la sostenibilidad de los ecosistemas y el consumo humano. (Asamblea Nacional Constituyente de Ecuador, 2008, pág. 29)

Artículos Relevantes:

- *Art. 12.- Reconoce el derecho humano al agua como fundamental e irrenunciable.*
- *Art. 14.- Reconoce el derecho a vivir en un ambiente sano, que garantice la sostenibilidad.*

2.3.2 Ley Orgánica de Recursos hídricos Uso y Aprovechamiento del Agua.

Esta ley, publicada en agosto de 2014, define la infraestructura hidráulica como obras destinadas a diversas acciones, desde la captación hasta el tratamiento y reutilización de aguas. Incluye regulaciones para actividades que puedan afectar la calidad y cantidad del agua y el equilibrio de los ecosistemas. Además, establece que la autoridad a cargo de la gestión del agua será responsable de su planificación, regulación y control, cooperando con la gestión ambiental para garantizar un manejo con enfoque ecosistémico. (Agencia de Regulación y Control del Agua, 2014, pág. 5)

Artículos Relevantes:

- *Art. 11: Define la infraestructura hidráulica y sus componentes.*

2.3.3 Ley Orgánica de la Salud

Esta legislación, originalmente promulgada en diciembre de 2006 y modificada en diciembre de 2015, asigna al Estado la responsabilidad de proporcionar sistemas de alcantarillado sanitario, pluvial y disposición de excretas y aguas servidas. Busca garantizar que estas infraestructuras no afecten la salud individual, colectiva y el ambiente, así como asegurar sistemas de tratamiento de aguas servidas. (Ministerio de Salud Pública, 2015, pág. 19)

Artículo Relevante:

- *Art. 102: Establece la responsabilidad del Estado en dotar a la población de sistemas de alcantarillado sanitario y sistemas de tratamiento de aguas servidas.*

2.3.4 Ley de gestión ambiental

La Ley de Gestión Ambiental, en vigencia desde septiembre de 2004, establece el Sistema Descentralizado de Gestión Ambiental como un mecanismo de coordinación entre distintos ámbitos y sistemas de manejo ambiental. Su objetivo es fomentar la coordinación transectorial e interacción para una gestión ambiental efectiva y sostenible. (Ministerio del Ambiente, 2004, pág. 1)

Artículo Relevante:

- *Art. 5: Establece el Sistema Descentralizado de Gestión Ambiental como un mecanismo de coordinación entre distintos ámbitos y sistemas de manejo ambiental.*

2.3.5 Acuerdo 097-A Norma de Calidad Ambiental y descarga de efluentes: recurso agua.

Este acuerdo, dictado en noviembre de 2015, establece normas técnicas ambientales aplicables a nivel nacional. Define límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para descargas en cuerpos de agua, así como criterios de calidad de aguas para distintos usos. Proporciona métodos y procedimientos para determinar la presencia de

contaminantes en el agua, todo enmarcado en la Ley de Gestión Ambiental y su reglamento. (Ministerio del Ambiente, 2015)

La presente norma técnica determina o establece:

- Establece normas técnicas ambientales aplicables a nivel nacional.
- Define límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para descargas en cuerpos de agua.
- Establece criterios de calidad de aguas para distintos usos.
- Proporciona métodos y procedimientos para determinar la presencia de contaminantes en el agua.

2.4 Marco metodológico

Para el desarrollo del presente proyecto, se ha optado por la Metodología secuencial (Waterfall Methodology), que permite la realización de actividades de manera estructurada y organizada, abordando cada fase de forma progresiva según los resultados obtenidos en la etapa anterior. (Sherman, 2015, págs. 474-475)

2.4.1 Metodología secuencial (Waterfall Methodology)

La metodología Waterfall es un proceso formal, con cada fase compuesta por una lista de tareas detalladas con la documentación correspondiente y criterios de salida. El proyecto se descompone en una secuencia de tareas, con la agrupación de nivel más alto referida como fases. Cada fase debe completarse de manera consecutiva, lo que significa que cada una debe concluir antes de que comience la siguiente. (Sherman, 2015, págs. 474-475)

2.4.2 Aplicabilidad de la metodología en el proyecto

En el contexto de este proyecto, la metodología Waterfall resulta adecuada debido a su capacidad para manejar proyectos con fases bien definidas y con la necesidad de gestionar múltiples recursos y actividades de forma secuencial. Las fases típicas son, la recopilación de requisitos, diseño, desarrollo, pruebas y despliegue, permitirán un control adecuado sobre los procesos de diseño y construcción de los sistemas de recolección y tratamiento de aguas grises, asegurando que cada etapa cumpla con los objetivos establecidos antes de avanzar a la siguiente.

2.4.3 Metodología del proyecto

2.4.3.1 Investigación y revisión de literatura y normativa

Se llevará a cabo una revisión de la literatura relacionada con la gestión del agua, aplicada a la reutilización de aguas residuales grises. Esta revisión incluirá la normativa vigente en Ecuador, estándares de calidad del agua y datos sobre cobertura y abastecimiento de agua a nivel nacional. Además, se considerarán estudios previos sobre tecnologías aplicadas a sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales domésticas.

2.4.3.2 Diagnóstico inicial de condiciones en la comunidad rural

Se realizará un diagnóstico preliminar en la comunidad rural seleccionada. El diagnóstico abarcará la evaluación de las condiciones actuales de los recursos hídricos, las prácticas de uso del agua en las viviendas y la infraestructura existente. Además, se caracterizarán las aguas residuales generadas, tomando en cuenta la cantidad y composición de las aguas grises. Para ello, se tomarán muestras de las aguas generadas en las viviendas, las cuales serán enviadas a un laboratorio acreditado caracterización.

2.4.3.3 Caracterización de aguas residuales

Las muestras obtenidas de las aguas grises serán analizadas para determinar su calidad, composición química y microbiológica. Este análisis permitirá definir los requerimientos de los sistemas de tratamiento. Los resultados del análisis también serán útiles para adaptar los sistemas a las condiciones detectadas. Para esta caracterización serán evaluados los diferentes parámetros establecidos en la normativa vigente.

2.4.3.4 Diseño de sistemas adaptados a condiciones locales

Con base en los resultados de la caracterización de las aguas residuales, se procederá al diseño de sistemas de tratamiento de aguas grises. El diseño considerará las condiciones de la comunidad, seleccionando tecnologías apropiadas para garantizar su funcionalidad y sostenibilidad.

2.4.3.5 Construcción y evaluación del prototipo

Se procederá a la construcción de un prototipo del sistema diseñado. El prototipo será probado simulando las condiciones de uso en un entorno controlado. Se evaluará su desempeño en condiciones reales con aguas grises, llevando a cabo un monitoreo de parámetros para determinar la eficiencia del tratamiento y la calidad del agua tratada.

2.4.3.6 Diagrama de metodología empleada

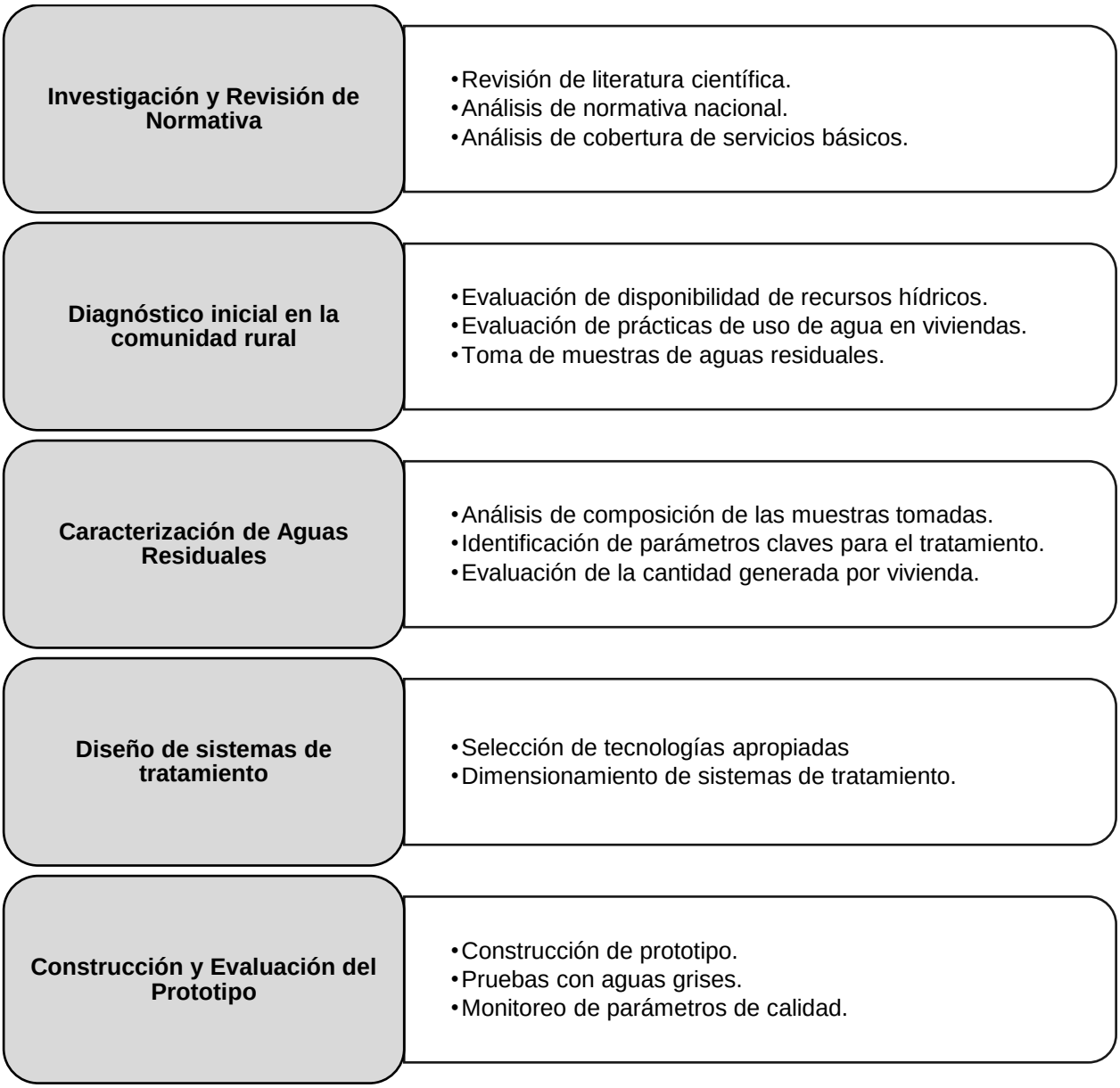


Figura 2.6 – Diagrama de metodología empleada en el proyecto (Carriel, 2024)

2.5 Trabajo de campo

El trabajo de campo se enfocó en evaluar las condiciones actuales de la comunidad rural seleccionada y recolectar datos necesarios para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas grises. Estas actividades fueron importantes para obtener un análisis preliminar sobre las condiciones recursos hídricos, las prácticas de uso del agua en las viviendas y las características de las aguas grises. A continuación, se detallan las actividades realizadas:

2.5.1 Evaluación de recursos hídricos existentes

Se llevó a cabo una evaluación de las fuentes de agua disponibles en la comunidad. Esta evaluación incluyó la identificación de fuentes de abastecimiento, como pozos, ríos o sistemas de agua potable, y una revisión del estado actual de la infraestructura para el almacenamiento y distribución del agua. Se tomó nota de las limitaciones y oportunidades de mejora para la gestión eficiente del recurso.

2.5.2 Levantamiento de información sobre los habitantes y las viviendas

Se realizó un censo del lote de análisis para obtener datos sobre el número de habitantes por vivienda y la cantidad de viviendas en la comunidad. Esta información es importante para dimensionar los sistemas de tratamiento, considerando las necesidades diarias de agua por persona y hogar. Además, se identificó la casa con mayor número de habitantes para en esta realizar la recolección de muestras de aguas grises.

2.5.3 Recolección de muestras de aguas grises

Para la caracterización de las aguas residuales, se tomaron muestras de aguas grises en la vivienda con mayor número de habitantes. Esta vivienda fue seleccionada con el objetivo de evaluar el mayor volumen posible de aguas generadas. Las muestras fueron enviadas a un laboratorio acreditado para su análisis, donde se evaluaron parámetros físicos, químicos y microbiológicos de acuerdo con la normativa vigente en Ecuador.

2.5.4 Evaluación de prácticas de uso del agua

Durante el trabajo de campo, se llevó a cabo una observación y análisis de las prácticas de uso del agua en las viviendas. Se entrevistó a los habitantes para conocer sus hábitos relacionados con el consumo de agua, los métodos de recolección de aguas pluviales, y la disposición de las aguas residuales. Esta actividad permitió identificar oportunidades para mejorar la eficiencia en la gestión del agua.

2.5.5 Validación de tecnologías apropiadas para el contexto

Con base en las condiciones detectadas durante el trabajo de campo, se evaluaron diferentes tecnologías de tratamiento de aguas grises, asegurándose de que sean adecuadas para las condiciones geográficas y sociales de la comunidad rural. Se priorizaron tecnologías sostenibles y de bajo costo, que sean de fácil uso y mantenimiento por los residentes locales.

2.6 Tabulación de datos

La tabulación de datos es una etapa importante en el desarrollo del proyecto, ya que permite organizar y analizar la información obtenida a través de la encuesta para tomar decisiones sobre el diseño y la implementación de sistemas de tratamiento de aguas grises. A continuación, se describe el proceso para la tabulación y análisis de los datos recogidos en la encuesta:

2.6.1 Organización de Datos:

- **Recopilación:** Una vez completadas las encuestas en las viviendas seleccionadas, se procederá a recopilar todas las respuestas en un formato digital utilizando herramientas de procesamiento de datos, como hojas de cálculo (Excel).

2.6.2 Clasificación y Agrupación:

- **Clasificación:** Los datos serán clasificados según las secciones de la encuesta, como información sobre la vivienda, composición del hogar, fuentes de agua, y características del terreno.

- **Agrupación:** Se agruparán los datos según las categorías determinadas. Esta agrupación permitirá identificar patrones y tendencias.

2.6.3 Análisis Descriptivo:

- **Frecuencias y Porcentajes:** Se calcularán las frecuencias absolutas y relativas de cada respuesta para obtener una visión general de las condiciones y necesidades en la comunidad. Por ejemplo, se determinará el porcentaje de viviendas con terreno plano o el número promedio de personas por hogar.

- **Medidas de Tendencia Central:** Se calcularán medidas de tendencia central, como medias y medianas, para entender la distribución de las variables numéricas, como el espacio disponible para el sistema de tratamiento.

2.6.4 Análisis Comparativo:

- **Comparación de Datos:** Se compararán los datos de diferentes viviendas para identificar similitudes y diferencias. Esto ayudará a determinar las necesidades específicas y las características comunes entre las viviendas.

- **Evaluación de Condiciones:** Se evaluarán las condiciones del terreno, la disponibilidad de espacio para preseleccionar el tipo de sistema de tratamiento más adecuado.

2.6.5 Estimaciones del Tratamiento:

- **Estimación de Requerimientos:** Con base en los datos tabulados, se estimarán los requerimientos del sistema de tratamiento de aguas grises, como el tamaño del lecho filtrante y la capacidad de tratamiento necesaria.

- **Selección del Diseño:** Los datos ayudarán a seleccionar el diseño del sistema más adecuado, considerando factores como la topografía, el espacio disponible y las características del agua residual.

2.7 Solución por diseñar

En el cantón Baba, en la provincia de Los Ríos, Ecuador, se enfrenta una problemática significativa en cuanto a la gestión de recursos hídricos y servicios de saneamiento. A pesar de los esfuerzos previos, la cobertura de agua potable apenas alcanza el 56.9%, el alcantarillado se limita al 10.1%.

Considerando estas limitantes, se ha identificado la necesidad de implementar un sistema sostenible que mejore la gestión del agua y del saneamiento en la comunidad seleccionada. El objetivo es diseñar un sistema de tratamiento de aguas grises mediante humedales construido subsuperficial. Este tipo de sistema se adapta a las condiciones topográficas planas de la región y proporciona una solución para el tratamiento y reutilización de aguas.

2.7.1 Justificación del Diseño

El sistema seleccionado se considera el adecuado para la comunidad por las siguientes razones:

- La topografía de la región facilita la implementación de humedales de flujo subsuperficial, que requieren una disposición relativamente sencilla del lecho de grava y vegetación.
- El humedal seleccionado es eficaz en la remoción de contaminantes comunes en aguas residuales domésticas, como DBO, DQO, nitrógeno amoniacal y fosfatos. Su diseño permite un contacto entre el agua y las raíces de las plantas, facilitando la degradación de contaminantes.
- Estos sistemas requieren menos mantenimiento comparado con otros tipos de humedales y utilizan materiales disponibles localmente, lo que reduce los costos operativos y mejora la viabilidad del proyecto.

La implementación de este sistema busca mejorar la calidad del agua en la comunidad, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental al disminuir la contaminación de los recursos hídricos. Mejorando las deficiencias en la infraestructura disponible en la zona.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados Esperados

En el desarrollo del presente proyecto, se espera obtener resultados que permitan avanzar en la gestión sostenible del agua residual y su posible aprovechamiento en riego agrícola, en cumplimiento con los lineamientos del TULSMA. Estos resultados contribuirán tanto al diseño de sistemas de tratamiento adecuados como a la mejora de las prácticas locales de gestión de los recursos hídricos. A continuación, se presentan los resultados esperados:

- **Validación de la calidad del agua residual para su uso en riego agrícola según el TULSMA**

Este proyecto espera validar la calidad del agua residual mediante un análisis basado en los criterios de calidad establecidos en el TULSMA, asegurando que el agua cumpla con los estándares para su aprovechamiento en riego agrícola. Esta validación es clave para fomentar el uso sostenible de los recursos hídricos y contribuir al desarrollo de prácticas agrícolas seguras y eficientes.

- **Diseño adecuado del sistema de filtración subterráneo**

Se prevé el diseño de un sistema de filtración subterráneo, que tome en cuenta tanto la caracterización química y física del agua residual como las condiciones del entorno local. Este diseño permitirá optimizar la calidad del agua tratada para su aplicación en riego, integrando prácticas sostenibles y asequibles para el beneficio de la comunidad.

3.2 Análisis de resultados

3.2.1 Encuesta realizada

La encuesta realizada a los moradores de la comunidad rural es un elemento importante para el desarrollo de este proyecto, ya que permite recopilar información detallada sobre la gestión del agua en la comunidad. A través de esta herramienta, se busca identificar las condiciones actuales, deficiencias y oportunidades en el manejo de los recursos hídricos. Los resultados obtenidos ayudarán a tomar decisiones para el diseño de soluciones específicas con las condiciones particulares del sector.

Figura 3.1 – Encuesta realizada a moradores de la comunidad rural (Carriel, 2024)

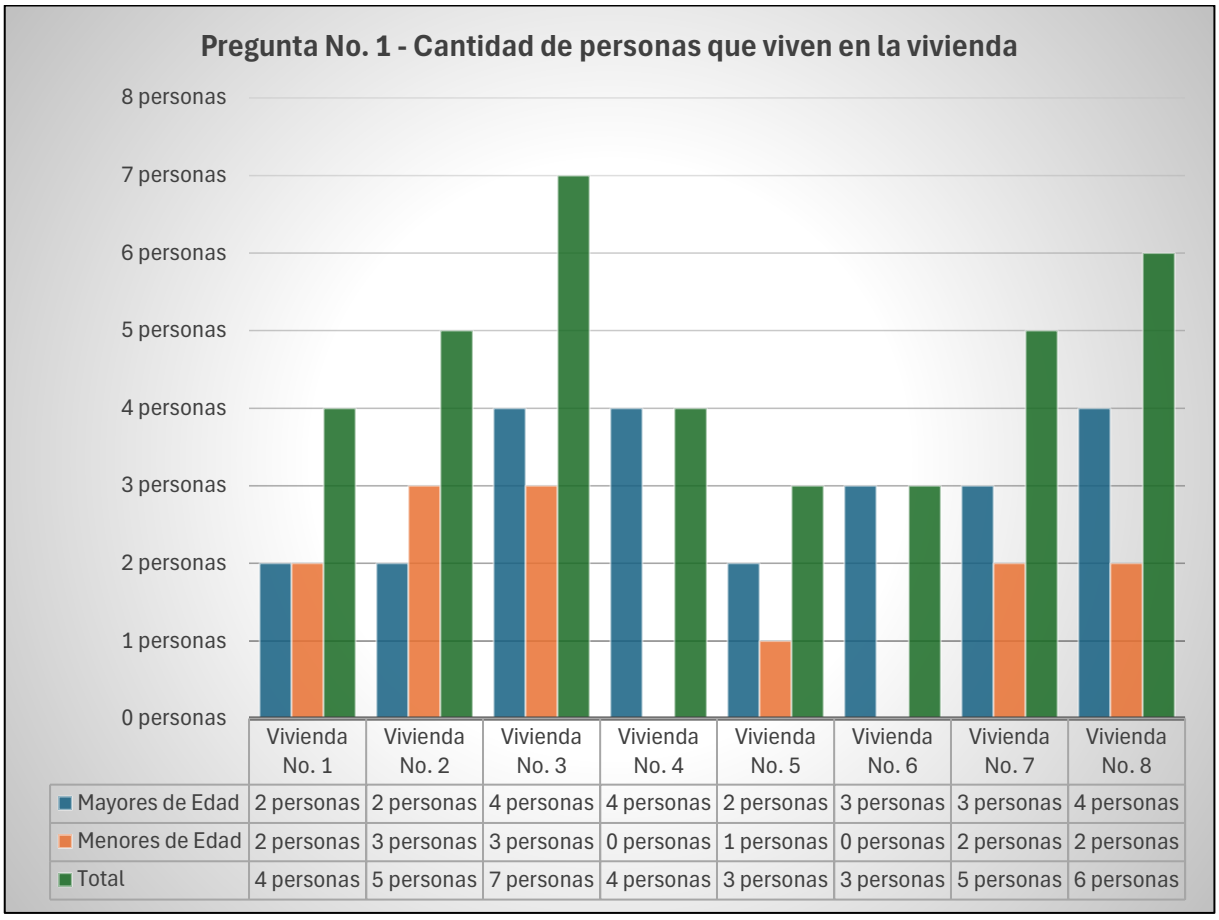
Figura 3.2 – Encuesta realizada a moradores de la comunidad rural (Carriel, 2024)

Figura 3.3 – Encuesta realizada a moradores de la comunidad rural (Carriel, 2024)

3.2.1.1 Análisis de Sección 1: Datos Generales de la Vivienda

Pregunta No. 1: Cantidad de personas que viven en la vivienda:

Se evaluó la cantidad de personas que viven en cada vivienda, separando entre mayores y menores de edad. Los resultados mostraron una distribución variable, con un total de entre 2 a 7 personas por vivienda. La vivienda con mayor cantidad de personas fue la Vivienda No. 4, con 7 habitantes, mientras que la Vivienda No. presentó el menor número de personas, con 3 habitantes. Estos resultados, representados en un gráfico de barras, reflejan la diversidad en el tamaño de las familias, lo cual tiene implicaciones para el diseño del sistema de tratamiento, ya que el volumen de agua residual generada será directamente proporcional al número de personas por vivienda.



	Vivienda No. 1	Vivienda No. 2	Vivienda No. 3	Vivienda No. 4	Vivienda No. 5	Vivienda No. 6	Vivienda No. 7	Vivienda No. 8
Mayores de Edad	2 personas	2 personas	4 personas	4 personas	2 personas	3 personas	3 personas	4 personas
Menores de Edad	2 personas	3 personas	3 personas	0 personas	1 personas	0 personas	2 personas	2 personas
Total	4 personas	5 personas	7 personas	4 personas	3 personas	3 personas	5 personas	6 personas

Figura 3.4 – Diagrama de Pregunta No. 1 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

Pregunta No. 2: ¿Hace cuántos años vive en esta vivienda?

Los resultados, indican que la mayoría de las familias llevan varios años residiendo en sus viviendas, con una distribución que va desde pocos años hasta varias décadas. Este factor es importante para el proyecto de saneamiento, ya que un mayor tiempo de residencia implica una mayor acumulación de aguas residuales en sistemas como pozos sépticos.

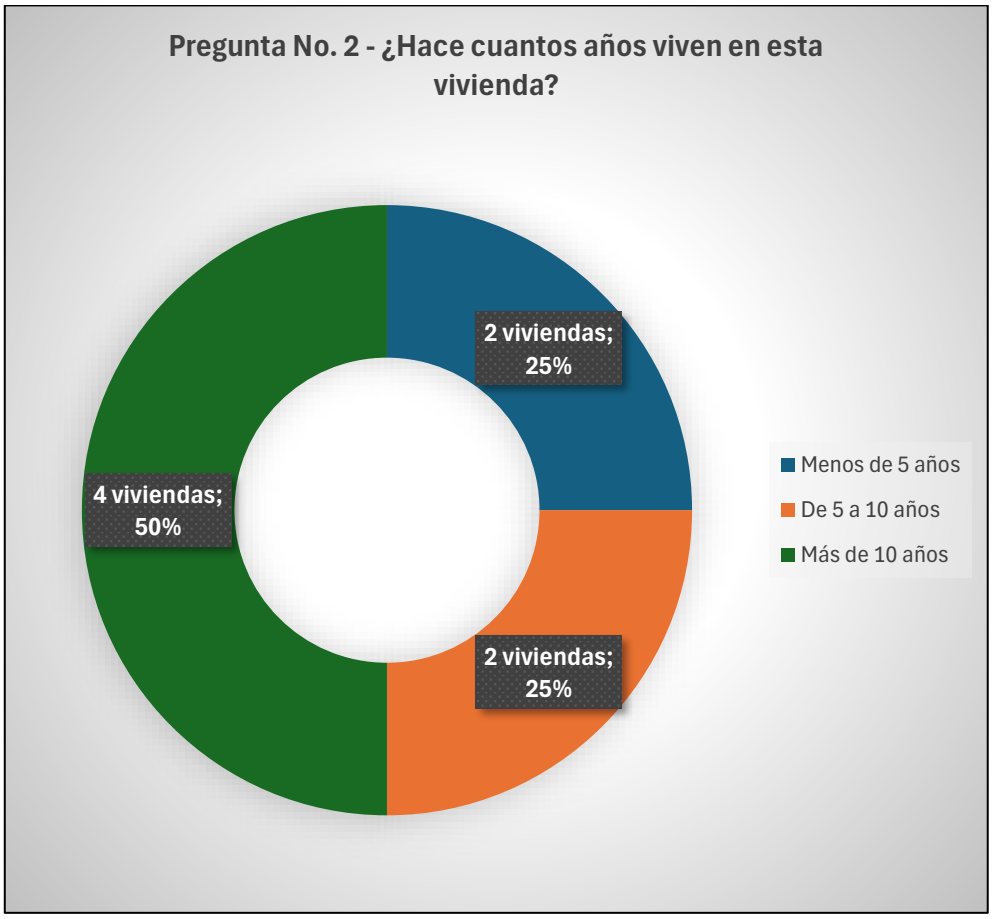


Figura 3.5 – Diagrama de Pregunta No. 2 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

Pregunta No. 3: ¿De dónde proviene el agua que utilizan en la vivienda?

Los resultados revelan que las 8 viviendas encuestadas dependen exclusivamente de pozos profundos como fuente de abastecimiento. No se registró el uso de otras fuentes como ríos, cisternas, agua de lluvia o la red pública. Este dato resalta la ausencia de infraestructura pública de agua potable en la comunidad y subraya la dependencia del recurso subterráneo, lo que puede implicar un mayor riesgo de contaminación si no se maneja adecuadamente.

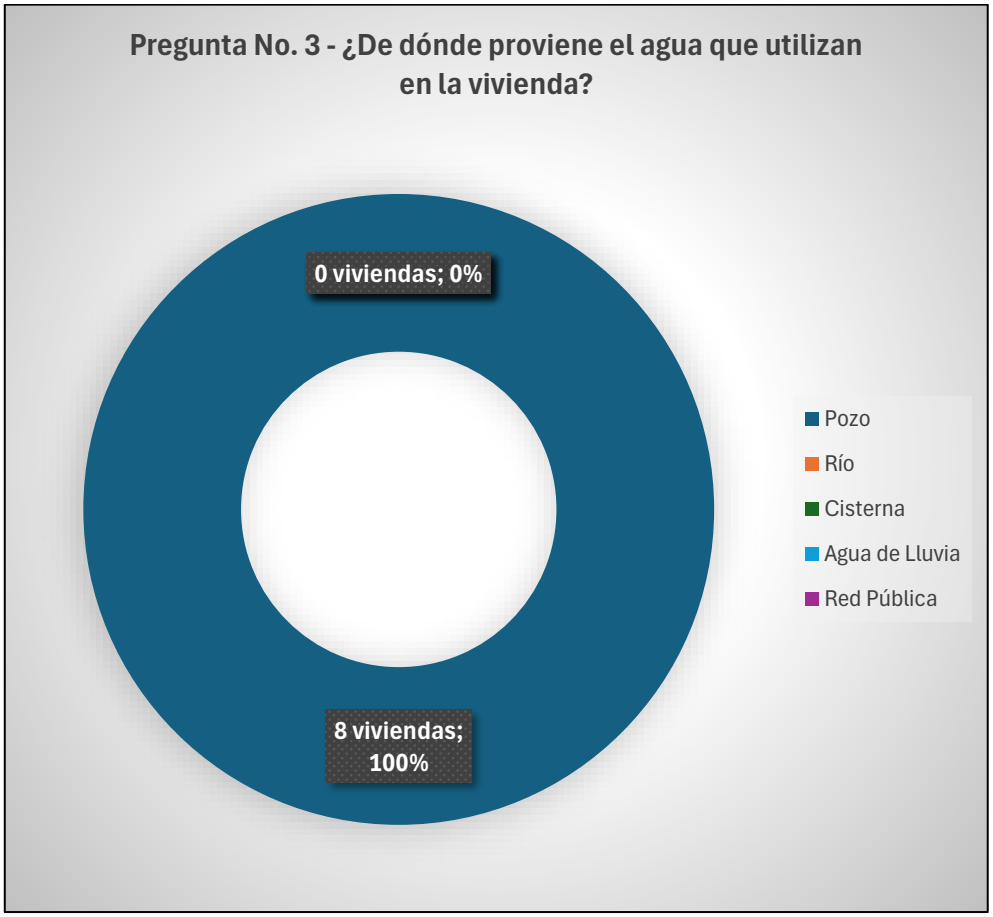


Figura 3.6 – Diagrama de Pregunta No. 3 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

3.2.1.2 Análisis de Sección 2: Acceso y Consumo de Agua

Pregunta No. 4: Para el consumo, ¿utilizan la misma agua que para otras actividades o adquieren agua distinta?

Se consultó sobre el uso de agua para consumo en comparación con otras actividades. Los resultados indican que 5 viviendas adquieren agua purificada exclusivamente para consumo, mientras que 3 viviendas utilizan el agua de pozo tanto para beber como para otras actividades. Estos datos subrayan la preocupación de algunos moradores por la calidad del agua para consumo humano, ya que más de la mitad de las viviendas optan por comprar agua purificada, lo que evidencia una posible falta de confianza en la calidad del agua del pozo.

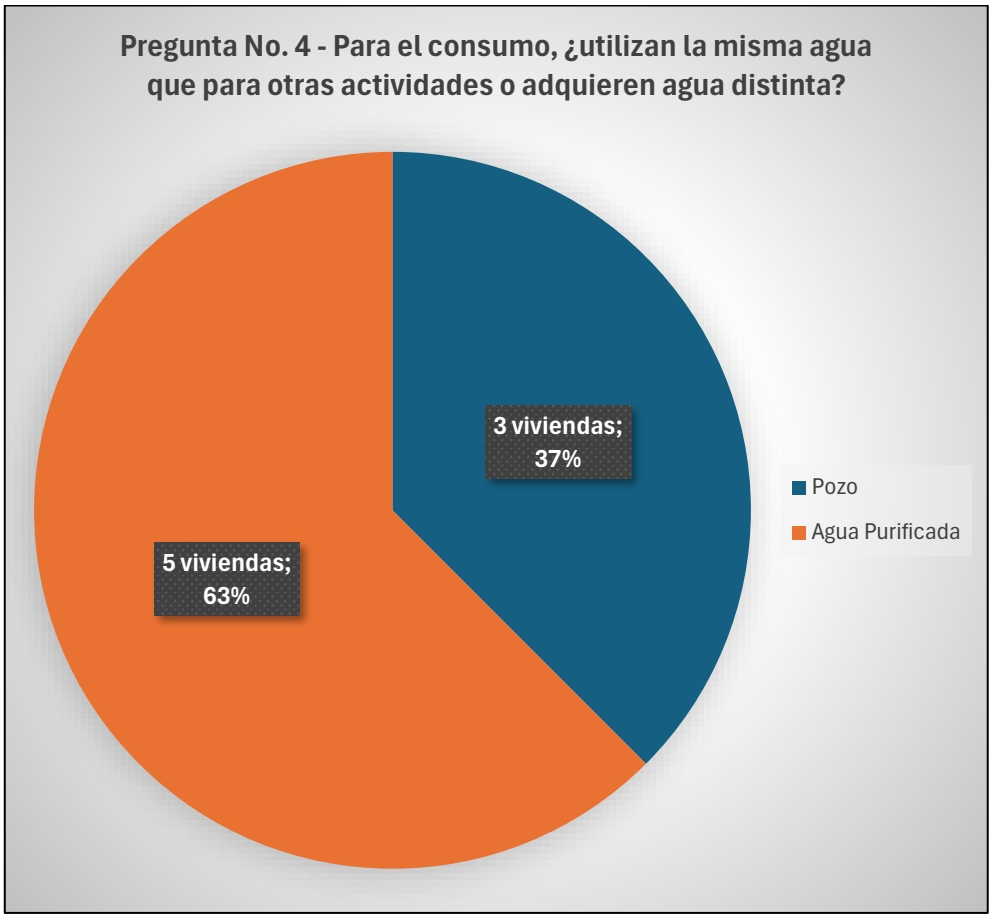


Figura 3.7 – Diagrama de Pregunta No. 4 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

Pregunta No. 5: ¿Reutilizan el agua para alguna actividad en la vivienda (como riego, limpieza, etc.)?

Los resultados muestran que 3 viviendas indicaron que reutilizan el agua, mientras que 5 no lo hacen. Esto refleja que la mayoría de los moradores no están aprovechando el recurso hídrico para actividades secundarias, lo que puede representar una oportunidad de mejora en la gestión del agua. La reutilización adecuada del agua, especialmente en áreas rurales, puede disminuir la demanda sobre las fuentes de agua y mejorar la sostenibilidad del uso de este recurso.

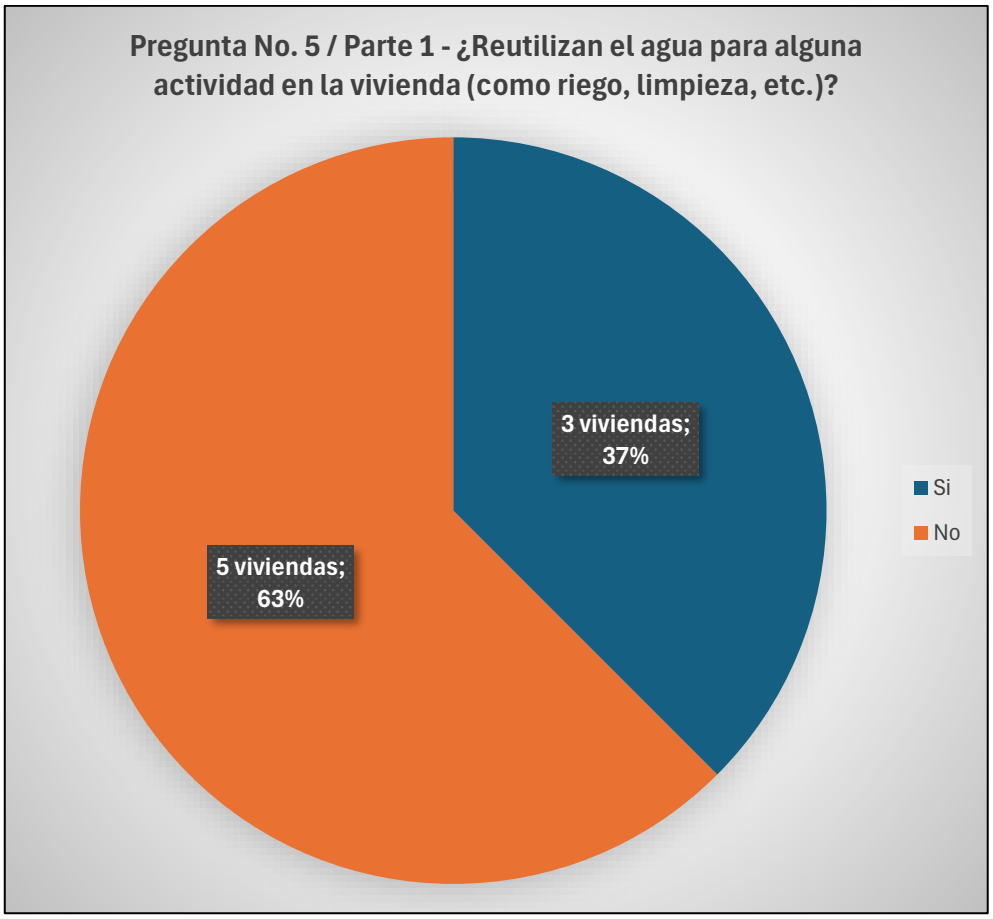


Figura 3.8 – Diagrama de Pregunta No. 5 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

¿Realizan algún tratamiento antes de reutilizarla o simplemente la desechan?

Para las viviendas que respondieron afirmativamente, se realizó una segunda pregunta sobre el tratamiento del agua reutilizada. De las 3 viviendas que reutilizan el agua, 3 vivienda reutilizan el agua de la lavadora, a la vez que estas 3 viviendas no le realizan ningún tratamiento. Esto indica una práctica común de desechar el agua sin tratamiento previo, lo cual representa un riesgo ambiental si no se maneja adecuadamente. Estos datos sugieren la necesidad de implementar estrategias simples de tratamiento para mejorar la calidad del agua reutilizada y asegurar su uso seguro en actividades domésticas.

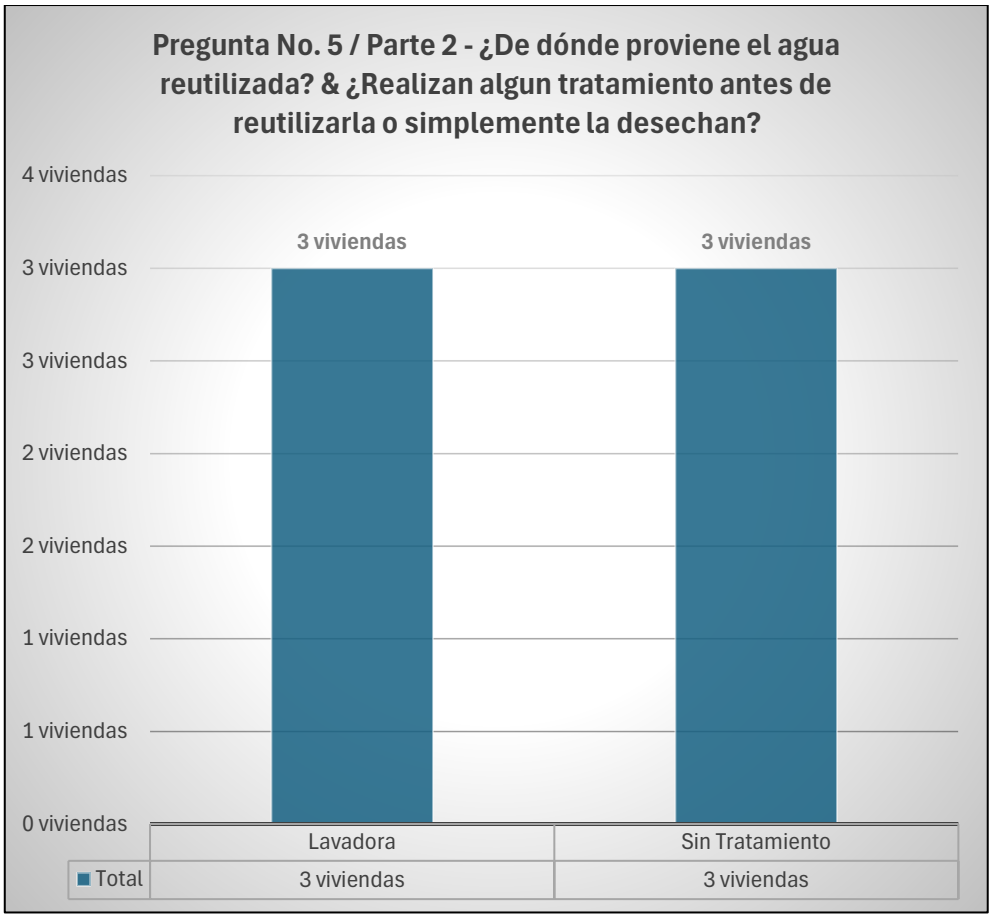


Figura 3.9 – Diagrama de Pregunta No. 5 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

Pregunta No. 6: ¿Considera que el agua que utiliza en la vivienda es suficiente para todas sus necesidades?

De las 8 viviendas encuestadas, 5 respondieron que no es suficiente, mientras que 3 indicaron que sí lo es. Estos resultados subrayan que una mayoría significativa de la comunidad enfrenta dificultades para satisfacer todas sus demandas de agua, lo que refleja una deficiencia en el acceso adecuado al recurso hídrico.

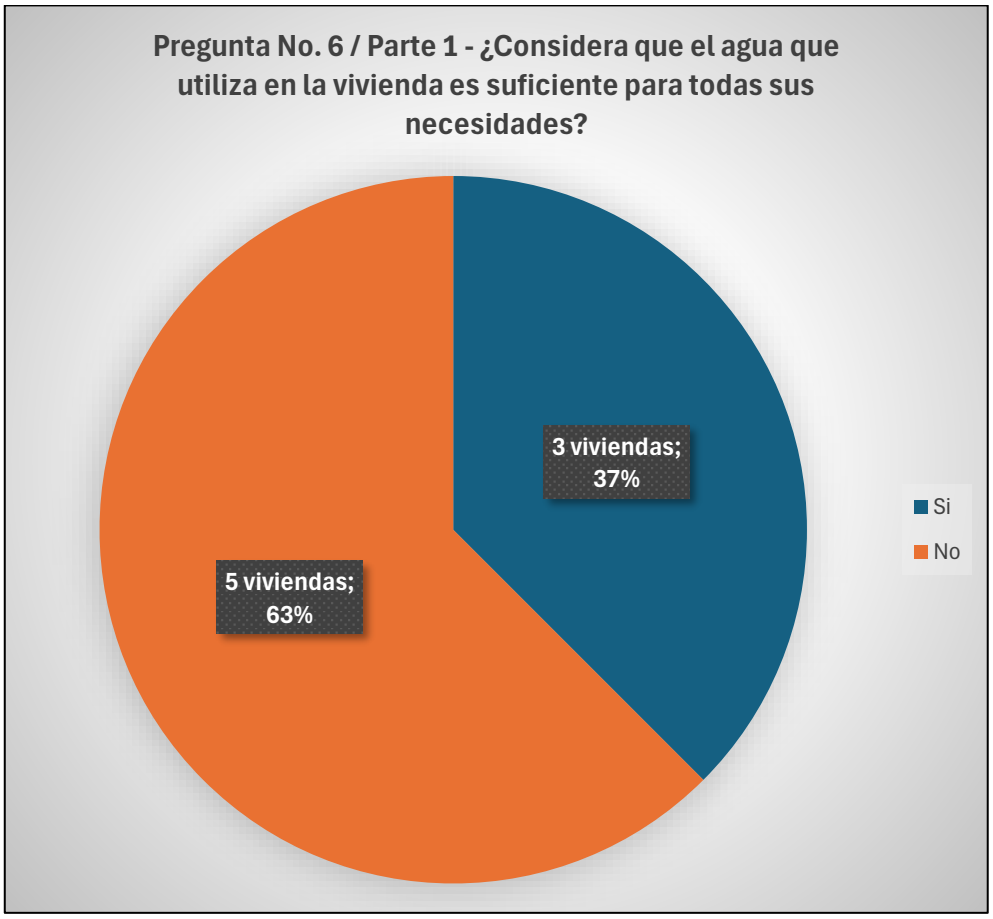


Figura 3.10 – Diagrama de Pregunta No. 6 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

Especificar qué necesidades no cubre

Para quienes respondieron que el agua no cubre todas sus necesidades, se les pidió que especificaran qué aspectos eran insuficientes. De las 5 viviendas, 2 señalaron la falta de agua potable y 3 mencionaron que no tienen suficiente para cocinar. Este detalle resalta que las principales carencias están relacionadas con el agua para consumo humano y la preparación de alimentos, lo que enfatiza la necesidad urgente de mejorar tanto la calidad como el suministro del agua en la comunidad, enfocándose en garantizar acceso seguro y suficiente para estas necesidades básicas.

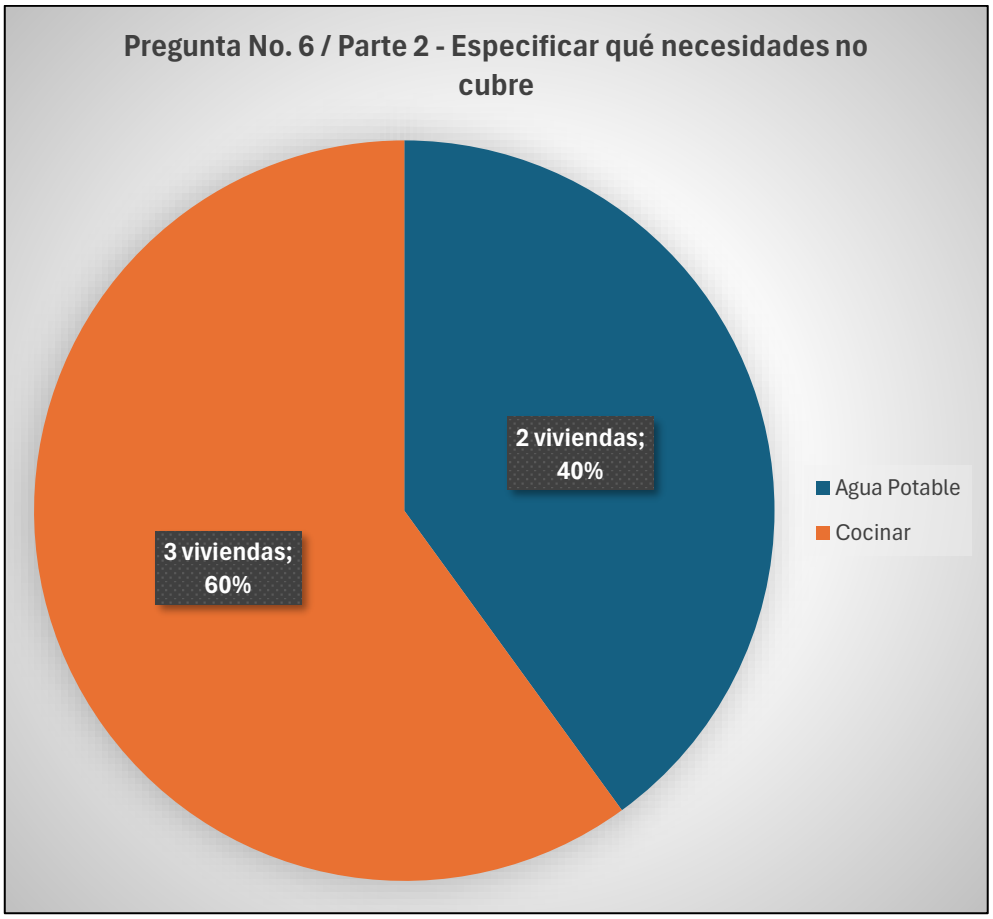


Figura 3.11 – Diagrama de Pregunta No. 6 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

Pregunta No. 7: ¿El agua que utilizan en la vivienda es de buena calidad?

Los resultados mostraron que la mayoría, 6 de las 8 viviendas encuestadas, indicaron que el agua no es de buena calidad, mientras que solo 2 afirmaron que sí lo es. Esta percepción generalizada de baja calidad del agua refleja una preocupación importante en la comunidad, especialmente en cuanto al agua destinada para actividades domésticas y de consumo.

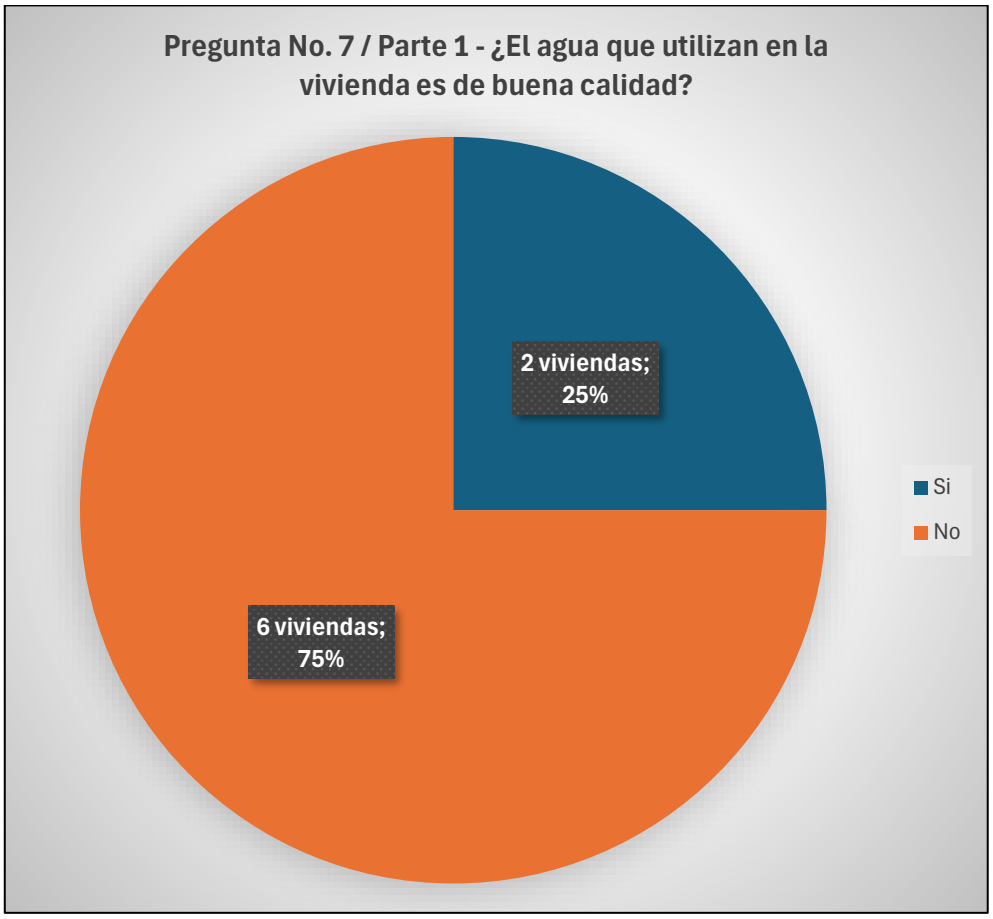


Figura 3.12 – Diagrama de Pregunta No. 7 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

No (indicar problemas):

A quienes respondieron que el agua no es de buena calidad, se les solicitó especificar los problemas que han percibido. Las respuestas obtenidas revelaron que los principales problemas están relacionados con características físicas organolépticas, específicamente sabor, olor y color. Tres viviendas mencionaron problemas de sabor, dos señalaron color, y una indicó problemas con el olor. Estos problemas son indicativos de posibles contaminantes presentes en el agua, lo que refuerza la importancia de implementar sistemas de tratamiento eficaces que puedan garantizar un agua más segura y adecuada para el uso doméstico y humano en esta comunidad.

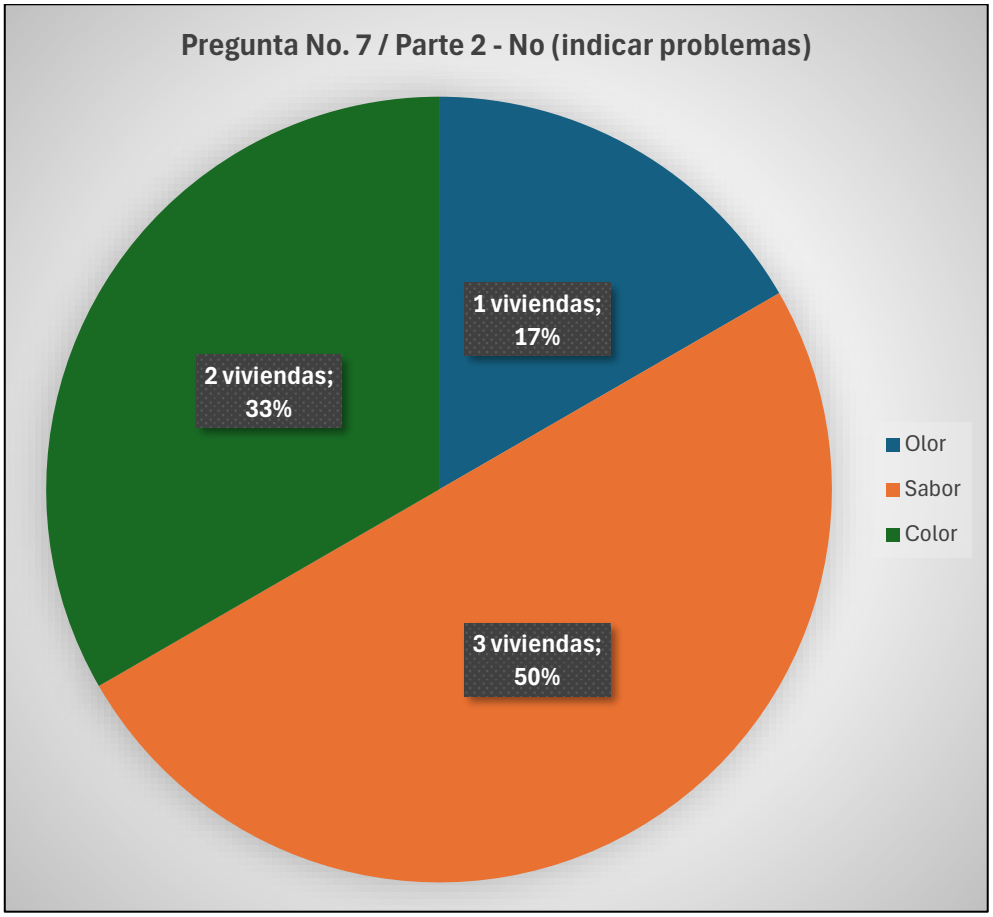


Figura 3.13 – Diagrama de Pregunta No. 7 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

3.2.1.3 Análisis de Sección 3: Aguas residuales y Saneamiento

Pregunta No. 8: ¿Qué tipo de sistema de saneamiento utilizan para las aguas residuales domésticas?

En la zona de estudio 7 de las 8 viviendas encuestadas, utilizan un pozo séptico, mientras que una vivienda reportó el uso de una letrina. Ninguna vivienda indicó no poseer un sistema de saneamiento. Estos datos destacan que, aunque la mayoría de las viviendas cuenta con algún tipo de solución para el manejo de aguas residuales, el uso predominante de pozos sépticos sugiere una necesidad de mejorar las condiciones de saneamiento en términos de sostenibilidad y posibles impactos ambientales.

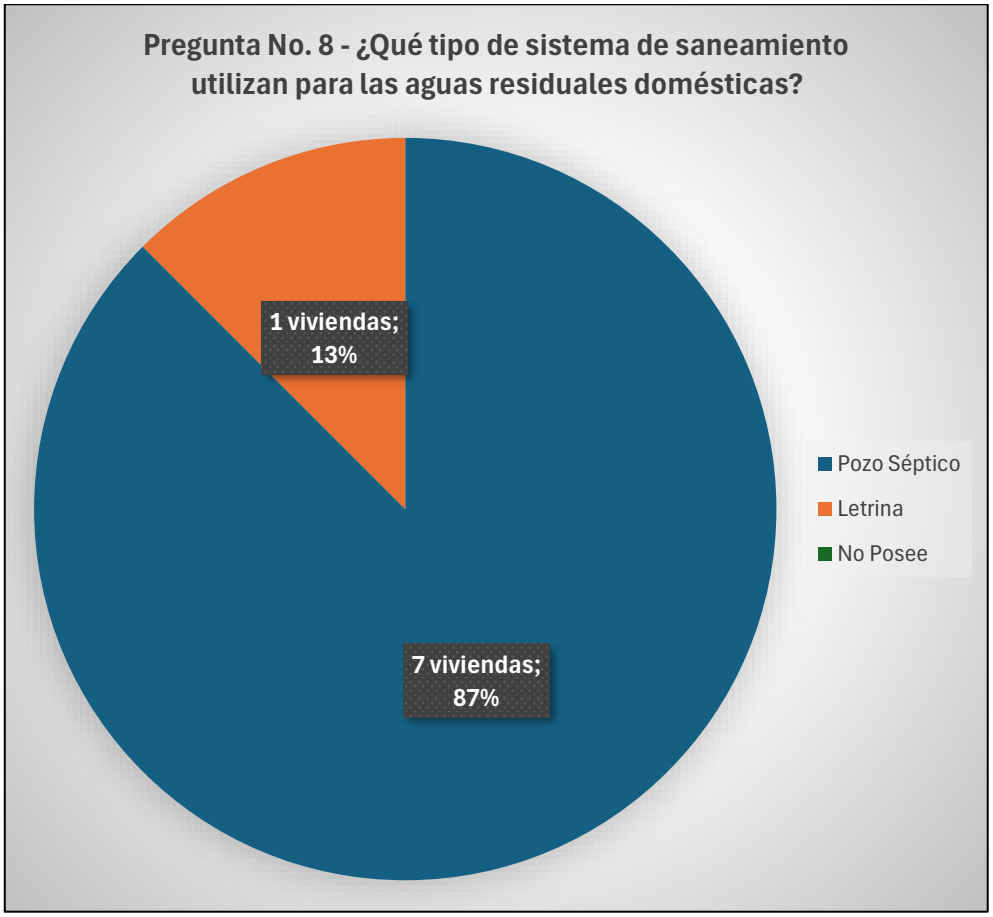


Figura 3.14 – Diagrama de Pregunta No. 8 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

Pregunta No. 9: Si utilizan pozo séptico, ¿sabía que es necesario realizarle mantenimiento regular para evitar la contaminación de aguas subterráneas?

Se indagó a los encuestados si conocían la importancia de realizar mantenimiento a los pozos sépticos para evitar la contaminación de las aguas subterráneas. Los resultados muestran que solo 2 de las 7 viviendas que utilizan un pozo séptico son conscientes de esta necesidad, mientras que 6 viviendas no estaban al tanto de la importancia del mantenimiento en sistemas de tratamiento.

Este resultado muestra una significativa falta de conocimiento en la comunidad sobre el manejo de los sistemas de saneamiento. La falta de mantenimiento en los pozos sépticos puede provocar la filtración de aguas residuales hacia el subsuelo, contaminando fuentes de agua cercanas.

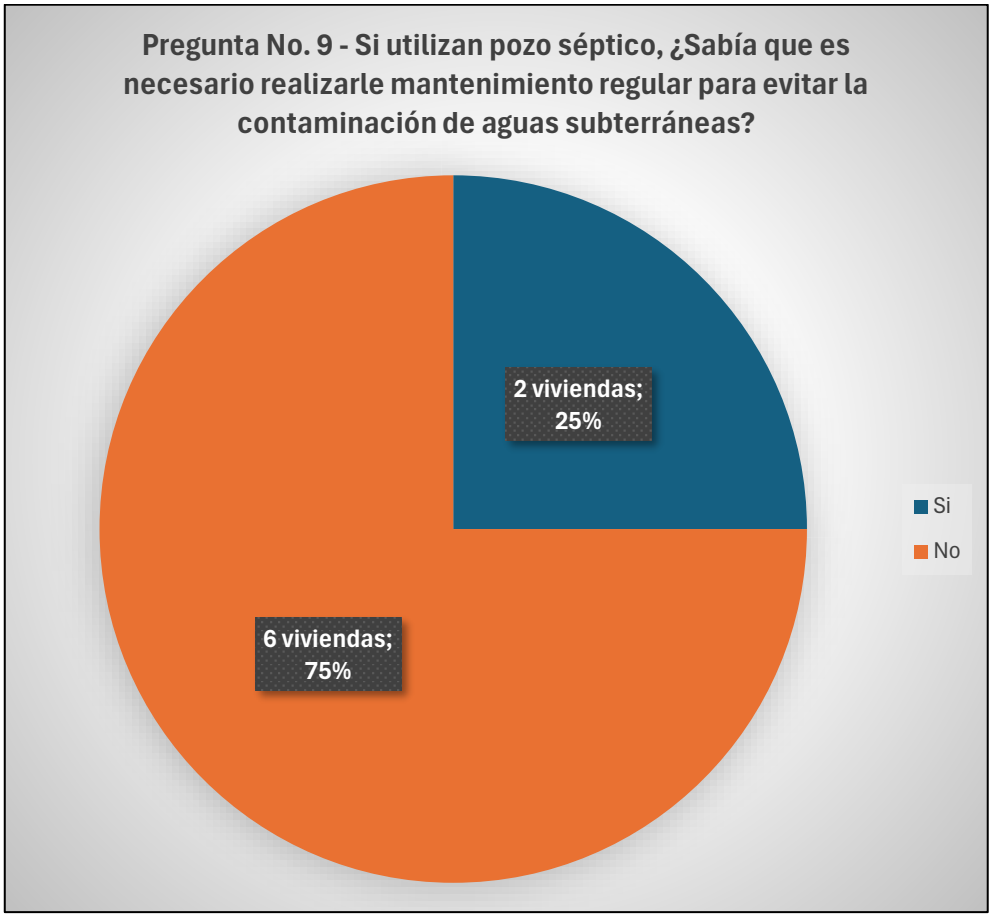


Figura 3.15 – Diagrama de Pregunta No. 9 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

Pregunta No. 10: Durante el tiempo que ha vivido aquí, ¿cuántos pozos sépticos han utilizado en la vivienda?

Los resultados indican que 2 viviendas han utilizado un pozo séptico, mientras que 3 viviendas han utilizado dos pozos y otras 3 viviendas han utilizado tres pozos. Estos resultados evidencian que una parte considerable de la comunidad ha tenido que recurrir a múltiples pozos sépticos, lo que sugiere que los sistemas de saneamiento instalados no están siendo sostenibles a largo plazo. El uso repetido de nuevos pozos podría estar relacionado con la falta de mantenimiento adecuado y la saturación de los pozos existentes.

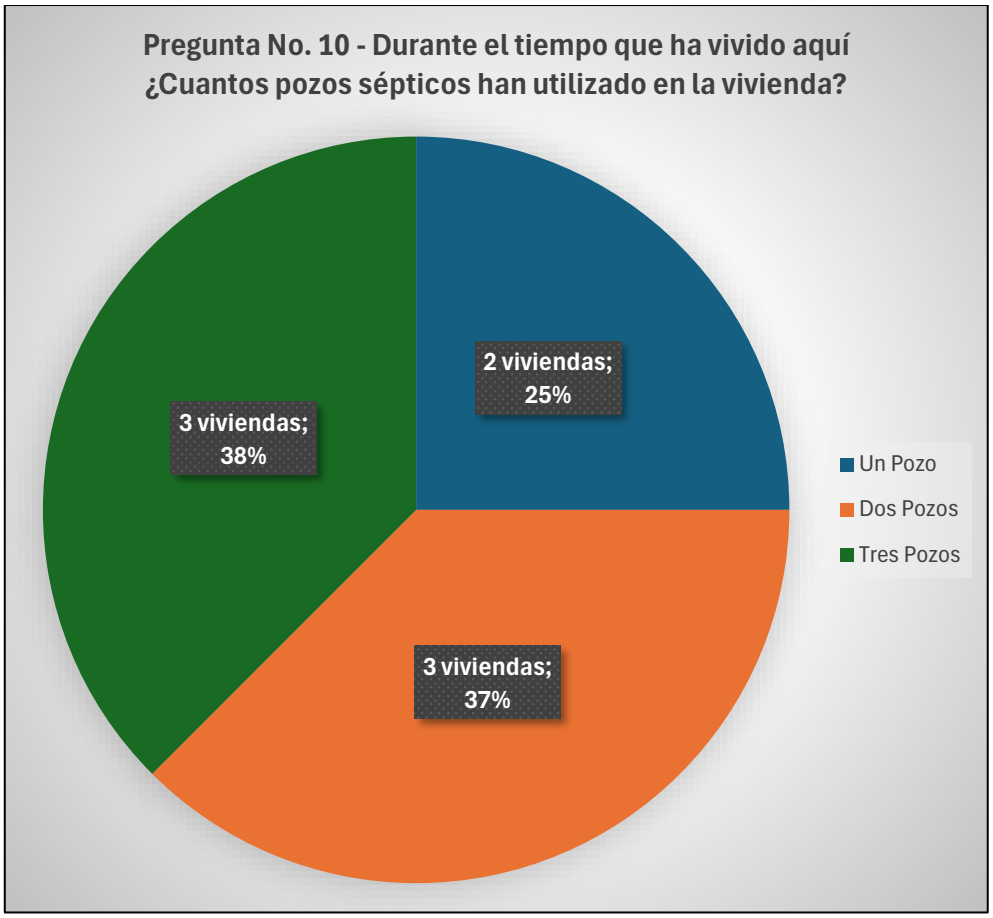


Figura 3.16 – Diagrama de Pregunta No. 10 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

3.2.1.4 Análisis de Sección 4: Satisfacción y mejoras

Pregunta No. 11: Si pudieran mejorar alguna condición relacionada con el agua en su vivienda, ¿qué elegirían como prioridad?

Los resultados indican que tres viviendas eligieron mejorar el acceso a agua potable, dos viviendas priorizaron el manejo de aguas servidas, y tres viviendas optaron por mejorar el saneamiento, evidenciando las diferentes necesidades de la comunidad. Mientras que una proporción mayoritaria de los encuestados considera que el acceso a agua potable es una prioridad, otros reconocen la importancia de mejorar tanto el manejo de aguas residuales como el saneamiento general en la vivienda.

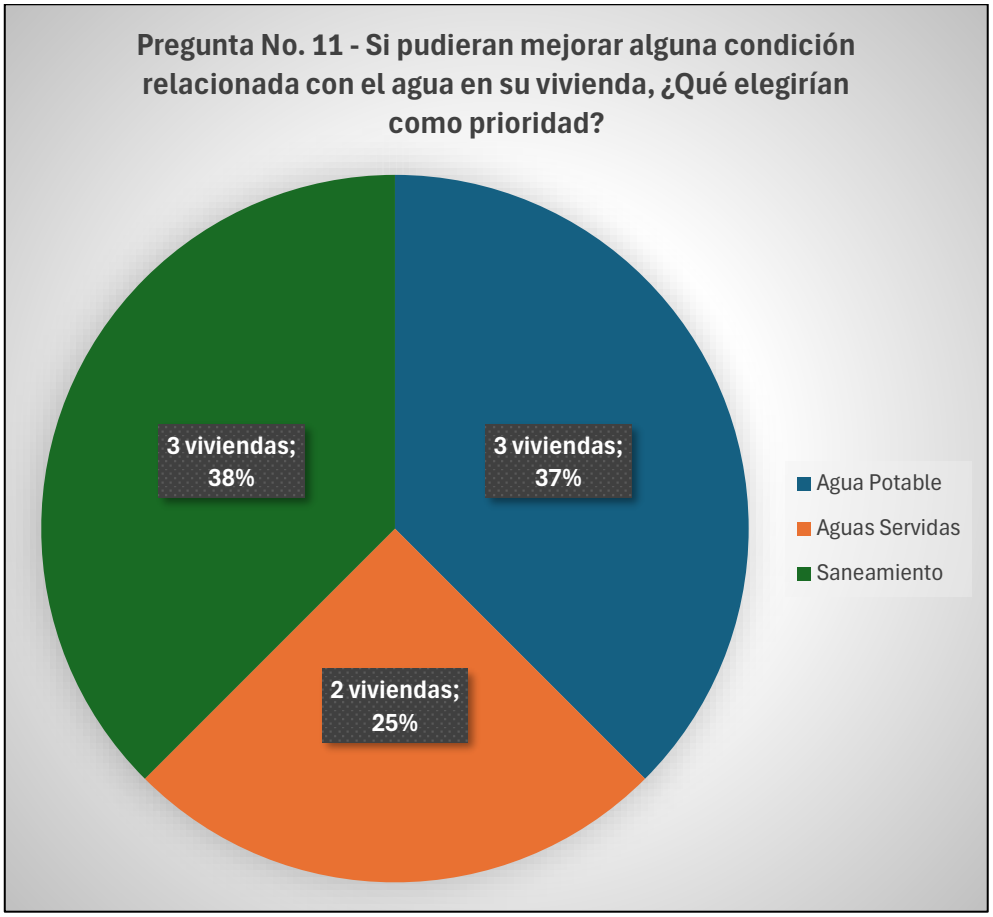


Figura 3.17 – Diagrama de Pregunta No. 11 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

3.2.1.5 Análisis de Sección 5: Criterios de selección del sistema

Pregunta No. 12: ¿El terreno de la vivienda es plano o tiene inclinaciones?

Respecto a la topografía del terreno de las viviendas, obteniendo los siguientes resultados: dos viviendas indicaron que su terreno es totalmente plano, cinco viviendas señalaron que tienen inclinaciones suaves, y una vivienda reportó tener inclinaciones pronunciadas. Estos resultados son relevantes para el desarrollo de cualquier sistema de saneamiento o tratamiento de aguas residuales, ya que la topografía del terreno influye directamente en el diseño. Los terrenos planos pueden facilitar la instalación de sistemas de drenaje y tratamiento, mientras que aquellos con inclinaciones suaves o pronunciadas podrían requerir consideraciones adicionales para evitar problemas de escorrentía y garantizar un adecuado funcionamiento del sistema.

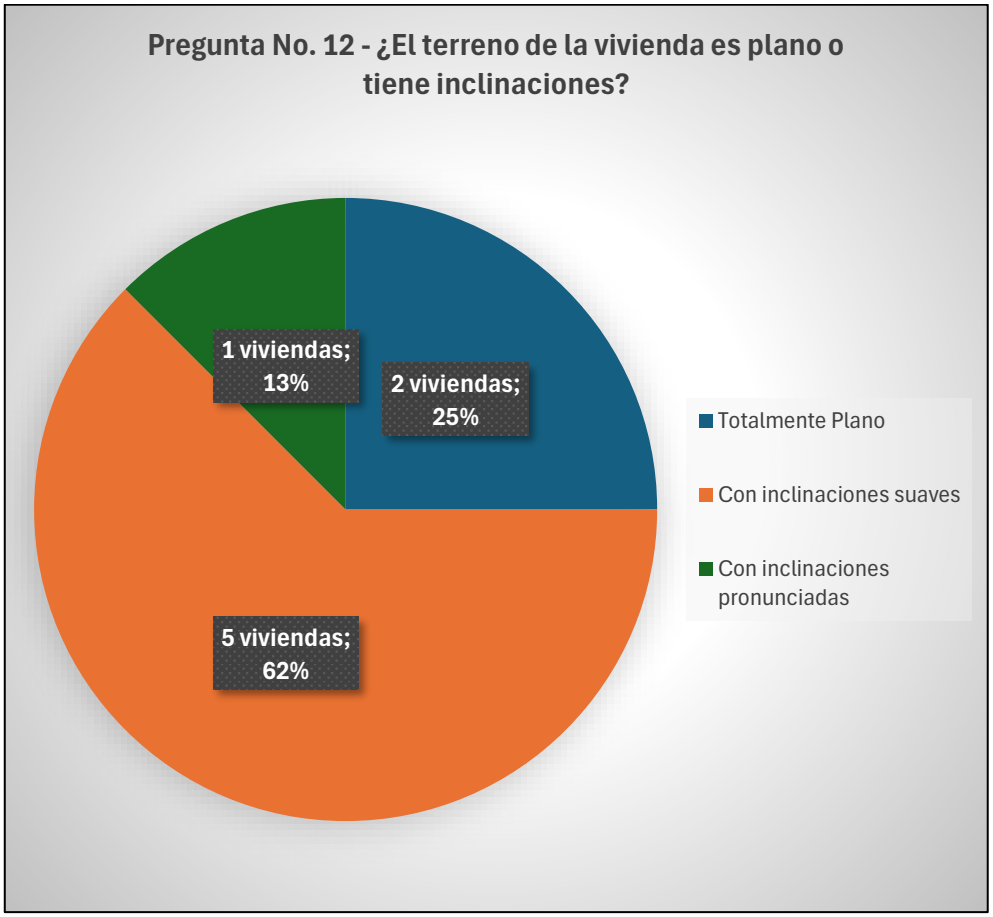


Figura 3.18 – Diagrama de Pregunta No. 12 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

Pregunta No. 13: ¿Qué espacio disponible tiene en su vivienda para la instalación de un sistema de tratamiento de aguas?

Los resultados obtenidos indican que cinco viviendas disponen de menos de 10 m², dos viviendas cuentan con un espacio entre 10 y 20 m², y una vivienda tiene más de 20 m². Estos datos son relevantes para el diseño de un sistema de tratamiento adecuado, ya que la disponibilidad de espacio influye en las opciones que se pueden implementar. La mayoría de los encuestados con menos de 10 m² podría limitar las soluciones a sistemas compactos o modulares, mientras que aquellos con más espacio podrían considerar alternativas más extensas que ofrezcan un tratamiento más completo.

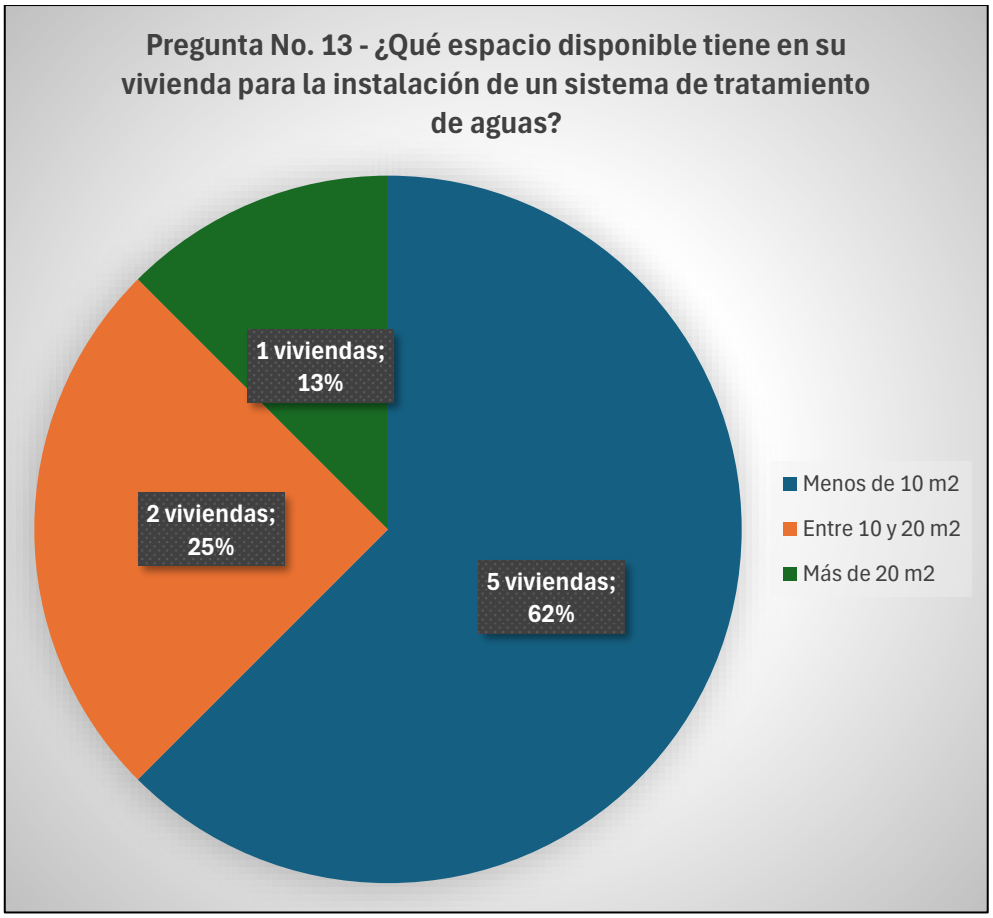


Figura 3.19 – Diagrama de Pregunta No. 13 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

Pregunta No. 14: ¿La vivienda tiene algún sistema actual para el manejo de aguas grises (lavamanos, ducha, cocina)?

Este resultado muestra una carencia significativa en la gestión de aguas residuales en la comunidad, en donde ocho viviendas respondieron negativamente, indicando que no cuentan con un sistema establecido para el manejo de estas aguas. La falta de un sistema adecuado para el tratamiento y disposición de estas aguas puede contribuir a la contaminación de fuentes hídricas locales y afectar la calidad de vida.

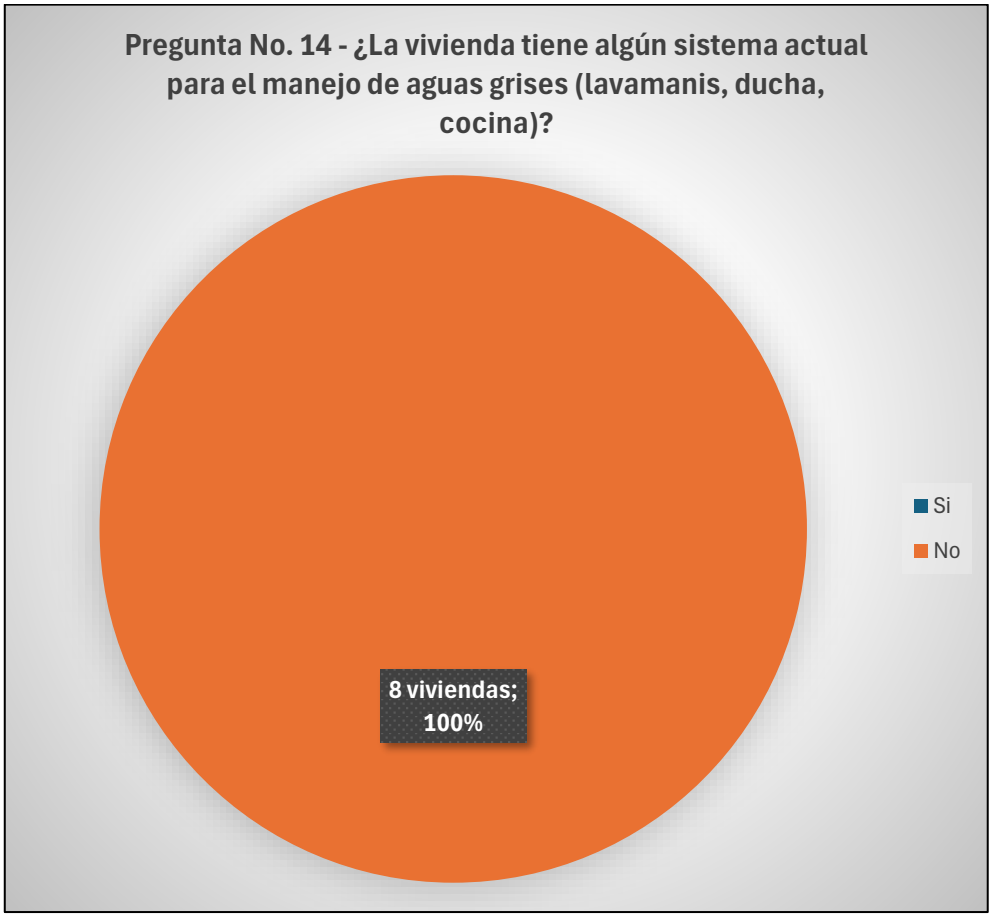


Figura 3.20 – Diagrama de Pregunta No. 14 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

Pregunta No. 15: ¿Qué tipo de vegetación tiene en los alrededores de la vivienda? Los resultados obtenidos fueron los siguientes: tres viviendas reportaron tener vegetación densa, tres viviendas mencionaron tener vegetación moderada, y dos viviendas indicaron que tienen poca o ninguna vegetación. Estos resultados son relevantes para el diseño de un sistema de tratamiento de aguas, ya que la vegetación puede influir en la calidad del suelo y en la capacidad de absorción y filtración del agua. La vegetación densa puede actuar como un excelente biofiltro, ayudando a mejorar la calidad del agua al absorber nutrientes y contaminantes, lo cual es un factor positivo para la implementación de humedales construidos.

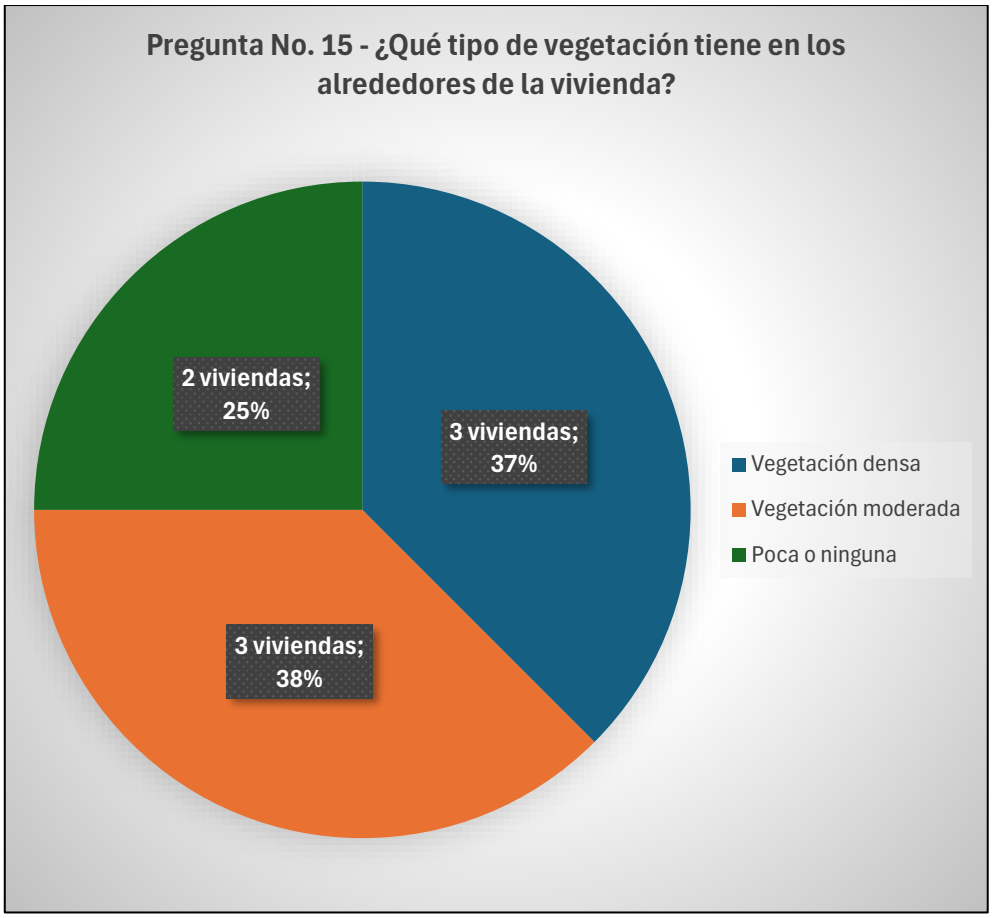


Figura 3.21 – Diagrama de Pregunta No. 15 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

Pregunta No. 16: ¿Está dispuesto a mantener y monitorear un sistema de tratamiento de aguas residuales?

De los resultados obtenidos, 7 viviendas manifestaron que No están dispuestas a llevar a cabo estas actividades, mientras que solo 1 vivienda respondió Si. Este resultado es importante para la planificación e implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la comunidad, ya que la falta de disposición para el mantenimiento y monitoreo puede comprometer la eficacia y sostenibilidad del sistema.

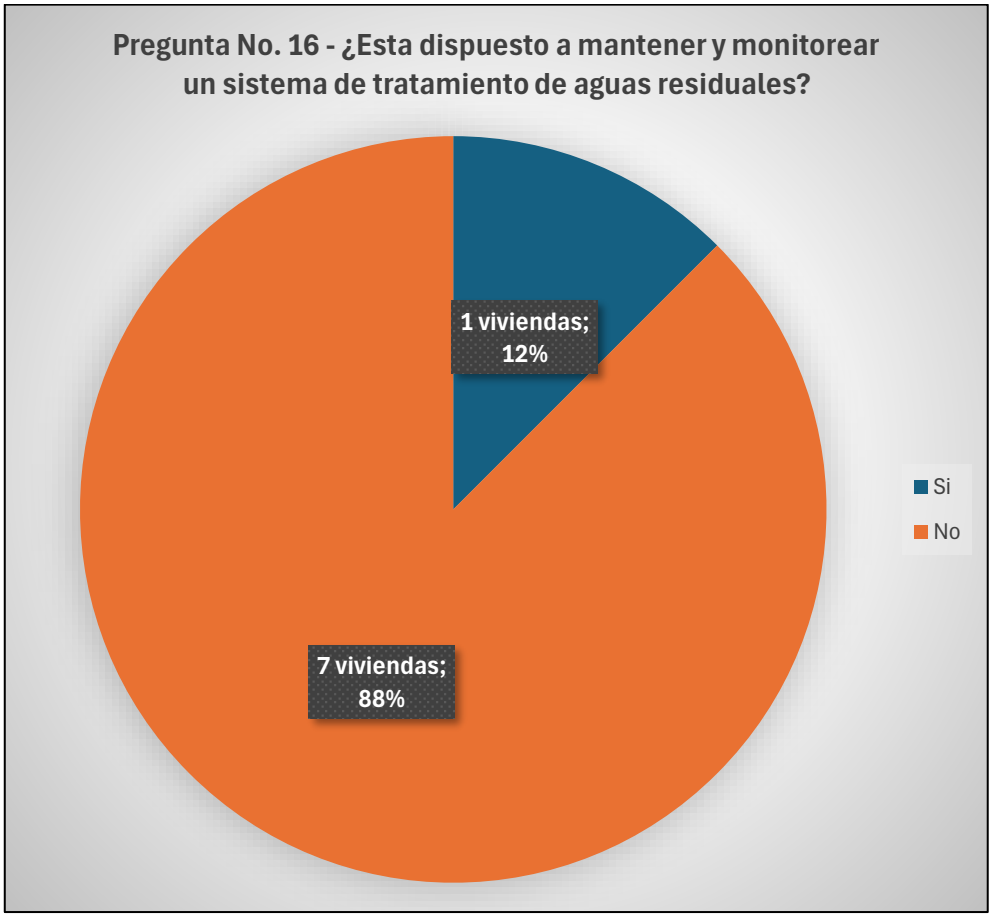


Figura 3.22 – Diagrama de Pregunta No. 16 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

Pregunta No. 17: ¿Cómo calificaría la importancia de tratar y reutilizar las aguas grises en su vivienda?

Los resultados indican que dos viviendas calificaron esta práctica como muy importante, mientras que otras dos la consideraron moderadamente importante. Sin embargo, la mayoría, es decir, cuatro viviendas, opinaron que no es prioritario. La valoración de “muy importante” y “moderadamente importante” por parte de algunos residentes puede reflejar una conciencia sobre la escasez de recursos hídricos y la necesidad de una gestión más sostenible del agua. No obstante, la respuesta predominante de “no es prioritario” entre la mayoría de los encuestados puede ser indicativa de una falta de comprensión de los beneficios asociados a la reutilización del agua, o de una priorización de otras necesidades más urgentes en la comunidad.

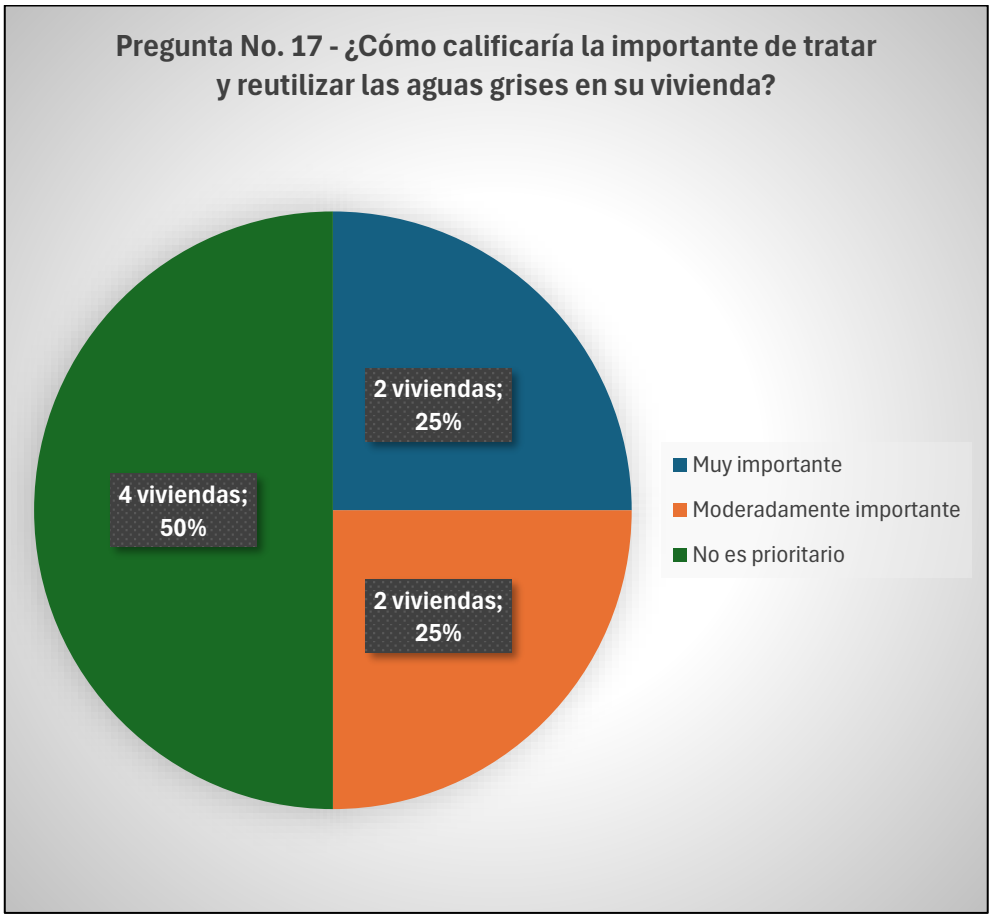


Figura 3.23 – Diagrama de Pregunta No. 17 de la Encuesta Realizada (Carriel, 2024)

3.2.2 Especificaciones técnicas

Para el desarrollo de esta sección, se realizará una evaluación siguiendo la normativa vigente en Ecuador, que establece los requisitos para la calidad del agua destinada a diferentes usos, incluyendo el uso agrícola. Destaca en este ámbito el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), el cual regula y supervisa los parámetros de calidad de agua en el país.

Dentro del contexto agrícola, el agua de uso agrícola se define como aquella empleada en la irrigación de cultivos, así como en actividades conexas o complementarias. Para asegurar la salubridad de este recurso, se prohíbe el uso de aguas residuales sin tratamiento para riego. Sin embargo, se permiten las aguas residuales tratadas, siempre que cumplan con los niveles de calidad establecidos en el TULSMA.

Tabla 3.1 – Criterios de calidad de aguas para riego agrícola (Ministerio del Ambiente, 2015)

PARAMETRO	EXPRESADO COMO	UNIDAD	CRITERIO DE CALIDAD
Aceites y grasas	Película visible	mg/l	Ausencia
Aluminio	Al	mg/l	5.00
Arsénico	As	mg/l	0.10
Berilio	Be	mg/l	0.10
Boro	B	mg/l	0.75
Cadmio	Cd	mg/l	0.05
Cinc	Zn	mg/l	2.00
Cobalto	Co	mg/l	0.01
Cobre	Cu	mg/l	0.20
Coliformes fecales	NMP	NMP/1000 ml	1 000.00
Cromo	Cr^{+6}	mg/l	0.10
Flúor	F	mg/l	1.00
Hierro	Fe	mg/l	5.00
Huevo de parásitos	---	mg/l	Ausencia
Litio	Li	mg/l	Li
Materia flotante	Visible	mg/l	Ausencia
Mercurio	Hg	mg/l	0.001
Manganeso	Mn	mg/l	0.20
Molibdeno	Mo	mg/l	0.01
Níquel	Ni	mg/l	0.20

PARAMETRO	EXPRESADO COMO	UNIDAD	CRITERIO DE CALIDAD
Nitritos	NO_2	mg/l	0.20
Oxígeno disuelto	OD	mg/l	3.00
pH	pH	mg/l	6-9
Plomo	Pb	mg/l	5.00
Selenio	Se	mg/l	0.02
Sulfatos	SO_4^{-2}	mg/l	250.00
Vanadio	V	mg/l	0.10

Tabla 3.2 – Parámetros de los niveles de la calidad del agua para riego (Ministerio del Ambiente, 2015)

PROBLEMA POTENCIAL	UNIDADES	GRADO DE RESTRICCIÓN		
		NINGUNO	MODERADO	SEVERO
Salinidad:				
Conductividad eléctrica	milimhos/cm	0.70	0.70 – 3.00	> 3.00
Sólidos disueltos totales	mg/l	450.00	450.0 – 2000.0	> 2000.00
Toxicidad por iones:				
Irrigación superficial RAS	meq/l	3.00	3.00 – 9.00	> 9.00
Aspersión	meq/l	3.00	3.00 – 10.00	> 10.00
Cloruros:				
Irrigación superficial	meq/l	4.00	4.00 – 10.00	> 10.00
Aspersión	meq/l	3.00	3.00 – 10.00	> 10.00
Boro:				
Boro	mg/l	0.70	0.70 – 3.00	> 3.00
Efectos misceláneos:				
Nitratos	meq/l	5.00	5.00 – 30.00	> 30.00
Bicarbonato	meq/l	1.50	1.50 – 8.50	> 8.50
pH	---		6.50 – 8.40	

- Salinidad: Afecta a la disponibilidad de agua para los cultivos
- Conductividad eléctrica de regadío (1 milimhos/cm = 1000 micromhos/cm)
- Infiltración: Afecta a la tasa de infiltración del agua en el suelo
- Toxicidad por iones específicos: Afecta a la sensibilidad de los cultivos
- RAS: relación de absorción de sodio ajustada
- Efectos misceláneos: Afecta a los cultivos susceptibles

3.2.3 Análisis de la calidad del agua inicial

3.2.3.1 Toma de muestras del agua

Para iniciar el análisis de calidad de las aguas grises, se realizó la toma de muestras de agua sin tratamiento en la Vivienda No. 3, la cual cuenta con la mayor cantidad de habitantes dentro del área de estudio, lo que permite obtener una muestra representativa del uso doméstico. La recolección de agua se llevó a cabo en dos puntos específicos dentro de la vivienda:

- **Lavadero de la cocina:** En este punto se captó el agua empleada para la limpieza de alimentos y para lavar utensilios de cocina como ollas, platos, y cubiertos. La muestra de esta zona refleja principalmente residuos orgánicos, grasas y restos de alimentos.

Figura 3.24 – Adecuación del lavadero previo a la toma de muestras en la cocina de la Vivienda No. 3 (Carriel, 2024)

Figura 3.25 – Adecuación del recipiente previo a la toma de muestras en la cocina de la Vivienda No. 3 (Carriel, 2024)

Para la toma de muestras en el fregadero de la cocina, se realizó una adaptación temporal, removiendo el sifón ubicado en la parte inferior. Esto permitió que el agua usada en la limpieza de alimentos y utensilios cayera directamente al recipiente de recolección, evitando interferencias que pudieran alterar los resultados. Esta adecuación aseguró la obtención de una muestra representativa y sin acumulación de residuos de otras actividades.

- **Área de lavado de ropa:** En esta zona, la muestra se obtuvo directamente del sitio de lavado donde el agua fue depositada en un recipiente de almacenamiento. El agua recolectada en este sitio corresponde al lavado de ropa y, por lo tanto, es previsible una mayor presencia de detergentes y jabones debido a las actividades de limpieza.

Figura 3.26 – Lavado de prendas de la Vivienda No. 3 (Carriel, 2024)

Figura 3.27 – Muestra de aguas de zona de lavado de la Vivienda No. 3 (Carriel, 2024)

Figura 3.28 – Recolección de aguas grises en Vivienda No. 3 (Carriel, 2024)

3.2.3.2 Resultados de las muestras entregadas

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de las muestras de agua recolectadas previamente. Esta caracterización inicial de las aguas grises tomadas de la Vivienda No. 3 constituye una referencia clave para entender las condiciones actuales del agua sin tratamiento, lo cual resulta fundamental para el diseño adecuado de la solución de tratamiento planteada en el proyecto.

Estos datos iniciales servirán también para realizar una comparación cuantitativa entre las condiciones del agua antes y después de pasar por el proceso de tratamiento en el prototipo diseñado, permitiendo evaluar la efectividad del sistema implementado. Esta comparativa contribuirá a validar el prototipo y a ajustar el diseño para su eventual aplicación a escala.

A continuación, en la Tabla 3.3 se presentan los resultados de los parámetros obtenidos entregados por el laboratorio.

Tabla 3.3 – Resultado de muestras de laboratorio (Carriel, 2024)

Parámetro	Unidad	Técnica	Resultado	Criterio
Aceites y grasas	mg/l	Gravimetría	22.45	Ausencia
Aluminio - Al	mg/l	ICP	0.09	5.00
Arsénico - As	mg/l	ICP	0.002	0.10
Berilio - Be	mg/l	ICP	0.0001	0.10
Boro - B	mg/l	ICP	0.75	0.75
Cadmio - Cd	mg/l	ICP	0.001	0.05
Cinc - Zn	mg/l	ICP	0.35	2.00
Cobalto - Co	mg/l	ICP	0.002	0.01
Cobre - Cu	mg/l	ICP	0.12	0.20
Coliformes fecales	NMP/100 ml	Fermentación en tubo	1 250.00	1 000.00
Cromo - Cr^{+6}	mg/l	ICP	0.002	0.10
Flúor - F	mg/l	Espectrofotometría	0.30	1.00
Hierro - Fe	mg/l	Espectrofotometría UV-Vis	0.25	5.00
Huevos de parásitos	---	Microscopía	No detectado	Ausencia
Materia flotante	---	Visual	Presente	Ausencia
Mercurio - Hg	mg/l	ICP	0.00005	0.001
Manganeso - Mn	mg/l	Espectrofotometría UV-Vis	0.02	0.20
Molibdeno - Mo	mg/l	ICP	0.001	0.01
Níquel - Ni	mg/l	ICP	0.01	0.20
Nitritos - NO_2	mg/l	Espectrofotometría	0.25	0.50
Oxígeno Disuelto - OD	mg/l	Electrometría	4.60	3.00

Parámetro	Unidad	Técnica	Resultado	Criterio
Potencial de Hidrógeno	---	Electrometría	7.30	6 a 9
Plomo - Pb	mg/l	ICP	0.001	5.00
Selenio - Se	mg/l	ICP	0.0005	0.02
Sulfatos - SO4	mg/l	Espectrofotometría UV-Vis	20.20	250.00
Vanadio - V	mg/l	ICP	0.001	0.10
Conductividad Eléctrica	milimhos/cm	Electrometría	2.70	3.00
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	Gravimetría	480.00	2000.00
Sodio - Na	meq/l	ICP-MS	5.50	9.00
Cloruros - Cl+	meq/l	Titrimetría	11.00	10.00
Nitratos - NO3	mg/l	Espectrofotometría	8.20	30.00
Bicarbonato - HCO3-	meq/l	Volumetría	3.50	8.50
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	Espectrofotometría	225.00	500.00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	mg/l	Incubación a 20 °C	130.00	250.00
Turbiedad	NTU	Nefelometría	15.50	100.00
Tensoactivos	mg/l	Colorimetría	0.80	0.50
Color real	Pt-Co	Colorimetría	50.00	75.00
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	Filtración y secado	160.00	220.00
Sólidos totales	mg/l	Gravimetría	640.00	1 600.00

A partir del análisis de la tabla, es posible observar que la calidad del agua analizada presenta una variedad de parámetros tanto dentro como fuera de los límites establecidos por el criterio de evaluación.

3.2.3.2.1 Parámetros con Excesos y sus Implicaciones:

- **Aceites y grasas:** Se detectó una concentración de 22.45 mg/l, mientras que el criterio exige ausencia. La presencia de aceites y grasas en estas concentraciones puede reducir la oxigenación del agua y provocar una capa superficial en los suelos de cultivo, afectando la absorción de nutrientes y el intercambio de gases.

- **Coliformes fecales:** Este parámetro mostró un nivel de 1 250 NMP/100 ml, superando el criterio permisible de 1 000 NMP/100 ml. Estos niveles indican una contaminación bacteriana, que podría representar un riesgo de transmisión de enfermedades si se utiliza esta agua sin tratamiento para riego en cultivos comestibles.

- **Conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales:** Ambos parámetros, con valores de 2.70 milimhos/cm y 480.00 mg/l respectivamente, se encuentran en un grado de restricción moderado acorde con la Tabla 3.2. Esto indica una concentración de sales disueltas, lo cual puede causar toxicidad en algunas plantas sensibles a la salinidad y reducir la fertilidad del suelo.

- **Sodio y cloruros:** Los niveles de sodio (5.5 meq/l) y cloruros (11.0 mg/l) se encuentran en un grado de restricción moderado acorde con la Tabla 3.2. La concentración de estos iones podría ocasionar un incremento en la salinidad del suelo, perjudicando la capacidad de las plantas para absorber agua y otros nutrientes.

- **Bicarbonatos y tensoactivos:** El nivel de bicarbonato (3.5 meq/l) y el de tensoactivos (0.8 mg/l) superan sus criterios de 1.5 meq/l y 0.5 mg/l respectivamente. Los altos niveles de bicarbonatos pueden provocar problemas de alcalinidad en el suelo, mientras que los tensoactivos, generalmente presentes en detergentes, afectan la calidad del agua y pueden dañar la estructura del suelo.

3.3 Diseño de la solución

3.3.1 Evaluación de la situación actual

3.3.1.1 Acceso y Consumo de Agua

La comunidad depende principalmente de un pozo profundo como fuente de agua, de donde se extrae el recurso a través de un sistema de bombas, como se observa en la Figura 3.29. Este sistema de extracción permite que el agua sea transportada directamente a cada vivienda, donde generalmente se almacena en tanques para su uso diario. En particular, la Vivienda No. 3 cuenta con un tanque elevado, visible en la Figura 3.30, el cual facilita la distribución y almacenamiento de agua a nivel interno, ofreciendo una ventaja en cuanto a la disponibilidad continua del recurso. Sin embargo, el resto de las viviendas utilizan tanques plásticos de menor capacidad y generalmente almacenan el agua en puntos más bajos como se muestra en la Figura 3.31, lo cual podría limitar la presión y regularidad del suministro en algunas áreas de la vivienda.

Figura 3.29 – Sistema de bombeo de agua de la comunidad rural (Carriel, 2024)

Figura 3.30 – Tanque elevado de Vivienda No.3 (Carriel, 2024)

Figura 3.31 – Almacenamiento de aguas en sanitario de Vivienda No. 5 (Carriel, 2024)

La Figura 3.32 muestra una prueba realizada por el autor del proyecto, quien ingiere directamente el agua obtenida desde el pozo profundo, lo cual permitió verificar que, en apariencia y sabor, el agua carece de contaminantes físicos evidentes. Esta experiencia empírica coincide con lo manifestado por los residentes de la comunidad, quienes indican que, en general, el agua es apta para el consumo directo. Sin embargo, algunos habitantes han señalado variaciones ocasionales en el sabor, lo cual puede sugerir cambios en la composición o calidad del agua a lo largo del tiempo. Si bien este proyecto no incluye un análisis detallado de la calidad microbiológica o química del agua, esta observación resalta una oportunidad para futuras investigaciones y mejoras.

Figura 3.32 – Tanque elevado de Vivienda No.3 (Carriel, 2024)

Uno de los mayores desafíos para la comunidad es la falta de abastecimiento de agua por parte de una entidad oficial competente, lo que lleva a los habitantes a depender de sus propios medios para acceder al recurso. En periodos de escasez o cuando los proveedores no pueden abastecer a la comunidad, el consumo directo de agua desde el pozo se vuelve la única alternativa, lo cual resalta la importancia de contar con un sistema que pueda garantizar la seguridad y potabilidad del agua.

3.3.1.2 Aguas residuales y Saneamiento

La gestión de aguas residuales en la comunidad presenta importantes desafíos, dado que cada vivienda cuenta con su propio sanitario, el cual está diseñado para descargar las aguas residuales directamente en pozos sépticos ubicados en la parte posterior de las viviendas, colindantes con un estero.

Un caso particular es el de la Vivienda No. 4, que, debido a su antigüedad, ha implementado una división en el manejo de las aguas residuales. Las aguas descargadas del sanitario se dirigen al pozo séptico, mientras que las aguas provenientes del lavadero de la cocina se vierten directamente al suelo, mediante irrigación superficial. En la Figura 3.33 y Figura 3.34 se muestra que, esta práctica ha generado problemáticas en la zona de disposición, donde se observan acumulaciones de sedimentos y una coloración oscura del suelo, sugiriendo una posible contaminación por las descargas inadecuadas.

Figura 3.33 – Descarga de aguas grises de Vivienda No. 4 (Carriel, 2024)

Figura 3.34 – Descarga de aguas grises de Vivienda No. 4 (Carriel, 2024)

En la Vivienda No. 2, representada en la Figura 3.35, se observa un panorama similar, donde la alta humedad en las áreas cercanas y la presencia de un canal de tierra evidencian la acumulación de agua y lodo, lo que pone de manifiesto la ineficiencia del sistema de saneamiento actual.

Además, las zonas de lavado de las viviendas están ubicadas en la parte trasera, donde las descargas se realizan directamente en los cultivos de plátano. Este método, aunque práctico para los residentes, ha llevado a la saturación del suelo y a un incremento en la humedad, lo que podría tener repercusiones negativas en la salud pública y en la producción agrícola.

Por otro lado, la Figura 3.36 ilustra un pozo séptico antiguo que ha colapsado debido a un aumento en el nivel del agua en la parte posterior del terreno. Este colapso ha derivado en que, en algún momento, todas las heces presentes en esta estructura cayeran directamente en el estero, lo que representa un grave riesgo para la salud pública y el medio ambiente.

Figura 3.35 – Zona de lavado de Vivienda No. 2 (Carriel, 2024)

Figura 3.36 – Pozo séptico antiguo de Vivienda No. 4 (Carriel, 2024)

En la Vivienda No. 5, la Figura 3.37 y Figura 3.38y 3.38 muestran una situación similar a la de la Vivienda No. 4, con acumulación de sedimentos y un suelo de color oscuro, acompañado de alta humedad y agua estancada en los alrededores, lo que indica la falta de un manejo adecuado de las aguas residuales.

Figura 3.37 – Descarga de aguas grises de Vivienda No. 5 (Carriel, 2024)

Figura 3.38 – Descarga de aguas grises de Vivienda No. 5 (Carriel, 2024)

La Figura 3.39 presenta el pozo séptico actual conectado a la Vivienda No. 4, que cuenta con un respiradero y fue construido hace aproximadamente tres años, según indican los moradores. Sin embargo, su diseño y ubicación podrían no ser suficientes para manejar adecuadamente las aguas residuales generadas en la vivienda.

Figura 3.39 – Pozo séptico actual de Vivienda No. 4 (Carriel, 2024)

Figura 3.40 – Chiquero de animales en Vivienda No. 4 (Carriel, 2024)

Finalmente, en la Figura 3.40 se muestra un chiquero donde se crían dos cerdos. Es importante señalar que el mantenimiento realizado para la limpieza de las heces no se conecta al pozo séptico, sino que se descarga directamente al suelo, lo que podría agravar aún más la situación sanitaria en la comunidad.

3.3.2 Prototipo para tratamiento de las aguas grises

El prototipo para el tratamiento de aguas grises se basa en un filtro subsuperficial de flujo vertical, el cual emplea una combinación de materiales y vegetación acuática para tratar las aguas grises. Este filtro se compone de varias capas de materiales que trabajan en conjunto con la planta seleccionada, el jacinto de agua (Eichhornia crassipes), adaptado a un recipiente de 25 litros para un diseño compacto y eficiente. A continuación, se describe el proceso de elaboración, las características y funcionamiento del prototipo, así como las consideraciones necesarias para su operación.

3.3.2.1 Materiales del Prototipo

Los materiales seleccionados para el filtro desempeñan funciones específicas en el proceso de tratamiento. Cada capa contribuye a la filtración, degradación y retención de contaminantes. Los materiales utilizados son los siguientes:

- **Recipiente de 25 litros:** Este contenedor, con un diámetro de 34,5 cm y una altura de 45 cm, se adapta a un diseño de filtro vertical que permite el almacenamiento y tratamiento adecuado de las aguas grises.
- **Piedra chispa:** Utilizada por su capacidad para retener sólidos y facilitar el drenaje, tiene una granulometría uniforme que optimiza la filtración.
- **Piedra 3/4:** Este material, de mayor tamaño, sirve como capa de drenaje inicial y asegura la circulación de agua hacia las capas superiores.
- **Arena:** Actúa como filtro de partículas finas y es crucial para la reducción de contaminantes en las etapas finales de filtración.
- **Carbón vegetal triturado:** Triturado hasta un diámetro inferior al de la piedra chispa, el carbón se sitúa como capa intermedia, facilitando la transición entre la arena y el recipiente, y contribuye a la adsorción de contaminantes orgánicos.
- **Jacinto de agua (Eichhornia crassipes):** Planta acuática que ayuda en la absorción de nutrientes y en la remoción de contaminantes orgánicos del agua.

Figura 3.41 – Materiales empleados para la elaboración del filtro (Carriel, 2024)

3.3.2.2 Características del Filtro

El filtro subsuperficial de flujo vertical se compone de cuatro capas de materiales que trabajan en conjunto para retener y tratar los contaminantes presentes en las aguas grises. Las características de cada capa son las siguientes:

- **Capa de piedra 3/4:** Colocada en el fondo del filtro, con un espesor de 7,5 cm. Esta capa garantiza un drenaje adecuado y evita el estancamiento en la base del filtro.
- **Capa de piedra chispa:** Con un espesor de 7,5 cm, complementa la primera capa y mejora la retención de sólidos suspendidos.
- **Capa de carbón vegetal triturado:** Con un espesor de 5 cm, esta capa permite la adsorción de compuestos orgánicos y la transición hacia las capas superiores.
- **Capa de arena:** La capa superior de 7,5 cm proporciona la última barrera de filtración antes de que el agua llegue al espejo de agua.
- **Geotextil NT 1600:** Se incorporó un geotextil no tejido de 1600 g/m² en la parte superior para evitar la colmatación por partículas externas y facilitar el mantenimiento y limpieza del sistema

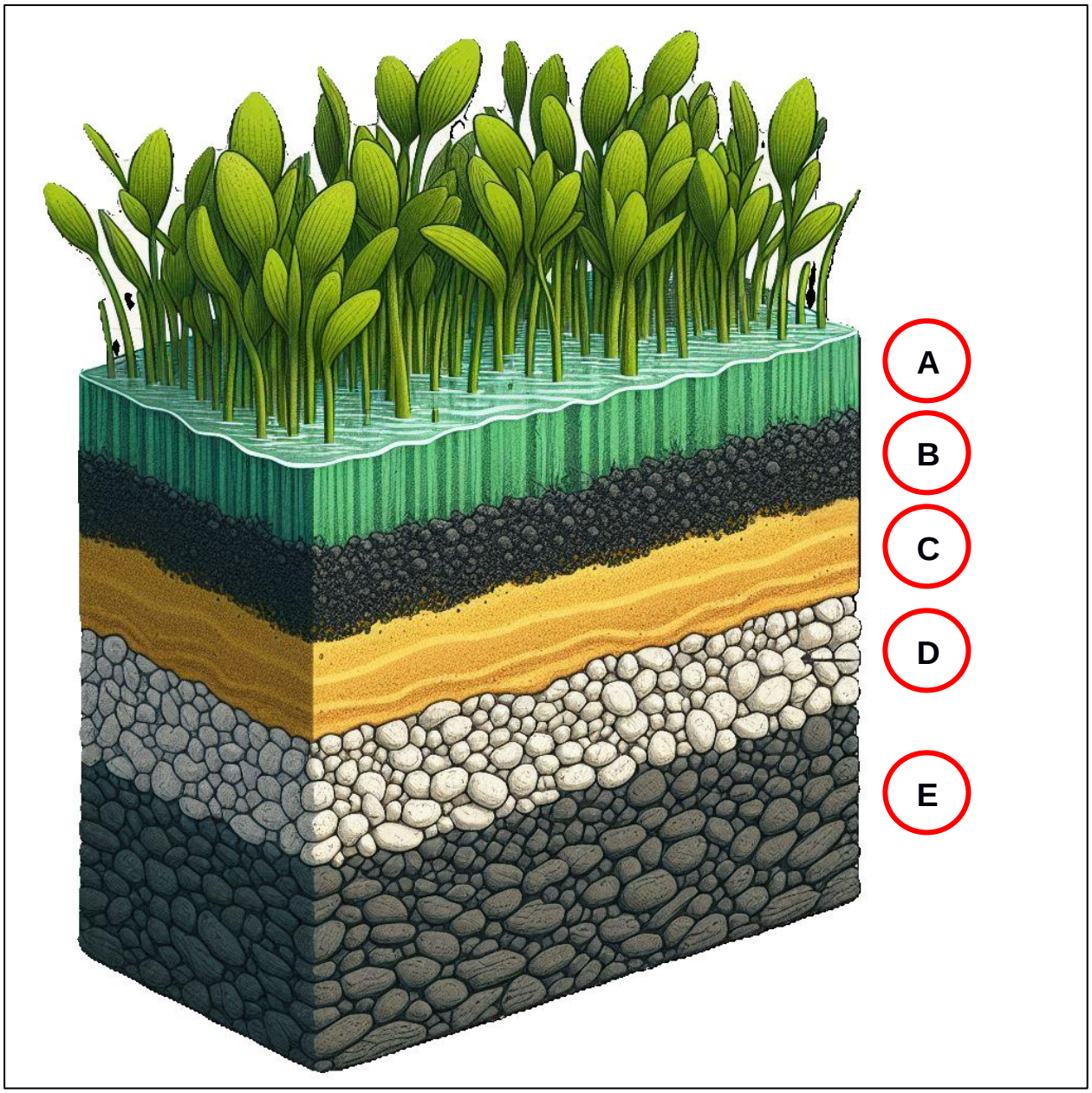


Figura 3.42 – Prototipo construido para el tratamiento (Carriel, 2024)

Donde:

(A) Espejo de agua – 15 centímetros

(B) Arena – 7.5 centímetros.

(C) Carbón vegetal – 5 centímetros.

(D) Piedra chispa – 7.5 centímetros.

(E) Piedra 3/4 – 7.5 centímetros.

Figura 3.43 – Prototipo de filtro subsuperficial (Carriel, 2024)

Este filtro se diseñó para funcionar a nivel de inundación con un espejo de agua de 15 centímetros, necesario para la adaptación del jacinto de agua, que necesita una mínima profundidad para realizar el proceso de tratamiento de manera efectiva.

Figura 3.44 – Geotextil empleado en el prototipo (Carriel, 2024)

3.3.2.3 Consideraciones de Implementación

Antes de la puesta en funcionamiento, se realizaron ciertos procesos previos de limpieza y purga de los materiales. Cada material fue lavado para reducir la presencia de contaminantes externos. Este proceso fue particularmente relevante en el caso del carbón vegetal, que necesito más ciclos de lavado debido a su propensión a generar sedimentos que podrían afectar la calidad del agua.

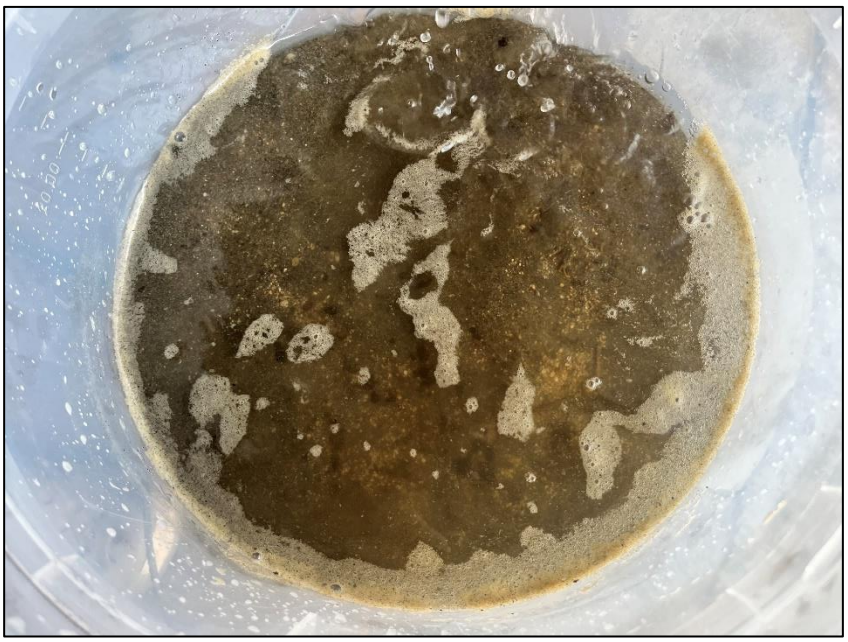


Figura 3.45 – Limpieza de materiales empleados en el prototipo (Carriel, 2024)

Figura 3.46 – Limpieza de materiales empleados en el prototipo (Carriel, 2024)

Figura 3.47 – Limpieza de materiales empleados en el prototipo (Carriel, 2024)

3.3.2.4 Periodo de Adaptación

El prototipo fue sometido a un periodo de adaptación inicial para asegurar su correcto funcionamiento y rendimiento. Durante los primeros 7 días, el filtro fue purgado con agua potable para estabilizar las condiciones internas y limpiar cualquier residuo presente en los materiales.

Figura 3.48 – Prototipo construido para el tratamiento (Carriel, 2024)

3.3.2.5 Puesta en Funcionamiento y Monitoreo

Tras el periodo de adaptación, se colocó la muestra de aguas grises, iniciándose así el proceso de tratamiento. Para asegurar la efectividad del sistema, se estableció un periodo de retención mínima de 14 días. Durante este tiempo, se realizará una documentación fotográfica de las características físicas del agua.

3.3.2.6 Funcionamiento del Prototipo

El funcionamiento del prototipo para el tratamiento de aguas grises se llevó a cabo mediante un proceso de monitoreo periódico y la toma de muestras. Este proceso de evaluación incluyó la observación de las características físicas del agua tratada, como el color y el olor, para identificar cambios a lo largo del tiempo.

El prototipo fue puesto en funcionamiento con una carga inicial de aproximadamente 16 litros de agua gris. Las muestras tomadas en cada revisión fueron documentadas fotográfica y posteriormente devueltas al prototipo para continuar el proceso de tratamiento. Es fundamental destacar que este procedimiento permitió asegurar la continuidad del proceso sin alterar el volumen de agua tratado.

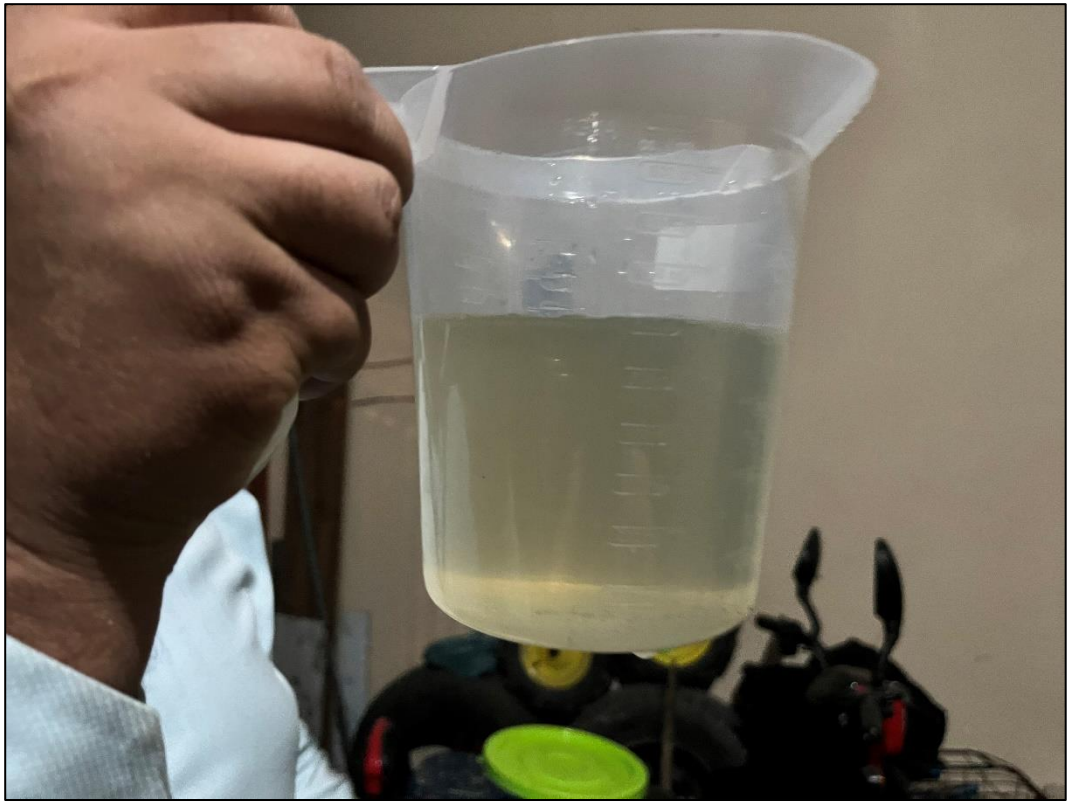
Al finalizar el período de experimentación, se medirá el volumen total del agua tratada para determinar si hubo una pérdida significativa atribuible a la evaporación o al consumo por parte de las plantas. En la Tabla 3.4 se presentan las características físicas del agua tratada tomadas desde el efluente.

Tabla 3.4 – Caracterización de muestras del agua tratada (Carriel, 2024)

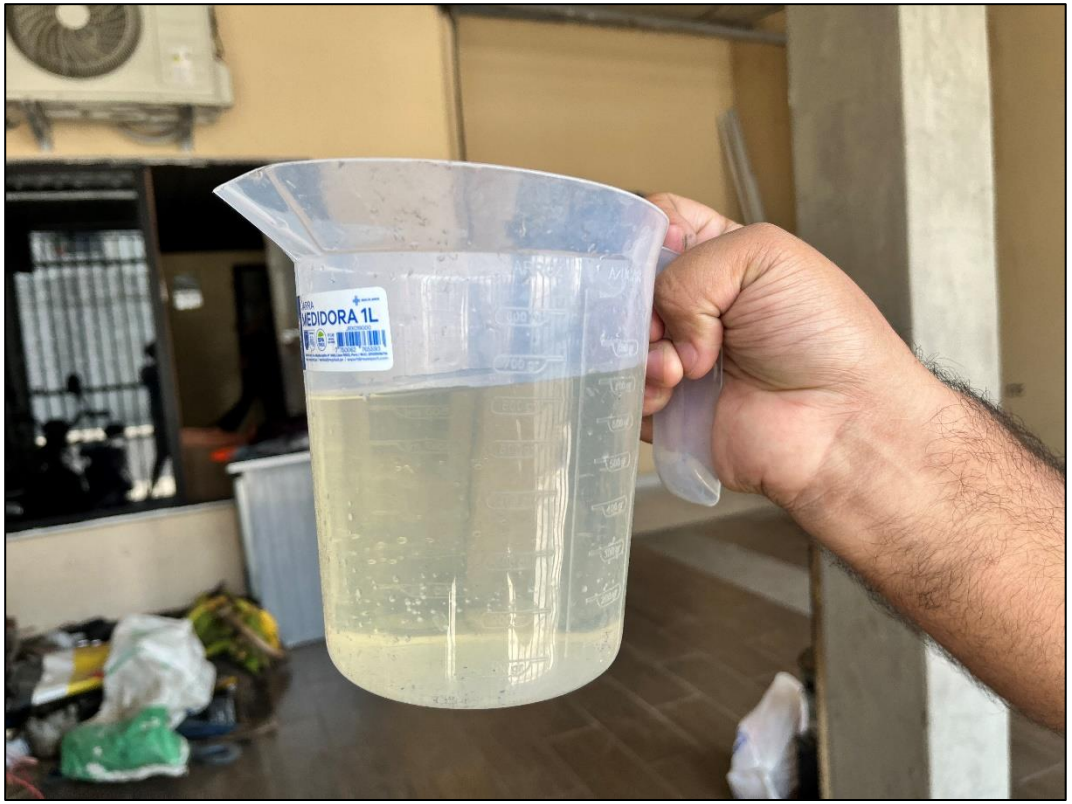
Observaciones	Fotografía
Día 0 (13 de octubre de 2024)	
Se realizó la puesta en funcionamiento del prototipo y se vertieron 16 litros de agua gris en el sistema. Las características iniciales del agua mostraban un color grisáceo intenso y un olor fuerte, característico de materia orgánica sin tratar. La transparencia era baja, presentando turbidez significativa	 **Figura 3.49 – Muestra de agua tratada en Día 0 (Carriel, 2024)**

Observaciones	Fotografía
Día 1 (14 de octubre de 2024)	
Se realizó la primera inspección visual. El color mantenía una tonalidad gris menos opaca y se registró una leve mejora en el olor, aunque aún perceptible. La turbidez permanecía alta, indicando que las primeras etapas del proceso de filtración aún no habían logrado una reducción significativa de las partículas suspendidas.	 **Figura 3.50 – Muestra de agua tratada en Día 1 (Carriel, 2024)**

Observaciones	Fotografía
Día 7 (20 de octubre de 2024)	
La tonalidad del agua presentó un cambio notable, volviéndose más clara y con menor turbidez. En esta fase, se observó que las plantas de jacinto de agua comenzaron a manifestar signos de estrés debido a la carga orgánica inicial. Fue necesario reemplazar algunas plantas que no se adaptaron, para asegurar la eficacia del tratamiento. El olor disminuyó considerablemente, indicando un inicio de la biodegradación de los compuestos.	 **Figura 3.51 – Muestra de agua tratada en Día 7 (Carriel, 2024)**

Observaciones	Fotografía
Día 9 (22 de octubre de 2024)	
El sistema mostró una mejora en la claridad del agua, reflejando la filtración progresiva a través de las capas de materiales. El reemplazo de las plantas contribuyó a la estabilización del proceso. La presencia de las nuevas plantas permitió una absorción más eficiente de nutrientes y contaminantes.	 **Figura 3.52 – Muestra de agua tratada en Día 9 (Carriel, 2024)**

Observaciones	Fotografía
Día 10 (23 de octubre de 2024)	
Se observó una reducción en la carga orgánica y una mayor transparencia en el agua, evidenciando la actividad microbiana en las capas del filtro y la función de las plantas. El olor se percibió aún menos intenso, con un olor neutro en comparación con el inicio. La sedimentación de partículas se mantuvo controlada, y no se reportaron obstrucciones significativas en el prototipo.	 **Figura 3.53 – Muestra de agua tratada en Día 10 (Carriel, 2024)**

Observaciones	Fotografía
Día 18 (31 de octubre de 2024)	
El agua tratada mostró una mejora visible en cuanto a transparencia, acercándose a los límites aceptables para el riego. La coloración era notablemente más pálida, con un olor imperceptible a simple vista.	 **Figura 3.54 – Muestra de agua tratada en Día 18 (Carriel, 2024)**

Observaciones	Fotografía
Día 21 (01 de noviembre de 2024)	
Se realizó la evaluación final, mostrando que el agua había alcanzado una mejoría. A pesar de que no estaba completamente incolora, la transparencia era suficiente y el olor era prácticamente nulo. Se observó una mejora en la composición física y se registró un menor volumen de agua, atribuido a la evaporación y al consumo por las plantas.	 **Figura 3.55 – Muestra de agua tratada en Día 21 (Carriel, 2024)**

3.3.3 Diseño del Humedal Construido

El diseño de un humedal construido para el tratamiento de aguas es un proceso que requiere una planificación para garantizar el cumplimiento de parámetros técnicos. Este tipo de sistemas se han desarrollado para aprovechar los procesos naturales de filtración, absorción y descomposición biológica, permitiendo así el tratamiento de aguas residuales de distintas características. A continuación, se describe las consideraciones de diseño y los parámetros para garantizar la funcionalidad y eficiencia del sistema.

3.3.3.1 Parámetros Considerados en el Diseño

3.3.3.1.1 Tipo de Humedal

Para la comunidad en función de los espacios disponibles, y las condiciones específicas se presenta la opción de la implementación de humedal construido de flujo vertical subsuperficial. Se debe de considerar que acorde a la literatura

En cuanto a los enfoques de diseño mostrados en la Tabla 2.8, las "Reglas generales" y los "Gráficos de carga" son los únicos aplicables a humedales de flujo vertical, incluyendo los de tipo francés. Los demás métodos, en cambio, son específicos para humedales de flujo subsuperficial horizontal y de flujo superficial.

3.3.3.1.2 Superficie Total

Para calcular la superficie total de un humedal de tipo vertical subsuperficial se realizará mediante:

Reglas generales (Guías de diseño de otros países, artículos científicos, etc.).

Tabla 3.5 – Recomendaciones de diseño de área superficial (Dotro, y otros, 2017, pág. 36)

País	Tecnología	Área superficial	Referencias
Austria	Flujo subsuperficial vertical	4.00	(ÖNORM, 2009)
Dinamarca	Flujo subsuperficial vertical	3.00	(Brix & Johansen, 2004)

País	Tecnología	Área superficial	Referencias
Alemania	Flujo subsuperficial vertical	4.00	(Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), 2017)

Considerando el área superficial requerida para el humedal acorde a las recomendaciones de las guías de diseño, se establece como punto de partida un área por persona de 4.00 m^2. Considerando la información obtenida de las encuestas la Vivienda No. 3 posee la mayor cantidad de habitantes por lo cual el diseño se realizará tomando en consideración esta vivienda en específico.

Considerando que, en los sistemas con capacidades superiores a 5 habitantes equivalentes (PE), el tamaño del lecho del filtro debe incrementarse de forma proporcional a la carga de entrada. Para sistemas con una capacidad superior a 15 PE, se recomienda dividir el sistema en dos lechos de igual tamaño que funcionen en paralelo. (Brix & Arias, 2005, pág. 496)

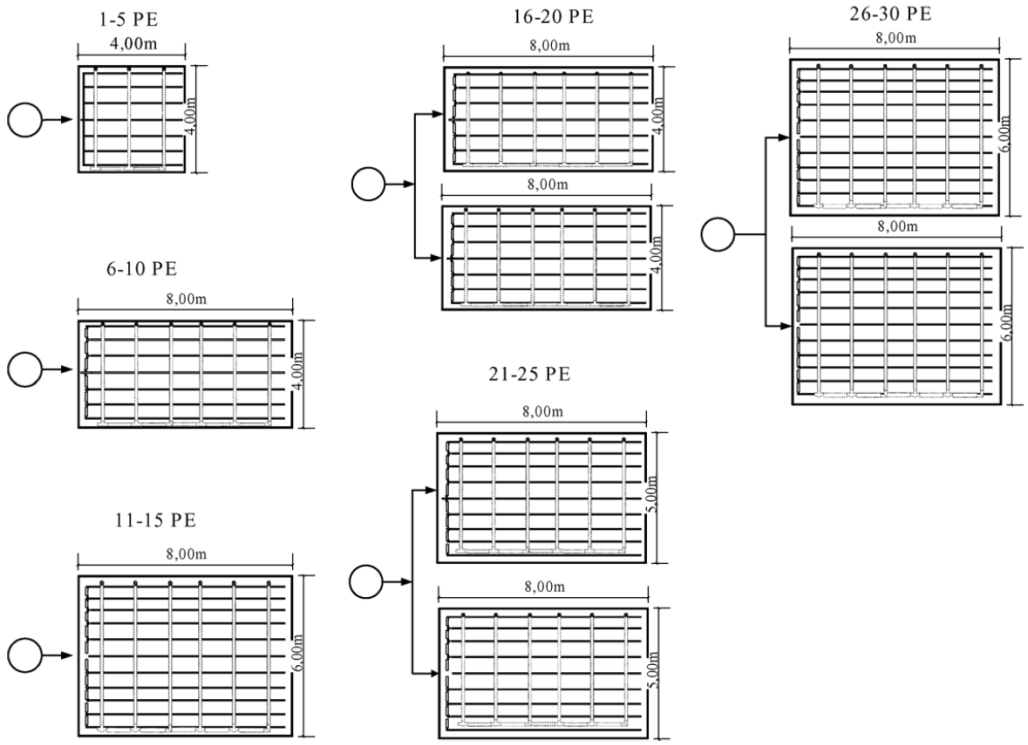


Figura 3.56 – Dimensión de humedales construidos recomendados (Brix & Arias, 2005, pág. 497)

Resumiendo, los datos obtenidos se pueden establecer lo siguiente:

Tabla 3.6 – Áreas de diseño para el humedal (Carriel, 2024)

Modelo	Área superficial	Referencias
Guía de Austria	28.00 m^2	(ÖNORM, 2009)
Guía de Dinamarca	21.00 m^2	(Brix & Johansen, 2004)
Guía de Alemania	28.00 m^2	(Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), 2017)
Articulo científico	32.00 m^2	(Brix & Arias, 2005, pág. 497)

Para el diseño de este humedal se tomará en consideración el área de **32.00 m^2**.

3.3.3.1.3 Profundidad

La profundidad efectiva del filtro es de 1.00 m, con la superficie del filtro nivelada para asegurar un flujo uniforme. Para evitar que la arena del filtro penetre y obstruya la capa de drenaje en la base del lecho, se coloca un geotextil abierto entre ambas capas o se utiliza una capa de grava graduada. (Brix & Arias, 2005, pág. 495)

El diseño de las capas del filtro incluye arena y grava, respetando las alturas y especificaciones establecidas en las guías técnicas, lo que asegura un funcionamiento óptimo del sistema y previene la colmatación del material filtrante. (Brix & Arias, 2005, pág. 495)

Tabla 3.7 – Recomendaciones de diseño de profundidad (Dotro, y otros, 2017, pág. 71)

Modelo	Profundidad	Referencias
Guía de Austria	> 50.00 cm	(ÖNORM, 2009)
Guía de Dinamarca	100.00 cm	(Brix & Johansen, 2004)
Guía de Alemania	> 50.00 cm	(Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), 2017)
Articulo científico	100.00 cm	(Brix & Arias, 2005, pág. 497)

3.3.3.1.4 Relación Largo/Ancho

La relación largo/ancho del humedal influye en la eficiencia del flujo y en la uniformidad de la distribución del agua a lo largo del sistema. Para el presente proyecto, se optó por un humedal de 32 m^2, cuyas dimensiones son de 8 metros de largo y 4 metros de ancho. Esto da una relación de largo/ancho de 2:1, que se encuentra dentro de las recomendaciones establecidas por las guías danesas para el diseño de humedales de flujo subsuperficial. (Brix & Arias, 2005, pág. 495)

3.3.3.1.5 Compartimentalización

La compartimentalización puede influir en la eficiencia y sostenibilidad del tratamiento de las aguas residuales. En este proyecto, debido a la cantidad de personas servidas, se ha decidido implementar un solo compartimiento, tal como se ilustra en la Figura 3.56. Esta decisión se basa en el hecho de que el sistema ha sido diseñado para una capacidad que no supera el umbral de 15 habitantes, lo que hace innecesaria la subdivisión en compartimientos múltiples. (Brix & Arias, 2005, pág. 496)

3.3.4 Evaluación del prototipo

En esta sección, se lleva a cabo un análisis comparativo del agua tratada por el prototipo, contrastando sus características físicas, químicas y biológicas con las obtenidas en la caracterización inicial. Este proceso permite verificar si el prototipo cumple con los parámetros de calidad del agua establecidos en la normativa vigente, asegurando que el agua tratada sea apta para su uso en riego.

Una vez que el prototipo operó durante el período de 21 días, se analizaron las muestras de agua tratada. Se midieron los mismos parámetros para identificar las reducciones en la concentración de contaminantes y comparar los resultados con los límites establecidos por la normativa.

En la Tabla 3.8 se presenta un resumen de las características comparativas entre el agua cruda y el agua tratada, destacando las mejoras alcanzadas y verificando el cumplimiento con los estándares de calidad.

Tabla 3.8 – Resultado de muestras de laboratorio (Carriel, 2024)

Parámetro	Unidad	Agua cruda	Agua tratada	Criterio	Remoción	Observación
Aceites y grasas	mg/l	22.45	No detectado	Ausencia	100.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Aluminio - Al	mg/l	0.09	0.075	5.00	16.67%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Arsénico - As	mg/l	0.002	0.0018	0.10	10.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Berilio - Be	mg/l	0.0001	0.00008	0.10	20.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Boro - B	mg/l	0.75	0.47	0.75	37.33%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.

Parámetro	Unidad	Agua cruda	Agua tratada	Criterio	Remoción	Observación
Cadmio - Cd	mg/l	0.001	0.0009	0.05	10.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Cinc - Zn	mg/l	0.35	0.32	2.00	8.57%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Cobalto - Co	mg/l	0.002	0.0018	0.01	10.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Cobre - Cu	mg/l	0.12	0.115	0.20	4.17%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Coliformes fecales - NMP	NMP/100 ml	1 250.00	217.00	1 000.00	82.64%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.

Parámetro	Unidad	Agua cruda	Agua tratada	Criterio	Remoción	Observación
Cromo - Cr+6	mg/l	0.002	0.0019	0.10	5.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Flúor - F	mg/l	0.30	0.26	1.00	13.33%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Hierro - Fe	mg/l	0.25	0.19	5.00	24.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Huevos de parásitos	---	No detectado	No detectado	Ausencia	No aplica	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Materia flotante	---	Presente	No detectado	Ausencia	No aplica	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.

Parámetro	Unidad	Agua cruda	Agua tratada	Criterio	Remoción	Observación
Mercurio - Hg	mg/l	0.00005	0.00004	0.001	20.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Manganeso - Mn	mg/l	0.02	0.017	0.20	15.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Molibdeno - Mo	mg/l	0.001	0.0008	0.01	20.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Níquel - Ni	mg/l	0.01	0.008	0.20	20.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Nitritos - NO2	mg/l	0.25	0.21	0.50	16.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.

Parámetro	Unidad	Agua cruda	Agua tratada	Criterio	Remoción	Observación
Oxígeno Disuelto - OD	mg/l	4.60	2.70	3.00	41.30%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Potencial de Hidrógeno	---	7.30	7.10	6 a 9	2.74%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Plomo - Pb	mg/l	0.001	0.0009	5.00	10.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Selenio - Se	mg/l	0.0005	0.0004	0.02	20.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Sulfatos - SO4	mg/l	20.20	18.18	250.00	10.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.

Parámetro	Unidad	Agua cruda	Agua tratada	Criterio	Remoción	Observación
Vanadio - V	mg/l	0.001	0.0008	0.10	20.00%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.1**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido.
Conductividad Eléctrica	milimhos/cm	2.70	0.68	0.70	74.81%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.2**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido. Se detecta que no posee **NINGÚN** grado de restricción en su uso.
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	480.00	250.00	450.00	47.92%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.2**. Se determina que este **CUMPLE** con el límite establecido. Se detecta que no posee **NINGÚN** grado de restricción en su uso.
Sodio - Na	meq/l	5.50	5.00	3.00	9.09%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.2**. Se determina que este **CUMPLE PARCIALMENTE** con el límite establecido. Se detecta que posee un **MODERADO** grado de restricción en su uso.

Parámetro	Unidad	Agua cruda	Agua tratada	Criterio	Remoción	Observación
Cloruros - Cl+	meq/l	11.00	10.10	4.00	8.18%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.2**. Se determina que este **CUMPLE PARCIALMENTE** con el límite establecido. Se detecta que posee un **MODERADO** grado de restricción en su uso.
Nitratos - NO3	mg/l	8.20	7.80	5.00	4.88%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.2**. Se determina que este **CUMPLE PARCIALMENTE** con el límite establecido. Se detecta que posee un **MODERADO** grado de restricción en su uso.
Bicarbonato - HCO3-	meq/l	3.50	3.20	1.50	8.57%	Se realiza la comparativa con el valor estipulado en la **Tabla 3.2**. Se determina que este **CUMPLE PARCIALMENTE** con el límite establecido. Se detecta que posee un **MODERADO** grado de restricción en su uso.

Parámetro	Unidad	Agua cruda	Agua tratada	Criterio	Remoción	Observación
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	225.00	36.00	No definido	84.00%	Este parámetro no está contemplado en la normativa, pero se incluyó para fines de evaluación.
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	mg/l	130.00	19.00	No definido	85.38%	Este parámetro no está contemplado en la normativa, pero se incluyó para fines de evaluación.
Turbiedad	NTU	15.50	6.80	No definido	56.13%	Este parámetro no está contemplado en la normativa, pero se incluyó para fines de evaluación.
Tensoactivos	mg/l	0.80	0.45	No definido	43.75%	Este parámetro no está contemplado en la normativa, pero se incluyó para fines de evaluación.
Color real	Pt-Co	50.00	31.00	No definido	38.00%	Este parámetro no está contemplado en la normativa, pero se incluyó para fines de evaluación.

Parámetro	Unidad	Agua cruda	Agua tratada	Criterio	Remoción	Observación
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	160.00	29.00	No definido	81.88%	Este parámetro no está contemplado en la normativa, pero se incluyó para fines de evaluación.
Sólidos totales	mg/l	640.00	279.00	No definido	56.41%	Este parámetro no está contemplado en la normativa, pero se incluyó para fines de evaluación.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Los pozos profundos, principales fuentes de agua en la comunidad rural, presentan riesgos para la calidad y sostenibilidad del recurso hídrico. Esta realidad subraya la necesidad de implementar sistemas de tratamiento y potabilización adecuados. Además, la falta de mantenimiento de los pozos sépticos, práctica común en la zona, resalta la urgencia de promover campañas educativas enfocadas en prevenir la contaminación de aguas subterráneas mediante una adecuada gestión de saneamiento.

El 37,5% de las viviendas reutiliza agua, pero la falta de tratamientos adecuados representa un riesgo significativo para la salud y la sostenibilidad ambiental. Este hallazgo subraya la importancia de implementar sistemas eficaces que garanticen la calidad del agua reutilizada. Los resultados de la encuesta revelan que la comunidad otorga mayor prioridad al acceso a agua potable, seguido de mejoras en el saneamiento. Aunque solo el 25% de los encuestados considera relevante la reutilización de aguas grises, es esencial promover una mayor sensibilización sobre los beneficios asociados a una gestión hídrica sostenible y responsable.

El prototipo desarrollado demostró ser eficaz en la mejora de la calidad del agua tratada, evidenciada por la significativa reducción de olores y turbidez. Estos resultados respaldan la viabilidad técnica del sistema diseñado y su capacidad para adaptarse eficazmente a las condiciones operativas previstas para el tratamiento de aguas grises.

Con un cumplimiento del 87.50% de los parámetros evaluados (28 de 32 dentro de los límites normativos), el sistema demostró un desempeño positivo. No obstante, los parámetros de sodio, cloruros, nitratos y bicarbonato presentaron restricciones moderadas, lo que evidencia la necesidad de ajustes en el diseño para optimizar su rendimiento.

El sistema logró una remoción superior al 70% en parámetros clave como aceites y grasas, coliformes fecales, sólidos suspendidos totales, DBO y DQO, mostrando una alta eficacia en la eliminación de contaminantes orgánicos y sólidos.

Aunque algunos parámetros analizados, como turbiedad, color real, DBO5, DQO y sólidos totales, no están regulados por la normativa vigente, su evaluación permitió valorar integralmente el desempeño del sistema. Las remociones superiores al 50% en estos indicadores respaldan su capacidad para mejorar la calidad del agua tratada.

Finalmente, la limitada remoción de ciertos compuestos químicos destaca la necesidad de incorporar tecnologías complementarias o realizar ajustes en el proceso para garantizar una eliminación más eficiente de estos compuestos en el agua tratada.

4.2 Recomendaciones

Es recomendable aumentar la cantidad de muestras y ensayos para caracterizar el agua cruda y tratada. Aunque en este proyecto los análisis se realizaron al inicio y al final de un periodo de tratamiento de 21 días, ampliar la cantidad de ensayos permitirá obtener datos más representativos, comprender mejor el comportamiento del sistema y validar su eficiencia en diversas condiciones operativas.

Dado que este proyecto utilizó Jacinto (Eichhornia crassipes) por su disponibilidad en la región, se recomienda explorar el uso de especies vegetales locales en otras áreas del Ecuador, como la Sierra y la Amazonía. Adaptar el sistema a la flora autóctona de cada zona puede optimizar los resultados del tratamiento al aprovechar las propiedades específicas de las plantas nativas.

Se recomienda evaluar la viabilidad de implementar sistemas de tratamiento de aguas grises considerando el espacio disponible y las características específicas del terreno en cada comunidad. Este enfoque personalizado garantizará un diseño más efectivo y adaptable.

Es importante desarrollar programas de sensibilización en comunidades rurales sobre la gestión de recursos hídricos, la importancia de la calidad del agua y el mantenimiento adecuado de los sistemas de saneamiento. Estas iniciativas fomentarán la conciencia social y promoverán prácticas sostenibles.

Se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo e integral para evaluar la calidad del agua tratada y el estado general de los sistemas de saneamiento. Este sistema permitirá analizar la evolución del tratamiento, determinar con precisión el tiempo óptimo de retención del agua residual y realizar ajustes necesarios para optimizar su eficacia. Asimismo, garantizará el cumplimiento de los estándares de salud pública y sostenibilidad, facilitando la identificación de mejoras en el diseño y operación del tratamiento.

BIBLIOGRAFÍA

Agencia de Regulación y Control del Agua. (06 de Agosto de 2014). *Ley Orgánica de Recursos Hídricos usos y aprovechamiento del agua.* Obtenido de Agencia de Regulación y Control del Agua: https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/03/Ley-Org%C3%A1nica-de-Recursos-H%C3%ADdricos-Usos-y-Aprovechamiento-del-Agua.pdf

Agencia de Regulación y Control del Agua. (2023). *Benchmarking de prestadores públicos de los servicios de agua potable y saneamiento en el Ecuador.* Obtenido de Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA): http://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/12/Boletin-Estadistico-APS_dic23-fnl.pdf

Asamblea Nacional Constituyente de Ecuador. (20 de Octubre de 2008). *Constitución de la República del Ecuador.* Obtenido de Asamblea Nacional Constituyente de Ecuador: https://www.asambleanacional.gob.ec/sites/default/files/documents/old/constitucion_de_bolsillo.pdf

Ayres Rachel; Mara David & Organización Mundial de la Salud. (1997). *Análisis de aguas residuales para su uso en agricultura: manual de técnicas parasitológicas y bacteriológicas de laboratorio.* Obtenido de Organización Mundial de la Salud: https://iris.who.int/handle/10665/41996

Brix, H., & Arias, C. (2005). The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. (Elsevier, Ed.) *Ecological Engineering, 25*(5), 491-500. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.009

Brix, H., & Johansen, N. (2004). Recuperado el 26 de Octubre de 2024, de Guidelines for the Establishment of Reed Bed Systems up to 30 PE (Retningslinier for etablering af beplantede filteranlæg op til 30 PE).

Carriel, W. (2024). *Diseño de sistema para la reutilización de aguas grises en la irrigación de cultivos de viviendas rurales del cantón Baba, Los Ríos, Ecuador.* Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Globierno de la República de México. (02 de Enero de 2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Hunedales Artificiales.* Recuperado el 08 de Septiembre de 2024, de Biblioteca Digital de MAPAS: https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf

Davis, L., Edwards, R., Garber, L., Isaacs, B., Lapp, J., Murphy, T., . . . Webster, H. (1999). *A Handbook of Constructed Wetlands, General Considerations* (Vol. 1). Washington: US Environmental Protection Agency (EPA). Recuperado el 08 de Septiembre de 2024, de https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/constructed-wetlands-handbook.pdf

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). (2017). *DWA-A 262.* Recuperado el 26 de Octubre de 2024, de Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Kläranlagen mit bepflanzten und unbepflanzten Filtern zur Reinigung häuslichen und kommunalen Abwassers, in German.

Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & von Sperling, M. (2017). *Treatment Wetlands / Humedales para Tratamiento* (1 ed., Vol. VII). (I. Publishing, Ed., I. Vera, & C. Arias, Trads.) Internation Water Association. doi:https://doi.org/10.2166/9781780408774

Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., & Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban Water, Volume 4*(Issue 1), 85-104. doi:https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00064-4

Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Baba. (2019). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial.* Obtenido de Gobierno Autónomo Descentralizado

Municipal de Baba: https://gadmunicipalbaba.gob.ec/plan_integral_movilidad_transporte.php#close

Google. (2024). Google Earth. *Imagen Satelital.* Google Inc., Guayaquil.

Hoffman, H., Platzer, C., Winker, M., & Von Muench, E. (Febrero de 2011). *Technology review of constructed wetlands.* Recuperado el 08 de Septiembre de 2024, de Sustainable Sanitation - ECOSAN Program: https://www.susana.org/_resources/documents/default/2-930-giz2011-en-technology-review-constructed-wetlands.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Censo. (2017). *Indicadores ODS de Agua, Saneamiento e Higiene en Ecuador.* Obtenido de Biblioteca INEC: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Libros/Diagnostico_ASH_pobreza_INEC_BM.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Censo. (Diciembre de 2023). *Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales.* Obtenido de Biblioteca INEC: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/gad-municipales/

Instituto Nacional de Estadística y Censo. (21 de Septiembre de 2023). *Estadísticas Censo 2022*. Obtenido de Biblioteca INEC: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas/

Iwema, A., Raby, D., Lesarve, J., Boutin, C., Dodane, P., Liénard, A., . . . Esser, D. (2005). *Groupe Français "Macrophytes et Traitement des Eaux" and Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, et Rhin Meuse.* Recuperado el 26 de Octubre de 2024, de Épuration des eaux usées domestiques par filtres plantes de macrophytes: Recommandations techniques pour la conception et la réalisation (Treatment of domestic wastewater with planted filters: technical recommendations for design and realization: https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/08/Guide- Macrophytes.pdf.

Kadlec, R. H. (200). The inadequacy of first-order treatment wetland models. (Elsevier, Ed.) *Ecological Engineering, 15*(1-2). doi:https://doi.org/10.1016/S0925-8574(99)00039-7

Matovelle, C., Quinteros, M., & Ochoa, S. (02 de Febrero de 2023). Performance of Equisetum spp and Zantedeschia aethiopica on the evaluation of artificial wetlands as an alternative for wastewater treatment in rural areas of the Ecuadorian Andes. *Elsevier*. doi:https://doi.org/10.1016/j.crsust.2024.100243

Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Stensel, H., Tsuchihashi, R., & Burton, F. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery 5th Edition.* New York: McGraw-Hill Education.

Ministerio de Salud Pública. (15 de Diciembre de 2015). *Ley Orgánica de Salud.* Obtenido de Ministerio de Salud Pública: https://www.salud.gob.ec/wp-content/uploads/2017/03/LEY-ORG%C3%81NICA-DE-SALUD4.pdf

Ministerio del Ambiente. (10 de Septiembre de 2004). *Ley de Gestión Ambiental.* Obtenido de Ministerio del Ambiente: https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/LEY-DE-GESTION-AMBIENTAL.pdf

Ministerio del Ambiente. (04 de Noviembre de 2015). *Reforma Libro VI Anexo 1 del Texto unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente.* Obtenido de Ministerio del Ambiente: https://www.gob.ec/regulaciones/acuerdo-ministerial-097-anexos-normativa-reforma-libro-vi-texto-unificado-legislacion-secundaria-ministerio-ambiente

Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica & UNICEF Ecuador. (Diciembre de 2022). *Costos asociados a servicios inadecuados de agua, saneamiento e higiene en el área rural del Ecuador.* Obtenido de UNICEF Ecuador: https://www.unicef.org/ecuador/informes/costos-asociados-servicios-inadecuados-de-agua-saneamiento-e-higiene-en-el-%C3%A1rea-rural-del

Naciones Unidas Ecuador. (25 de Agosto de 2022). *Marco de Cooperación de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible.* Obtenido de Naciones Unidas Ecuador: https://ecuador.un.org/es/196423-marco-de-cooperaci%C3%B3n-de-las-naciones-unidas-para-el-desarrollo-sostenible-ecuador-2022-2026

ÖNORM. (2009). *Bepflanzte Bodenfilter (Pflanzenkläranlagen) - Anwendung, Bemessung, Bau und Betrieb (Subsurface flow constructed wetlands - Application, dimensioning, installation, and operation).* Recuperado el 26 de Octubre de 2024, de ÖNORM B 2505.

Organización de Naciones Unidas. (25 de Septiembre de 2015). *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. Obtenido de Objetivos de Desarrollo Sostenible: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/

Organización de Naciones Unidas. (25 de Septiembre de 2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de Objetivos de Desarrollo Sostenible: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D., & Kumar, R. (2021). A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. (Elsevier, Ed.) *Environmental Technology & Innovation, 21*. doi:https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261

Romero Rojas, J. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y principios de diseño; 3ra Edición.* Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Secretaría Nacional de Agua Potable y Saneamiento. (Septiembre de 2016). *Estrategia Nacional de la Calidad de Agua.* Obtenido de Agencial Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria: https://www.controlsanitario.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/05/Estrategia-Nacional-de-Calidad-del-Agua_2016-2030.pdf

Sherman, R. (2015). Chapter 18 - Project Management. En R. Sherman, *Business Intelligence Guidebook* (págs. 449-492). Elsevier. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411461-6.00018-6.

Sustainable Sanitation Alliance & International Water Asociation. (2018). *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento.* Recuperado el 08 de Septiembre de 2024, de Banco Interamerico de Desarrollo: https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/schwerpunkte/sesp/CLUES/Compendium_Spanish_pdfs/compendio_sp.pdf

Valdez, E. C., & Vázquez González, A. (2003). *Ingeniería de los Sistemas de Tratamiento y Disposición de Aguas Residuales.* México: Fundación ICA.

Wallace, S., & Knight, R. (2006). *Feasibility, Design Criteria, and O&M Requirements for Small Scale Constructed Wetland Wastewater Treatment Systems* (Vol. 5). IWA Publishing. doi:https://doi.org/10.2166/9781780403991

ANEXOS

ANEXO 1 – ENCUESTA REALIZADA EN LA COMUNIDAD PARA LA EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y SANEAMIENTO

ENCUESTA PARA EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y SANEAMIENTO

Nombre de la persona que responde la encuesta:

1. **Cantidad de personas que viven en la vivienda:**

Personas mayores de edad (18 años o más): _____
Personas menores de edad (menos de 18 años): _____

2. **¿Hace cuántos años vive en esta vivienda?**

Menos de 5 años _____
De 5 a 10 años _____
Más de 10 años _____

3. **¿De dónde proviene el agua que utilizan en la vivienda?**

Pozo _____
Río o quebrada _____
Cisternas _____
Agua de lluvia _____
Red pública de agua _____
Otra (especificar): _____

4. **Para el consumo, ¿utilizan la misma agua que para otras actividades o adquieren agua distinta?**

Utilizamos la misma para todo _____
Adquirimos agua distinta para el consumo (si la adquieren, especificar de dónde proviene): _____

5. **¿Reutilizan el agua para alguna actividad en la vivienda (como riego, limpieza, etc.)?**

Sí (si es afirmativo, responda las siguientes): _____
¿De dónde proviene el agua reutilizada? _____
¿Realizan algún tratamiento antes de reutilizarla o simplemente la desechan? _____
No _____

6. **¿Considera que el agua que utiliza en la vivienda es suficiente para todas sus necesidades?**

Sí _____
No (especificar qué necesidades no cubre): _____

7. **¿El agua que utilizan en la vivienda es de buena calidad?**

Sí _____
No (indicar problemas): _____

8. **¿Qué tipo de sistema de saneamiento utilizan para las aguas residuales domésticas?**

Pozo séptico _____
Letrina _____
No tenemos _____
Otro (especificar): _____

9. **Si utilizan pozo séptico, ¿sabía que es necesario realizarle mantenimiento regular para evitar la contaminación de aguas subterráneas?**

Sí _____
No _____

10. **Durante el tiempo que ha vivido aquí, ¿cuántos pozos sépticos han utilizado en la vivienda?**

Un solo pozo _____
Más de un pozo (especificar cuántos): _____

11. **Si pudieran mejorar alguna condición relacionada con el agua en su vivienda, ¿qué elegirían como prioridad?**

Agua potable _____
Aguas servidas _____
Saneamiento _____
Otro (especificar): _____

12. **¿El terreno de la vivienda es plano o tiene inclinaciones?**

Totalmente plano _____
Con inclinaciones suaves _____
Con inclinaciones pronunciadas _____

13. **¿Qué espacio disponible tiene en su vivienda para la instalación de un sistema de tratamiento de aguas?**

Menos de 10 m² _____
Entre 10 y 20 m² _____
Más de 20 m² _____

14. **¿La vivienda tiene algún sistema actual para el manejo de aguas grises (lavamanos, ducha, cocina)?**

Sí (especificar): _____
No _____

15. **¿Qué tipo de vegetación tiene en los alrededores de la vivienda?**

Vegetación densa _____
Vegetación moderada _____
Poca o ninguna vegetación _____

16. **¿Está dispuesto a mantener y monitorear un sistema de tratamiento de aguas residuales?**

Sí, estoy dispuesto _____
No, preferiría un sistema de bajo mantenimiento _____

17. **¿Cómo calificaría la importancia de tratar y reutilizar las aguas grises en su vivienda?**

Muy importante _____
Moderadamente importante _____
No es prioritario _____

ANEXO 2 – RESULTADOS DE ENCUESTAS REALIZADAS

ENCUESTA PARA EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y SANEAMIENTO

Nombre de la persona que responde la encuesta:

Vivienda No. 1

1. **Cantidad de personas que viven en la vivienda:**

Personas mayores de edad (18 años o más): 2

Personas menores de edad (menos de 18 años): 2

2. **¿Hace cuántos años vive en esta vivienda?**

Menos de 5 años X

De 5 a 10 años _____

Más de 10 años _____

3. **¿De dónde proviene el agua que utilizan en la vivienda?**

Pozo X

Río o quebrada _____

Cisternas _____

Agua de lluvia _____

Red pública de agua _____

Otra (especificar): _____

4. **Para el consumo, ¿utilizan la misma agua que para otras actividades o adquieren agua distinta?**

Utilizamos la misma para todo NO

Adquirimos agua distinta para el consumo (si la adquieren, especificar de dónde proviene): Agua Purificada

5. **¿Reutilizan el agua para alguna actividad en la vivienda (como riego, limpieza, etc.)?**

Sí (si es afirmativo, responda las siguientes): _____

¿De dónde proviene el agua reutilizada? _____

¿Realizan algún tratamiento antes de reutilizarla o simplemente la desechan? _____

No X

6. **¿Considera que el agua que utiliza en la vivienda es suficiente para todas sus necesidades?**

Sí X

No (especificar qué necesidades no cubre): _____

7. **¿El agua que utilizan en la vivienda es de buena calidad?**

Sí X

No (indicar problemas): _____

8. **¿Qué tipo de sistema de saneamiento utilizan para las aguas residuales domésticas?**

Pozo séptico X

Letrina _____

No tenemos _____

Otro (especificar): _____

9. **Si utilizan pozo séptico, ¿sabía que es necesario realizarle mantenimiento regular para evitar la contaminación de aguas subterráneas?**

Sí _____

No X

10. **Durante el tiempo que ha vivido aquí, ¿cuántos pozos sépticos han utilizado en la vivienda?**

Un solo pozo ___X___

Más de un pozo (especificar cuántos): _____

11. **Si pudieran mejorar alguna condición relacionada con el agua en su vivienda, ¿qué elegirían como prioridad?**

Agua potable ___X___

Aguas servidas _____

Saneamiento _____

Otro (especificar): _____

12. **¿El terreno de la vivienda es plano o tiene inclinaciones?**

Totalmente plano ___X___

Con inclinaciones suaves _____

Con inclinaciones pronunciadas _____

13. **¿Qué espacio disponible tiene en su vivienda para la instalación de un sistema de tratamiento de aguas?**

Menos de 10 m² ___X___

Entre 10 y 20 m² _____

Más de 20 m² _____

14. **¿La vivienda tiene algún sistema actual para el manejo de aguas grises (lavamanos, ducha, cocina)?**

Sí (especificar): _____

No ___X___

15. **¿Qué tipo de vegetación tiene en los alrededores de la vivienda?**

Vegetación densa _____
Vegetación moderada X
Poca o ninguna vegetación _____

16. **¿Está dispuesto a mantener y monitorear un sistema de tratamiento de aguas residuales?**

Sí, estoy dispuesto _____
No, preferiría un sistema de bajo mantenimiento X

17. **¿Cómo calificaría la importancia de tratar y reutilizar las aguas grises en su vivienda?**

Muy importante X
Moderadamente importante _____
No es prioritario _____

ENCUESTA PARA EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y SANEAMIENTO

Nombre de la persona que responde la encuesta:

Vivienda No. 2

1. **Cantidad de personas que viven en la vivienda:**

Personas mayores de edad (18 años o más): 2

Personas menores de edad (menos de 18 años): 3

2. **¿Hace cuántos años vive en esta vivienda?**

Menos de 5 años _____

De 5 a 10 años X

Más de 10 años _____

3. **¿De dónde proviene el agua que utilizan en la vivienda?**

Pozo X

Río o quebrada _____

Cisternas _____

Agua de lluvia _____

Red pública de agua _____

Otra (especificar): _____

4. **Para el consumo, ¿utilizan la misma agua que para otras actividades o adquieren agua distinta?**

Utilizamos la misma para todo NO

Adquirimos agua distinta para el consumo (si la adquieren, especificar de dónde proviene): Agua Purificada

5. **¿Reutilizan el agua para alguna actividad en la vivienda (como riego, limpieza, etc.)?**

Sí (si es afirmativo, responda las siguientes): _____

¿De dónde proviene el agua reutilizada? _____

¿Realizan algún tratamiento antes de reutilizarla o simplemente la desechan? _____

No X

6. **¿Considera que el agua que utiliza en la vivienda es suficiente para todas sus necesidades?**

Sí _____

No (especificar qué necesidades no cubre): Agua Potable

7. **¿El agua que utilizan en la vivienda es de buena calidad?**

Sí _____

No (indicar problemas): Sabor

8. **¿Qué tipo de sistema de saneamiento utilizan para las aguas residuales domésticas?**

Pozo séptico X

Letrina _____

No tenemos _____

Otro (especificar): _____

9. **Si utilizan pozo séptico, ¿sabía que es necesario realizarle mantenimiento regular para evitar la contaminación de aguas subterráneas?**

Sí _____

No X

10. **Durante el tiempo que ha vivido aquí, ¿cuántos pozos sépticos han utilizado en la vivienda?**

Un solo pozo _____
Más de un pozo (especificar cuántos): 2

11. **Si pudieran mejorar alguna condición relacionada con el agua en su vivienda, ¿qué elegirían como prioridad?**

Agua potable _____
Aguas servidas _____
Saneamiento X
Otro (especificar): _____

12. **¿El terreno de la vivienda es plano o tiene inclinaciones?**

Totalmente plano X
Con inclinaciones suaves _____
Con inclinaciones pronunciadas _____

13. **¿Qué espacio disponible tiene en su vivienda para la instalación de un sistema de tratamiento de aguas?**

Menos de 10 m² X
Entre 10 y 20 m² _____
Más de 20 m² _____

14. **¿La vivienda tiene algún sistema actual para el manejo de aguas grises (lavamanos, ducha, cocina)?**

Sí (especificar): _____
No X

15. **¿Qué tipo de vegetación tiene en los alrededores de la vivienda?**

Vegetación densa ___X___
Vegetación moderada _____
Poca o ninguna vegetación _____

16. **¿Está dispuesto a mantener y monitorear un sistema de tratamiento de aguas residuales?**

Sí, estoy dispuesto _____
No, preferiría un sistema de bajo mantenimiento ___X___

17. **¿Cómo calificaría la importancia de tratar y reutilizar las aguas grises en su vivienda?**

Muy importante _____
Moderadamente importante _____
No es prioritario ___X___

ENCUESTA PARA EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y SANEAMIENTO

Nombre de la persona que responde la encuesta:

Vivienda No. 3

1. **Cantidad de personas que viven en la vivienda:**

Personas mayores de edad (18 años o más): 4

Personas menores de edad (menos de 18 años): 3

2. **¿Hace cuántos años vive en esta vivienda?**

Menos de 5 años _____

De 5 a 10 años _____

Más de 10 años X

3. **¿De dónde proviene el agua que utilizan en la vivienda?**

Pozo X

Río o quebrada _____

Cisternas _____

Agua de lluvia _____

Red pública de agua _____

Otra (especificar): _____

4. **Para el consumo, ¿utilizan la misma agua que para otras actividades o adquieren agua distinta?**

Utilizamos la misma para todo NO

Adquirimos agua distinta para el consumo (si la adquieren, especificar de dónde proviene): Agua Purificada

5. **¿Reutilizan el agua para alguna actividad en la vivienda (como riego, limpieza, etc.)?**

Sí (si es afirmativo, responda las siguientes): X

¿De dónde proviene el agua reutilizada? lavadora

¿Realizan algún tratamiento antes de reutilizarla o simplemente la desechan? NO realizan ningún tratamiento.

No _____

6. **¿Considera que el agua que utiliza en la vivienda es suficiente para todas sus necesidades?**

Sí _____

No (especificar qué necesidades no cubre): Agua potable

7. **¿El agua que utilizan en la vivienda es de buena calidad?**

Sí _____

No (indicar problemas): No tiene buen olor

8. **¿Qué tipo de sistema de saneamiento utilizan para las aguas residuales domésticas?**

Pozo séptico X

Letrina _____

No tenemos _____

Otro (especificar): _____

9. **Si utilizan pozo séptico, ¿sabía que es necesario realizarle mantenimiento regular para evitar la contaminación de aguas subterráneas?**

Sí X

No _____

10. **Durante el tiempo que ha vivido aquí, ¿cuántos pozos sépticos han utilizado en la vivienda?**

Un solo pozo _____
Más de un pozo (especificar cuántos): 3

11. **Si pudieran mejorar alguna condición relacionada con el agua en su vivienda, ¿qué elegirían como prioridad?**

Agua potable X
Aguas servidas _____
Saneamiento _____
Otro (especificar): _____

12. **¿El terreno de la vivienda es plano o tiene inclinaciones?**

Totalmente plano _____
Con inclinaciones suaves X
Con inclinaciones pronunciadas _____

13. **¿Qué espacio disponible tiene en su vivienda para la instalación de un sistema de tratamiento de aguas?**

Menos de 10 m² _____
Entre 10 y 20 m² X
Más de 20 m² _____

14. **¿La vivienda tiene algún sistema actual para el manejo de aguas grises (lavamanos, ducha, cocina)?**

Sí (especificar): _____
No X

15. **¿Qué tipo de vegetación tiene en los alrededores de la vivienda?**

Vegetación densa _____
Vegetación moderada _____
Poca o ninguna vegetación X

16. **¿Está dispuesto a mantener y monitorear un sistema de tratamiento de aguas residuales?**

Sí, estoy dispuesto X
No, preferiría un sistema de bajo mantenimiento _____

17. **¿Cómo calificaría la importancia de tratar y reutilizar las aguas grises en su vivienda?**

Muy importante X
Moderadamente importante _____
No es prioritario _____

ENCUESTA PARA EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y SANEAMIENTO

Nombre de la persona que responde la encuesta:

Vivienda No. 4

1. **Cantidad de personas que viven en la vivienda:**

Personas mayores de edad (18 años o más): 4

Personas menores de edad (menos de 18 años): 0

2. **¿Hace cuántos años vive en esta vivienda?**

Menos de 5 años _____

De 5 a 10 años _____

Más de 10 años X

3. **¿De dónde proviene el agua que utilizan en la vivienda?**

Pozo X

Río o quebrada _____

Cisternas _____

Agua de lluvia _____

Red pública de agua _____

Otra (especificar): _____

4. **Para el consumo, ¿utilizan la misma agua que para otras actividades o adquieren agua distinta?**

Utilizamos la misma para todo X

Adquirimos agua distinta para el consumo (si la adquieren, especificar de dónde proviene): _____

5. **¿Reutilizan el agua para alguna actividad en la vivienda (como riego, limpieza, etc.)?**

Sí (si es afirmativo, responda las siguientes): _____

¿De dónde proviene el agua reutilizada? _____

¿Realizan algún tratamiento antes de reutilizarla o simplemente la desechan? _____

No X

6. **¿Considera que el agua que utiliza en la vivienda es suficiente para todas sus necesidades?**

Sí _____

No (especificar qué necesidades no cubre): Cocinar

7. **¿El agua que utilizan en la vivienda es de buena calidad?**

Sí _____

No (indicar problemas): NO tiene buen Color

8. **¿Qué tipo de sistema de saneamiento utilizan para las aguas residuales domésticas?**

Pozo séptico X

Letrina _____

No tenemos _____

Otro (especificar): _____

9. **Si utilizan pozo séptico, ¿sabía que es necesario realizarle mantenimiento regular para evitar la contaminación de aguas subterráneas?**

Sí _____

No X

10. **Durante el tiempo que ha vivido aquí, ¿cuántos pozos sépticos han utilizado en la vivienda?**

Un solo pozo _____
Más de un pozo (especificar cuántos): 3

11. **Si pudieran mejorar alguna condición relacionada con el agua en su vivienda, ¿qué elegirían como prioridad?**

Agua potable _____
Aguas servidas _____
Saneamiento X
Otro (especificar): _____

12. **¿El terreno de la vivienda es plano o tiene inclinaciones?**

Totalmente plano _____
Con inclinaciones suaves X
Con inclinaciones pronunciadas _____

13. **¿Qué espacio disponible tiene en su vivienda para la instalación de un sistema de tratamiento de aguas?**

Menos de 10 m² X
Entre 10 y 20 m² _____
Más de 20 m² _____

14. **¿La vivienda tiene algún sistema actual para el manejo de aguas grises (lavamanos, ducha, cocina)?**

Sí (especificar): _____
No X

15. ¿Qué tipo de vegetación tiene en los alrededores de la vivienda?

Vegetación densa _____
Vegetación moderada _____
Poca o ninguna vegetación X

16. ¿Está dispuesto a mantener y monitorear un sistema de tratamiento de aguas residuales?

Sí, estoy dispuesto _____
No, preferiría un sistema de bajo mantenimiento X

17. ¿Cómo calificaría la importancia de tratar y reutilizar las aguas grises en su vivienda?

Muy importante _____
Moderadamente importante X
No es prioritario _____

ENCUESTA PARA EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y SANEAMIENTO

Nombre de la persona que responde la encuesta:

Vivienda No. 5

1. **Cantidad de personas que viven en la vivienda:**

Personas mayores de edad (18 años o más): 2
Personas menores de edad (menos de 18 años): 1

2. **¿Hace cuántos años vive en esta vivienda?**

Menos de 5 años X
De 5 a 10 años _____
Más de 10 años _____

3. **¿De dónde proviene el agua que utilizan en la vivienda?**

Pozo X
Río o quebrada _____
Cisternas _____
Agua de lluvia _____
Red pública de agua _____
Otra (especificar): _____

4. **Para el consumo, ¿utilizan la misma agua que para otras actividades o adquieren agua distinta?**

Utilizamos la misma para todo NO
Adquirimos agua distinta para el consumo (si la adquieren, especificar de dónde proviene): Agua Purificada

5. **¿Reutilizan el agua para alguna actividad en la vivienda (como riego, limpieza, etc.)?**

Sí (si es afirmativo, responda las siguientes): _____

¿De dónde proviene el agua reutilizada? _____

¿Realizan algún tratamiento antes de reutilizarla o simplemente la desechan? _____

No X

6. **¿Considera que el agua que utiliza en la vivienda es suficiente para todas sus necesidades?**

Sí _____

No (especificar qué necesidades no cubre): Cocinar

7. **¿El agua que utilizan en la vivienda es de buena calidad?**

Sí _____

No (indicar problemas): No tiene buen color

8. **¿Qué tipo de sistema de saneamiento utilizan para las aguas residuales domésticas?**

Pozo séptico X

Letrina _____

No tenemos _____

Otro (especificar): _____

9. **Si utilizan pozo séptico, ¿sabía que es necesario realizarle mantenimiento regular para evitar la contaminación de aguas subterráneas?**

Sí _____

No X

10. **Durante el tiempo que ha vivido aquí, ¿cuántos pozos sépticos han utilizado en la vivienda?**

Un solo pozo ___X___

Más de un pozo (especificar cuántos): _____

11. **Si pudieran mejorar alguna condición relacionada con el agua en su vivienda, ¿qué elegirían como prioridad?**

Agua potable _____

Aguas servidas ___X___

Saneamiento _____

Otro (especificar): _____

12. **¿El terreno de la vivienda es plano o tiene inclinaciones?**

Totalmente plano _____

Con inclinaciones suaves ___X___

Con inclinaciones pronunciadas _____

13. **¿Qué espacio disponible tiene en su vivienda para la instalación de un sistema de tratamiento de aguas?**

Menos de 10 m² _____

Entre 10 y 20 m² ___X___

Más de 20 m² _____

14. **¿La vivienda tiene algún sistema actual para el manejo de aguas grises (lavamanos, ducha, cocina)?**

Sí (especificar): _____

No ___X___

15. **¿Qué tipo de vegetación tiene en los alrededores de la vivienda?**

Vegetación densa _____
Vegetación moderada X
Poca o ninguna vegetación _____

16. **¿Está dispuesto a mantener y monitorear un sistema de tratamiento de aguas residuales?**

Sí, estoy dispuesto _____
No, preferiría un sistema de bajo mantenimiento X

17. **¿Cómo calificaría la importancia de tratar y reutilizar las aguas grises en su vivienda?**

Muy importante _____
Moderadamente importante _____
No es prioritario X

ENCUESTA PARA EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y SANEAMIENTO

Nombre de la persona que responde la encuesta:

Vivienda No. 6

1. **Cantidad de personas que viven en la vivienda:**

Personas mayores de edad (18 años o más): 3

Personas menores de edad (menos de 18 años): _____

2. **¿Hace cuántos años vive en esta vivienda?**

Menos de 5 años _____

De 5 a 10 años X

Más de 10 años _____

3. **¿De dónde proviene el agua que utilizan en la vivienda?**

Pozo X

Río o quebrada _____

Cisternas _____

Agua de lluvia _____

Red pública de agua _____

Otra (especificar): _____

4. **Para el consumo, ¿utilizan la misma agua que para otras actividades o adquieren agua distinta?**

Utilizamos la misma para todo X

Adquirimos agua distinta para el consumo (si la adquieren, especificar de dónde proviene): _____

5. **¿Reutilizan el agua para alguna actividad en la vivienda (como riego, limpieza, etc.)?**

Sí (si es afirmativo, responda las siguientes): _____

¿De dónde proviene el agua reutilizada? _____

¿Realizan algún tratamiento antes de reutilizarla o simplemente la desechan? _____

No X

6. **¿Considera que el agua que utiliza en la vivienda es suficiente para todas sus necesidades?**

Sí _____

No (especificar qué necesidades no cubre): Cocinar

7. **¿El agua que utilizan en la vivienda es de buena calidad?**

Sí _____

No (indicar problemas): No tiene buen sabor.

8. **¿Qué tipo de sistema de saneamiento utilizan para las aguas residuales domésticas?**

Pozo séptico _____

Letrina X

No tenemos _____

Otro (especificar): _____

9. **Si utilizan pozo séptico, ¿sabía que es necesario realizarle mantenimiento regular para evitar la contaminación de aguas subterráneas?**

Sí X

No _____

10. **Durante el tiempo que ha vivido aquí, ¿cuántos pozos sépticos han utilizado en la vivienda?**

Un solo pozo _____
Más de un pozo (especificar cuántos): 2

11. **Si pudieran mejorar alguna condición relacionada con el agua en su vivienda, ¿qué elegirían como prioridad?**

Agua potable _____
Aguas servidas _____
Saneamiento X
Otro (especificar): _____

12. **¿El terreno de la vivienda es plano o tiene inclinaciones?**

Totalmente plano _____
Con inclinaciones suaves X
Con inclinaciones pronunciadas _____

13. **¿Qué espacio disponible tiene en su vivienda para la instalación de un sistema de tratamiento de aguas?**

Menos de 10 m² _____
Entre 10 y 20 m² _____
Más de 20 m² X

14. **¿La vivienda tiene algún sistema actual para el manejo de aguas grises (lavamanos, ducha, cocina)?**

Sí (especificar): _____
No X

15. **¿Qué tipo de vegetación tiene en los alrededores de la vivienda?**

Vegetación densa X
Vegetación moderada _____
Poca o ninguna vegetación _____

16. **¿Está dispuesto a mantener y monitorear un sistema de tratamiento de aguas residuales?**

Sí, estoy dispuesto _____
No, preferiría un sistema de bajo mantenimiento X

17. **¿Cómo calificaría la importancia de tratar y reutilizar las aguas grises en su vivienda?**

Muy importante _____
Moderadamente importante X
No es prioritario _____

ENCUESTA PARA EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y SANEAMIENTO

Nombre de la persona que responde la encuesta:

Vivienda No. 7

1. **Cantidad de personas que viven en la vivienda:**

Personas mayores de edad (18 años o más): 3
Personas menores de edad (menos de 18 años): 2

2. **¿Hace cuántos años vive en esta vivienda?**

Menos de 5 años _____
De 5 a 10 años _____
Más de 10 años X

3. **¿De dónde proviene el agua que utilizan en la vivienda?**

Pozo X
Río o quebrada _____
Cisternas _____
Agua de lluvia _____
Red pública de agua _____
Otra (especificar): _____

4. **Para el consumo, ¿utilizan la misma agua que para otras actividades o adquieren agua distinta?**

Utilizamos la misma para todo X
Adquirimos agua distinta para el consumo (si la adquieren, especificar de dónde proviene): _____

5. **¿Reutilizan el agua para alguna actividad en la vivienda (como riego, limpieza, etc.)?**

Sí (si es afirmativo, responda las siguientes): X

¿De dónde proviene el agua reutilizada? lavadora

¿Realizan algún tratamiento antes de reutilizarla o simplemente la desechan? No Realizan ningún tratamiento

No _____

6. **¿Considera que el agua que utiliza en la vivienda es suficiente para todas sus necesidades?**

Sí X

No (especificar qué necesidades no cubre): _____

7. **¿El agua que utilizan en la vivienda es de buena calidad?**

Sí _____

No (indicar problemas): Mal Sabor

8. **¿Qué tipo de sistema de saneamiento utilizan para las aguas residuales domésticas?**

Pozo séptico X

Letrina _____

No tenemos _____

Otro (especificar): _____

9. **Si utilizan pozo séptico, ¿sabía que es necesario realizarle mantenimiento regular para evitar la contaminación de aguas subterráneas?**

Sí _____

No X

10. **Durante el tiempo que ha vivido aquí, ¿cuántos pozos sépticos han utilizado en la vivienda?**

Un solo pozo _____

Más de un pozo (especificar cuántos): 2

11. **Si pudieran mejorar alguna condición relacionada con el agua en su vivienda, ¿qué elegirían como prioridad?**

Agua potable X

Aguas servidas _____

Saneamiento _____

Otro (especificar): _____

12. **¿El terreno de la vivienda es plano o tiene inclinaciones?**

Totalmente plano _____

Con inclinaciones suaves X

Con inclinaciones pronunciadas _____

13. **¿Qué espacio disponible tiene en su vivienda para la instalación de un sistema de tratamiento de aguas?**

Menos de 10 m² X

Entre 10 y 20 m² _____

Más de 20 m² _____

14. **¿La vivienda tiene algún sistema actual para el manejo de aguas grises (lavamanos, ducha, cocina)?**

Sí (especificar): _____

No X

15. ¿Qué tipo de vegetación tiene en los alrededores de la vivienda?

Vegetación densa _____
Vegetación moderada X
Poca o ninguna vegetación _____

16. ¿Está dispuesto a mantener y monitorear un sistema de tratamiento de aguas residuales?

Sí, estoy dispuesto _____
No, preferiría un sistema de bajo mantenimiento X

17. ¿Cómo calificaría la importancia de tratar y reutilizar las aguas grises en su vivienda?

Muy importante _____
Moderadamente importante _____
No es prioritario X

ENCUESTA PARA EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y SANEAMIENTO

Nombre de la persona que responde la encuesta:

Vivienda No. 8

1. **Cantidad de personas que viven en la vivienda:**

Personas mayores de edad (18 años o más): 4

Personas menores de edad (menos de 18 años): 2

2. **¿Hace cuántos años vive en esta vivienda?**

Menos de 5 años _____

De 5 a 10 años _____

Más de 10 años X

3. **¿De dónde proviene el agua que utilizan en la vivienda?**

Pozo X

Río o quebrada _____

Cisternas _____

Agua de lluvia _____

Red pública de agua _____

Otra (especificar): _____

4. **Para el consumo, ¿utilizan la misma agua que para otras actividades o adquieren agua distinta?**

Utilizamos la misma para todo No

Adquirimos agua distinta para el consumo (si la adquieren, especificar de dónde proviene): Agua Purificada

5. **¿Reutilizan el agua para alguna actividad en la vivienda (como riego, limpieza, etc.)?**

Sí (si es afirmativo, responda las siguientes): X

¿De dónde proviene el agua reutilizada? lavadora

¿Realizan algún tratamiento antes de reutilizarla o simplemente la desechan? No Realizan ningún tratamiento

No _____

6. **¿Considera que el agua que utiliza en la vivienda es suficiente para todas sus necesidades?**

Sí X

No (especificar qué necesidades no cubre): _____

7. **¿El agua que utilizan en la vivienda es de buena calidad?**

Sí X

No (indicar problemas): _____

8. **¿Qué tipo de sistema de saneamiento utilizan para las aguas residuales domésticas?**

Pozo séptico X

Letrina _____

No tenemos _____

Otro (especificar): _____

9. **Si utilizan pozo séptico, ¿sabía que es necesario realizarle mantenimiento regular para evitar la contaminación de aguas subterráneas?**

Sí _____

No X

10. **Durante el tiempo que ha vivido aquí, ¿cuántos pozos sépticos han utilizado en la vivienda?**

Un solo pozo _____
Más de un pozo (especificar cuántos): 3

11. **Si pudieran mejorar alguna condición relacionada con el agua en su vivienda, ¿qué elegirían como prioridad?**

Agua potable _____
Aguas servidas X
Saneamiento _____
Otro (especificar): _____

12. **¿El terreno de la vivienda es plano o tiene inclinaciones?**

Totalmente plano _____
Con inclinaciones suaves _____
Con inclinaciones pronunciadas X

13. **¿Qué espacio disponible tiene en su vivienda para la instalación de un sistema de tratamiento de aguas?**

Menos de 10 m² X
Entre 10 y 20 m² _____
Más de 20 m² _____

14. **¿La vivienda tiene algún sistema actual para el manejo de aguas grises (lavamanos, ducha, cocina)?**

Sí (especificar): _____
No X

15. **¿Qué tipo de vegetación tiene en los alrededores de la vivienda?**

Vegetación densa ___X___
Vegetación moderada _____
Poca o ninguna vegetación _____

16. **¿Está dispuesto a mantener y monitorear un sistema de tratamiento de aguas residuales?**

Sí, estoy dispuesto _____
No, preferiría un sistema de bajo mantenimiento ___X___

17. **¿Cómo calificaría la importancia de tratar y reutilizar las aguas grises en su vivienda?**

Muy importante _____
Moderadamente importante _____
No es prioritario ___X___