

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
ESCUELA DE POSGRADO  
Programa de Doctorado en Ingeniería Civil**



---

**Depuración de aguas residuales urbanas con humedal  
de flujo vertical construido con sustrato reciclado**

---

**Tesis para optar el grado de Doctor en Ingeniería Civil**

**Autor:**  
**Mg. Mogollon Vizueta, Cristhian Juan**

**Asesor:**  
**Dr. Aparicio Roque, Fidel Gregorio**  
**Código ORCID: 0000-0003-1405-7588**  
**DNI. N° 31672306**

**Línea de investigación**  
**Gestión integrada de recursos hídricos**

**Nuevo Chimbote - PERÚ**  
**2025**



**UNS**  
ESCUELA DE  
POSGRADO

## **CONSTANCIA DE ASESORAMIENTO DE TESIS**

Yo, Dr. Fidel Gregorio Aparicio Roque, mediante la presente certifico mi asesoramiento de la Tesis Doctoral titulada: "DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS CON HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL CONSTRUIDO CON SUSTRATO RECICLADO", por el magister Cristhian Juan Mogollon Vizueta, para obtener el Grado Académico de Doctor en Ingeniería Civil en la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa.

Nuevo Chimbote, noviembre del 2025.

Dr. Fidel Gregorio Aparicio Roque  
ASESOR  
CÓDIGO ORCID: 0000-0003-1405-7588  
DNI N° 31672306



**UNS**  
ESCUELA DE  
POSGRADO

**CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR**

**"Depuración de Aguas Residuales Urbanas con Humedal de Flujo Vertical Construido con Sustrato Reciclado"**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA CIVIL**

Revisado y Aprobado por el Jurado Evaluador:

DR. ABNER ITAMAR LEÓN BOBADILLA  
PRESIDENTE  
CÓDIGO ORCID: 0000-0003-2949-6591  
DNI N° 32942184

DRA. JENISSE DEL ROCÍO FERNÁNDEZ MANTILLA  
SECRETARIA  
CÓDIGO ORCID: 0000-0003-3336-4786  
DNI N° 33264434

DR. FIDEL GREGORIO APARICIO ROQUE  
VOCAL  
CÓDIGO ORCID: 0000-0003-1405-7588  
DNI N° 31672306



**ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

A los diecinueve días del mes de noviembre del año 2025, siendo las 9:00 horas, en el aula P-01 de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador, designados mediante Resolución Directoral N° 830-2025-EPG-UNS de fecha 27.09.2025, conformado por los docentes: Dr. Abner Itamar León Bobadilla (Presidente), Dra. Jenisse del Rocío Fernández Mantilla (Secretaria), Dr. Fidel Gregorio Aparicio Roque (Vocal); con la finalidad de evaluar la tesis intitulada: "**DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS CON HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL CONSTRUÍDO CON SUSTRATO RECICLADO**"; presentado por el tesista **Cristhian Juan Mogollon Vizueta**, egresado del programa de Doctorado en Ingeniería Civil.

Sustentación autorizada mediante Resolución Directoral N° 919-2025-EPG-UNS de fecha 12 de noviembre de 2025.

El presidente del jurado autorizó el inicio del acto académico; producido y concluido el acto de sustentación de tesis, los miembros del jurado procedieron a la evaluación respectiva, haciendo una serie de preguntas y recomendaciones al tesista, quien dio respuestas a las interrogantes y observaciones.

El jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como Bueno, asignándole la calificación de DIECISIETE (17).

Siendo las 10:00 horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando la presente acta en señal de conformidad.

**Dr. Abner Itamar León Bobadilla**  
Presidente

**Dra. Jenisse del Rocío Fernández Mantilla**  
Secretaria

**Dr. Fidel Gregorio Aparicio Roque**  
Vocal/Asesor



## Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Cristhian Juan MOGOLLON VIZUETA  
Título del ejercicio: DOCTORADO 2025 - 2  
Título de la entrega: Informe de tesis Cristhian Juan Mogollon Vizueta  
Nombre del archivo: Informe\_de\_tesis\_Cristhian\_Juan\_Mogollon\_Vizueta\_2025\_Turn...  
Tamaño del archivo: 1.89M  
Total páginas: 66  
Total de palabras: 18,802  
Total de caracteres: 98,680  
Fecha de entrega: 04-dic-2025 06:58a.m. (UTC-0500)  
Identificador de la entrega: 2823046211



Derechos de autor 2025 Turnitin. Todos los derechos reservados.

# Informe de tesis Cristhian Juan Mogollon Vizueta

## INFORME DE ORIGINALIDAD



## FUENTES PRIMARIAS

Rank	Fuente	Porcentaje (%)
1	hdl.handle.net Fuente de Internet	4%
2	uss.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	repositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	2%
4	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	1%
5	worldwidescience.org Fuente de Internet	1%
6	docplayer.es Fuente de Internet	1%
7	ECOFLUIDOS INGENIEROS S.A.. "Adenda al EIA de Renovación de Equipos, Maquinaria y del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de las Plantas de Congelado y Harina Residual, Ubicadas en el Distrito de Paita, Piura-IGA0004579", R.D. N° 346-2016-PRODUCE/DGCHD, 2020 Publicación	<1 %
8	www.repositorydigital.ufrb.edu.br Fuente de Internet	<1 %
9	Submitted to Universidad Privada del Norte Trabajo del estudiante	<1 %

## ÍNDICE GENERAL

HOJA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR.....	ii
HOJA DE CONFORMIDAD DE JURADO EVALUADOR.....	iii
ACTA DE SUSTENTACIÓN.....	vii
ACTA DE APROBACIÓN DE ORIGINALIDAD .....	vii
DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA .....	vii
RECIBO TURNITIN.....	vii
REPORTE PORCENTUAL DE TURNITIN.....	viii
INDICE GENERAL .....	ix
LISTA DE TABLAS .....	xi
LISTA DE ECUACIONES .....	xi
LISTA DE FIGURAS .....	xii
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
I. INTRODUCCIÓN .....	15
1.1      Descripción y Formulación del Problema.....	15
1.1.1    Descripción del Problema .....	15
1.1.2    Formulación del Problema.....	19
1.2      Objetivos .....	19
1.2.1    Objetivo General .....	19
1.2.2    Objetivos Específicos .....	19
1.3      Hipótesis de la Investigación.....	20
1.3.1    Hipótesis General .....	20
1.3.2    Hipótesis Específicas.....	20
1.4      Justificación .....	20
1.5      Importancia .....	21
II. MARCO TEÓRICO .....	22
2.1      Antecedentes de la Investigación .....	22
2.1.1    Internacionales.....	22
2.1.2    Nacionales .....	27
2.2      Marco conceptual .....	28
2.2.1    Variable Humedales de Flujo Vertical .....	28

2.2.2	Variable Depuración de Aguas Residuales .....	37
2.3	Definición de términos básicos .....	39
III.	METODOLOGÍA.....	42
3.1	Método de Investigación .....	42
3.2	Diseño de Investigación .....	42
3.3	Población y Muestra.....	20
3.4	Operacionalización de las Variables de Estudio .....	20
3.5	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos .....	45
3.6	Procedimiento de Recolección de Datos .....	47
3.7	Técnica de Análisis de los Resultados.....	51
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
4.1	Influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en dos etapas.....	53
4.2	Influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de arena en una primera etapa y de ladrillo de arcilla reciclado en una segunda etapa .....	57
4.3	Influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en una primera etapa y de arena en una segunda etapa .....	61
4.4	Contrastación de Hipótesis.....	65
4.5	Discusión de Resultados.....	72
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	77
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y VIRTUALES.....	80
VII.	ANEXOS .....	85

## **Lista de tablas**

Tabla 1. Rendimientos obtenidos en el modelo de flujo vertical .....	31
Tabla 2. Características del sustrato convencional en el sistema de humedales construidos de flujo vertical.....	33
Tabla 3. Parámetros de medición de aguas residuales urbanas tratadas.....	39
Tabla 4. Propiedades físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales urbanas.....	50
Tabla 5. Contrastación de hipótesis: Turbiedad del GE1 .....	65
Tabla 6. Contrastación de hipótesis: DBO <sub>5</sub> del GE1 .....	66
Tabla 7. Contrastación de hipótesis: DQO del GE1 .....	66
Tabla 8. Contrastación de hipótesis: Coliformes termo tolerantes del GE1 .....	67
Tabla 9. Contrastación de hipótesis: Turbiedad del GE2 .....	68
Tabla 10. Contrastación de hipótesis: DBO <sub>5</sub> del GE2.....	68
Tabla 11. Contrastación de hipótesis: DQO del GE2.....	69
Tabla 12. Contrastación de hipótesis: Coliformes termo tolerantes del GE2.....	69
Tabla 13. Contrastación de hipótesis: Turbiedad del GE3 .....	70
Tabla 14. Contrastación de hipótesis: DBO <sub>5</sub> del GE3 .....	71
Tabla 15. Contrastación de hipótesis: DQO del GE3 .....	71
Tabla 16. Contrastación de hipótesis: Coliformes termo tolerantes del GE3 .....	72

## **Lista de ecuaciones**

Ecuación 1. Diseño hidráulico del sistema de flujo vertical .....	33
Ecuación 2. Permeabilidad equivalente.....	36
Ecuación 3. T de Student .....	51

## Lista de figuras

Figura 1. Diagrama del sistema de humedales construidos de flujo vertical en serie .....	29
Figura 2. Diseño con flujo sub superficial de tipo horizontal y vertical .....	30
Figura 3. Diseño del sistema de humedales construidos de flujo vertical.....	32
Figura 4. Fórmula para el diseño hidráulico del sistema de flujo vertical .....	32
Figura 5. Características y disposición del sustrato en sistemas de flujo vertical .....	34
Figura 6 Permeabilidad equivalente horizontal y vertical.....	35
Figura 7. Procedimiento para la depuración de aguas residuales urbanas .....	38
Figura 8. Componentes del humedal construido de flujo vertical.....	46
Figura 9. Esquema de la planta con humedales construidos de flujo vertical.....	48
Figura 10. Conformación del humedal de flujo vertical en la primera etapa.....	49
Figura 11. Conformación del humedal de flujo vertical en la segunda etapa .....	49
Figura 12. Valores de remoción del parámetro turbiedad GE1.....	53
Figura 13. Eficiencia de remoción del parámetro turbiedad GE1 .....	53
Figura 14. Valores de remoción del parámetro DBO <sub>5</sub> GE1 .....	54
Figura 15. Eficiencia de remoción del parámetro DBO <sub>5</sub> GE1 .....	54
Figura 16. Valores de remoción del parámetro demanda química de oxígeno GE1 .....	55
Figura 17. Eficiencia de remoción del parámetro demanda química de oxígeno GE1 .....	55
Figura 18. Valores de remoción del parámetro coliformes termo tolerantes GE1 .....	56
Figura 19. Eficiencia de remoción del parámetro coliformes termo tolerantes GE1 .....	56
Figura 20. Valores de remoción del parámetro turbiedad GE2.....	57
Figura 21. Eficiencia de remoción del parámetro turbiedad GE2 .....	57
Figura 22. Valores de remoción del parámetro DBO <sub>5</sub> GE2 .....	58
Figura 23. Eficiencia de remoción del parámetro DBO <sub>5</sub> GE2.....	58
Figura 24. Valores de remoción del parámetro demanda química de oxígeno GE2 .....	59
Figura 25. Eficiencia de remoción del parámetro demanda química de oxígeno GE2 .....	59
Figura 26. Valores de remoción del parámetro coliformes termo tolerantes GE2 .....	60
Figura 27. Eficiencia de remoción del parámetro coliformes termo tolerantes GE2 .....	60
Figura 28. Valores de remoción del parámetro turbiedad GE3.....	61
Figura 29. Eficiencia de remoción del parámetro turbiedad GE3 .....	61
Figura 30. Valores de remoción del parámetro DBO <sub>5</sub> GE3 .....	62
Figura 31. Eficiencia de remoción del parámetro DBO <sub>5</sub> GE3.....	62
Figura 32. Valores de remoción del parámetro demanda química de oxígeno GE3 .....	63
Figura 33. Eficiencia de remoción del parámetro demanda química de oxígeno GE3 .....	63
Figura 34. Valores de remoción del parámetro coliformes termo tolerantes GE3 .....	64
Figura 35. Eficiencia de remoción del parámetro coliformes termo tolerantes GE3 .....	64

## **RESUMEN**

El problema del presente trabajo de investigación fue el deficiente tratamiento de las aguas residuales urbanas en comunidades rurales con poblaciones menores a dos mil habitantes; el objetivo principal fue analizar la influencia de la implementación de un humedal construido con sustrato proveniente de ladrillo de arcilla reciclado en la depuración de aguas residuales urbanas. La metodología utilizada fue a través de una investigación aplicada con un enfoque cuantitativo, con un diseño experimental de nivel explicativo; se trabajó con una población muestral constituida por el agua residual urbana de una comunidad rural del distrito de Buenos Aires ubicado en la región Piura en el norte del Perú. Los instrumentos fueron adaptados de las normas técnicas peruanas para granulometría, capacidad de infiltración y porosidad del medio filtrante del humedal construido y de las normas para evaluación de efluentes de plantas de tratamientos de aguas residuales. Los resultados determinaron que la granulometría a utilizar debe tener un coeficiente de uniformidad entre 3.8 y 5.0. El porcentaje de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno fue de 95.74 %, de la demanda química de oxígeno fue de 88.47 % y de la turbiedad fue de 76.67 %. La conclusión de la investigación determinó que se aceptó la hipótesis de investigación comprobándose que la implementación de un humedal de flujo vertical construido con sustrato conformado por ladrillo de arcilla reciclado influye positivamente en la depuración de aguas residuales urbanas.

*Palabras clave:* humedal construido, sustrato, arcilla reciclada, aguas residuales

## **ABSTRACT**

The problem of this research work was the deficient treatment of urban wastewater in rural communities with populations under two thousand inhabitants. The main objective was to analyze the influence of implementing a constructed wetland with recycled clay brick substrate on urban wastewater treatment. The methodology used was applied research with a quantitative approach, with an explanatory-level experimental design. The sample population consisted of urban wastewater from a rural community in the Buenos Aires district, located in the Piura region of northern Peru. The instruments were adapted from Peruvian technical standards for particle size distribution, infiltration capacity, and porosity of the constructed wetland filter medium, and from standards for evaluating effluents from wastewater treatment plants. The results determined that the particle size distribution to be used should have a uniformity coefficient between 3.8 and 5.0. The biochemical oxygen demand removal percentage was 95.74%, chemical oxygen demand was 88.47%, and turbidity was 76.67%. The research conclusion determined that the research hypothesis was accepted, proving that the implementation of a vertical flow wetland constructed with a substrate composed of recycled clay bricks positively influences urban wastewater treatment.

Keywords: constructed wetland, substrate, recycled clay, wastewater

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción y Formulación del Problema

#### 1.1.1 *Descripción del Problema*

Las aguas residuales urbanas son el resultado de las actividades humanas y, antes de ser vertidas en ríos y otros cuerpos de agua, deben ser tratadas mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Sin embargo, aproximadamente el 80% de estas aguas residuales se descargan sin tratamiento previo, lo que provoca su contaminación (Programa de las Naciones Unidas Hábitat [UN HABITAT] y la Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021).

Zhao et al. (2020) señalan que el vertido de aguas urbanas sin tratamiento previo genera contaminación en los recursos hídricos, especialmente en zonas rurales. En Latinoamérica, una de las principales fuentes de contaminación de ríos proviene de las aguas residuales de comunidades que se descargan sin tratamiento, lo que agrava la situación (Pérez et al., 2022). Además, Agaton et al. (2022) afirman que "el 44% del total de aguas residuales producidas se recogen y se disponen sin un tratamiento adecuado " (p. 1).

Hui et al. (2022) afirman que "un mecanismo de protección del medio hídrico y el reciclaje de los recursos hídricos es el tratamiento eficiente y eficaz de las aguas residuales urbanas" (p. 2). Agaton et al. (2022) destacan que es fundamental eliminar los productos químicos de las aguas residuales para permitir su reutilización. Feifer et al. (2024) señala que en las zonas rurales de China se concentran entre 800 y 900 millones de habitantes en las zonas rurales y del total de aguas residuales que generan sólo entre el 13 % y el 34 % reciben un tratamiento eficaz.

Berendes et al., citado por Feifer et al. (2024) señalan que la problemática del tratamiento de aguas residuales trae consecuencias negativas para las aguas superficiales y deterioran el medio ambiente. Según Pérez (2022), en estas localidades "el crecimiento de la población y la urbanización de las mismas ejerce una presión sobre el recurso agua " (p. 1). Hui et al. (2022) añaden que "el exceso de aguas residuales se vierte sobre los ríos generando un deterioro del sistema acuático " (p. 23).

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2022) informa que los tratamientos de aguas residuales no han avanzado al mismo ritmo que el crecimiento de la población, lo que ha resultado en un aumento de la contaminación en las ciudades. En este contexto, se propone que la implementación de humedales construidos como tecnología

ecológica, resulta una solución rentable y sostenible en comunidades dispersas y áreas rurales ayuda en la remediación de aguas contaminadas. Matos et al. (2020) añaden que, tras una operación prolongada, el sistema puede obstruirse, "reduciendo la eficiencia del tratamiento debido a la acumulación de sólidos con una disminución de la porosidad drenable " (p. 3).

Navarro et al. (2020) destacan que los humedales de flujo vertical son ideales para el tratamiento de aguas residuales urbanas ya que el diseño hidráulico permite la remoción de contaminantes en materia orgánica. Por esta razón, Pérez et al. (2022) afirman que “deben manipular los procesos biológicos dentro de un entorno natural controlado” (p. 1). Además, Navarro et al. (2020) señalan que un incorrecto diseño genera la obstrucción del sustrato y se disminuye el volumen de los poros generando como consecuencia una pobre eficiencia hidráulica general.

Según Hui et al. (2022), la obstrucción de los poros altera la estructura del sustrato, resultando en un sistema con resistencia mínima. Zidan et al. citado en Santos et al. (2024) advierten que "el uso de sustratos con poca capacidad de anti obstrucción generan que el sistema reduzca su porosidad y la conductividad hidráulica " (p. 6). Por su parte, Deng et al. (2021) afirman que "para determinar un rendimiento óptimo en este tipo de tratamientos se hace imprescindible la colocación del sustrato seleccionado cuidadosamente " (p. 5).

Según Zidan et al. citado en Santos et al. (2024), los sustratos más comunes son el suelo, la arena y la grava, que son económicos. Sin embargo, “estos materiales seleccionados sin un proceso adecuado generan un rendimiento débil del tratamiento, una deficiente capacidad de intercepción para los contaminantes y una baja capacidad de unión microbiana resultando en un sistema altamente susceptible a la obstrucción” (p. 6). Mlih et al. (2020, p. 4) añaden que la obstrucción trae como consecuencia un deficiente tratamiento y rendimiento en la depuración de los contaminantes”.

Con el objeto de evitar esta problemática como la obstrucción en este tipo de sistemas sub superficiales se han planteado soluciones utilizando sustratos alternativos como el hormigón y el ladrillo reciclado (Miranda et al. citado en Hasim et al., 2022); del mismo modo Matos et al. (2020) recomiendan la utilización de manera gradual escoria de alto horno en sustitución de sustratos convencionales, sin embargo, el problema de la obstrucción permanece a largo plazo en el ingreso de aguas residuales en el sistema. Por otro lado, Mlih et al. (2020) considera que “el uso del agregado ligero de arcilla expandida, conocido como

LECA, produce un mejor rendimiento en el proceso de depuración, pero se requiere realizar un seguimiento a fin de medir el nivel de eficiencia en la remoción óptima". (p. 5)

Li et al. (2022) sostienen que al seleccionar un sustrato es fundamental considerar "la resistencia hidráulica, el costo, la disponibilidad del mismo y el rendimiento de eliminación de contaminantes, ya que una mala selección tiene como consecuencia bajos niveles en la inversión en gestión y en daños ambientales" (p. 4). Por su parte, Miranda et al. citado en Hasim et al (2022) advierten que una selección inadecuada del sustrato puede causar obstrucciones en el modelo de tratamiento, no mejora la eficiencia ecológica y no se reduce los riesgos a la salud de la población ni el daño al medio ambiente.

Li et al. (2021) señalan que:

Debido al rápido proceso de urbanización en China en las últimas décadas, se han generado grandes cantidades de residuos de demolición y construcción (D&C). Estos restos, que provienen de actividades de demolición, renovación y construcción, no se tratan adecuadamente y, por lo general, se apilan en áreas remotas o se envían a vertederos. Por lo tanto, es urgente implementar estrategias efectivas para la reutilización y el reciclaje de estos residuos, con el fin de reducir su impacto en el entorno urbano. Además, es esencial evaluar el uso de estos residuos como agregado reciclado en la industria de la construcción o como medio filtrante en sistemas de tratamiento de aguas residuales.

El Programa de las Naciones Unidas Hábitat y la Organización Mundial de la Salud (UN HABITAT y OMS, 2021) refiere que solo el 20% del volumen total de estas aguas recibe un tratamiento adecuado. Feifer et al. (2024) indica que hasta 2019, 5 millones de personas en áreas rurales carecían de acceso a servicios de saneamiento y añade que se estima que solo el 69% de la población en núcleos urbanos tiene conexión domiciliaria de alcantarillado.

Fernández (2020), por su lado, sostiene que, "aproximadamente 54 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales que se producen al día tienen como descarga final los ríos y fuentes superficiales y, se estima que aproximadamente 4000 hectáreas de terrenos agrícolas se riegan con aguas residuales urbanas sin ningún tratamiento previo" (p. 2). Se estima que un tercio de la población no cuenta con redes de saneamiento y el problema se agrava en las comunidades rurales y periurbanas que no tienen acceso a los servicios de saneamiento lo que trae como consecuencia riesgos en la salud pública de la población (Feifer et al., 2024).

La atención de los servicios de saneamiento, que incluye el tratamiento de aguas residuales urbanas, está regulada para centros poblados con más de 2000 habitantes. En el caso de comunidades con menos de 2000 habitantes, se aplican tecnologías de saneamiento individual que se construyen dentro de cada vivienda (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017).

El Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2020) señala que hasta el 2019, el 81% de las viviendas en núcleos rurales carecen de acceso a servicios de saneamiento, lo que llevó a la implementación de unidades básicas de saneamiento. Sin embargo, Delgadillo citado por Mateus (2020) advierten que cuando estas unidades se instalan en localidades con suelos de baja permeabilidad, el sistema colapsa, lo que las convierte en una solución ineficaz y genera contaminación ambiental, tanto en su interior como en las vías públicas.

Según el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE, 2006), se han propuesto soluciones para remediar el tratamiento inadecuado de aguas residuales en espacios rurales mediante sistemas condominales. Sin embargo, no existen dispositivos legales que permitan la construcción y operación de estos sistemas de flujo vertical en serie en el país. El Programa Nacional de Saneamiento Urbano (PNSU, 2015) en su regulación señala que “los proyectos de inversión pública que se ejecuten sobre centros poblados menores de 2000 habitantes deben seguir las pautas tecnológicas con el uso de soluciones individuales de saneamiento, con el consiguiente problema de saturación en localidades con suelos no permeables”. (p. 45)

En la región de Piura, el informe del Gobierno Regional de Piura (GRP, 2020) indica que se ha solucionado el acceso a servicios de saneamiento mediante la implementación de soluciones individuales a través de unidades básicas de saneamiento. Sin embargo, la naturaleza del suelo, frecuentemente arcillosa y de baja permeabilidad, provoca una rápida saturación, colmatando las unidades y generando contaminación ambiental que afecta la salud de los habitantes.

Según el informe de la Municipalidad Provincial de Morropón – Chulucanas (MPM-CH, 2020), se ha constatado que cerca del 75% de las viviendas en la provincia cuentan con unidades básicas de saneamiento, ya sean de arrastre hidráulico o de hoyo seco. Sin embargo, aproximadamente el 80% de estas unidades dejan de ser utilizadas en poco tiempo, lo que lleva a que las aguas residuales se dispongan nuevamente en el medio natural sin tratamiento previo.

Una consecuencia del deficiente tratamiento de aguas residuales en espacios rurales, según UN HABITAT y OMS (2021), es la propagación de enfermedades asociadas con el vertido inadecuado de estas aguas. Además, la colmatación en suelos de baja permeabilidad puede favorecer la proliferación de mosquitos y zancudos que transmiten infecciones como el dengue. Del mismo modo es importante considerar las infecciones gastrointestinales que afectan principalmente a los niños, lo que se resume en una afectación a la salud pública y genera una contaminación en el medio ambiente.

### **1.1.2 *Formulación del Problema***

**Problema General.** ¿Cuál es la influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado?

#### **Problemas Específicos.**

¿Cuál es la influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en dos etapas?

¿Cuál es la influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de arena en una primera etapa y de ladrillo de arcilla reciclado en una segunda etapa?

¿Cuál es la influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en una primera etapa y de arena en una segunda etapa?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 *Objetivo General***

Evaluar la influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado.

### **1.2.2 *Objetivos Específicos***

Determinar la influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en dos etapas.

Determinar la influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de arena en una primera etapa y de ladrillo de arcilla reciclado en una segunda etapa.

Determinar la influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en una primera etapa y de arena en una segunda etapa.

### **1.3 Formulación de la Hipótesis**

#### **1.3.1 *Hipótesis General***

Existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado.

#### **1.3.2 *Hipótesis Específicas***

Existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en dos etapas.

Existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de arena en una primera etapa y de ladrillo de arcilla reciclado en una segunda etapa.

Existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en una primera etapa y de arena en una segunda etapa.

### **1.4 Justificación**

#### **Justificación Teórica**

La investigación se justifica de manera teórica por cuanto se tiene la necesidad de generar un nuevo conocimiento sobre las ya existentes relacionado con el tratamiento adecuado de aguas residuales urbanas y que han sido desarrolladas en Europa, específicamente en Francia y Dinamarca en núcleos poblaciones rurales con menos de 2000 habitantes. Se buscó establecer un marco teórico que se constituya en una norma técnica para regular las pautas y procedimientos para la implementación de procesos de depuración conformados por humedales construidos de flujo vertical en dos etapas utilizando distintos tipos de medios filtrantes a fin de solucionar los problemas de este modelo. El uso de ladrillo

de arcilla reciclado permitió solucionar la incorrecta disposición de este producto en vertederos no apropiados. Asimismo, sirve para futuras investigaciones como antecedente.

#### Justificación Metodológica

La presente investigación fue experimental y se implementó el modelo de depuración de aguas residuales urbanas utilizando humedales de flujo vertical que es de última tecnología con un diseño de pre y post prueba con cuatro tratamientos y cinco repeticiones; se utilizaron sustratos tanto convencionales como reciclados adaptados de la zona de investigación con un periodo útil superior a los 10 años. Las pruebas a las muestras se efectuaron en el laboratorio de control de calidad del Área Técnica Municipal de la comuna local, acreditado por el Instituto Nacional de Calidad, lo cual garantizó la calidad y confiabilidad de los resultados de la presente investigación.

#### Justificación Práctica

El problema fáctico de la investigación fue la obstrucción que se genera en el modelo de tratamiento de aguas residuales en zonas rurales con humedales construidos de flujo vertical. Se analizó el uso de sustratos con medios filtrantes provenientes de la industria de la construcción como el ladrillo reciclado. Los resultados obtenidos fueron contrastados con los valores máximos permitidos para el reciclaje del agua tratada y que se encuentran normados en el Perú para usos no potables. Los beneficiarios directos fueron los pobladores de los centros poblados menores de 2000 habitantes y ubicados en las zonas periurbanas y rurales.

### 1.5 Importancia

La trascendencia de la investigación tuvo un impacto internacional debido a que la gestión del recurso hídrico se encuentra enmarcado en el objetivo seis para el desarrollo sostenible hacia el 2030. Los resultados obtenidos se presentan como una solución concreta con una estación depuradora de aguas residuales que reemplacen la disposición de este recurso hídrico sin tratar al interior de la vivienda. El presente trabajo reviste importancia por cuanto mejoró las condiciones de vida y de salud pública de las comunidades rurales y periurbanas; asimismo sirvió, a través del uso de residuos reciclados provenientes de la industria de la construcción como el ladrillo de arcilla reciclado, en la mitigación del calentamiento global.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes de la Investigación

#### 2.1.1 Internacionales

**Herrera et al.** (2021) publicaron un artículo científico titulado: “Sistema de humedales acoplados construidos para la reutilización de aguas residuales para el riego de jardines”. El tipo de investigación fue aplicada y el diseño de investigación fue a través de un diseño experimental. El objetivo fue analizar un sistema de humedales anaeróbico acoplado construido con un reactor deflector para el tratamiento de aguas residuales. Se construyó un reactor anaerobio deflector a escala completa ( $20\text{ m}^3$ ) mientras que el humedal construido con plantas de caña de azúcar y heliconia se utilizó a escala piloto ( $1,36\text{ m}^3$ ). Los resultados demostraron que la concentración más baja de materia orgánica fue de  $22\text{ mg/L}$  y se encontró el día 140 en el efluente del sistema. La eliminación de sólidos suspendidos totales y coliformes con el sistema fue superior al 90. La conclusión fue que al utilizar esta tecnología no convencional construido con un reactor deflector anaeróbico acoplado, fue posible eliminar los SST y los coliformes de conformidad con las normas europeas y mexicanas para el riego de jardines; sin embargo, se debe mejorar la remoción de materia orgánica como DBO<sub>5</sub>.

**Hube et al.** (2023) publicaron un artículo científico titulado: “Humedales artificiales con hormigón reciclado para el tratamiento de aguas residuales en climas fríos: evaluación del rendimiento y del ciclo de vida”. El estudio fue de tipo aplicado y el diseño de investigación fue experimental. El objetivo fue analizar la viabilidad técnica, ambiental y económica del uso de material de construcción reciclado del hormigón como sustrato en humedales construidos. La metodología utilizada fue con un diseño experimental en laboratorio y se utilizaron hormigón reciclado y piedra de lavara como sustratos. Los resultados determinaron que se tuvo una eficiencia de remoción de 51% de nitrógeno con el agregado reciclado y de 54% de eficiencia con agregados naturales. La conclusión de la investigación es que no se encontraron diferencias significativas entre ambos sustratos y que el uso del agregado reciclado reduce el impacto ambiental.

**Li et al.** (2021) publicaron un artículo científico titulado: “Áridos reciclados de residuos de construcción y demolición como sustratos de humedales para la eliminación de contaminantes”. El estudio fue de tipo aplicado y el diseño de investigación fue experimental. El objetivo de la investigación fue evaluar la eficiencia del control de la contaminación de los agregados reciclados de residuos de construcción y demolición como

sustratos en humedales artificiales de flujo vertical y evaluar asimismo la capacidad de regeneración de estos sustratos. La metodología utilizada fue con un diseño experimental y se construyeron seis columnas experimentales con ladrillo, hormigón, mezclas de hormigón y ladrillo, y tres con agregados naturales: piedra caliza, roca de lava y zeolita. Los resultados demostraron que los sustratos con agregados reciclados tuvieron mejor desempeño en la eliminación de la demanda química de oxígeno y fósforo que los sustratos naturales con valores de 74,9% y 87,1% de remoción. La conclusión de la investigación es que los agregados reciclados lograron una eficiencia en la remoción de fósforo y la demanda química de oxígeno y la eficiencia de la eliminación de nitratos mejoró con el aumento de la profundidad del sistema.

**Li et al.** (2022) publicaron un artículo científico titulado: “Efectos de purificación de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción como relleno de humedales artificiales”. El estudio fue de tipo aplicado y se utilizó un diseño experimental para la investigación. El objetivo fue explorar los efectos de purificación que se obtiene con el uso de agregados reciclados como hormigón asfáltico, ladrillo rojo y gravas. La metodología utilizada fue experimental y se construyeron tres modelos a laboratorio. Los resultados muestran que los agregados reciclados tienen poco riesgo de lixiviación de metales pesados y la tasa de eliminación de la demanda química de oxígeno y nitratos fue de 96%. La conclusión de la investigación fue que la adsorción de nitratos fue superior en el sustrato conformado por gravas en comparación con el ladrillo rojo y en la adsorción de fósforo fue superior la eficiencia del hormigón asfáltico en comparación con el ladrillo rojo y las gravas.

**Li et al.** (2025) publicaron un artículo científico titulado: “Mejorar la disponibilidad de residuos de construcción como sustrato para humedales artificiales mediante la mezcla de sustratos y el ajuste de la relación carbono / hidrógeno”. El estudio fue de tipo aplicado y se utilizó un diseño experimental para la investigación. El objetivo fue explorar los efectos del uso de residuos de construcción como sustrato en humedales artificiales realizando combinaciones de residuos de construcción con otros sustratos. Se construyeron cuatro celdas de tratamiento utilizando rocas volcánicas y hormigón de deshecho. Cada sistema utilizó una capa inferior de grava con un tamaño de 3 a 6 cm, una capa intermedia de 90 cm de altura con partículas de 3 a 6 cm y una capa superior de 5 cm compuesto de gránulos cerámicos con un tamaño de partícula de aproximadamente 2 cm. Los resultados determinaron valores de pH entre 7,47 y 8,49. La eficiencia de remoción de DQO osciló entre 83,08 % y 85 %. La conclusión de la investigación demostró que el hormigón de deshecho representa un potencial en la eliminación de contaminantes presentes en las aguas

residuales, del mismo modo se presenta como un elemento de uso mitigador de gases de efecto invernadero.

**Matos et al.** (2020) publicaron un artículo científico titulado: “Obstrucción en humedales artificiales de flujo subterráneo horizontal: factores influyentes, métodos de investigación y técnicas de remediación”. El tipo de investigación fue aplicada y se utilizó un diseño experimental para la investigación. El objetivo de la investigación fue recopilar información sobre los principales factores que interfieren en el proceso de obstrucción de los humedales artificiales de flujo horizontal subterráneo, los métodos disponibles y nuevos para caracterizar el grado de obstrucción del medio poroso y las técnicas/estrategias para desatascar estos sistemas. Los resultados más resaltantes fueron que la obstrucción en estos sistemas se produce por los contaminantes químicos y se debe evaluar la contribución de los factores influyentes y facilitar la remediación. La conclusión del estudio señala que es necesario contar con una metodología que favorezca la caracterización de las condiciones reales de los contaminantes, asimismo las diferentes configuraciones geométricas no generan diferencias respecto a la eliminación de materia orgánica.

**Mateus** (2020) publicaron un artículo científico titulado: “Evaluación de mezclas estratificadas de residuos sólidos como rellenos de humedales artificiales bajo diferentes modos de operación”. El estudio fue de tipo aplicado y se utilizó un diseño experimental para la investigación. El objetivo fue evaluar la recuperación de residuos sólidos como material de relleno en humedales artificiales utilizados para el tratamiento de aguas residuales. La metodología utilizada fue con un diseño experimental y se construyeron a escala de laboratorio mezclas con cinco sólidos residuales y se pusieron en operación para evaluar la demanda química de oxígeno y nutrientes de aguas residuales urbanas e industriales. Los resultados demostraron que la remoción de la demanda química de oxígeno, fósforo y nitrógeno fue del 42% al 93%, del 6% al 97% y del 4% al 87% respectivamente, en el caso de los valores inferiores fueron los sustratos conformados por piedra caliza y conchas de caracol. La conclusión de la investigación fue que la mezcla estratificada de piedra caliza y escoria de carbón demostraron el mejor sistema con remociones de la demanda química de oxígeno entre el 75 y el 97% y con un tiempo de retención hidráulica de aproximadamente 1,5 días.

**Miranda et al.** (2020) publicaron un estudio titulado: “Influencia del tipo de sustrato y la posición de las especies vegetales en la obstrucción y la hidrodinámica de los sistemas de humedales construidos”. El tipo de investigación fue aplicada y se utilizó un

diseño experimental para la investigación. El objetivo de la investigación fue evaluar la influencia del material del sustrato de relleno sobre la saturación y el comportamiento de humedales construidos. Para la evaluación se construyeron seis prototipos de humedales construidos deflujo sub superficial con mampostería de 0.6 m. de alto x 1.0 m. de ancho x 2.5 m de largo. Se realizó una observación durante 1 año y 8 meses y los resultados determinaron que de manera distinta el uso de diferentes sustratos presenta zonas muertas y gran dispersión. La conclusión de la investigación determinó que a mayor concentración de sólidos y cuando se aumenta el flujo superficial las celdas conformadas por gravas presentan mejores condiciones hidrodinámicas que con el uso de sustratos alternativos.

**Navarro et al.** (2020) publicaron un artículo científico titulado: “Desempeño de humedales construidos de flujo vertical en el tratamiento de aguas residuales municipales”. El estudio fue de tipo aplicado y se utilizó un diseño experimental para la investigación. El propósito fue evaluar el comportamiento de esta tecnología no convencional en sus diferentes configuraciones en el nivel de remoción de contaminantes. La metodología utilizada fue exploratoria y se analizaron plantas de tratamiento con humedales construidos para aglomeraciones urbanas pequeñas. Los resultados obtenidos en la investigación arrojaron una eficiencia del 93% de remoción de los sólidos suspendidos presentes en los efluentes, asimismo una remoción del 98% de la demanda bioquímica de oxígeno. La conclusión de la investigación fue que se determinó que los valores obtenidos en la remoción fueron mayores a los modelos conformados por dos o más etapas, sin embargo, aún no se tienen valores de turbiedad que permita el uso público de acuerdo a la legislación mexicana.

**Obeng et al.** (2023) publicaron un artículo científico titulado: “Ladrillos de arcilla reciclados y cáscara de palma como sustrato para humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales: Un enfoque de economía circular de circuito cerrado diseñado”. El tipo del estudio fue aplicado y se utilizó un diseño experimental para la investigación. El objetivo fue evaluar los efectos de la utilización de ladrillo de arcilla en la remoción de contaminantes con el uso de humedales construidos. Para el análisis se construyeron cinco celdas a nivel de laboratorio y dos de ellas fueron llenadas con ladrillo de arcilla de deshecho con partículas de 0.6 a 6.3 mm. Los resultados obtenidos indicaron que el pH osciló entre 8.05 y 8.20 lo que indicó una ligera alcalinidad. La reducción logarítmica de coliformes osciló entre 1,4 y 1,5 unidades logarítmicas. La turbidez tuvo una remoción entre el 22,5 % y el 48 %. La conclusión de la investigación determinó que el uso de ladrillo de arcilla reciclado demostró

un potencial de tratamiento superior al de arenas y gravas; el uso de partículas entre 5 y 14 mm es el óptimo para un adecuado rendimiento del sistema.

**Rincón** (2023) en su publicación “Diseño de humedales construido para tratamiento de aguas residuales domésticas y aguas ricas en metales” presentó la forma como pueden tratarse las aguas residuales utilizando la tecnología de humedales construidos en distintas combinaciones de diseño. Los datos de desempeño publicados determinaron valores de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días entre 84.5 % a 97.0 %. Sobre el diseño de humedales de flujo vertical señaló que la obstrucción del material filtrante se relaciona con la acumulación de sólidos en suspensión, asimismo recomienda no utilizar arena muy fina. La conclusión de la investigación fue que este tipo de tecnología resulta viable tanto en la construcción como en la operación y mantenimiento en núcleos poblacionales menores a 2000 habitantes, asimismo se concluyó que en caso se presenten obstrucciones en el sistema se sugiere aplicar periodos de descanso para re establecer la conductividad hidráulica de la capa de material filtrante.

**Saeed et al.** (2020) investigaron: “Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales industriales: medios alternativos, índice de biodegradación de entrada y carga inestable”. El estudio fue de tipo aplicado y se utilizó un diseño experimental para la investigación. El propósito de la investigación fue comparar el rendimiento de la remoción de contaminantes con dos sistemas de humedales construidos híbridos paralelos. La metodología utilizada fue experimental y se construyeron seis reactores de humedales construidos fabricados con tubería PVC de 1.50 m. de altura y 0.15 m. de diámetro. En el sistema 1 se utilizó entre otros el ladrillo reciclado como sustrato con un tamaño entre 5 y 10 mm y una porosidad de 51 %. Los resultados demostraron un porcentaje de eliminación del 92.0 % de la DBO<sub>5</sub>. La conclusión de la investigación fue que el sistema construido con residuos de materiales de construcción logró una alta eliminación de nitrógeno. De igual modo la eliminación de fósforo fue alta en el sistema que se construyó con ladrillo reciclado debido a la alta capacidad de adsorción del sustrato. Se precisó que los ladrillos reciclados contienen productos de hidratación como el hidrato de silicato de calcio e hidrato de silicato de calcio y aluminio. Los valores del pH de las aguas tratadas fueron relativamente altas y se cuantificaron valores superiores a 10. El oxígeno disuelto tuvo una disminución después de la última etapa del sistema.

**Saeed et al.** (2022) investigaron: “Tratamiento de aguas residuales industriales en humedales artificiales repletos de materiales de construcción y subproductos agrícolas”. El

estudio fue de tipo aplicado y se utilizó un diseño experimental para la investigación. El propósito de la investigación fue analizar la eficiencia en humedales artificiales con el uso de materiales reciclados de construcción y con productos agrícolas. La metodología utilizada fue experimental y se construyeron dos unidades de humedales construidos con tuberías de cloruro de polivinilo y con una dimensión de 0.90 m. de longitud, 0.30 m. de ancho y 0.92 m. de profundidad. Uno de los materiales utilizados fue el ladrillo de arcilla reciclado. Se emplearon los sustratos con tamaños de partículas similares con el objeto de mantener propiedades físicas uniformes. Los resultados demostraron que el pH se redujo sustancialmente. Las cargas medias de eliminación fueron de 43.5 g DBO/m<sup>2</sup>d y de 240.8 g DQO/m<sup>2</sup>d. La conclusión de la investigación fue que la mayor porosidad del ladrillo reciclado aumentó el tiempo de retención lo que hizo mejorar la nitrificación del humedal en comparación con el sustrato conformado por el bagazo de caña de azúcar, asimismo se lograron mayores remociones de fósforo debido a la adsorción de los materiales de ladrillo reciclados utilizados.

**Simachew et al.** (2020) publicaron un artículo científico titulado: “Uso de ladrillos rotos para mejorar la eliminación de nutrientes en humedales artificiales de flujo subsuperficial que reciben aguas residuales hospitalarias”. El tipo de investigación fue aplicada y se utilizó un diseño experimental para la investigación. El objetivo fue evaluar la eficacia del ladrillo triturado en la eliminación de nutrientes de las aguas residuales hospitalarias. Para la determinación de la evaluación se construyeron ocho humedales construidos. Los resultados encontrados determinaron una eficiencia de remoción de la DBO<sub>5</sub> entre el 89.7 % y el 93.2 %, de la DQO entre el 85.8 % y el 90.4 %. La conclusión de la investigación determinó que la variación estacional no tiene influencia significativa en la eficiencia de la remoción; del mismo modo se concluyó que el uso de ladrillo triturado aumenta la remoción en los humedales construidos y a menor costo en sistemas a gran escala.

### **2.1.2 Nacionales**

**Mena** (2022) realizó una tesis doctoral titulada: “Eficiencia del sistema de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales domésticas”. El estudio fue de tipo aplicado y se utilizó un diseño experimental para la investigación. La investigación tuvo como objetivo analizar el comportamiento de este modelo en el tratamiento de aguas residuales domésticas construidas a nivel piloto. La metodología utilizada fue con un diseño

experimental. Los resultados de la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno fueron de 46% hasta 72%, de la demanda química de oxígeno fue de 40% hasta 68% y de aceites y grasas fue de 37% hasta 66%. Estos valores permiten inferir que la remoción presenta un alto nivel de eficiencia. La conclusión de la investigación determina que el sistema de humedal construido permite lograr una reducción significativa y eficiente de las aguas residuales domésticas. Se verificó un buen nivel de eficiencia en la remoción de metales pesados, así como en los parámetros físicos y químicos de las aguas residuales domésticas que ingresaron al sistema.

## 2.2 Marco conceptual

### 2.2.1 *Variable Humedales de Flujo Vertical*

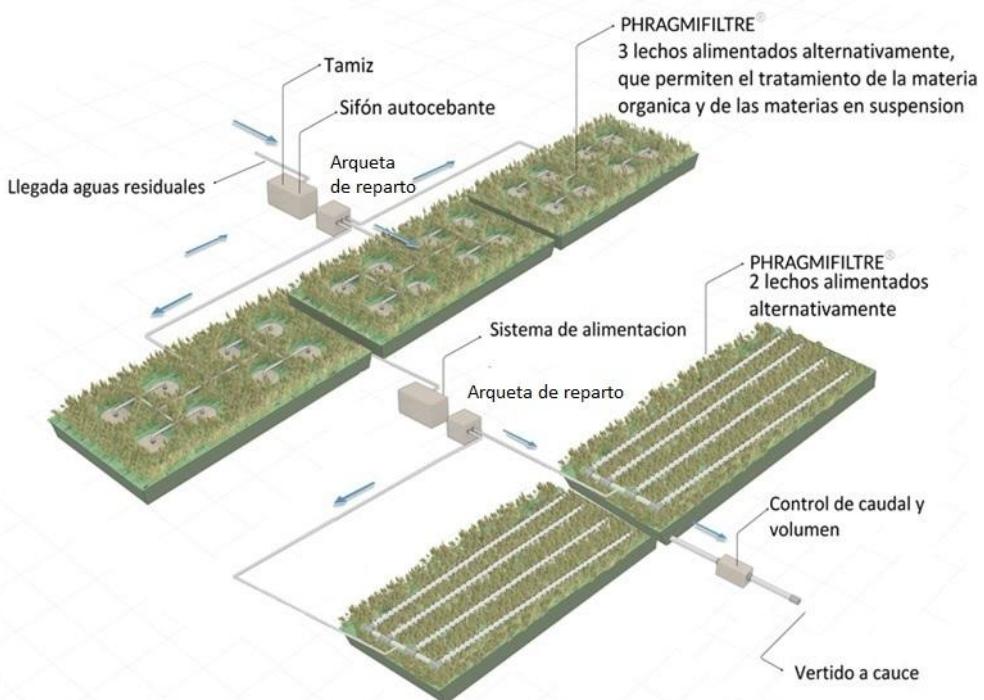
El modelo de tratamiento de aguas residuales a través de humedales construidos tanto de flujo horizontal como de flujo vertical fueron desarrollado en Francia a inicios de los años 1990. En países de Europa se han construido más de 4000 prototipos. Este sistema ha demostrado su eficiencia principalmente en espacios rurales o núcleos con viviendas dispuestas de manera dispersa. Se sustenta en el funcionamiento de canales de poca profundidad que tienen un flujo sub superficial de tipo vertical y con un medio de soporte compuesto por gravas y arenas (Miranda et al. citado en Hasim et al., 2022).

Rincón (2023) sobre el funcionamiento y la composición de este modelo de tratamiento conceptualiza lo siguiente: Los humedales artificiales que componen un sistema de humedales construidos de flujo vertical están conformados por dos etapas. En una primera etapa se construyen 3 celdas con humedales de tipo sub superficial de tipo vertical con una determinada característica en el medio filtrante y en una segunda etapa se construyen 2 celdas con humedales de tipo francés de tipo vertical, pero utilizando finos en el sustrato. La disminución de la materia en suspensión en los humedales artificiales de flujo superficial se logra fundamentalmente a través de dos mecanismos físicos: la deposición de partículas por gravedad y el tamizado natural que proporciona la masa de tallos y restos de plantas a medida que el agua circula. La materia en suspensión se elimina en los humedales artificiales de flujo subsuperficial, fundamentalmente, porque el agua se filtra a través del lecho de grava o arena que forma el sustrato. Los sólidos de naturaleza orgánica retenidos en el medio filtrante se degradan de manera directamente proporcional con el incremento de temperaturas (p. 75)

En relación a estos humedales construidas, Arias y Brix, citados por Masharqa et al. (2023) sostienen que son “áreas de poca profundidad y tienen en su composición gravas y arenas con una vegetación que se adapta a vivir en condiciones de saturación y sirven el tratamiento de aguas residuales con poca o casi nula energía” (p. 34).

**Figura 1**

*Diagrama del sistema de humedales construidos de flujo vertical en serie*



*Nota.* En la figura 1 se verifica que el sistema de humedales de flujo vertical se utilizan dos etapas conformado por tres celdas y dos celdas respectivamente, el sustrato a utilizar varía en cada localidad.

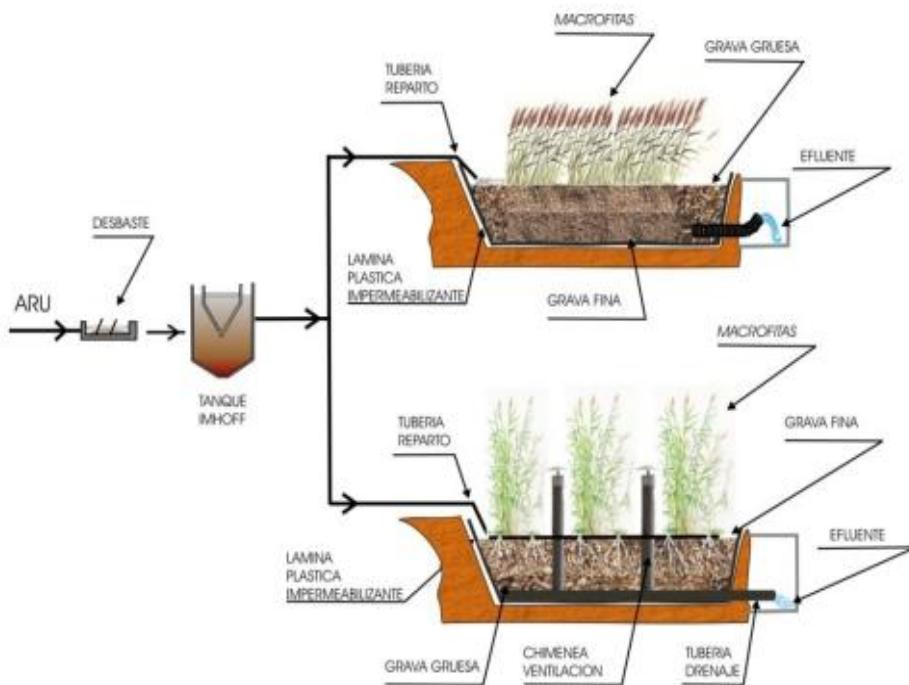
Rincón (2023), sobre estos modelos, establece dos tipos de sistemas en función al flujo de alimentación. Existen modelos con el flujo horizontal y con el flujo vertical. En ambos se tiene una sección rectangular que tiene en su interior sustratos provenientes de canteras que se diferencian por el ingreso del efluente; en los sistemas con el flujo horizontal el ingreso se realiza por uno de los extremos del canal; y, en los modelos de flujo vertical el ingreso de las aguas usadas se realiza por la parte superior del mismo.

**2.2.1.1 Fundamentos de los Humedales Construidos.** Sierra y López, citados por Pérez et al. (2022) definen las particularidades de los humedales construidos y señalan que se trata de la construcción de un canal confinado e impermeabilizado; en su composición se

tiene sustratos que tienen distinta tipología y granulometría; en estos sistemas se “utilizan solo humedales de flujo vertical y en ellos se producen procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como objetivo depurar las aguas tratadas, y que se dispongan dentro de los límites permisibles al suelo o ríos”. (p.34)

**Figura 2**

*Diseño con flujo sub superficial de tipo horizontal y vertical*



*Nota.* La figura 2 explica el procedimiento del tratamiento con el ingreso de las aguas residuales de forma horizontal a través del ingreso de las aguas por un lado del canal del humedal. Para el modelo de flujo vertical el afluente ingresa por la parte superior del sistema.

Estos modelos, especialmente el de flujo vertical en serie o en celdas intermitentes, que en la actualidad son utilizados en países de Europa como Dinamarca y Francia sirven para el tratamiento de aguas residuales urbanas de núcleos poblacionales menores a 2000 habitantes, y como característica principal tiene la cualidad de servir como tratamiento primario, es decir, que ingresan aguas al sistema solo con un tratamiento previo de selección con un cribado a través de una cámara de rejas y un desarenador. Los resultados obtenidos en cerca de 4000 plantas instaladas en Francia señalan que hay garantía de obtener los siguientes parámetros en las aguas depuradas:

**Tabla 1**

*Rendimientos obtenidos en el modelo de flujo vertical*

Nº Parámetro	Símbolo	Resultado
1 Demanda bioquímica de oxígeno	DBO <sub>5</sub>	< 15 mg/l.
2 Materia en suspensión	MES	< 15 mg/l.
3 Demanda química de oxígeno	DQO	< 70 mg/l.
4 Nitrógeno total Kjeldahl	NTK	< 10 mg/l.

*Nota.* Los valores obtenidos se recogieron en sistemas sin tratamiento primario prescindiendo de pre tratamiento como tanque Imhoff o pozo séptico. Fuente: Delgadillo citado por Mateus (2020).

En los modelos de flujo vertical utilizados en el sistema, se reducen los tiempos de retención hidráulica y los valores de ingreso de carga orgánica son superiores (Delgadillo citado por Mateus, 2020) y “tienen rendimientos óptimos en la reducción de la DBO<sub>5</sub> y de nitratos generado especialmente por el mejor control hidráulico, por ello se han implementado diferentes guías de instalación de este modelo vertical en diversos países de Europa” (Masharqa et al., 2023, p.3).

Rincón (2023) conceptualiza sobre el sistema de flujo sub superficial de tipo vertical que se caracteriza por un flujo que se mueve hacia abajo de forma intermitente. Una ventaja clave es que requiere aproximadamente la mitad del área de los sistemas de flujo horizontal. Asimismo, demuestra una alta eficiencia en la nitrificación, así como en la remoción de DBO<sub>5</sub> y DQO, debido a su eficiente transferencia de oxígeno; sin embargo, no es adecuado para la desnitrificación ni para la retención de sólidos suspendidos.

Para el diseño hidráulico del sistema vertical se utilizan las fórmulas establecidas por Reed et al. citadas por Saldías et al. (2025) y se establecen en base a la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días, asimismo se tiene en consideración las normas establecidas en la comunidad europea sobre construcción de estas tecnologías no convencionales realizándose estudios previos sobre el tipo y tamaño del medio filtrante a utilizar en laboratorio.

Saeed et al (2022) define sobre los sustratos provenientes del reciclado de ladrillos de arcilla lo siguiente:

Los humedales construidos se constituyen como una posible tecnología de tratamiento natural de las aguas residuales industriales, debido a sus menores costos operativos y de mantenimiento, Los agregados provenientes de

desechos de la construcción pueden ser convertidos en recursos y utilizados en el medio filtrante de estos sistemas. (p. 3)

**Figura 3**

*Diseño del sistema de humedales construidos de flujo vertical*



*Nota.* En la figura 3 se verifican los componentes en el diseño de un humedal de flujo vertical, se verifica la impermeabilización del fondo a través del uso de geomembranas y la implementación de tuberías de aireación.

**Figura 4**

*Fórmula para el diseño hidráulico del sistema de flujo vertical*

$$A_s = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_e)}{Kt(y)(n)} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

Donde:

ln Ce: Concentración de DBO<sub>5</sub>, N, P Y SST en el efluente, (mg/L)  
 ln Co: Concentración de DBO<sub>5</sub>, N, P Y SST en el afluente, (mg/L)  
 As: Área superficial del humedal, (m<sup>2</sup>)  
 Kt: Constante de primer orden dependiente de la temperatura, (d<sup>-1</sup>)  
 n=e: Porosidad promedio del sistema, en fracción decimal. 0.65 a 0.75  
 y: Profundidad promedio del sistema, (m)  
 Q: Caudal (m<sup>3</sup>/d)

K<sub>20</sub> = 1,104 d<sup>-1</sup>  
 K<sub>T</sub> = K<sub>20</sub>(1,06)<sup>T-20</sup> (Para remoción de DBO<sub>5</sub>)  
 K<sub>T</sub> = 1,104(1,06)<sup>T-20</sup>  
 K<sub>T</sub> = 0.927

*Nota.* En la figura 4 se nota la Ecuación 1 para la obtención del área superficial requerido para el funcionamiento del modelo de humedal de flujo vertical, en función a la concentración de contaminantes que ingresan en la planta de tratamiento. Fuente: Rincón (2023).

Rincón (2023) define que los rangos poblacionales donde este sistema ha demostrado eficiencia son aquellos centros poblados menores a 2000 habitantes, agrega que “las condiciones climáticas tienen un papel importante en el funcionamiento, del mismo modo es necesario que en zonas que registran precipitaciones de regular a fuerte intensidad el dimensionamiento debe tomar en cuenta el caudal para tiempo de lluvia” (p. 45).

Delgadillo citado por Mateus (2022) señala que, “los componentes del sistema de humedal de flujo vertical deben estar conformados por la cámara de rejillas, un sistema desarenador, sifón autocebante, caja de distribución, tres lechos de tratamiento primario, caja de alimentación, dos lechos de tratamiento secundario, caja de control y zona de amortiguamiento final”. (p. 23).

En relación a la colmatación del sustrato, Rincón (2023) enfatiza que es “el principal problema al que se enfrenta este sistema, y se debe entre otras causas a la obstrucción del sustrato, la acumulación de sólidos en suspensión y a la acumulación de materia” (p. 94).

**2.2.1.2 Sustratos de Arenas en Humedales.** Espinoza (2020) conceptualiza que los sustratos convencionales son aquellos utilizados en los sistemas existentes y lo conforman las arenas y gravas de diferente granulometría. Para un eficiente funcionamiento en estos modelos recomienda emplear a aquellos que tengan las siguientes características:

**Tabla 2**

*Características del sustrato en el sistema de humedales construidos de flujo vertical*

Tipo de sustrato	Tamaño (mm)	Porosidad (%)	Conductividad hidráulica (m/d)
Arena media	1	30	492
Arena gruesa	2	32	984
Arena pedregosa	8	35	4920
Grava mediana	32	40	9840
Grava gruesa	128	45	98400

*Nota.* En la tabla 2 se verifican los indicadores de tamaño efectivo, porosidad y conductividad hidráulica de sustratos conformados por arenas y gravas que son las que actualmente se utilizan en este sistema de flujo vertical. Existe una relación directa entre el tamaño efectivo del sustrato y el porcentaje de porosidad. Fuente: Espinoza (2000).

El sustrato resulta ser un componente vital para un correcto funcionamiento del sistema y debe realizarse un análisis granulométrico para la selección apropiada y evitar la colmatación del medio filtrante. Se recomienda el uso de arena entre 3 y 8 mm. y entre 12 y 20 mm para el filtro vertical en una segunda etapa (Rincón, 2023).

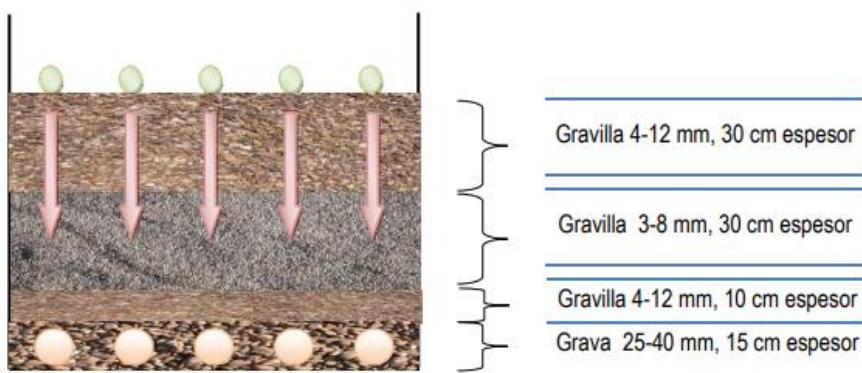
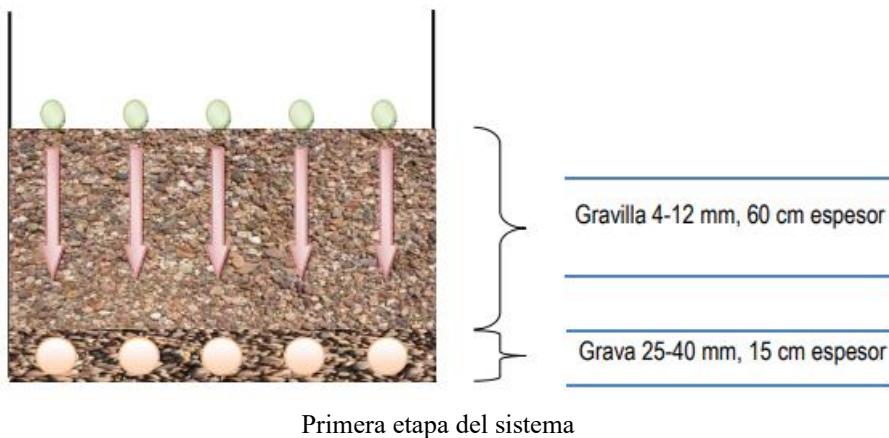
Sobre el sustrato conformado por arenas y gravas Zhao et al (2020) conceptualiza lo siguiente:

El sustrato conformado por arenas y gravas debe ser homogéneo en tamaño y forma y no debe contener impurezas, pues un sustrato que no es lavado previamente a su colocación en el medio filtrante puede colmatarse rápidamente, recortando la vida útil del sistema. Adicionalmente a ello, debe tenerse en cuenta la colocación tanto manual o con maquinaria, pues debe tenerse en cuenta no deteriorar el material impermeabilizante ni las tuberías de drenaje que se colocan al fondo del canal. (p-42)

La disposición del sustrato convencional en el sistema tiene distinta configuración y los pisos filtrantes tienen alturas entre 0.10 m. y 0.15 m. Asimismo, se construyen 3 filtros por cuanto se utilizan de manera alternada entre uno o dos días y con un periodo de reposo de diez días, con el objeto de evitar el atasco por la masa a depurar.

**Figura 5**

*Características y disposición del sustrato en sistemas de flujo vertical*



*Nota.* En la figura 5 se verifica que la primera etapa del sistema tiene dos pisos filtrantes y en la segunda etapa se agregan dos pisos filtrantes adicionales.

Vera et al. (2021) sobre el sustrato a utilizar en los modelos de flujo vertical señalan lo siguiente:

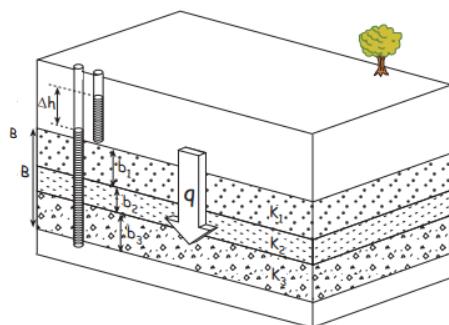
Para un correcto funcionamiento del humedal artificial de flujo sub superficial en sistemas verticales se debe tener en cuenta la permeabilidad del medio filtrante. En caso de utilizar sistemas con flujo del tipo vertical el agregado grueso no debe contener impurezas ya que el mismo es el principal causante de la obstrucción de estos modelos. Una recomendación en el sistema constructivo es proceder a lavar previamente las arenas y gravas antes de ser colocadas en las celdas de tratamiento. El diseño debe contener el valor de la DBO<sub>5</sub> a obtener en los efluentes del sistema. (p. 366)

Masharqa et al. (2023) citando a Brix y Arias, señala que el medio filtrante también es conocido como medio poroso o medio granular y la misma debe tener una granulometría con un tamaño efectivo de partícula  $d_{10}$  entre 0.25 mm. y 1.2 mm. y una partícula  $d_{60}$  entre 1 mm. y 4 mm. con un coeficiente de uniformidad  $d_{60}/d_{10}$  menor a 3.5.

Sobre la permeabilidad o conductividad hidráulica, Basaldúa et al. (2025) sostiene que es la forma a través del cual un fluido atraviesa un medio sin modificar las características internas del mismo, asimismo, precisa que, en medios con diferentes estratos, el flujo de agua recorre diferentes capas o niveles, y al aplicar la Ley de Darcy, se debe entender el concepto de permeabilidad equivalente tanto horizontal como vertical.

## Figura 6

*Permeabilidad equivalente horizontal y vertical*



*Nota.* En la figura 6 se muestran los dos tipos de flujos para considerar la permeabilidad equivalente en un flujo paralelo a las capas o perpendicular a las capas

Las fórmulas a considerar para la obtención de la permeabilidad equivalente, deben tener en cuenta que la densidad del agua residual que no contiene cantidades elevadas de

residuos industriales o agroindustriales es la misma que tiene el agua, siempre y cuando se mida a la misma temperatura (Basaldúa et al., 2025). La Ecuación 2 se utiliza para hallar la permeabilidad equivalente:

Donde:

- $K_v$ : Conductividad hidráulica equivalente vertical  
 $K_h$ : Conductividad hidráulica equivalente horizontal  
 $K_i$ : Conductividad hidráulica de cada una de las capas  
 $b_i$ : espesor de cada una de las capas  
 $B$ : espesor total, suma de todos los espesores

**2.2.1.3 Sustratos Reciclados en Humedales Construidos.** Este tipo de sustrato emergente se utiliza en los modelos de humedales para analizar las probables obstrucciones físicas, químicas y biológicas en modelos que han demostrado eficientes valores de remoción y entre otros se utilizan el plástico, el caucho, cáscaras de nuez, escoria de acero, la escoria de alto horno, conchilla y arcilla expandida (Li et al., 2025).

Zidan et al. citado en Santos et al. (2024) definen que la obstrucción que se genera en estos modelos se evita seleccionando sustratos anti obstrucción con materiales nuevos como agregados de arcilla expandida con un alto rendimiento; su selección está definida por la fuente y el costo, la resistencia hidráulica, el rendimiento de eliminación de contaminantes y la vida útil. La arcilla tiene baja reactividad, alta porosidad, no se desgasta con facilidad y reduce la proporción de inorgánicos.

El rendimiento de la arcilla expandida y su adaptación al sistema es fuerte en relación al uso de gravas, tiene una alta porosidad (Tang et al., 2020) y el área requerida para su implementación es menor que el sistema basado en gravas (Zhao et al., 2020). La utilización de materiales nuevos “resuelve los problemas ambientales que genera la incorrecta disposición en vertederos no apropiados” (Zhao et al., 2020, p. 4).

Tebitendwa et al. (2021) conceptualiza sobre los sustratos conformado por arcilla expandida lo siguiente:

La utilización de arcilla expandida produce una alta permeabilidad y porosidad como sustrato alternativo; en comparación con la arena de concha, el uso de la arcilla como sustrato se ve menos afectada por el crecimiento biológico y se tiene un mejor rendimiento hidráulico lo que genera una vida

útil mayor que con el uso de sustratos compuestos por gravas. Los sistemas combinados utilizados en el sistema son aquellas combinaciones de sustratos convencionales con sustratos emergentes en diferentes etapas de operación o celdas de depuración. (p. 15)

Li et al. (2025) define que la obstrucción en este tipo de sistemas puede ser física, química o biológica, la obstrucción física se produce por la interceptación de partículas sólidas en suspensión y por la fragmentación de los sustratos que se produce por el desgaste generado por las propiedades del material.

Zidan et al. citado en Santos et al. (2024) desarrollaron un experimento encontrando que las porosidades del caucho, de la grava y el sustrato plástico eran de 0.505, 0.358 y 0.788 respectivamente y después de seis meses de operación y estabilizado el sistema las porosidades disminuyeron 12,33%, 16.94% y 9.01% para cada sustrato respectivamente, resultando que el caucho y el plástico tienden a una menor obstrucción que la grava.

Otra técnica utilizada fue la del manejo de capas de suelo conformada por suelo rojo, aserrín y carbón, lo que demostró una mejor permeabilidad, minimizó la disminución de la capacidad de drenaje y evitó la obstrucción del sistema durante 4 años de operación, lo que nos permite inferir que el aserrín y el carbón son sustratos que reducen el problema de obstrucción y la acumulación de finos (Zidan et al. citado en Santos et al. 2024).

### **2.2.2 *Variable Depuración de Aguas Residuales Urbanas***

En núcleos urbanos que tienen más de 2000 habitantes se proponen soluciones con plantas de tratamientos de aguas residuales y su regulación, en el Perú, se encuentra en la norma técnica OS 090 del reglamento nacional de edificaciones; en el caso de comunidades rurales o periurbanas menores a 2000 habitantes, se establecen tecnologías no convencionales con construcciones individuales de saneamiento al interior de las viviendas. El objetivo de la normativa es mejorar la calidad de las aguas residuales a fin de ser vertidas al cuerpo receptor cumpliendo las normas de calidad (Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA).

En el Perú, mediante el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, se regulan los límites de la calidad del agua tratada previo a su disposición final y se establecen los valores con las que se caracterizan las aguas tratadas aptas para el vertido a los cuerpos de agua.

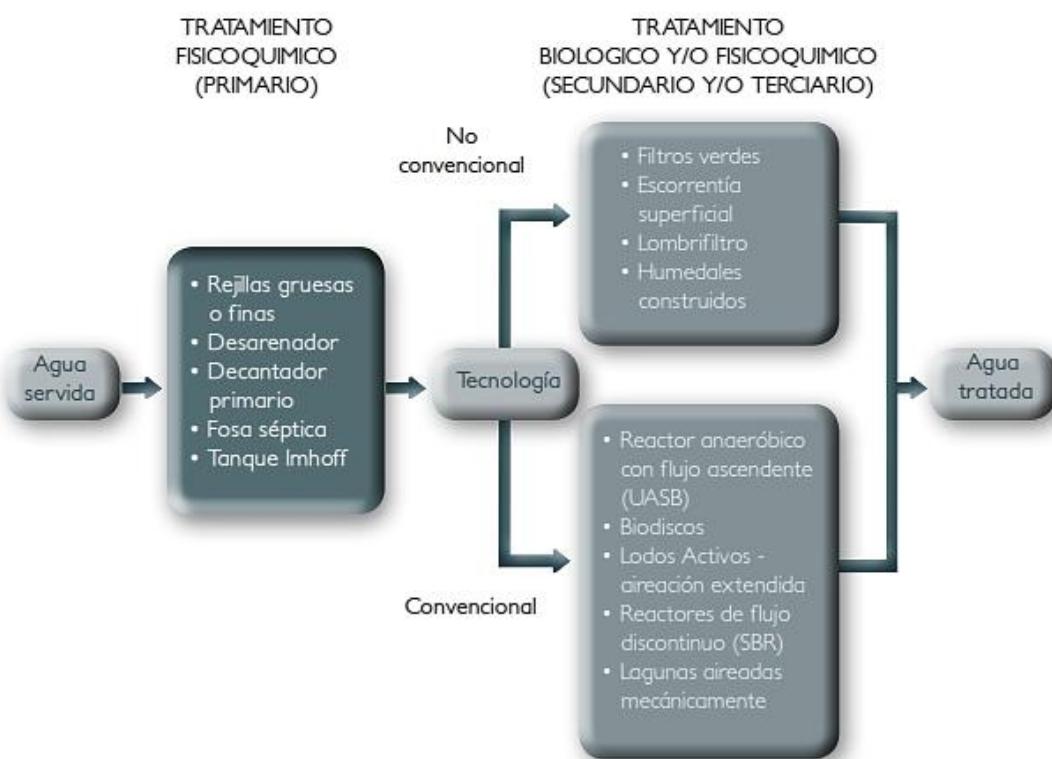
El Reglamento nacional de edificaciones estipula los niveles de tratamiento necesarios para el agua residual, tanto en zonas rurales como urbanas para poblaciones

mayores a dos mil habitantes e incluye un tratamiento preliminar, primario, secundario y terciario. Los proyectos de inversión en el Perú, se desarrollan diseñando tratamientos preliminares para la retención de sólidos gruesos a través una cámara de rejas (Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA).

En el caso de las comunidades rurales, en el Perú, la normativa señala que se debe construir unidades básicas de saneamiento para la deposición de excretas tanto en hoyos secos como en unidades de arrastre hidráulico. En el caso de este último se instalan adicionalmente tanques sépticos y para el tratamiento secundario se establece la construcción de humedal de flujo sub superficial (Resolución ministerial N° 173-2016-VIVIENDA, 2016).

**Figura 7**

*Procedimiento para la depuración de aguas residuales urbanas*



*Nota.* En la figura 7 se verifica la secuencia de la depuración incluye la recolección, el tratamiento y la reutilización. Se advierte que los humedales construidos resultan una tecnología no convencional utilizado en un segundo o tercer tratamiento. Fuente: UN HABITAT y OMS (2021).

Mena (2022) define que, los contaminantes presentes en las aguas residuales se clasifican en contaminantes físicos, químicos y biológicos. Entre los contaminantes físicos

se tiene a la temperatura, al pH y a la turbiedad. Los contaminantes químicos son la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno y entre los contaminantes biológicos se tiene a los coliformes termo tolerantes.

El reglamento nacional de edificaciones del Perú, precisa los parámetros de medición para la evaluación del efluente obtenido. Asimismo, se tiene que el sector Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú viene impulsando una política para el reciclaje del recurso hídrico generado para que sea utilizado en el riego de áreas verdes urbanas y señala tres parámetros de medición del efluente obtenido, y son la escherichia coli, los huevos de helminto y los sólidos suspendidos (Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA).

**Tabla 3**

*Parámetros de medición de aguas residuales urbanas tratadas*

<i>Nº Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Límite máximo (vertido a cuerpos de agua)</i>	<i>Reuso (riego de áreas verdes)</i>
1 Demanda bioquímica de oxígeno	DBO <sub>5</sub>	100 mg/l.	15 mg/l.
2 Demanda química de oxígeno	DQO	200 mg/l.	40 mg/l.
4 Temperatura	°C	< 35	Δ 3
5 Potencial del hidrógeno	pH	6.5-8.5	6.5-8.5
6 Sólidos totales en suspensión	mg/l.	150 mg/l.	< 35 mg/l.
7 Coliformes termo tolerantes	NMP/100ml	10,000	1000
8 Escherichia coli	NMP/100ml		≤ 1000
9 Huevos de helminto	Huevo/L		≤ 1

*Nota.* Información tomada del Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA.

### 2.3 Definición de términos básicos

**Aguas residuales.** Aguas que provienen de la utilización por comunidades urbanas, rurales o por actividades industriales y contienen material contaminante dentro de su composición que requieren un tratamiento antes de ser vertidas a los cuerpos de agua (Reglamento nacional de edificaciones, 2016).

**Aguas residuales urbanas.** Aguas usadas que contiene material o deshechos provenientes de las actividades humanas, y de la escorrentía pluvial que deben ser previamente tratadas para poder ingresar al sistema de alcantarillado (Reglamento nacional de edificaciones, 2016).

**Arcilla expandida.** Se define como un árido cerámico obtenido de manera artificial al someterse a temperaturas superiores a los 1100°C, se compone de un núcleo poroso de baja densidad, tiene una utilización en ingeniería geotécnica (Roces et al., 2021).

**Coliformes termo tolerantes.** Es un parámetro biológico que mide la cantidad de coliformes fecales presentes en las aguas residuales que tienen una capacidad de soportar temperaturas más altas (Ramírez, 2021).

**Conductividad hidráulica.** Capacidad que tiene un sustrato para conducir el agua cuando el espacio poroso está saturado o con valores cerca de la saturación (Basaldúa, 2025).

**Demandा bioquímica de oxígeno a los 5 días (DBO<sub>5</sub>).** Es la cantidad de oxígeno a los 5 días y a 20°C que se requiere para la estabilización de la materia orgánica (Reglamento nacional de edificaciones, 2016).

**Demandा química de oxígeno (DQO).** Es la cantidad de sustancias que son oxidadas a través de mecanismos químicos. Es un parámetro para medir la contaminación de los efluentes de una planta de tratamiento (Reglamento nacional de edificaciones, 2016).

**Depuración de aguas residuales urbanas.** Tratamiento que se realiza a las aguas residuales para reducir los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en ella con el objeto de disponer sobre cuerpos de agua o con fines de reutilización (Reglamento nacional de edificaciones, 2016).

**Granulometría.** En humedales construidos es la forma como se disponen en tamaño las partículas que conforman un sustrato (Mena, 2022).

**Humedal construido.** Es una tecnología no convencional que sirve para tratar las aguas residuales domésticas, urbanas e industriales (Mena, 2022).

**Obstrucción física.** Es aquella que se genera en los humedales construidos por la interceptación de partículas sólidas en suspensión, involucra al material suspendido en la entrada del sistema, el desgaste del sustrato y los desechos inorgánicos que se generan por la vegetación (Matos et al., 2020).

**Obstrucción química.** Se genera en los humedales construidos por la reacción química entre los poros de los sustratos formando coloide, gas y precipitación (Tang et al., 2020).

**Obstrucción biológica.** Es aquella obstrucción que se genera en los humedales construidos y generada por la formación de bacterias, hongos, algas y metazoos en la superficie del sustrato (Matos et al., 2020).

**Porosidad.** Indicador que mide los espacios disponibles en un medio filtrante que puede ser ocupado por agua o aire, se obtiene restando el peso húmedo con el peso seco adicionado con el volumen drenado dividido por el volumen del sustrato (Matos et al., 2020).

**pH en aguas residuales urbanas.** Indicador que mide un parámetro físico que permite identificar el ingreso de la carga orgánica a un sistema (Ramírez, 2020).

**Sólidos.** Contaminantes en forma suspendida, en solución total o en dispersión coloidal presentes en las aguas residuales (Tang et al., 2020).

**Sustrato.** Es una parte esencial del sistema para el tratamiento, está conformado por gravas y arenas, así como agregados no convencionales como el plástico, el caucho, arcilla expandida, aserrín, entre otros. La altura varía entre 0.60 m. y 0.90 m. en función del tipo de flujo, sea horizontal o vertical (Rincón, 2023).

**Sustratos convencionales.** Sustrato que forma parte de los humedales construidos y constituidos por agregados naturales como la arena con una granulometría seleccionada por cada condición geográfica.

**Sustratos emergentes.** Sustrato conformado por materiales como el plástico, arcilla expandida, caucho, aserrín, agregado reciclado y que se utilizan para evitar obstrucciones en los humedales construidos.

**Tiempo de retención hidráulico.** Se define como el tiempo transcurrido durante el ingreso y salida del sistema de tratamiento de aguas residuales urbanas (Ramírez, 2021).

**Turbiedad.** Es una característica de las aguas residuales urbanas que está relacionada con la presencia de partículas en suspensión, materia en suspensión o sólidos en suspensión. Sirve para medir la calidad del efluente obtenido en el tratamiento de aguas residuales. (Tang et al., 2020).

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Método de Investigación**

Según el propósito de la investigación fue de tipo aplicada con un nivel explicativo, siguiendo a Maletta (2019) se señala que el método consiste en aplicar a un campo particular variable independiente (humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado) sobre una variable dependiente (depuración de aguas residuales urbanas) exponiendo a los grupos experimentales conformados por las celdas del sistema a la acción de una variable experimental con sustratos convencionales, emergentes y combinados y contrastando los resultados con grupos de comparación.

Según la recolección de datos fue investigación de tipo prospectiva, ya que se observó el proceso de depuración de las aguas residuales introduciendo el modelo de humedales de tipo vertical. En este periodo se observó y se recogieron los resultados (Maletta, 2019).

Según la secuencia temporal de recolección de datos fue una investigación de tipo longitudinal, ya que se tomaron datos en diferentes momentos del experimento, y la observación se realizó en diferentes momentos, con el objeto de evaluar la maduración del modelo a instaurar (Hernández et al, 2014).

Según el enfoque de la investigación fue de tipo cuantitativa, ya que se recopilaron datos cuantificados y que sirvieron para el análisis de datos (Hernández et al, 2014).

#### **3.2 Diseño de Investigación**

La investigación hizo uso del diseño experimental. Se utilizó el diseño con grupo de control pre y post test. Se manipuló la variable independiente (humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado) y “con un diseño de pre prueba – post prueba se conoció si el tratamiento utilizado es eficiente para la depuración de las aguas contaminadas” (Hernández et al, 2014, p. 189).

El esquema de investigación fue el siguiente:

<b>Grupos</b>	<b>Pre prueba</b>	<b>Etapa 1</b>	<b>Etapa 2</b>	<b>Post prueba</b>
GC	M1	SC → SC ( $X_1$ )		M <sub>2</sub>
GE <sub>1</sub>	M1	SR → SR ( $X_2$ )		M <sub>3</sub>
GE <sub>2</sub>	M1	SC → SR ( $X_3$ )		M <sub>4</sub>
GE <sub>3</sub>	M1	SR → SC ( $X_4$ )		M <sub>5</sub>

Donde:

$X_{1,2,3,4}$  : Tratamiento

SC : Sustrato convencional (arenas)

SR : Sustrato reciclado (ladrillo de arcilla reciclado)

GC : Grupo de control

GE<sub>1,2,3</sub>: Grupo experimental

M<sub>1,2,3,4,5</sub>: Muestra

El grupo de control (GC) estuvo conformado por celdas con sustrato de arena en ambas etapas; el grupo experimental 1 (GE1) estuvo conformado por celdas con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en ambas etapas; el grupo experimental 2 (GE2) estuvo conformado por celdas con sustrato de arena en una primera etapa y ladrillo de arcilla reciclado en una segunda etapa; y, el grupo experimental 3 (GE3) estuvo conformado por celdas con sustratos de ladrillo de arcilla reciclado en una primera etapa y arena en una segunda etapa. Se aplicaron los tratamientos y se midió la influencia de la implementación de los tratamientos.

### 3.3 Población y muestra

Como afirman Hernández et al. (2014) se entiende por población a las unidades que tienen especificaciones en común y se sitúa por sus características de lugar, tiempo y contenido. La muestra de estudio fue el conjunto de aguas residuales generadas por una comunidad rural de 36 habitantes.

En el estudio se realizaron las muestras de acuerdo al protocolo establecido en el reglamento nacional de edificaciones y concordante con las indicaciones establecidas para la toma de muestras por el sector vivienda, construcción y saneamiento del Perú. Se tomaron muestras al ingreso del sistema en la zona de pretratamiento, la frecuencia del muestreo fue mensual. Finalmente, se tomaron muestras al final del tratamiento.

El tipo de muestra fue probabilístico con un muestreo aleatorio cada cierto intervalo de tiempo. Se buscó que la recolección manejo y preservación de muestras sean representativos para los parámetros a analizar: Turbiedad, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de oxígeno y Coliformes termo tolerantes.

### 3.4 Operacionalización de las Variables de Estudio

#### 3.4.1 Definición Conceptual

##### Variable independiente

Humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado: el sistema de humedales construidos de flujo vertical es un modelo creado en Francia que sirve para el tratamiento y depuración de contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas. Se compone de dos etapas de humedales construidos de flujo sub superficial de tipo de flujo vertical, conformado por sustratos seleccionados como arenas y gravas (Obeng et al., 2023).

### **Variable dependiente**

Depuración de aguas residuales urbanas: las aguas residuales urbanas provienen de los hogares, industria, servicios y de las escorrentías urbanas que están localizadas geográficamente. Para la depuración se deben remover los contaminantes del tipo físico, químico y biológico presentes en las aguas residuales (D.S. N° 011-2006-VIVIENDA).

#### **3.4.2 Definición Operacional**

### **Variable independiente**

Humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado: las características físicas del sustrato de humedales construidos incluyen el porcentaje de humedad, el tamaño y peso de las partículas para filtrar contaminantes. Las características hidráulicas como la porosidad y la capacidad de infiltración son claves para la permeabilidad del sistema (Obeng et al., 2023).

### **Variable independiente**

Depuración de aguas residuales urbanas: Las aguas residuales urbanas se caracterizan de acuerdo a los contaminantes presentes en ella. El objeto de la depuración es mejorar los contaminantes físicos, químicos y biológicos y cumplir normas de calidad del cuerpo receptor (D.S. N° 011-2006-VIVIENDA).

#### **3.4.3 Dimensiones e Indicadores de las Variables**

**Variable independiente:** Humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado.

Dimensión 1: Propiedades físicas

Indicadores: Porcentaje de humedad, coeficiente de uniformidad, peso específico y absorción.

Dimensión 2: Propiedades hidráulicas

Indicadores: Porosidad y capacidad de infiltración.

**Variable independiente:** Depuración de aguas residuales urbanas:

Dimensión 1: Propiedades físicas

Indicadores: Turbiedad

Dimensión 2: Propiedades químicas

Indicadores: Demanda Bioquímica de oxígeno y Demanda química de oxígeno.

Dimensión 3: Propiedades biológicas

Indicadores: Coliformes termotolerantes

### **3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

**Observación.** Con esta técnica se analizó el tratamiento de los afluentes mediante los distintos modelos diseñados con sustratos convencionales conformado por arena, sustratos emergentes como el ladrillo de arcilla reciclado y sustratos combinados, las mismas que fueron analizadas en laboratorio.

Instrumentos de recolección de datos

**Ficha de observación.** Se utilizaron fichas con el objeto que el investigador anote las fechas, puntos de muestreo, valores obtenidos y en general los datos de los ensayos realizados para caracterizar tanto los efluentes como los afluentes obtenidos, en las diferentes combinaciones de diseño. Asimismo, se realizaron fichas de observación para los datos obtenidos en laboratorio de las propiedades físicas de los sustratos utilizados en el sistema.

**Instrumentos electrónicos de la especialidad.** Sirvió para recolectar los datos obtenidos de las mediciones a las aguas residuales urbanas tratadas y que fueron debidamente calibradas de acuerdo a la normativa sobre la materia.

### **Actividades del Proceso Investigativo**

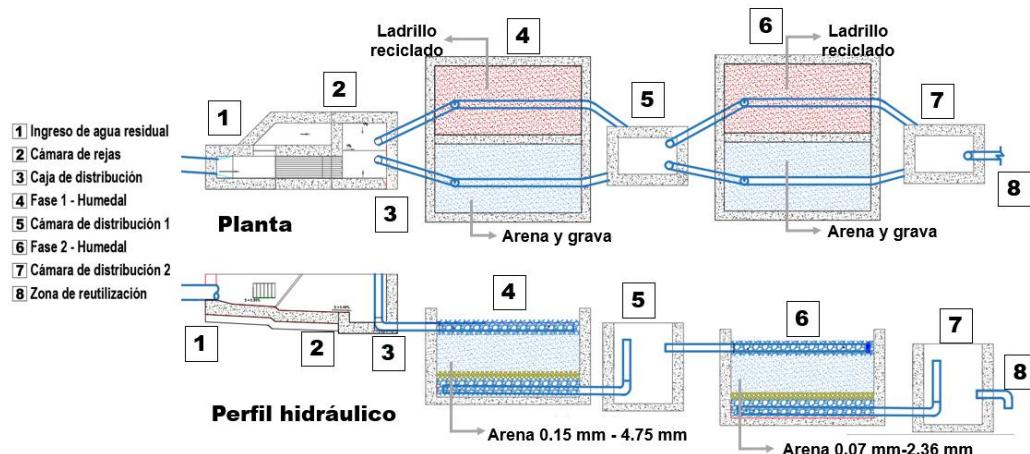
En la construcción del humedal de flujo vertical se utilizó el modelo de Reed et al, citado por Obeng et al. (2023). Los componentes del sistema fueron los que se indican en la figura 8.

1. La cámara de rejas se diseñó con una medida de 0.60 ml. x 2.62 ml. y una profundidad de 0.70 ml. (ver detalle en anexo 8).
2. La cámara de distribución 1 y 2 contó con una medida de 0.80 ml. x 1.10 ml. con una profundidad de 1.15 ml. (ver detalle en anexo 8).

3. Los 2 lechos de humedal de flujo vertical en la primera etapa tuvieron una medida de 0.95 ml. x 2.00 ml. con una profundidad variable entre 0.85 ml y 1.10 ml cada celda (ver detalle en anexo 8).
4. Los 2 lechos de humedal de flujo vertical en la segunda etapa tuvieron una medida de 0.95 ml. x 2.00 ml. con una profundidad variable entre 0.85 ml y 1.10 ml cada celda (ver detalle en anexo 8).

**Figura 8**

*Componentes del humedal construido de flujo vertical*



*Nota.* El diseño de la estación depuradora se construyó de acuerdo a la memoria de cálculo indicado en el anexo 6 de esta investigación.

5. La zona de amortiguamiento se diseñó con una dimensión de 2.00 ml. x 5.00 ml. con una profundidad de 0.70 ml. (ver detalle en anexo 8).
6. El sustrato para material estuvo conformado por arena gruesa seleccionadas de la cantera el Olguín ubicado en la localidad de investigación, de acuerdo al diseño de cada lecho y con sustrato conformado por ladrillo reciclado (ver detalle en anexo 8).

Para el análisis de la porosidad, granulometría, peso específico, absorción, peso unitario y conductividad hidráulica se utilizaron los siguientes equipos de laboratorio:

1. Tamiz de laboratorio del 21/2" al # 200
2. Vasos plásticos de 250 ml.
3. Permeámetro
4. Embudo plástico
5. Regla y wincha métrica
6. Horno
7. Balanzas

Para el análisis químico, físico y biológico de las aguas residuales tratadas se utilizaron los siguientes equipos de laboratorio:

1. Un frasco plástico de 500 ml., 200 ml. y 50 ml.
2. Un frasco de vidrio de 250 ml.
3. Guante
4. Balde plástico de 4 lts.
5. Seis vasos precipitados de 100 ml.
6. Dos vasos precipitados de 250 ml.
7. Agua destilada
8. Turbidímetro HANNA HI 93703-11
9. Cooler para transporte de las muestras
10. Reactivos y preservantes
11. Guantes y mascarillas de seguridad
12. Medidor multiparámetro Waterproof HANNA

Los equipos de gabinete utilizados en la investigación fueron los siguientes:

1. Laptop HP 15"
2. Memoria USB 32 Gb
3. Impresora a color HP 380
4. Útiles de escritorio
5. Tablas de madera

### **3.6 Procedimiento de Recolección de Datos**

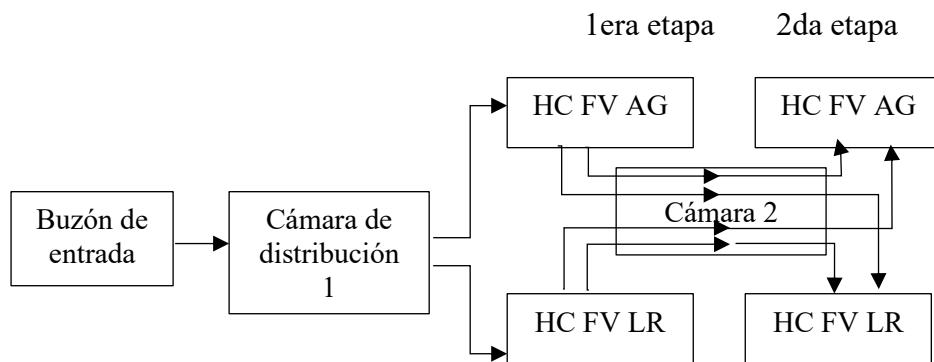
**Paso 1.** Se planteó la estación depuradora con los siguientes componentes: tratamiento con un buzón de entrada, cámara de rejas, cámara de distribución, primera celda construido de flujo vertical, segunda cámara de distribución, segunda etapa de humedal construido de flujo vertical, caja de salida y una zona de reutilización del agua tratada.

**Paso 2.** Se calculó el caudal medio diario, que sirvió para el cálculo del diseño de las etapas de humedales construidos de flujo vertical a nivel experimental. Se seleccionaron los sustratos en la misma localidad de investigación. Para el caso de la arena se suministraron de la cantera El Olguín, ubicado a 4 kms. de la zona de investigación. El ladrillo y la teja de arcilla reciclado se obtuvo de los residuos de construcción mediante un proceso de trituración siguiendo las disposiciones sobre el manejo de este residuo de construcción.

**Paso 3.** Se construyó la estación de depuración incorporando las celdas de flujo vertical (HC FV), con los valores obtenidos en los cálculos de diseño con el siguiente esquema:

**Figura 9**

*Esquema de la planta con humedales construidos de flujo vertical*



*Nota.* HC FV AG: Humedal de flujo vertical construido con arena

HC FV LR: Humedal de flujo vertical construido con ladrillo reciclado

**Paso 4.** Se caracterizaron las propiedades físicas de los sustratos a utilizar en el sistema de tratamiento (arena y ladrillo de arcilla reciclado) mediante los siguientes análisis:

**Análisis granulométrico – coeficiente de uniformidad:** de acuerdo a normativa NTP 400.012 donde se obtuvo el módulo de fineza y la caracterización de los agregados utilizados en el sistema.

**Porosidad:** de acuerdo al método de ensayo NTP 400.036 para la arena gruesa de ambas etapas.

**Porcentaje de humedad:** de acuerdo al método de ensayo NTP 339.185 para la arena gruesa de ambas etapas.

**Peso específico y absorción:** de acuerdo al método de ensayo NTP 400.022 para la arena gruesa de ambas etapas.

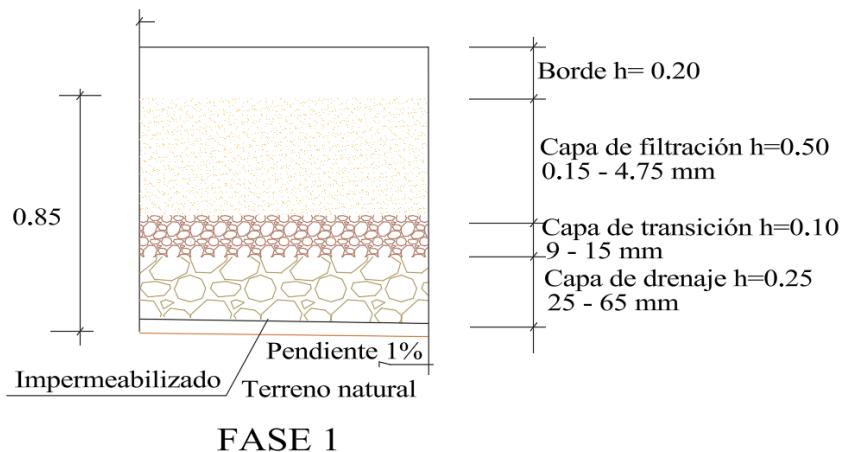
**Peso unitario:** de acuerdo al método de ensayo NTP 400.017 para la arena gruesa de ambas etapas.

**Capacidad de infiltración:** se tomará el tiempo en segundos del tiempo que se demore en infiltrar 500 ml de agua sobre una tubería de 110 mm con una altura de 0.60 m y con un contenido de sustrato en una altura de 0.30 m ligeramente apisonado. La tubería será colocada en un contenedor plástico tipo balde y con agregados entre  $\frac{1}{2}$ " y 1" en el fondo. Se realizaron 10 mediciones hasta esperar que el sustrato se stabilice y se obtenga el mayor

tiempo de saturación y se tomó el tiempo final obtenido medido en segundos. Se repitieron las pruebas hasta que se encontró un valor menor de 75 segundos.

**Figura 10**

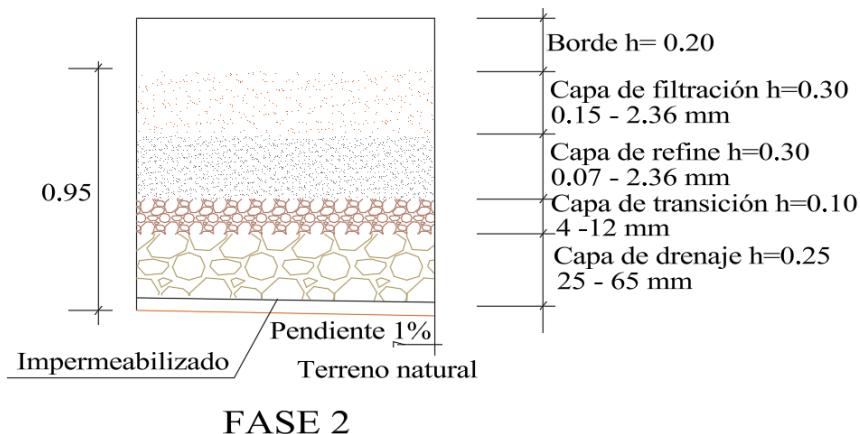
*Conformación del humedal de flujo vertical en la primera etapa*



*Nota.* Conformación del sustrato en la primera etapa del humedal de tipo vertical adaptado de Rincón (2023).

**Figura 11**

*Conformación del humedal de flujo vertical en la segunda etapa*



*Nota.* Conformación del sustrato en la segunda etapa del humedal de tipo vertical adaptado de Rincón (2023).

**Paso 5.** El planteamiento de las celdas de flujo vertical en la primera y segunda etapa tuvo una conformación de capa de filtración, capa de transición y una capa inferior de drenaje. Se tomaron los datos de muestras en la salida de cada etapa, de acuerdo al protocolo establecido.

**Paso 6.** Se implementó la planta de tratamiento con humedales construidos de flujo vertical en el centro poblado El Ala.

**Paso 7.** Se colocó el sustrato de acuerdo al diseño de investigación y se acondicionaron las tuberías de recogida, aireación y de alimentación con tubería HDPE de 60 mm, asimismo se construyeron cajas de distribución para la alimentación alterna de los humedales. En cada uno de los humedales se colocó una llave de control a fin de realizar las tomas de muestras respectivas. En la parte final del sistema se instaló una zona para el reúso del agua tratada previo análisis.

**Paso 8.** Se tomaron las muestras y fueron trasladadas al laboratorio del Área Técnica Municipal de la Municipalidad distrital de Buenos Aires – Morropón - Piura para ser evaluadas. Se tomó en cuenta el traslado de las muestras en cooler a fin de conservar la temperatura y no alterar las propiedades. Se analizaron los afluentes obtenidos en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. La temperatura el pH se midieron con el equipo multiparámetro Waterproof HANNA y la turbiedad se tomó en campo con el equipo Turbidímetro HANNA 93703-11.

#### **Tabla 4**

*Propiedades físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales urbanas*

Nº	Propiedad	Método de ensayo
1	Temperatura	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5550 B Temperature. Laboratorio y métodos de campo. 23rd Edición, 2017
2	pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ BpH Valor con método electromecánico. 23rd Edición, 2017
3	Turbiedad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 BTurbidity. 23rd Edición, 2017.
4	DBO <sub>5</sub>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test. 22nd Edition, 2012.
5	DQO	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D. Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method. 23rd Edition, 2017.
6	Coliformes termo tolerantes	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 B. Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique. 23rd Edition, 2017

*Nota.* Los ensayos serán realizados en el laboratorio del Área Técnica Municipal de la Municipalidad distrital de Buenos Aires – Morropón - Piura

**Paso 9.** Los datos obtenidos en laboratorio se sintetizaron en tablas en formato Excel a fin de realizar el análisis descriptivo y posteriormente fueron analizadas mediante el programa SPSS versión 28.01 para contrastar las hipótesis de investigación.

**Paso 10.** Para el procesamiento de datos se tomaron los datos obtenidos en laboratorio de las tres combinaciones del sistema tanto para las propiedades físicas, químicas y biológicas del efluente de las aguas residuales tratadas y se digitalizaron en formato en una base de datos en el programa Excel, posteriormente se procesaron mediante el programa SPSS versión 28.01.

**Paso 11.** Se elaboraron las tablas y gráficos de los resultados en concordancia a los objetivos de la investigación de la siguiente manera:

Grupo experimental 1 (GE1): Determinar la influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en dos etapas.

Grupo experimental 2 (GE2): Determinar la influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de arena en una primera etapa y de ladrillo de arcilla reciclado en una segunda etapa.

Grupo experimental 3 (GE3): Determinar la influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en una primera etapa y de arena en una segunda etapa.

Grupo de control (GC): Determinar la influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de arena en dos etapas.

### 3.7 Técnica de Análisis de los Resultados

Para el análisis de los resultados se examinaron las hipótesis aplicando la “t de Student”, posteriormente se analizó si los datos obtenidos en el efluente o ingreso del sistema (pre prueba) difieren con los valores del afluente o salida (post prueba) en ambas etapas respecto a los valores de las medias obtenidas. El estadístico “t” se calculó con la Ecuación 3:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(d_i - \bar{d})^2}{n-1}} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

Donde:

$\bar{X}_{1,2}$ : Medias de las observaciones obtenidas.

$s^2$ : Desviación estándar de las diferencias.

n: Cantidad de pares de observaciones.

$d_i$ : Diferencia entre dos mediciones por sujeto.

$\bar{d}$ : Media de las diferencias.

### **Hipótesis específica 1**

**H<sub>0</sub>** = No existe diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en dos etapas.

**H<sub>A</sub>** = Existe diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en dos etapas.

### **Hipótesis específica 2**

**H<sub>0</sub>** = No existe diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de arena en una primera etapa y de ladrillo de arcilla reciclado en una segunda etapa.

**H<sub>A</sub>** = Existe diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de arena en una primera etapa y de ladrillo de arcilla reciclado en una segunda etapa.

### **Hipótesis específica 3**

**H<sub>0</sub>** = No existe diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en una primera etapa y con arena en una segunda etapa.

**H<sub>A</sub>** = Existe diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en una primera etapa y con arena en una segunda etapa.

Se asumió:

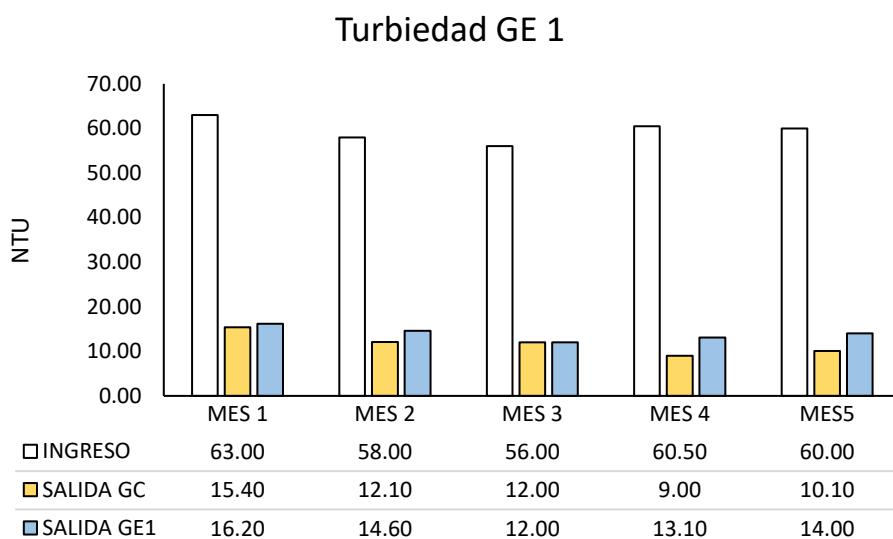
Rechazar la H<sub>0</sub> si sig < α (0.05) y aceptar la H<sub>0</sub> si sig > α (0.05)

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en dos etapas.

**Figura 12**

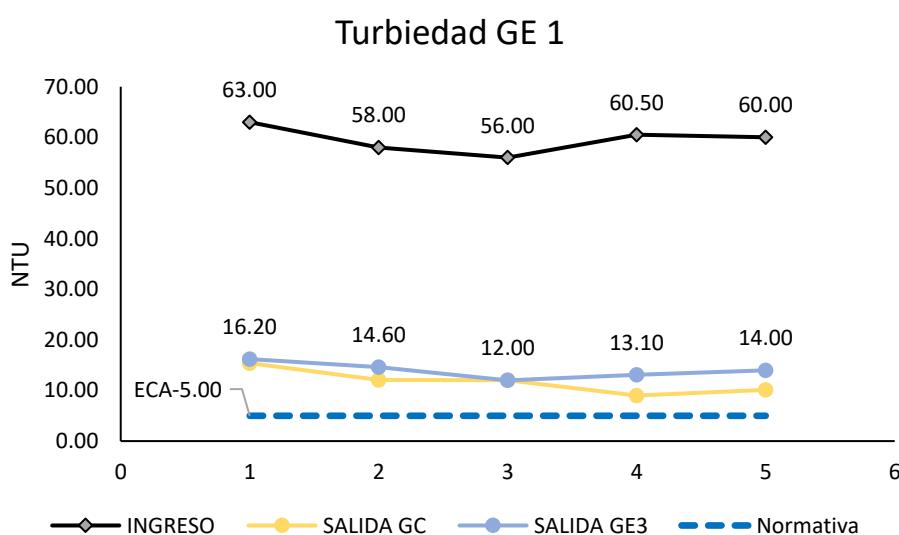
*Valores de remoción del parámetro turbiedad GE1*



*Nota:* Se tienen en la figura 12 los valores obtenidos en los parámetros de turbiedad del grupo experimental 1. El valor de ingreso osciló entre 56 NTU y 63 NTU durante los 5 meses de observación. En el primer mes del experimento se obtuvo un valor de 16.20 NTU y en el grupo de control 15.40 NTU con una eficiencia del 74.29%.

**Figura 13**

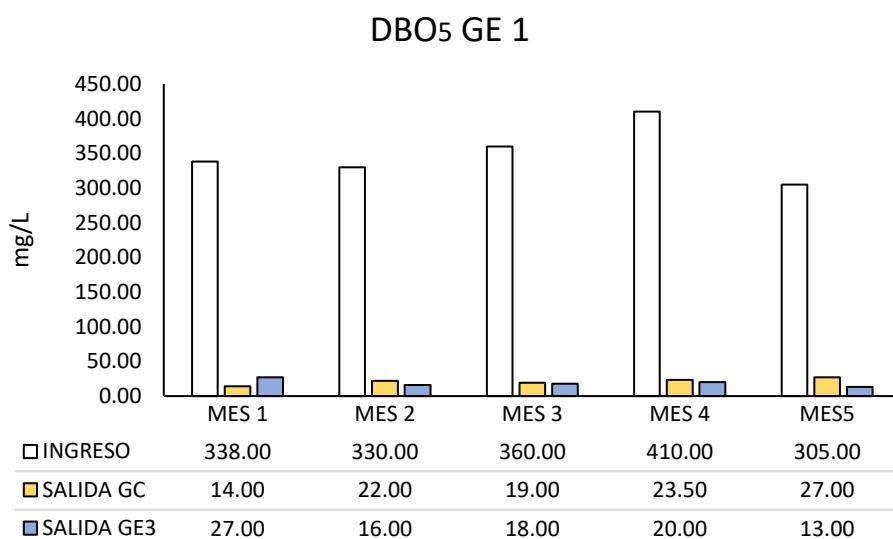
*Eficiencia de remoción del parámetro Turbiedad GE1*



*Nota:* En la figura 13 se verifica que los valores se encuentran por encima del valor de 5 NTU establecido en el DS 004-2017 – MINAM como el estándar de calidad ambiental para la turbiedad.

**Figura 14**

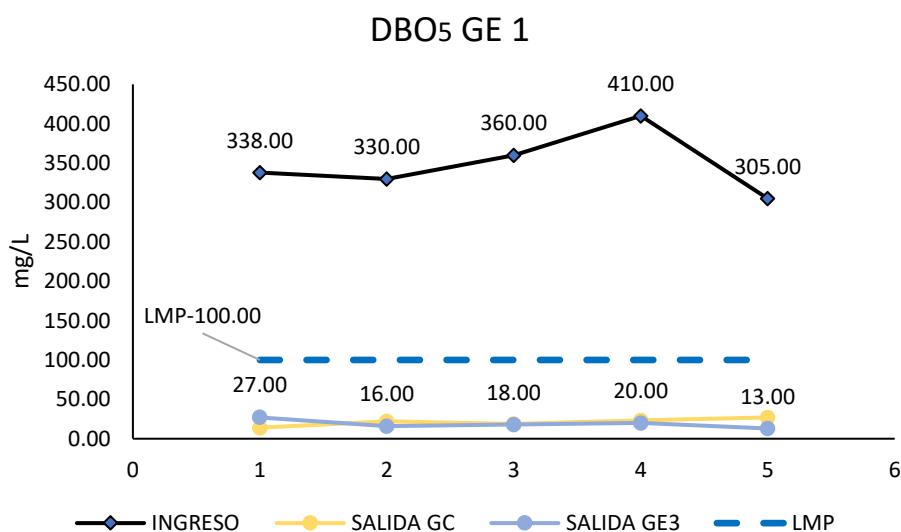
*Valores de remoción del parámetro DBO<sub>5</sub> GE1*



*Nota:* Los datos que se muestran en la figura 14 reflejan la eficiencia en la remoción de contaminantes de la demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días. El valor de ingreso durante los 5 meses de observación fue entre 305 mg/L y 410 mg/L. En el quinto mes se registró un valor de salida de 13 mg/L y en el grupo de control se obtuvo un valor de 28 mg/L. La eficiencia promedio fue de 94.60% de remoción de contaminantes.

**Figura 15**

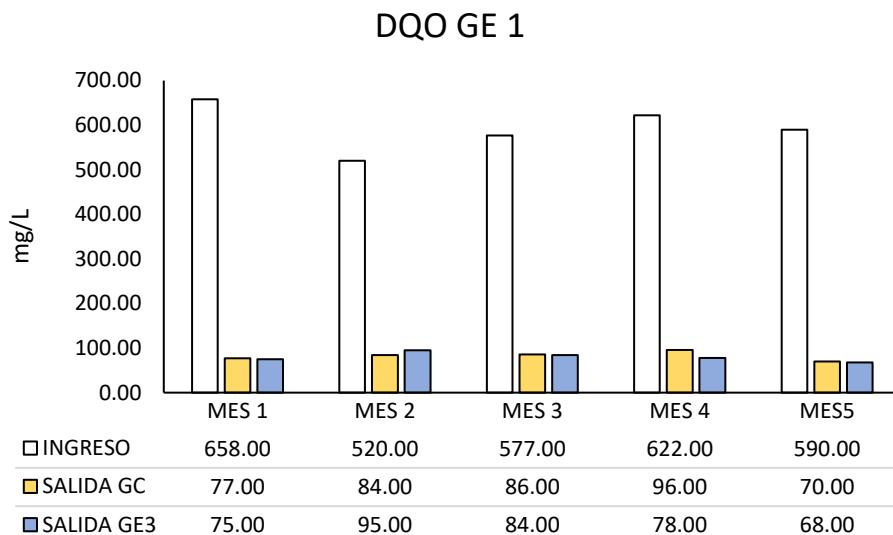
*Eficiencia de remoción del parámetro DBO<sub>5</sub> GE1*



*Nota:* En la figura 15 se verifica que los valores obtenidos en la salida del GE1 se encuentran debajo del valor de 100 mg/L establecido en el DS 003-2010 – MINAM como límite máximo permisible.

**Figura 16**

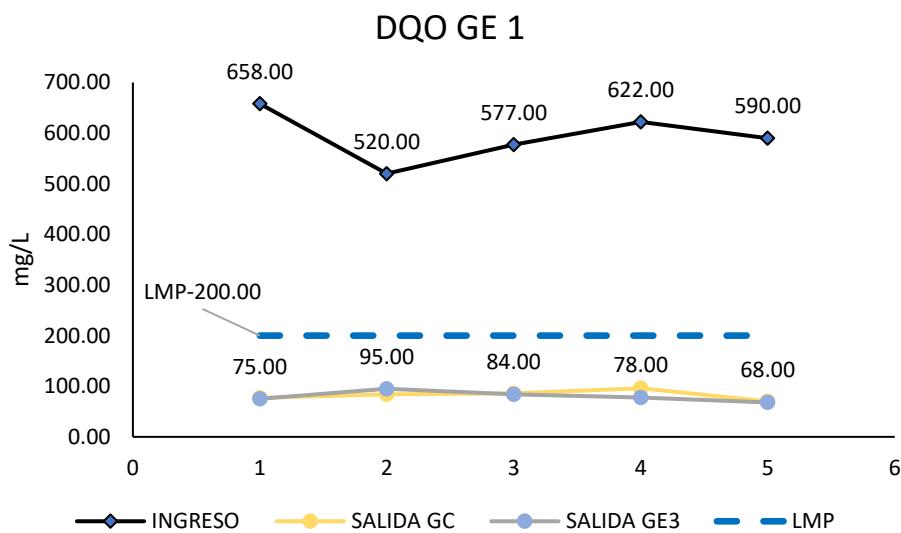
*Valores de remoción del parámetro demanda química de oxígeno GE1*



*Nota:* Los datos de la figura 16 corresponden al parámetro de la demanda química de oxígeno. En el ingreso de la estación depuradora se registraron valores entre 520 mg/L y 658 mg/L. Durante el primer mes el GE1 reportó un valor de salida de 75 mg/L. En el quinto mes se obtuvo un valor de 68 mg/L. La eficiencia de remoción promedio fue de 86.34%.

**Figura 17**

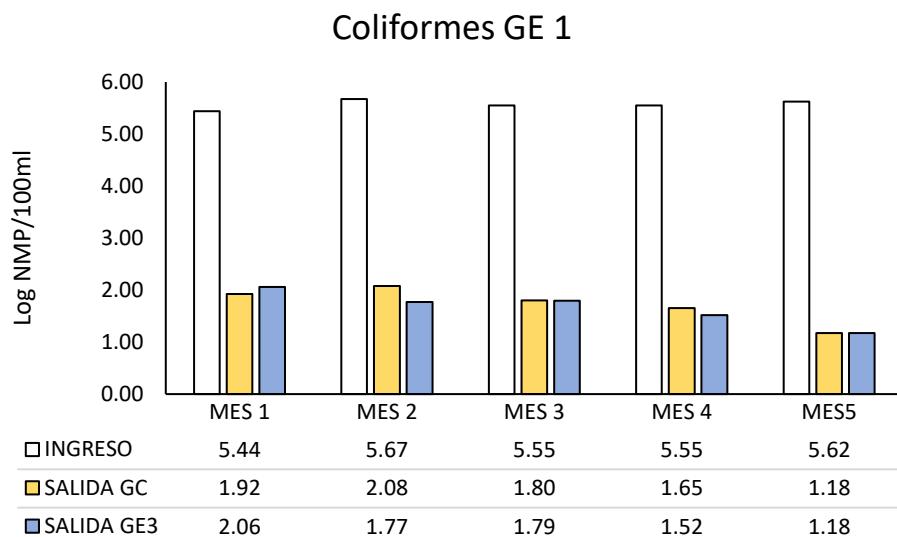
*Eficiencia de remoción del parámetro demanda química de oxígeno GE1*



*Nota:* En la figura 17 se verifica que los valores se encuentran debajo del valor de 200 mg/L establecido en el DS 003-2010 – MINAM como límite máximo permisible.

**Figura 18**

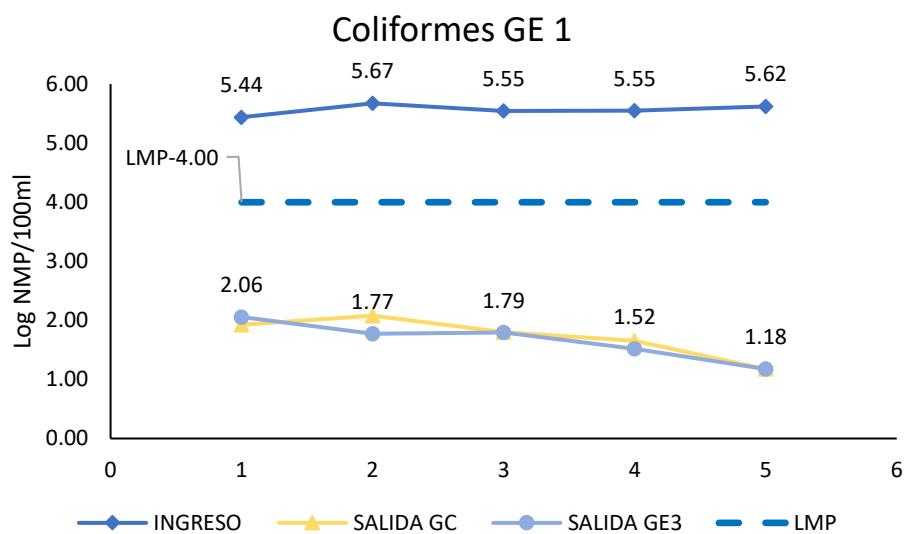
*Valores de remoción del parámetro coliformes termo tolerantes GE1*



*Nota:* En la figura 18 se verifica valores entre 5.44 y 5.67 Log NMP/100ml. En el tercer mes de observación se obtuvo un valor de salida de 1.79 Log NMP/100ml. Durante el quinto mes se obtuvo el registro de mayor eficiencia registrándose un valor de 1.18 Log NMP/100ml.

**Figura 19**

*Eficiencia de remoción del parámetro coliformes termo tolerantes GE1*

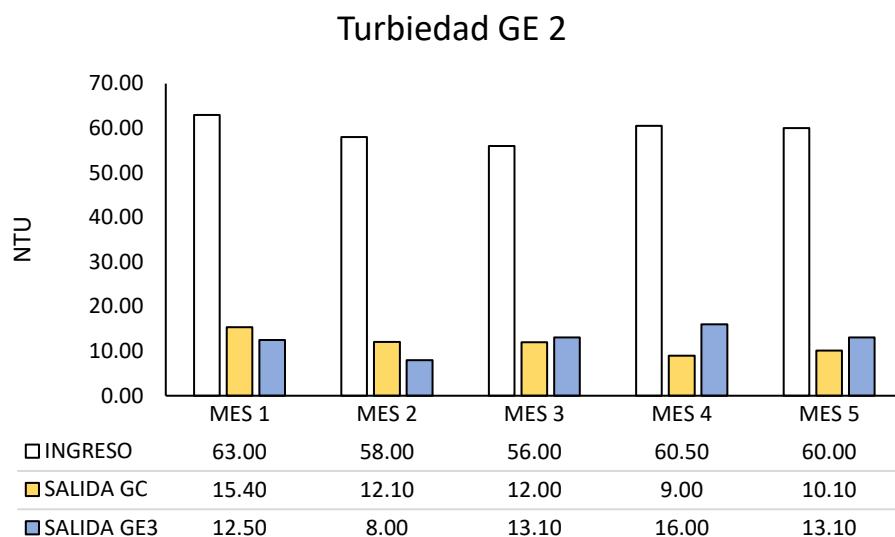


*Nota:* En la figura 19 se verifica que los valores se encuentran debajo del valor establecido en el DS 003-2010 – MINAM como límite máximo permisible para este parámetro.

#### 4.2 Influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de arena en una primera etapa y de ladrillo de arcilla reciclado en una segunda etapa.

**Figura 20**

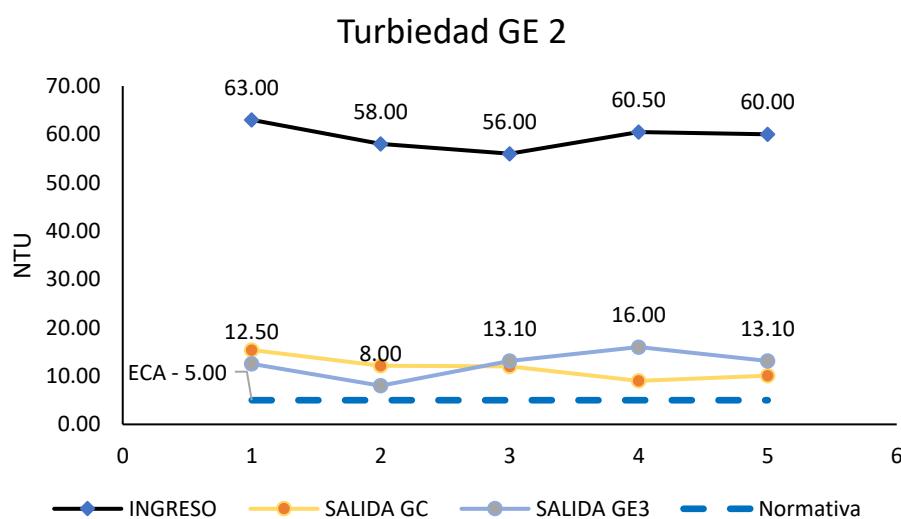
*Valores de remoción del parámetro turbiedad GE2*



*Nota:* Se tienen en la figura 20 los valores obtenidos en los parámetros de turbiedad del grupo experimental 2. En el primer mes del experimento se obtuvo un valor de 12.50 NTU y en el grupo de control de 15.40 NTU con una eficiencia del 80.16%.

**Figura 21**

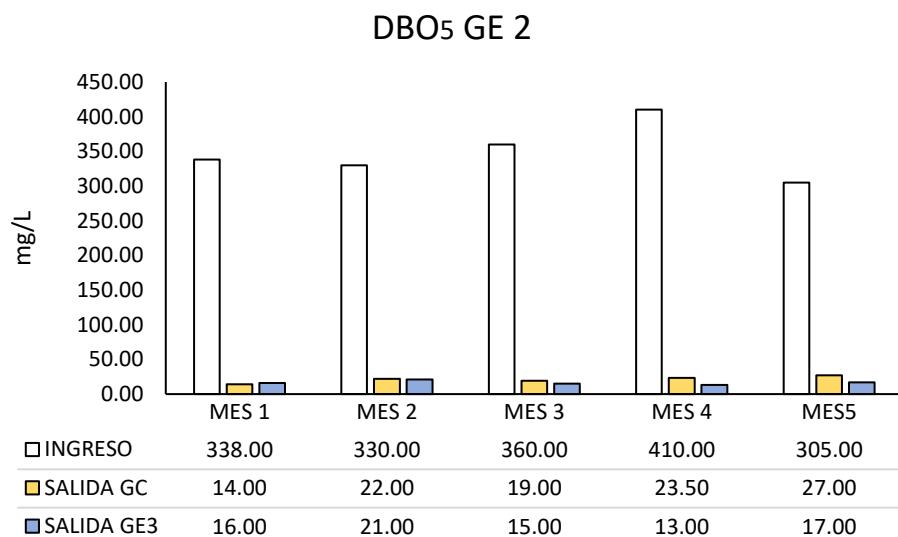
*Eficiencia de remoción del parámetro Turbiedad GE2*



*Nota:* En la figura 13 se verifica que los valores se encuentran por encima del valor de 5 NTU establecido en el DS 004-2017 – MINAM como el estándar de calidad ambiental para la turbiedad para el grupo experimental 2.

**Figura 22**

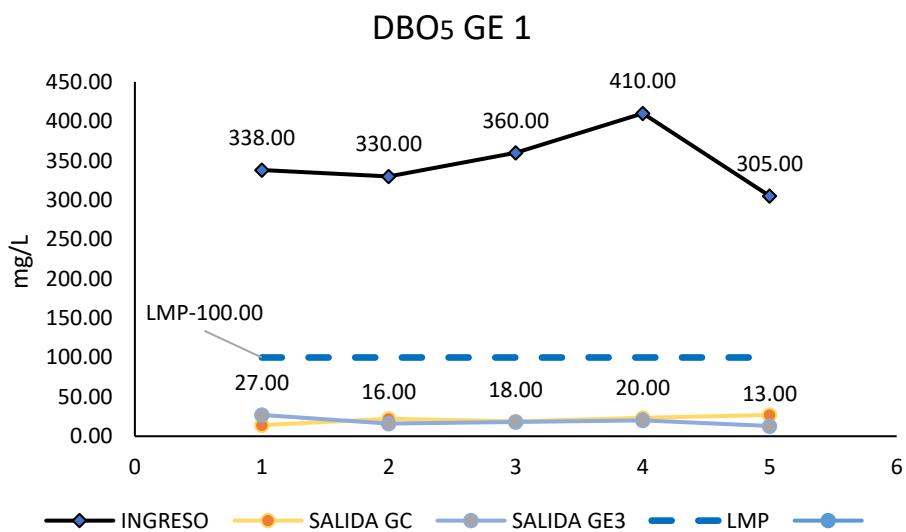
*Valores de remoción del parámetro DBO<sub>5</sub> GE2*



*Nota:* Los datos que se muestran en la figura 22 reflejan la eficiencia en la remoción de contaminantes de la demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días. En el quinto mes se registró un valor de salida de 17 mg/L y en el grupo de control se obtuvo un valor de 27 mg/L.

**Figura 23**

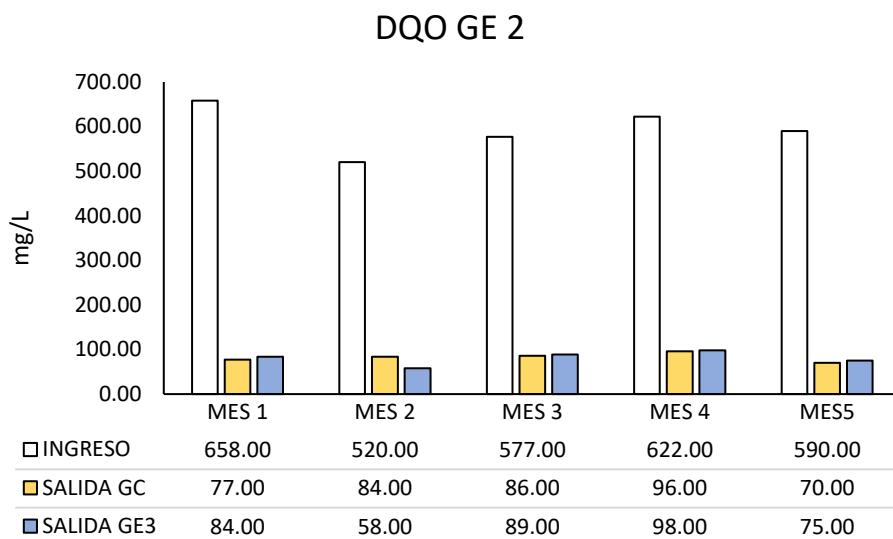
*Eficiencia de remoción del parámetro DBO<sub>5</sub> GE2*



*Nota:* En la figura 23 se verifica que los valores obtenidos en la salida del GE2 se encuentran debajo del valor de 100 mg/L establecido en el DS 003-2010 – MINAM como límite máximo permisible.

**Figura 24**

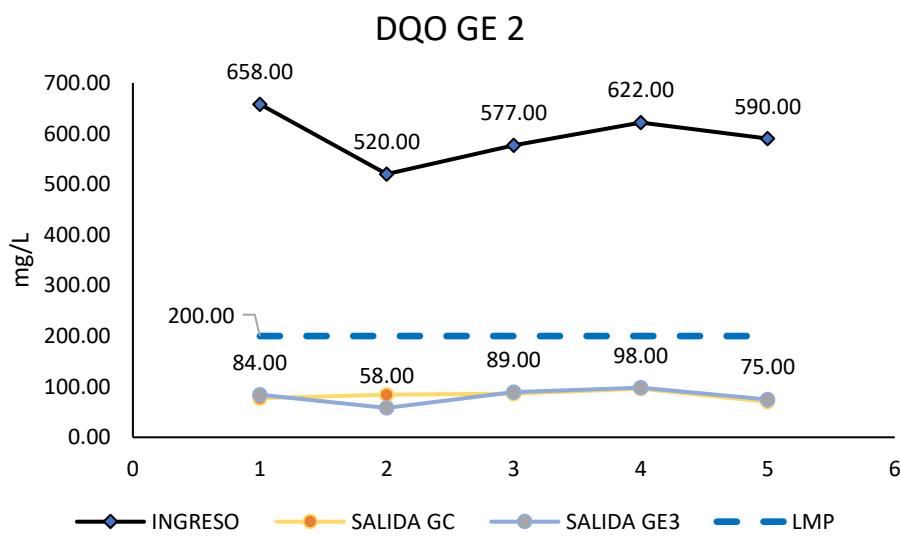
*Valores de remoción del parámetro demanda química de oxígeno GE2*



*Nota:* Los datos de la figura 24 corresponden al parámetro de la demanda química de oxígeno en el grupo experimental 2. Durante el primer mes el GE2 reportó un valor de salida de 84 mg/L y el de grupo de control fue de 77.00 mg/L. En el quinto mes se obtuvo un valor de 75 mg/L. La eficiencia de remoción fue de 87.29%

**Figura 25**

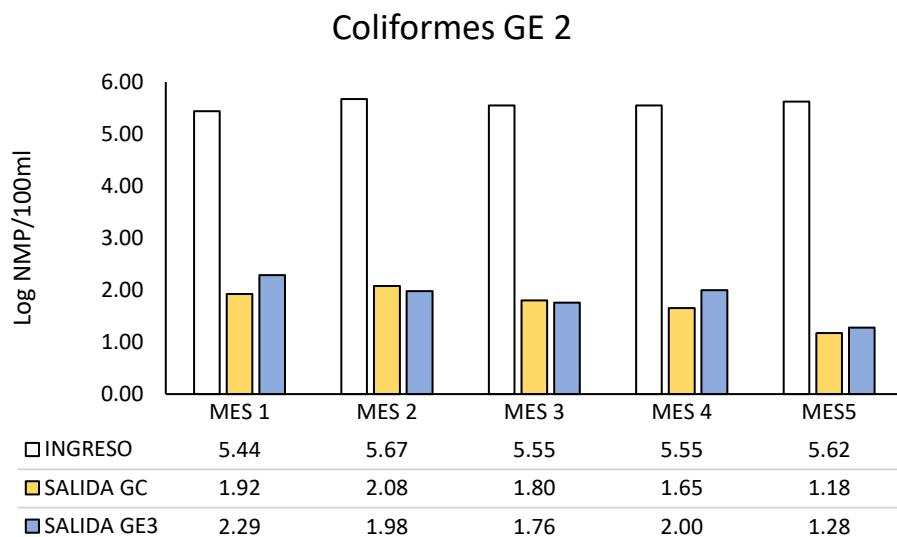
*Eficiencia de remoción del parámetro demanda química de oxígeno GE2*



*Nota:* En la figura 25 se verifica que los valores se encuentran debajo del valor de 200 mg/L establecido en el DS 003-2010 – MINAM como límite máximo permisible.

**Figura 26**

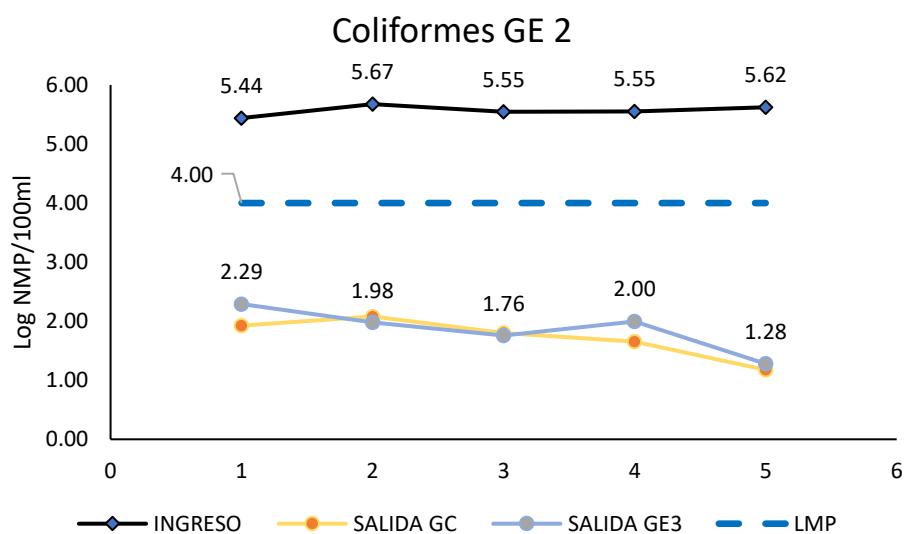
*Valores de remoción del parámetro coliformes termo tolerantes GE2*



*Nota:* En la figura 26 se verifica los valores obtenidos en la remoción de coliformes. En el tercer mes de observación se obtuvo un valor de salida de 1.76 Log NMP/100ml. Durante el quinto mes se obtuvo el registro de mayor eficiencia registrándose un valor de 1.28 Log NMP/100ml.

**Figura 27**

*Eficiencia de remoción del parámetro coliformes termo tolerantes GE2*

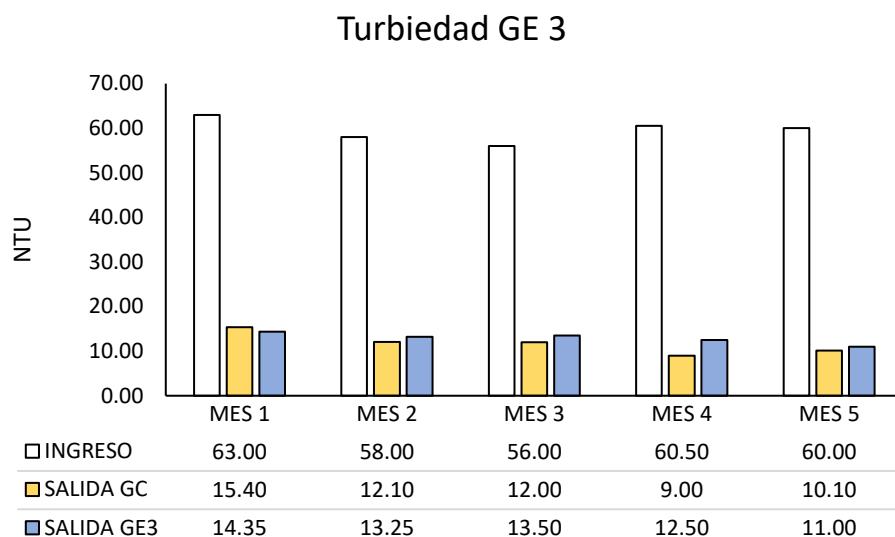


*Nota:* En la figura 27 se verifica que los valores se encuentran debajo del valor establecido en el DS 003-2010 – MINAM como límite máximo permisible para este parámetro.

#### 4.3 Influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en una primera etapa y de arena en una segunda etapa.

**Figura 28**

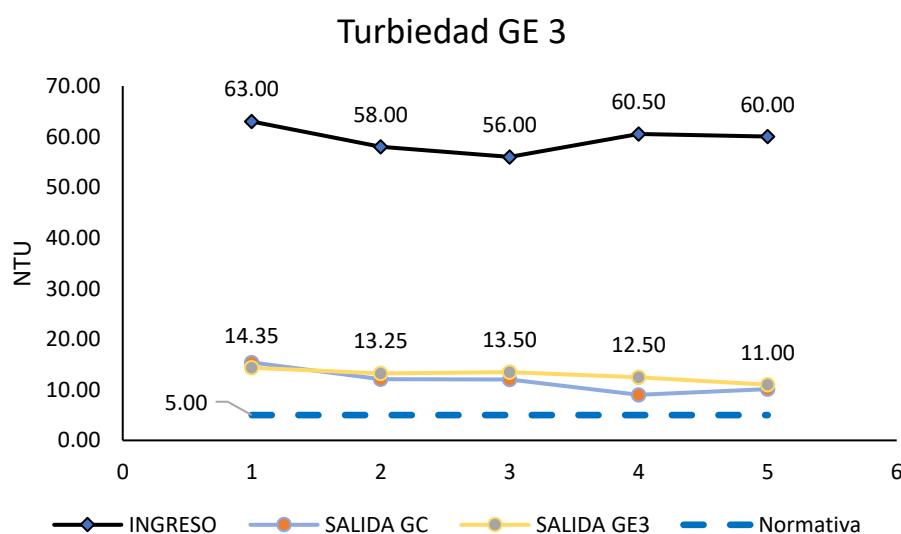
*Valores de remoción del parámetro turbiedad GE3*



*Nota:* Se tienen en la figura 28 los valores obtenidos en los parámetros de turbiedad del grupo experimental 3. En el primer mes del experimento se obtuvo un valor de 14.35 NTU y en el quinto mes se obtuvo 11.00 NTU con una eficiencia del 81.67%.

**Figura 29**

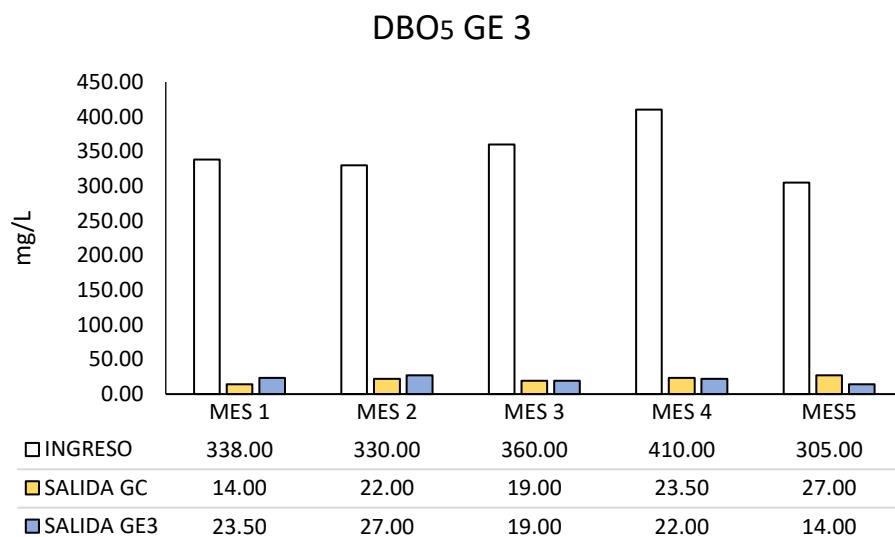
*Eficiencia de remoción del parámetro turbiedad GE3*



*Nota:* En la figura 29 se verifica que los valores se encuentran por encima del valor de 5 NTU establecido en el DS 004-2017 – MINAM como el estándar de calidad ambiental para la turbiedad para el grupo experimental 3.

**Figura 30**

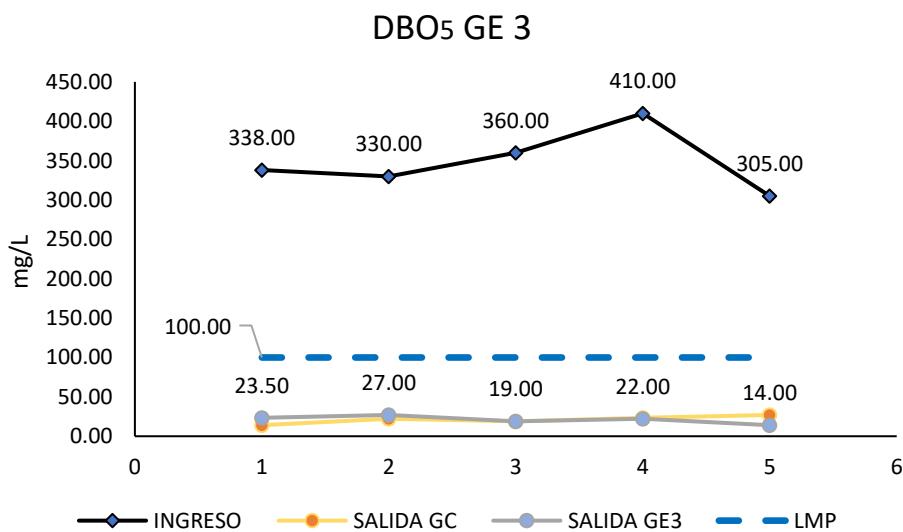
*Valores de remoción del parámetro DBO<sub>5</sub> GE3*



*Nota:* Los datos que se muestran en la figura 30 reflejan la eficiencia en la remoción de contaminantes de la demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días. En el quinto mes se registró un valor de salida de 14 mg/L y en el grupo de control se obtuvo un valor de 27 mg/L. La eficiencia de remoción alcanzó el 95.41%

**Figura 31**

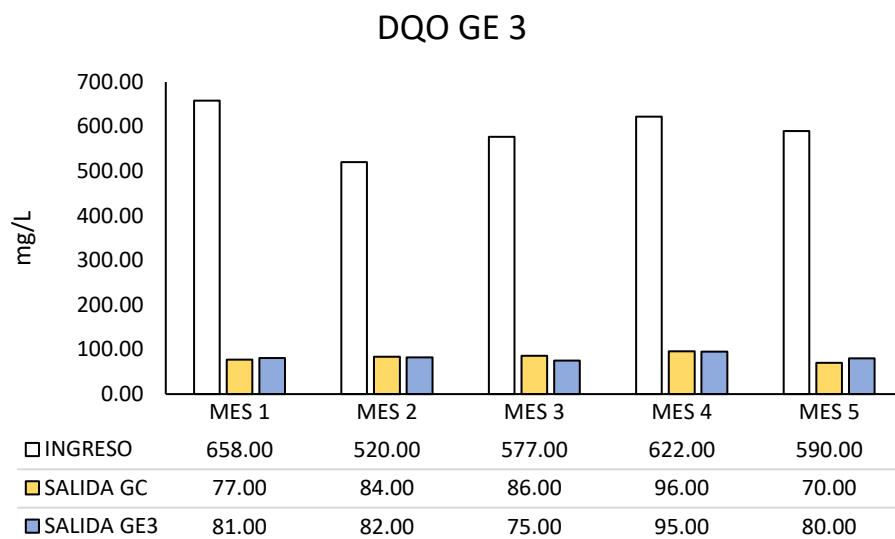
*Eficiencia de remoción del parámetro DBO<sub>5</sub> GE3*



*Nota:* En la figura 31 se verifica que los valores obtenidos en la salida del GE3 se encuentran debajo del valor de 100 mg/L establecido en el DS 003-2010 – MINAM como límite máximo permisible.

**Figura 32**

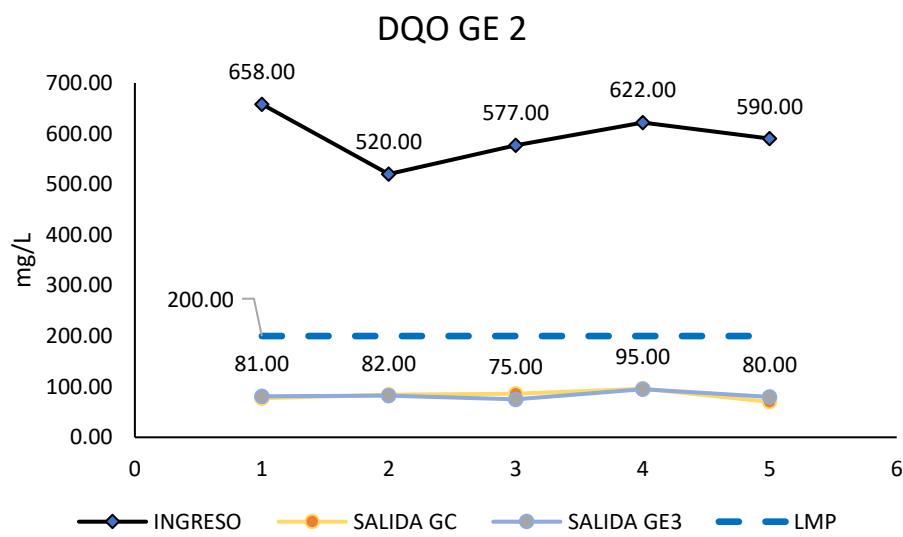
*Valores de remoción del parámetro demanda química de oxígeno GE3*



*Nota:* Los datos de la figura 32 corresponden al parámetro de la demanda química de oxígeno en el grupo experimental 3. Durante el primer mes el GE3 reportó un valor de salida de 81 mg/L y el de grupo de control fue de 77.00 mg/L. En el quinto mes se obtuvo un valor de 70 mg/L. La eficiencia de remoción fue de 86.44%

**Figura 33**

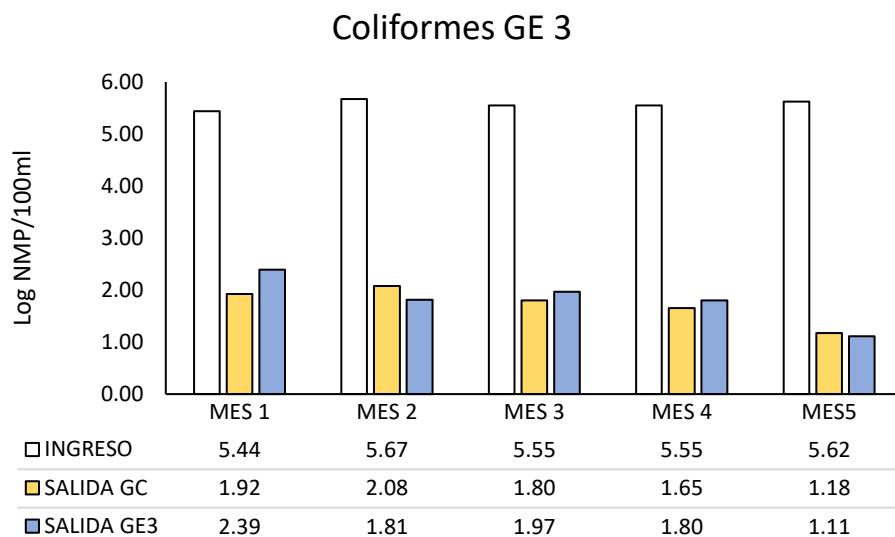
*Eficiencia de remoción del parámetro demanda química de oxígeno GE3*



*Nota:* En la figura 33 se verifica que los valores se encuentran debajo del valor de 200 mg/L establecido en el DS 003-2010 – MINAM como límite máximo permisible.

**Figura 34**

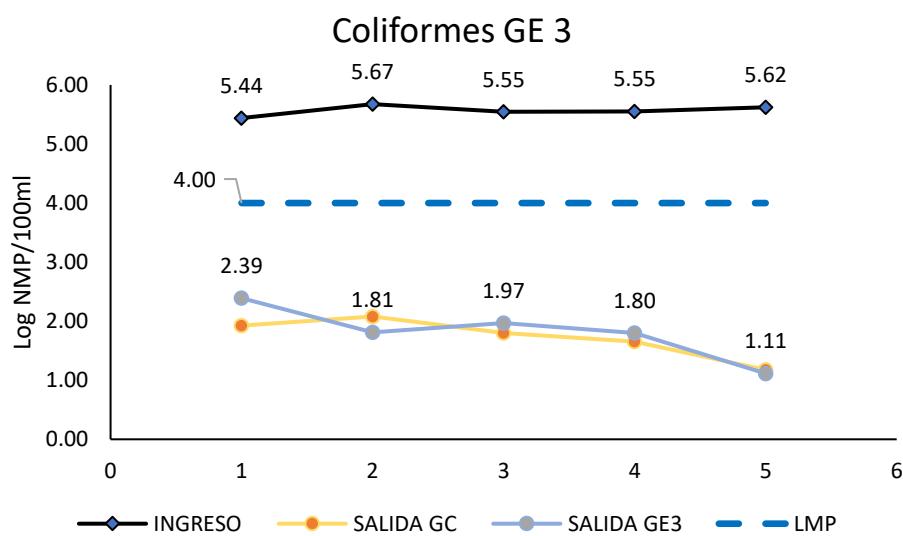
*Valores de remoción del parámetro coliformes termo tolerantes GE3*



*Nota:* En la figura 34 se verifica los valores obtenidos en la remoción de coliformes. En el primer mes de observación se obtuvo un valor de salida de 2.39 Log NMP/100ml. Durante el quinto mes se obtuvo el registro de mayor eficiencia registrándose un valor de 1.11 Log NMP/100ml.

**Figura 35**

*Eficiencia de remoción del parámetro coliformes termo tolerantes GE3*



*Nota:* En la figura 35 se verifica que los valores se encuentran debajo del valor establecido en el DS 003-2010 – MINAM como límite máximo permisible para este parámetro.

#### 4.4 Contrastación de Hipótesis

El análisis estadístico para la prueba de hipótesis se realizó mediante la prueba de hipótesis “T de Student”, tomando en cuenta que se utilizó un diseño experimental con muestras independientes. Previamente se verificó que los valores provinieran de una distribución normal mediante la prueba de Shapiro Wilk cuyos datos y comprobaciones gráficas se encuentran en el anexo 11 de esta investigación.

##### Hipótesis específica 1

**$H_0$**  = No existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en dos etapas.

**$H_A$**  = Existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en dos etapas.

Se asumió: Rechazar la  $H_0$  si “P” sig <  $\alpha$  (0.05) o aceptar la  $H_0$  si “P” sig >  $\alpha$  (0.05)

**Tabla 5**

*Contrastación de hipótesis: Turbiedad del GE1*

<b>Parámetro Turbiedad</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida GE1</b>
Media	59.50	11.72
Varianza	7.000	5.947
Observaciones	5.000	5.000
Grados de libertad	4.000	
Estadístico t	35.5204	
P(T<=t) una cola	0.000002	
Valor crítico de t (una cola)	2.132	

*Nota.* En la tabla 5 se observan los valores obtenidos del análisis de la prueba “T” de Student para dos muestras emparejadas del ingreso y salida del efluente del grupo experimental 1 y con el análisis estadístico del parámetro turbiedad.

Con el análisis estadístico efectuado a las muestras del grupo experimental 1 en el parámetro turbiedad se tiene un valor de “P” Sig. de 0.000002 que resultó menor a 0.05. En tal sentido se rechazó la hipótesis nula  $H_0$  y se aceptó la hipótesis de investigación  $H_A$  comprobándose que existe una diferencia significativa entre el nivel de ingreso y salida de agua residual urbana en el parámetro turbiedad del grupo experimental 1.

**Tabla 6***Contrastación de hipótesis: DBO<sub>5</sub> del GEI*

<b>Parámetro DBO<sub>5</sub></b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida GE1</b>
Media	348.60	18.80
Varianza	1564.8	27.70
Observaciones	5.0000	5.0000
Grados de libertad	4.0000	
Estadístico t	19.3581	
P(T<=t) una cola	0.00002	
Valor crítico de t (una cola)	2.1320	

*Nota.* En la tabla 6 se observan los valores obtenidos del análisis de la prueba “T” de Student para dos muestras emparejadas del ingreso y salida del efluente del grupo experimental 1 y con el análisis estadístico del parámetro DBO<sub>5</sub>

El análisis estadístico en el parámetro DBO<sub>5</sub> arrojó un valor de “P” Sig. de 0.00002 que resultó menor a 0.05. Se rechazó la hipótesis nula H<sub>0</sub> y se aceptó la hipótesis de investigación H<sub>A</sub> comprobándose que existe una diferencia significativa entre el nivel de ingreso y salida de agua residual urbana en el parámetro DBO<sub>5</sub> del grupo experimental 1.

**Tabla 7***Contrastación de hipótesis: DQO del GEI*

<b>Parámetro DQO</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida GE1</b>
Media	593.40	79.40
Varianza	2664.8	103.5
Observaciones	5.0000	5.0000
Grados de libertad	4.0000	
Estadístico t	19.34	
P(T<=t) una cola	0.00002	
Valor crítico de t (una cola)	2.132	

*Nota.* En la tabla 7 se observan los valores obtenidos del análisis de la prueba “T” de Student para dos muestras emparejadas del ingreso y salida del efluente del grupo experimental 1 y con el análisis estadístico del parámetro DQO

El análisis estadístico en el parámetro DQO arrojó un valor de “P” Sig. de 0.00002 que resultó menor a 0.05. Se rechaza la hipótesis nula H<sub>0</sub> y se acepta la hipótesis de investigación H<sub>A</sub> comprobándose que existe una diferencia significativa entre el nivel de ingreso y salida de agua residual urbana en el parámetro DQO del grupo experimental 1.

**Tabla 8***Contrastación de hipótesis: Coliformes termo tolerantes del GE1*

<b>Parámetro Coliformes termo tolerantes</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida GE1</b>
Media	375000.00	56.6
Varianza	5.64E+09	1.40E+03
Observaciones	5.0000	5.0000
Grados de libertad	4.0000	
Estadístico t	11.16	
P(T<=t) una cola	0.00018	
Valor crítico de t (una cola)	2.132	

*Nota.* En la tabla 8 se observan los valores obtenidos del análisis de la prueba “T” de Student para dos muestras emparejadas del ingreso y salida del efluente del grupo experimental 1 y con el análisis estadístico del parámetro Coliformes termo tolerantes.

El análisis estadístico en el parámetro Coliformes termo tolerantes arrojó un valor de “P” Sig. de 0.00018 que resultó menor a 0.05. Se rechazó la hipótesis nula  $H_0$  y se aceptó la hipótesis de investigación  $H_A$  comprobándose que existe una diferencia significativa entre el nivel de ingreso y salida de agua residual urbana en el parámetro Coliformes termo tolerantes del grupo experimental 1.

Con las pruebas estadísticas efectuadas se tuvo que, en los parámetros evaluados en el grupo experimental 1, que fueron la turbiedad, la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno y los coliformes termo tolerantes se comprobó la hipótesis de investigación y se afirmó que existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en dos etapas.

## Hipótesis específica 2

**$H_0$**  = No existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de arena en una primera etapa y de ladrillo de arcilla reciclado en una segunda etapa.

**$H_A$**  = Existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de arena en una primera etapa y de ladrillo de arcilla reciclado en una segunda etapa.

Se asumió: Rechazar la  $H_0$  si “P” sig <  $\alpha$  (0.05) o aceptar la  $H_0$  si “P” sig >  $\alpha$  (0.05)

**Tabla 9***Contrastación de hipótesis: Turbiedad del GE2*

<b>Parámetro Turbiedad</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida GE2</b>
Media	59.50	12.54
Varianza	7.00	8.30
Observaciones	5.00000	5.00000
Grados de libertad	4.00000	
Estadístico t	31.54	
P( $T \leq t$ ) una cola	0.000003	
Valor crítico de t (una cola)	2.132	

*Nota.* En la tabla 9 se observan los valores obtenidos del análisis de la prueba “T” de Student para dos muestras emparejadas del ingreso y salida del efluente del grupo experimental 2 y con el análisis estadístico del parámetro turbiedad

El análisis estadístico en el parámetro turbiedad arrojó un valor de “P” Sig. de 0.000003 que resultó menor a 0.05. Se rechazó la hipótesis nula  $H_0$  y se aceptó la hipótesis de investigación  $H_A$  comprobándose que existe una diferencia significativa entre el nivel de ingreso y salida de agua residual urbana en el parámetro turbiedad del grupo experimental 2.

**Tabla 10***Contrastación de hipótesis: DBO<sub>5</sub> del GE2*

<b>Parámetro DBO<sub>5</sub></b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida GE2</b>
Media	348.60	16.40
Varianza	1564.80	8.80
Observaciones	5.00000	5.00000
Grados de libertad	4.00000	
Estadístico t	17.81	
P( $T \leq t$ ) una cola	0.00003	
Valor crítico de t (una cola)	2.13	

*Nota.* En la tabla 10 se observan los valores obtenidos del análisis de la prueba “T” de Student para dos muestras emparejadas del ingreso y salida del efluente del grupo experimental 2 y con el análisis estadístico del parámetro DBO<sub>5</sub>

El análisis estadístico en el parámetro DBO<sub>5</sub> arrojó un valor de “P” Sig. de 0.00003 que resultó menor a 0.05. Se rechazó la hipótesis nula  $H_0$  y se aceptó la hipótesis de investigación  $H_A$  comprobándose que existe una diferencia significativa entre el nivel de ingreso y salida de agua residual urbana en el parámetro DBO<sub>5</sub> del grupo experimental 2.

**Tabla 11***Contrastación de hipótesis: DQO del GE2*

<b>Parámetro DQO</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida GE2</b>
Media	593.40	84.80
Varianza	2664.8	231.7
Observaciones	5.0000	5.0000
Grados de libertad	4.0000	
Estadístico t	27.26	
P(T<=t) una cola	0.00001	
Valor crítico de t (una cola)	2.132	

*Nota.* En la tabla 11 se observan los valores obtenidos del análisis de la prueba “T” de Student para dos muestras emparejadas del ingreso y salida del efluente del grupo experimental 2 y con el análisis estadístico del parámetro DQO

El análisis estadístico en el parámetro DQO arrojó un valor de “P” Sig. de 0.00001 que resultó menor a 0.05. Se rechazó la hipótesis nula  $H_0$  y se aceptó la hipótesis de investigación  $H_A$  comprobándose que existe una diferencia significativa entre el nivel de ingreso y salida de agua residual urbana en el parámetro DQO del grupo experimental 2.

**Tabla 12***Contrastación de hipótesis: Coliformes termo tolerantes del GE2*

<b>Parámetro Coliformes termo tolerantes</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida GE2</b>
Media	375000.00	93.00
Varianza	5.64E+09	4304
Observaciones	5.0000	5.0000
Grados de libertad	4.0000	
Estadístico t	11.15	
P(T<=t) una cola	0.00018	
Valor crítico de t (una cola)	2.13	

*Nota.* En la tabla 12 se observan los valores obtenidos del análisis de la prueba “T” de Student para dos muestras emparejadas del ingreso y salida del efluente del grupo experimental 2 y con el análisis estadístico del parámetro Coliformes termo tolerantes.

El análisis estadístico en el parámetro Coliformes termo tolerantes arrojó un valor de “P” Sig. de 0.00018 que resultó menor a 0.05. Se rechazó la hipótesis nula  $H_0$  y se aceptó la hipótesis de investigación  $H_A$  comprobándose que existe una diferencia significativa entre el nivel de ingreso y salida de agua residual urbana en el parámetro Coliformes termo tolerantes del grupo experimental 2.

Con las pruebas estadísticas efectuadas se tiene que, en los parámetros evaluados en el grupo experimental 2, que fueron la turbiedad, la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno y los coliformes termo tolerantes se comprobó la hipótesis de investigación y se afirmó que existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de arena en una primera etapa y de ladrillo de arcilla reciclado en una segunda etapa.

### Hipótesis específica 3

**H<sub>0</sub>** = No existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en una primera etapa y con arena en una segunda etapa.

**H<sub>A</sub>** = Existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en una primera etapa y con arena en una segunda etapa.

Se asumió: Rechazar la H<sub>0</sub> si sig < α (0.05) o aceptar la H<sub>0</sub> si sig > α (0.05)

**Tabla 13**

*Contrastación de hipótesis: Turbiedad del GE3*

<b>Parámetro Turbiedad</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida GE3</b>
Media	59.50	12.92
Varianza	7.00	1.58
Observaciones	5.00000	5.00000
Grados de libertad	4.00000	
Estadístico t	36.73	
P(T<=t) una cola	0.000002	
Valor crítico de t (una cola)	2.132	

*Nota.* En la tabla 13 se observan los valores obtenidos del análisis de la prueba “T” de Student para dos muestras emparejadas del ingreso y salida del efluente del grupo experimental 3 y con el análisis estadístico del parámetro turbiedad

El análisis estadístico en el parámetro turbiedad arrojó un valor de “P” Sig. de 0.000002 que resultó menor a 0.05. Se rechazó la hipótesis nula H<sub>0</sub> y se aceptó la hipótesis de investigación H<sub>A</sub> comprobándose que existe una diferencia significativa entre el nivel de ingreso y salida de agua residual urbana en el parámetro turbiedad del grupo experimental 3.

**Tabla 14***Contrastación de hipótesis: DBO<sub>5</sub> del GE3*

<b>Parámetro DBO<sub>5</sub></b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida GE3</b>
Media	348.60	21.10
Varianza	1564.80	24.05
Observaciones	5.00000	5.00000
Grados de libertad	4.00000	
Estadístico t	18.99	
P(T<=t) una cola	0.00002	
Valor crítico de t (una cola)	2.132	

*Nota.* En la tabla 14 se observan los valores obtenidos del análisis de la prueba “T” de Student para dos muestras emparejadas del ingreso y salida del efluente del grupo experimental 3 y con el análisis estadístico del parámetro DBO<sub>5</sub>

El análisis estadístico en el parámetro DBO<sub>5</sub> arrojó un valor de “P” Sig. de 0.00002 que resultó menor a 0.05. Se rechazó la hipótesis nula H<sub>0</sub> y se aceptó la hipótesis de investigación H<sub>A</sub> comprobándose que existe una diferencia significativa entre el nivel de ingreso y salida de agua residual urbana en el parámetro DBO<sub>5</sub> del grupo experimental 3.

**Tabla 15***Contrastación de hipótesis: DQO del GE3*

<b>Parámetro DQO</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida GE3</b>
Media	593.40	82.60
Varianza	2664.80	55.30
Observaciones	5.00000	5.00000
Grados de libertad	4.00000	
Estadístico t	22.81	
P(T<=t) una cola	0.00001	
Valor crítico de t (una cola)	2.13	

*Nota.* En la tabla 15 se observan los valores obtenidos del análisis de la prueba “T” de Student para dos muestras emparejadas del ingreso y salida del efluente del grupo experimental 2 y con el análisis estadístico del parámetro DQO

El análisis estadístico en el parámetro DQO arrojó un valor de “P” Sig. de 0.00001 que resultó menor a 0.05. Se rechazó la hipótesis nula H<sub>0</sub> y se aceptó la hipótesis de investigación H<sub>A</sub> comprobándose que existe una diferencia significativa entre el nivel de ingreso y salida de agua residual urbana en el parámetro DQO del grupo experimental 2.

**Tabla 16**

*Contrastación de hipótesis: Coliformes termo tolerantes del GE3*

Parámetro Coliformes termo tolerantes	Entrada	Salida GE3
Media	375000.00	95.80
Varianza	5.64E+09	7.79E+03
Observaciones	5.0000	5.0000
Grados de libertad	4.0000	
Estadístico t	11.152	
P(T<=t) una cola	0.00018	
Valor crítico de t (una cola)	2.1318	

*Nota.* En la tabla 16 se observan los valores obtenidos del análisis de la prueba “T” de Student para dos muestras emparejadas del ingreso y salida del efluente del grupo experimental 3 y con el análisis estadístico del parámetro Coliformes termo tolerantes.

El análisis estadístico en el parámetro Coliformes termo tolerantes arrojó un valor de “P” Sig. de 0.00018 que resultó menor a 0.05. Se rechazó la hipótesis nula  $H_0$  y se aceptó la hipótesis de investigación  $H_A$  comprobándose que existe una diferencia significativa entre el nivel de ingreso y salida de agua residual urbana en el parámetro Coliformes termo tolerantes del grupo experimental 3.

Con las pruebas estadísticas efectuadas se tiene que, en los parámetros evaluados en el grupo experimental 3, que fueron la turbiedad, la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno y los coliformes termo tolerantes se comprueba la hipótesis de investigación y se afirma que existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en una primera etapa y con arena en una segunda etapa.

#### 4.5 Discusión de Resultados

La discusión de resultados se realizó comparando los resultados obtenidos en esta investigación con los valores obtenidos y publicados en las revistas científicas consultadas. Se tomaron en cuenta los valores obtenidos en los parámetros físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales urbanas tratadas mediante este sistema; asimismo se tomaron en cuenta los valores obtenidos y se contrastaron con los límites máximos permisibles establecidos para los efluentes establecidos en el decreto supremo N° 003-2010-MINAM.

Por su lado, se tomaron en cuenta, para el caso que el agua obtenida pueda ser reutilizado para el riego de árboles de tallo largo, así como para su uso en riego de jardines de áreas verdes se evaluaron los estándares de calidad ambiental que se encuentran regulados en el decreto supremo N° 004-2017-MINAM.

En cuanto al diseño hidráulico se tomó en cuenta la guía de diseño de humedales verticales de Dinamarca citado por Rincón (2023) adaptando el uso de agregados locales como medio filtrante, así como el uso de ladrillo reciclado que se obtuvieron en la localidad de investigación. Asimismo, se realizaron variables en la composición del sustrato con el objeto de evitar la obstrucción y la saturación del sistema, de modo tal que se amplíe la vida útil del sistema.

Se tuvieron porcentajes de eficiencia en la remoción de los contaminantes de la Demanda Bioquímica de Oxígeno entre 94.43% y 95.74%, de la demanda Química de Oxígeno entre 86.44% y 88.47%, de la Turbiedad entre 81.67% y 76.67% y en los Coliformes termo tolerantes valores cercanos de 99.9%, comprobándose que no existen diferencias significativas entre los tres grupos experimentales.

Los resultados obtenidos de la implementación del uso de ladrillo reciclado en la implementación de un humedal de flujo vertical en un sistema de dos etapas en la depuración de aguas residuales urbanas demostraron que la aplicación del modelo es eficiente en la remoción de contaminantes físicos, químicos y biológicos.

En la remoción de la demanda química de oxígeno se obtuvo un 88.47% de eficiencia resultado que supera a lo obtenido por Li et al. (2022) que obtuvo en su investigación una eficiencia de 74.9% en la eliminación de la demanda química de oxígeno. Sobre esta diferencia es posible inferir que la concentración de contaminantes es menor en la entrada del sistema, ya que el sistema conformado con cámara de rejas y desarenador recibe las descargas de viviendas rurales, en cambio en la investigación consultada se tuvo un tratamiento con tanque Imhoff que controla la carga orgánica de viviendas ubicadas en zonas urbanas.

Por su parte, la eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno con esta combinación de etapas con ladrillo reciclado en ambas etapas fue del orden de 95.74% que supera a lo obtenido por Mena (2022) que obtuvo en su investigación una eficiencia de 72.00%. Dicho hallazgo permite concluir que este tipo de modelos que hacen uso de la arcilla cocida a través de la reutilización de ladrillo de arcilla reciclado muestran una consolidación en la remoción de este contaminante, por tanto, se comprueba lo indicado en la literatura existente y se convierte en una alternativa viable para ser utilizado en

comunidades rurales que cuenten con la implementación de unidades básicas de saneamiento como sistema de eliminación de aguas residuales urbanas.

Sobre la granulometría utilizada, se tiene que en la etapa 1 del modelo experimental se tuvo una capa de filtración con una altura de 0.50 m con una granulometría de 0.075 a 4.75 mm, asimismo tuvo una segunda capa de transición con una altura de 0.10 m y un agregado reciclado de 10 a 20 mm; finalmente la capa inferior se conformó de piedra de 20 a 60 mm. Esta granulometría es similar a la recomendada por Rincón (2023) que realizó un experimento para determinar la influencia de la granulometría en el modelo de humedal flujo vertical, de este modo se evitaron las obstrucciones en el sistema. Sobre el medio filtrante se seleccionaron manualmente las cantidades óptimas de cada fino a efectos de obtener una remoción efectiva.

En el objetivo específico 2 se implementó en el modelo experimental el uso de arena en la primera etapa y ladrillo de arcilla reciclado en la segunda etapa en la depuración de aguas residuales urbanas y los resultados demostraron que la aplicación del modelo es eficiente en la remoción de contaminantes físicos, químicos y biológicos.

El valor obtenido en la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno fue de 94.43% y resulta un valor aceptable, similar al valor obtenido por Navarro et al (2020) quien obtuvo un 98.00% de remoción, sobre esta diferencia se puede colegir que la carga orgánica que ingresó al modelo experimental presentó una variabilidad en el tiempo, debido, entre otras razones a los hábitos de los miembros de las familias y al incremento de los mismos en los meses de diciembre y enero, asimismo, es posible deducir que, tal como se indicó en la discusión del objetivo específico 1 el ingreso directo del afluente sin pretratamiento influye en la diferencia de remoción.

La publicación que realizó Rincón (2023) demostró que un correcto diseño y una correcta utilización de la granulometría evita la obstrucción del modelo, de este modo, se siguieron los esquemas utilizados en Dinamarca a efectos de seleccionar las cantidades óptimas, teniendo en la etapa 2, que es donde se realizó el refinado del tratamiento de las aguas residuales, la utilización de arenas desde 0.075 mm a 2.36 mm.

Los resultados de esta investigación fueron sometidos al análisis y a la comparación con los valores establecidos en la normativa del Perú tanto para la disposición a los cuerpos de agua regulado en el Decreto Supremo N° 03-2010-MINAM como para el reúso en el riego de vegetales de tallo alto regulado en el Decreto Supremo N° 04-2017-MINAM, concluyendo que los valores obtenidos cumplen con el límite máximo para el vertimiento final de los efluentes, sin embargo, no cumplen con los valores para el reúso del mismo,

debido a que la demanda bioquímica de oxígeno señala que el valor máximo es de 15 mg/L y se obtuvo en la investigación un valor de 17 mg/L.

Por otro lado, en lo que respecta al cumplimiento de la demanda química de oxígeno, se tiene que, en la remoción de este contaminante se obtuvo un valor de 75 mg/L, sin embargo, para el caso del reúso del agua tratada se requiere un valor máximo de 40 mg/L. Por su parte, se verificó que se obtuvo cumplimiento con los parámetros de temperatura, potencial de hidrógeno y coliformes termo tolerantes.

En el objetivo específico 3 se invirtió el uso de las celdas y se implementó en el modelo experimental el uso de ladrillo de arcilla reciclado en la primera etapa y arena en la segunda etapa en la depuración de aguas residuales urbanas y los resultados obtenidos indicaron que se cumple con la normativa del Perú para el vertimiento final de las aguas tratadas.

En la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno se obtuvo en el 5to mes de observación un valor de 14 mg/L y de acuerdo a la normativa peruana se verificó que se cumplió con el límite máximo que señala el Decreto Supremo N° 03-2010-MINAM que señala un valor de 100 mg/L, vale decir que las aguas tratadas con este modelo experimental pueden ser dispuestas a los cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneas.

Del mismo modo, los resultados de la investigación, determinaron que el valor obtenido en la remoción de la demanda química de oxígeno fue de 80 mg/L que resultó mayor a lo señalado en la normativa nacional para el reúso en el riego de vegetales de tallo alto o riego de áreas verdes urbanas, debido a que el valor máximo es de 40 mg/L, sobre este resultado se concluye que el agua residual tratada con este modelo experimental no puede ser reutilizada, y el autor considera que se requiere una etapa adicional a fin de obtener los valores establecidos en las disposiciones legales.

Asimismo, con los valores de remoción obtenidos se evaluó el porcentaje de eficiencia y se comparó con el grupo de control concluyendo que los datos obtenidos fueron menores. En el caso de la demanda bioquímica de oxígeno el valor de remoción fue de 95.41% versus el valor de 91.15% obtenido en el grupo de control. Estos valores coinciden con lo obtenido por Mena (2022) quien en su investigación obtuvo un porcentaje de remoción de 72.00%. Esta coincidencia permite asegurar que el modelo experimental con las 3 combinaciones utilizadas en la investigación permite el cumplimiento de la normativa exigida en el Perú para el vertido final de las aguas tratadas.

Por otro lado, a efectos de comparar las medias del grupo de control con los grupos experimentales se realizó un análisis de varianza, verificando que no existen diferencias estadísticas significativas entre los grupos de experimentación, es decir, las diferentes

combinaciones de tratamiento experimentados no tuvieron un efecto diferente en la depuración de las aguas residuales, no obstante, en todos los grupos se obtuvieron valores positivos y significativos en la variable dependiente tal como se demostró en la prueba de hipótesis. Para una mejor comprensión se ha incluido en el anexo 12 de esta investigación el análisis de datos efectuado mediante la prueba ANOVA y la prueba de Tukey.

Finalmente, con los resultados obtenidos es posible asegurar que el uso de ladrillo de arcilla reciclado tiene un comportamiento aceptable, para ser utilizado junto a la arena en celdas de humedales de flujo vertical en el tratamiento de aguas residuales ya que los valores de remoción cumplen con los límites establecidos en las disposiciones legales vigentes del Perú. Debe entenderse que el cuidado de la calidad de agua es una exigencia para cumplir con la sustentabilidad de las comunidades rurales que no cuentan con sistemas de saneamiento, de ese modo es posible cumplir con los objetivos de desarrollo sustentable y se mejorará la calidad de vida de estos centros poblados intervenidos.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

En este capítulo se enumeran las conclusiones que responden a los objetivos planteados en el capítulo I y a la pregunta de investigación: ¿Cuál es la influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado?

#### 1. Del objetivo general

Con los resultados experimentales se evaluó que el humedal vertical con sustrato reciclado en dos etapas demostró una eficiencia promedio del 95.20 % en la remoción de la DBO<sub>5</sub>, por tanto, existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado y evidencia su potencial como alternativa sostenible y de bajo costo de operación para comunidades rurales.

En la misma línea, el valor de la DQO a la salida del humedal vertical osciló entre 58 mg/L y 95 mg/L, lo que demostró que el sistema construido con sustrato reciclado actuó como remediador ambiental, ya que el agua residual urbana tratada en la zona de experimentación regresó a los cuerpos de agua con valores dentro de los límites máximos establecidos en la normativa peruana, que señala para este parámetro un valor máximo de 200 mg/L.

Los hallazgos de la investigación demostraron que el uso del humedal vertical permitió la mejora no solo de las condiciones de salud pública de la comunidad rural, sino que también permitió el acceso a servicios de saneamiento que incide en la mejora de calidad de vida del sector poblacional de la zona de experimentación.

#### 2. Del objetivo específico 1.

Con el humedal vertical con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en ambas etapas del sistema se determinó una eficiencia promedio de remoción del 95.74 % de la DBO<sub>5</sub> y se determinó que existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en dos etapas.

En este tratamiento se utilizó una granulometría cuya porosidad fue de 39.41 %, un coeficiente de uniformidad de 3.87 y una capacidad de infiltración de 3.53 mm/seg. Estos valores de diseño permitieron que el sistema no presente obstrucciones a lo largo de la observación de la experimentación y se evidenció que esta combinación permite extender el tiempo útil de operación del sistema.

Los valores de turbiedad obtenidos en el agua residual depurada entre 12.00 NTU y 16.20 NTU, que redujeron los malos olores en la localidad de investigación, demuestran que la implementación de este modelo tuvo un impacto social significativo en las mejoras de condiciones de salud.

### 3. Del objetivo específico 2

Los resultados experimentales a la salida del humedal vertical construido con sustrato de arena en una primera etapa y de ladrillo de arcilla reciclado en una segunda etapa determinaron en promedio de la DBO<sub>5</sub> y de la DQO un valor de salida de 16.4 mg/L y 80.8 mg/L respectivamente versus un ingreso de 338 mg/L y 658 mg/L lo que determinó que existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de arena en una primera etapa y de ladrillo de arcilla reciclado en una segunda etapa.

Esta combinación de sustratos en cada etapa demostró una eficiencia de remoción del 94.43% en promedio de la DBO<sub>5</sub> y de 78.17% en promedio de la turbiedad lo que reveló que el modelo tiene una alta capacidad de remoción de contaminantes físicos y químicos presentes en las aguas residuales urbanas.

El valor obtenido a la salida de este modelo del pH fue entre 7.1 y 7.45 unidades de pH y de la temperatura fue de 24.1°C y 25.3°C lo que permitió probar el cumplimiento de los límites establecidos en la normativa peruana para estos parámetros que señala para el pH valores de 6.5-8.5 y de <35°C para la temperatura.

### 4. Del objetivo específico 3

Con el humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en una primera etapa y por arena en una segunda etapa se determinó un valor promedio de remoción de 95.41% de la DBO<sub>5</sub> lo que determinó que existe una diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato de ladrillo de arcilla reciclado en una primera etapa y de arena en una segunda etapa

Esta combinación de etapas operó en un periodo de retención hidráulico de 2.5 días. La granulometría de la arena utilizada tuvo una porosidad de 38.07%, un coeficiente de uniformidad de 5.12 y una capacidad de infiltración de 4.00 mm/seg. Estos datos de diseño permitieron una alta capacidad de remoción de contaminantes biológicos.

El valor promedio obtenido en la remoción de coliformes termo tolerantes fue de 95.8 NMP/100 ml que se tradujo en una eficiencia cercana al 99%. Este límite obtenido evidenció que es viable la obtención de agua tratada que cumpla con la legislación peruana con un bajo requerimiento energético y sin la utilización de aditivos químicos para la desinfección de contaminantes.

## 5.2 Recomendaciones

1. Proponer a la autoridad reguladora de soluciones técnicas de saneamiento rural del Perú la creación de una norma técnica peruana basada en los resultados obtenidos. Se recomienda incorporar este modelo de combinación de etapas en los diseños tecnológicos de saneamiento rural, especialmente en zonas con suelos con baja permeabilidad, debido a que los valores de remoción obtenidos cumplen con la normativa peruana para el vertido de aguas tratadas a los cuerpos de agua.
2. Recomendar a las unidades formuladoras de proyectos de inversión de los gobiernos locales la formulación y replicación de este modelo en comunidades con similares condiciones geográficas y climáticas. Del mismo modo se recomienda para el tratamiento de aguas residuales grises y urbanas la utilización de otros materiales reciclados que provengan de la construcción como el hormigón reciclado, escoria o cerámica triturada.
3. En proyectos de saneamiento rural ejecutados con soluciones que incluyan unidades básicas de saneamiento se recomienda a las autoridades de los gobiernos locales incorporar este modelo de depuración de aguas residuales urbanas como tratamiento primario en agrupamiento de tres a más viviendas ya que el sistema experimentado evidenció un eficiente control de malos olores y control de presencia de vectores transmisores de enfermedades.
4. Se recomienda a futuros investigadores realizar observaciones durante periodos de presencia de lluvias con mayor intensidad a efectos de analizar y evaluar el reúso de las aguas residuales tratadas en usos no potables debido a que en dichos periodos la carga orgánica que ingresa a las celdas de tratamiento es menor.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y VIRTUALES

- Agaton, C. y Guila, P. (2023). *Ecosystem Services of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment.* Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/371134353\\_Ecosystem\\_Services\\_of\\_Constructed\\_Wetlands\\_for\\_Wastewater\\_Treatment/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/371134353_Ecosystem_Services_of_Constructed_Wetlands_for_Wastewater_Treatment/citation/download)
- Basaldúa, A., Alcaraz, E., Martínez, D. (2025). La edad del agua subterránea: principios y aplicación de trazadores ambientales. Disponible en <https://revistas.unlp.edu.ar/geoacta/article/view/19352>
- Comisión Económica para América latina y el Caribe. (2022). *Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe.* Obtenido de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/48613-oportunidades-la-economia-circular-tratamiento-aguas-residuales-america-latina>
- Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA (2006). *Reglamento nacional de edificaciones.* Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM (2010). Aprueban Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento Residuales Domésticas o Municipales.
- Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM (2017). Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias.
- Deng, S., Chen, J., Chang, J. (2021). *Application of biochar as an innovative substrate in constructed wetlands/biofilters for wastewater treatment: performance and ecological benefits.* Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126156>
- Feifei, J., Xinzhen, Z., Zhe, K. (2024). Perspectivas sobre el tratamiento neutro en carbono de aguas residuales rurales mediante humedales artificiales: una revisión del desarrollo actual y la dirección futura. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935124017018>
- Fernández, A. (2020). *Aguas residuales en el Perú, problemática y uso en la agricultura.* Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4516>
- Gobierno Regional de Piura. (2020). *Plan regional de saneamiento.* Obtenido de <https://www.regionpiura.gob.pe/documentos/resoluciones/php7bSidy.pdf>
- Hasin, K., Bhunia, P., (2022). Efecto de las raíces de las plantas sobre la obstrucción y el rendimiento del tratamiento de un vermifiltro de flujo subterráneo horizontal para

- aguas residuales de productos lácteos. Disponible en [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000696](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000696)
- Hernández, R. F. (2014). *Metodología de la investigación*. México D.F: McGraw - Hill.
- Herrera, D., Mejía, G., Cuevas, R., Arévalo, M., Guillén, G. (2020). *Sistema acoplado reactor anaerobio con deflectores-humedal artificial como alternativa para reúso de agua residual en riego de áreas verdes*. Obtenido de file:///C:/Users/Admin/Downloads/53643-Texto%20del%20art%C3%ADculo-164345-1-10-20210510.pdf
- Hui, Z., Hu, N., Qinhuia, W., Chen, Y., lei, H.(2022) How to select substrate for alleviating clogging in the subsurface flow constructed wetland. Obtenido en <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154529>
- Hube, S., Zagout, T., Ogmundarson, O., Olof, H., Wu, B. (2023). Humedales artificiales con hormigón reciclado para el tratamiento de aguas residuales en climas fríos: evaluación del rendimiento y del ciclo de vida. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166778>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). Formas de acceso al agua y saneamiento básico. Obtenido de <https://m.inei.gob.pe/biblioteca-virtual/boletines/formas-de-acceso-al-agua-y-saneamiento-basico-9343/1/>
- Li, H., Zhang, Y., Wu, L., Jin, Y., Gong, Y., Li, A., Li, J., Li, F. (2021). Áridos reciclados de residuos de construcción y demolición como sustratos de humedales para la eliminación de contaminantes. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127766>
- Li, Y., Wang, J., Lin X., Wang, H., Lia, H., Li, J. (2022). Efectos de purificación de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción como relleno de humedales artificiales. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103335>
- Li, Q., Zhou, R., Zeng, F., Li, D., Tian, H., Sun, T., Zeng, S., An, S., Zhao, D. (2025) Enhancing the availability of construction waste as substrate for constructed wetlands—through mixing substrates and adjusting C/N ratio. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127017>.
- Maletta , H., (2019). Hacer ciencia. Teoría y práctica de la producción científica: Universidad del Pacífico.

- Masharqa, A., Al Tardeh, S., Milh, R. y Bol, R. (2023). Humedales verticales e híbridos construidos como técnica sostenible para mejorar la calidad de las aguas residuales domésticas. Disponible en <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/19/3348>
- Mateus, D. P. (2020). Evaluación de mezclas estratificadas de residuos sólidos como rellenos de humedales artificiales bajo diferentes modos de operación. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119986>
- Matos, A., Mateus, P., Renan, A., Von Sperling, M. (2020). Influence factors in the adjustment of parameters of the modified first order kinetics equation used to model constructed wetland systems. Obtenido de <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v41i1.36709>
- Mena, A. (2022). Eficiencia del sistema de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos. Obtenido de <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/18006>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2017). Política nacional de saneamiento 2017-2021. Obtenido de <https://ww3.vivienda.gob.pe/transparencia/documentos/PNSaneamiento-2017-2021.pdf>
- Mlih, R., BydbBek, F., Klumpp, E., Yaghi, N., Bol, R., Wenk, J. (2020). Light-expanded clay aggregate (LECA) as a substrate in constructed wetlands@A review. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105783>.
- Municipalidad Provincial de Morropón - Chulucanas. (2020). Diagnóstico ambiental de la provincia de Morropón.
- Navarro, A.. Beissos, F., Marc Bec, J., Jaumejoan, T. (2020). Desempeño de humedales construidos de flujo vertical en el tratamiento de aguas residuales municipales. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/4435/443565548001/html/>
- Obeng, E., Korkor, H., Akodwaa-Boadi, K., Taylor, T., Kusi, I., Appiah-Effah, E. (2023). Recycled clay bricks and palm kernel shell as constructed wetland substrate for wastewater treatment: An engineered closed circuit circular economy approach. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103324>.
- Pérez, Y.A., García Cortés, D.A., Jauregui Haza, U.J. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. Ecosistemas 31(1): 2279. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2279>
- Programa de las Naciones Unidas Hábitat y Organización Mundial de la Salud. (2021). Progreso en el tratamiento de las aguas residuales. Obtenido de

[https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/10/sdg6\\_indicator\\_report\\_631\\_progres\\_s-on-wastewater-treatment\\_2021\\_es.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/10/sdg6_indicator_report_631_progres_s-on-wastewater-treatment_2021_es.pdf)

Programa Nacional de Saneamiento Urbano. (2015). Líneas de intervención en saneamiento urbano. Obtenido de

[https://www2.congreso.gob.pe/sicr/comisiones/2015/com2015precuegenrep.nsf//pubweb/B94CDF62E17321CC05257FC40075EAB0/\\$FILE/SUSTENTACION\\_PROG\\_NACIONAL\\_SANEAMIENTO\\_URBANO.PDF](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/comisiones/2015/com2015precuegenrep.nsf//pubweb/B94CDF62E17321CC05257FC40075EAB0/$FILE/SUSTENTACION_PROG_NACIONAL_SANEAMIENTO_URBANO.PDF)

Ramirez, D. (2021). Sistema de medición y control de temperatura para un prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales. Obtenido de <https://revistas.unisimon.edu.co/index.php/innovacioning/article/view/4305/6023>

Roces, E. (2021). Usos geotécnicos de la arcilla expandida. Obtenido de <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2450>

Rincón, A. (2023). Diseño de humedales construidos para tratamiento de aguas residuales domésticas y aguas ricas en metales. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/375794306\\_Diseno\\_de\\_humedales\\_constructos\\_para\\_tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales\\_domesticas\\_y\\_aguas\\_ricas\\_en\\_metales#citations](https://www.researchgate.net/publication/375794306_Diseno_de_humedales_constructos_para_tratamiento_de_aguas_residuales_domesticas_y_aguas_ricas_en_metales#citations)

Santos, J., Rodrigues, S., Magalhaes, M., Rodrigues, K., Pereira, L., Marinho, G. (2024) Una revisión del estado de arte sobre humedales construidos para el tratamiento y reutilización de aguas residuales. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100973>

Saeed, T., Muntahaa, S., Rashid, M., Guangzhi, S., Hasnat, A. (2022). Tratamiento de aguas residuales industriales en humedales artificiales repletos de materiales de construcción y subproductos agrícolas. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.115>

Saeed, T., Khan, T: (2019) Constructed wetlands for industrial wastewater treatment: Alternative media, input biodegradation ratio and unstable loading. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103042>.

Saldías, C. y Rodriguez, M. (2025). Avances y desafíos del tratamiento descentralizado de aguas residuales en América Latina: revisión sistemática 2013-2024 Disponible en [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2518-44312025000100005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2518-44312025000100005&script=sci_arttext)

- Tang, Y., Yao, X., Chen, Y., Zhou, Y., Zhu, D., Zhang, Y., Zhang, T., Peng, Y. (2020). Experiment research on physical clogging mechanism in the porous media and its impact on permeability. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s10035-020-1001-8>
- Tebitendwa, S., Cowan, A. (2021). Vertical-horizontal subsurface flow hybrid constructed wetlands for municipal wastewater treatment in developing countries: A review. Obtenido de <https://academicjournals.org/journal/AJB/article-full-text-pdf/4291F9467740.pdf>
- Simachew, D., Tarekegn, B., Argaw, A. (2020) Uso de ladrillos rotos para mejorar la eliminación de nutrientes en humedales artificiales de flujo subsuperficial que reciben aguas residuales hospitalarias. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.037>
- Vera, I., García, J., Sáez K., Moragas, L. y Vidal G. (2021) Performance evaluation of eight years experience of constructed wetland systems in Catalonia as alternative treatment for small communities. Disponible en [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=es&user=FTfsRKsAAAAJ&citation\\_for\\_view=FTfsRKhAAAAJ:u-x6o8ySG0sC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=FTfsRKsAAAAJ&citation_for_view=FTfsRKhAAAAJ:u-x6o8ySG0sC)
- Zhao, J., Mo, F., Wu, J., Hu, B., Chen, Y., Yang, W. (2020). Clogging simulation of horizontal subsurface-flow constructed wetland. Obtenido de <https://doi.org/10.1089/ees.2016.0025>

## VII. ANEXOS

### ANEXO 1: Valores Establecidos como Límites Máximos Permitidos para Efluentes

Parámetros	Unidad de medida	LMP para vertidos a cuerpos de agua
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes termo tolerantes	NMP/100 mL	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	100
Demanda Química de oxígeno (DQO)	mg/L	200
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6.5-8.5
Sólidos totales en suspensión	mg/L	150
Temperatura	°C	<35

*Nota.* Información sobre los parámetros a analizar y los límites máximos permisibles previo al vertimiento a cuerpos de agua. Fuente: Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM (2010).

### Estándares de Calidad Ambiental

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales	D2: Bebida de animales
Aceites y grasas	mg/L	5	10
Bicarbonatos	mg/L	518	**
Cianuro Wad	mg/L	0.1	0.1
Cloruros	mg/L	500	**
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	100 (a)	100 (a)
Conductividad	(uS/cm)	2500	5000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	15	15
Demanda Química de oxígeno (DQO)	mg/L	40	40
Detergentes (SAAM)	mg/L	0.2	0.5
Fenoles	mg/L	0.002	0.01
Fluoruros	mg/L	1	**
Nitratos (NO <sub>3</sub> -N) + Nitritos (NO <sub>2</sub> -N)	mg/L	100	100
Nitritos (NO <sub>2</sub> -N)	mg/L	10	10
Oxígeno disuelto (valor mínimo)	mg/L	> 4	> 5
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6.5-8.5	6.5-8.4
Sulfatos	mg/L	1000	1000
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3
Coliformes termotolerantes	NMP/100ml	1000/2000	1000

Nota. Parámetros a evaluar en los efluentes del sistema de tratamiento de aguas residuales para usos no potables como riego de vegetales o bebida de animales. Fuente: Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM (2017).

## ANEXO 2

Matriz de Consistencia											
Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	Variable	Dimensiones	Indicadores	Instrumento de recolección de datos	Metodología	Población y muestra			
¿Cuál es la influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado?	Objetivo General	Hipótesis Nula ( $H_0$ )	Variable Independiente	Humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado	Propiedades físicas	Porcentaje de humedad	Método de ensayo NTP 339.185	Tipo de investigación aplicada, tecnológica, longitudinal, prospectivo y cuantitativo			
						Coeficiente de uniformidad	Método de ensayo NTP 400.012				
	Determinar la influencia en la depuración de aguas residuales urbanas de un humedal de flujo vertical construido en dos etapas con sustrato reciclado.	No existe diferencia significativa en la depuración de aguas residuales urbanas entre la entrada y salida de un humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado.				Peso específico y absorción	Método de ensayo NTP 400.021				
						Peso unitario	Método de ensayo NTP 400.017				
		Propiedades hidráulicas			Porosidad	Método de ensayo NTP 400.036					
					Capacidad de infiltración	Ensayo de campo					
	Objetivos Específico	Hipótesis Alterna ( $H_a$ )	Variable Dependiente	Depuración de aguas residuales urbanas	Propiedades físicas	Turbiedad	Turbidimento HI 93703	3 tratamientos con 5 mediciones cada uno para determinar las propiedades de las aguas residuales depuradas			
						Demandा bioquímica de oxígeno	Ensayo de laboratorio Método APHA				
					Propiedades químicas	Demandा química de oxígeno	Ensayo de laboratorio Método APHA				
					Propiedades biológicas	Coliformes termotolerantes	Ensayo de laboratorio Método APHA	Diseño de pre y post prueba con grupo de control			

### ANEXO 3

Matriz de Operacionalización de Variables						
Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos de recolección de datos	Escala de medición
<b>Variable Independiente:</b> Sistema de humedal de flujo vertical construido con sustratos reciclados	El sistema de humedales construidos de flujo vertical es un modelo creado en Francia que sirve para el tratamiento y depuración de contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas. Se compone de dos etapas de humedales construidos de flujo sub superficial de tipo de flujo vertical, conformado por sustratos seleccionados como arenas y gravas (Obeng et al., 2023).	Las características físicas del sustrato de humedales construidos incluyen el porcentaje de humedad, el tamaño y peso de la partículas para filtrar contaminantes. Las características hidráulicas como la porosidad y la capacidad de infiltración son claves para la permeabilidad del sistema (Obeng et al., 2023).	Propiedades físicas	Porcentaje de humedad	Método de ensayo NTP 339.185	Razón
				Coeficiente de uniformidad	Método de ensayo NTP 400.012	
				Peso específico y absorción	Método de ensayo NTP 400.021	Razón
				Peso unitario	Método de ensayo NTP 400.017	
			Propiedades hidráulicas	Porosidad	Método de ensayo NTP 400.036	Razón
				Capacidad de infiltración	Método de ensayo de campo	
<b>Variable dependiente:</b> Depuración de aguas residuales urbanas	Las aguas residuales urbanas provienen de los hogares, industria, servicios y de las escorrentías urbanas que están localizadas geográficamente. Para la depuración se deben remover los contaminantes del tipo físico, químico y biológico presentes en las aguas residuales (D.S. N° 011-2006-VIVIENDA).	Las aguas residuales urbanas se caracterizan de acuerdo a los contaminantes presentes en ella. El objeto de la depuración es mejorar los contaminantes físicos, químicos y biológicos y cumplir normas de calidad del cuerpo receptor (D.S. N° 011-2006-VIVIENDA).	Propiedades físicas	Turbiedad	Turbidímetro HI 93703	Razón
			Propiedades químicas	Demandा bioquímica de oxígeno	Método APHA	Razón
				Demandা química de oxígeno	Método APHA	Razón
			Propiedades biológicas	Coliformes termotolerantes	Método APHA	Razón

#### ANEXO 4: Instrumentos de recolección de datos

<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA ESCUELA DE POSGRADO PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL</b>							
<b>INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS</b> <b>VARIABLE: HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL CON SUSTRATO RECICLADO</b>							
Ensayo:	Coeficiente de uniformidad (Adaptado de método de ensayo NTP 400.012)						
Fecha:							
Descripción del material:							
Muestras:							
<b>MEDIO FILTRANTE 1</b>							
Tamices ASTM	Abertura tamiz (mm)	% retenido	% acumulado	% que pasa acumulado	D10	D60	% de arenas
<b>% pasante N° 200</b>							
<b>Coeficiente de uniformidad</b>							
<b>MEDIO FILTRANTE</b>							
Peso inicial				GRAVA (Pasa 3", retiene N°4)			
ARENA (Pasa N°4, retiene N°200)				Contenido de humedad (%):			
Módulo de fineza				PASANTE N° 200			

<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA ESCUELA DE POSGRADO PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL</b>						
Ensayo:	Peso específico y absorción (Adaptado de método de ensayo NTP 400.021)					
Fecha:						
Descripción del material:						
Muestras:						
<b>MEDIO FILTRANTE</b>						
Descripción	Muestra 1	Muestra 2		M1	M2	Prom
Peso del frasco mas agua aforado (gr)			Pem: Peso específico de masa seca (gr/cm <sup>3</sup> )			
Peso de la muestra seca la horno (gr)			PeSSS: Peso específico de masa saturada superficialmente seca (gr/cm <sup>3</sup> )			
Peso de la muestra saturada superficialmente seca (gr)			Pea: Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )			
Peso del frasco mas agua mas muestra aforado (gr)			Ab: absorción de agua (%)			



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
ESCUELA DE POSGRADO**

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL**

**INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

**VARIABLE: HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL CON SUSTRATO RECICLADO**

Ensayo:	Porcentaje de humedad (Adaptado de método de ensayo NTP 339.185)		
Fecha:			
Descripción del material:			
Muestras:			
<b>MEDIO FILTRANTE 1</b>			
Peso suelo húmedo + tara (gr):		Peso tara (gr):	
Peso suelo seco + tara (gr):		Peso agua (gr):	
Peso suelo seco (gr):		Peso unitario (gr/cm <sup>3</sup> ):	
% de Humedad:			
<b>MEDIO FILTRANTE 2</b>			
Peso suelo húmedo + tara (gr):		Peso tara (gr):	
Peso suelo seco + tara (gr):		Peso agua (gr):	
Peso suelo seco (gr):		Peso unitario (gr/cm <sup>3</sup> ):	
% de Humedad:			



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
ESCUELA DE POSGRADO**

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL**

**INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

**VARIABLE: HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL CON SUSTRATO RECICLADO**

Ensayo:	Porosidad (Adaptado de método de ensayo NTP 400.036)		
Fecha:			
Descripción del material:			
Muestras:			
<b>MEDIO FILTRANTE 1</b>			
Peso específico (gr/cm <sup>3</sup> ):		Peso unitario del agregado (gr/cm <sup>3</sup> ):	
Peso unitario del agua		Peso agua (gr):	
% de Porosidad:			
<b>MEDIO FILTRANTE 2</b>			
Peso específico (gr/cm <sup>3</sup> ):		Peso unitario del agregado (gr/cm <sup>3</sup> ):	
Peso unitario del agua		Peso agua (gr):	
% de Porosidad:			
Ensayo:	Capacidad de infiltración		
Fecha:			
Descripción del material:			
Muestras:			
<b>MEDIO FILTRANTE 1</b>			
Volumen de arena (mm):		Tiempo inicio:	
Cantidad de agua (ml)		Tiempo final:	
Capacidad de infiltración (mm/seg):			



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
ESCUELA DE POSGRADO  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL**

**INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

**VARIABLE: DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS**

Ensayo:			
Fecha:			
Descripción del material:			
Muestras:			
<b>MUESTRA 1</b>			
<i>Fecha</i>		<i>Reactivos</i>	
<i>Tipo de frasco</i>		<i>Volumen de muestra</i>	
<i>Hora de toma de muestra</i>		<i>Preservante</i>	
<b>AFLUENTE 1 ETAPA 1</b>			
<i>Turbiedad</i>		<i>Temperatura</i>	
<i>DBO<sub>5</sub></i>		<i>DQO</i>	
<i>pH</i>		<i>Coliformes</i>	
<b>EFLUENTE 1 ETAPA 1</b>			
<i>Turbiedad</i>		<i>Turbiedad</i>	
<i>DBO<sub>5</sub></i>		<i>DBO<sub>5</sub></i>	
<i>pH</i>		<i>pH</i>	
<b>AFLUENTE 2 ETAPA 1</b>			
<i>Turbiedad</i>		<i>Temperatura</i>	
<i>DBO<sub>5</sub></i>		<i>DQO</i>	
<i>pH</i>		<i>Coliformes</i>	
<b>EFLUENTE 2 ETAPA 1</b>			
<i>Turbiedad</i>		<i>Turbiedad</i>	
<i>DBO<sub>5</sub></i>		<i>DBO<sub>5</sub></i>	
<i>pH</i>		<i>pH</i>	
<b>DATOS DE LA MUESTRA</b>			
<i>Hora</i>		<i>Laboratorio</i>	
<i>Operador</i>		<i>Observaciones</i>	
<i>Custodia</i>			

**ANEXO 5: Reciclado de ladrillo de arcilla  
Ensayo de capacidad de infiltración in situ del medio filtrante**



1



2



3



4



5



6

*Nota:* Fotografías del 1 al 6. Procedimiento de selección del sustrato reciclado y ensayos de infiltración.

## ANEXO 6: Memoria de cálculo de diseño

### A. Cálculo de población y caudal de diseño

#### A.1 Cálculo de coeficiente de crecimiento anual

$$r = \left( \frac{P_f}{P_o} \right)^{\frac{1}{t_f - t_o}} - 1 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

r : Coeficiente de crecimiento anual

P<sub>f</sub> : Población futura (censo 2007: 8753 habitantes)

P<sub>o</sub> : Población actual (censo 2017: 9410 habitantes)

t : Tiempo en años

$$r = \left( \frac{9410}{8753} \right)^{\frac{1}{10}} - 1$$

$$r = 1.0756^{0.1} - 1$$

$$\mathbf{r = 0.01}$$

#### A.2 Cálculo de población actual del sector El Ala

$$P_a = N^o \text{ lotes} \times \text{dens} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

P<sub>a</sub> : Población actual

Dens. : Densidad de 5 habitantes por lote según RNE

$$P_a = 7 \times 5$$

$$\mathbf{P_a = 35 \text{ habitantes}}$$

#### A.3 Cálculo de población futura

Se calculó utilizando la comparación de dos métodos con las siguientes ecuaciones:

$$P_f = P_o (1 + rt) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Ecuación método aritmético

$$P_f = P_o (1 + r)^t \quad (\text{Ecuación 4})$$

Ecuación método geométrico

Donde:

P<sub>f</sub> : Población futura

P<sub>o</sub> : Población actual 35 hab.

r : Coeficiente de crecimiento anual

t : Tiempo en años

$$P_f = 35 (1 + 0.01(20))$$

Valor método aritmético

$$P_f = 37 \text{ habitantes}$$

$$P_f = 35 (1 + 0.01)^{20}$$

Valor método geométrico

$$P_f = 37 \text{ habitantes}$$

#### A.4 Cálculo del periodo de diseño

Es el número de años en los cuales la planta de tratamiento de aguas residuales debe prestar el servicio en el sector El Ala de manera eficiente se calculará usando la fórmula propuesta por Simón Arocha:

$$X_1 = \frac{2.6 (1 - a)^{1.12}}{r} + \frac{0.3 (1 - a) X_0^{0.85}}{r^{0.5}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

X<sub>1</sub> : Periodo de diseño

a : Factor de escala de economía (0.45)

r : Tasa de interés (0.08)

X<sub>0</sub> : Demanda actual entre demanda esperada (0.99)

$$X_1 = \frac{2.6 (1 - 0.45)^{1.12}}{0.08} + \frac{0.3 (1 - 0.45) 0.99^{0.85}}{0.08^{0.5}} = 17.22 \text{ años}$$

Se aproxima al valor del periodo de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales del sector El Ala en **20 años**.

#### A.5 Cálculo del caudal medio diario

Se calculó de la siguiente manera:

$$Qm = \frac{Pf \times Dot.}{86400} \times \% Ctr \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

Pf : Población futura (36 habitantes)

Dot. : Dotación (220 lts/hab/día) (R. N.º 2716-2018-ANA-AAA-JZ-V)

Ctr : Contribución (factor de retorno 80%)

$$Qm = \frac{36 \text{ hab} \times 220 \text{ lts/hab/dia}}{86400} \times 80\%$$

$$\mathbf{Qm = 0.07 \text{ lts/s}}$$

#### A.6 Cálculo del caudal máximo diario y horario

Se obtiene mediante la siguiente ecuación

$$Qmd = k1 \times Qm \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$Qmh = k2 \times Qm \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

Qmd : Caudal máximo diario

Qmh : Caudal máximo horario

K1 : Coeficiente (1.3 en zonas urbanas y rurales)

K2 : Coeficiente (1.8-2.5 en zonas urbanas y 1.5 en zonas rurales)

Qm : Caudal medio diario

##### Caudal máximo diario

$$Qmd = 1.3 \times 0.07 \frac{\text{lts}}{\text{s}}$$

$$\mathbf{Qmd = 0.09 \text{ lts/s}}$$

##### Caudal máximo horario

$$Qmh = 2.5 \times 0.65 \text{ lts/s}$$

$$\mathbf{Qmh = 0.18 \text{ lts/s}}$$

### B. Cálculo del diseño de tratamiento preliminar: cámara de rejas

#### B.1 Cálculo del área efectiva (Au)

$$Au = \frac{Qmh}{Vr} / 1000 \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

Qmh : Caudal máximo horario

Vr : Velocidad entre rejas (0.70m/s)

Área efectiva

$$Au = \frac{1.7 \text{ m}^3/\text{s}}{0.70 \text{ m/s}} / 1000$$

$$Au = 0.1 \text{ m}^2$$

#### B.2 Cálculo del coeficiente geométrico (E)

$$E = \frac{a}{(a+e)} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

E : coeficiente geométrico

a : espaciado entre barras ( 1")

e : espesor de las barras (1/4")

##### Coeficiente geométrico

$$E = \frac{\frac{1}{4} \text{ pulg}}{\frac{1}{4} \text{ pulg}}$$

$$E = 0.80$$

**B.3 Cálculo del área del canal (Ac)**

$$Ac = \frac{Au}{E} \quad (Ecuación 11)$$

Donde:

Ac : Área del canal mínimo

Au : Área efectiva

E : Coeficiente geométrico: 0.80,

Área del canal

$$Ac = \frac{0.1}{0.80}$$

$$Ac = 0.0012 \text{ m}^2$$

**B.4 Cálculo del tirante máximo (Ymax)**

$$Y_{max} = \frac{Ac}{B} \quad (Ecuación 12)$$

Donde:

Ymax : Tirante máximo del canal de rejas

Ac : Área del canal

B : Ancho del canal (0.30)

Tirante máximo (Ymax)

$$Y_{max} = \frac{0.001}{0.30}$$

$$Y_{max} = 0.004 \text{ m}$$

**B.5 Área mínima de la cámara de rejas (Amin)**

$$A_{min} = B \times Y_{min} \quad (Ecuación 13)$$

Donde:

Ymin : Tirante mínimo del canal de rejas

Amin : Área mínima del canal

B : Ancho del canal (0.30)

Área mínima (Amin)

$$A_{min} = 0.03 \times 0.30$$

$$A_{min} = 0.01 \text{ m}^2$$

**B.6 Área mínima de la cámara de rejas (Amin)**

$$A_{min} = B \times Y_{min} \quad (Ecuación 14)$$

Donde:

Ymin : Tirante mínimo del canal de rejas

Amin : Área mínima del canal

B : Ancho del canal (0.30)

Área mínima (Amin)

$$A_{min} = 0.03 \times 0.30$$

$$A_{min} = 0.01 \text{ m}^2$$

**B.7 Longitud de la cámara de rejas (L)**

$$L = Ph + L' + P + By \quad (Ecuación 15)$$

Donde:

L : Longitud de la cámara de rejas

Ph : Proyección horizontal de rejas (0.91 m)

L' : Longitud de transición (1.30 m)

P : Plataforma de control (0.60 m)

By : By pass (0.65 m)

Longitud (L)

$$L = 0.91 + 1.30 + 0.60 + 0.65$$

$$L = 3.46 \text{ m}$$

**B.8 Nivel máximo de agua en la cámara de rejas (dmax)**

$$d_{max} = \frac{Q_{mh}}{V \times B} \quad (Ecuación 16)$$

Donde:

$d_{max}$  : Nivel máximo de agua

$Q_{mh}$  : Caudal máximo horario

$V$  : Velocidad a través de la reja limpia (1.30 m)

$B$  : Ancho del canal (0.30 m)

Nivel máximo de agua ( $d_{max}$ )

$$d_{max} = \frac{0.05}{0.70 \times 0.30}$$

$$d_{max} = 0.023 \text{ m}$$

**B.9 Altura de la reja (H)**

$$H = Y_{max} + BL \quad (Ecuación 17)$$

Donde:

$H$  : Altura de la reja

$Y_{max}$  : Tirante máximo

$BL$  : Borde libre (0.70 m)

Altura de la reja (H)

$$H = 0.0004 + 0.70$$

$$H = 0.704 \text{ m} \text{ (se aproxima a 0.71 m)}$$

**B.10 Longitud de la reja (Lreja)**

$$L_{reja} = H / \operatorname{sen}\theta \quad (Ecuación 18)$$

Donde:

$L_{reja}$  : Longitud de la reja

$H$  : Longitud de la reja

$\theta$  : Inclinación de la barra ( $60^\circ$ )

Longitud la reja (Lreja)

$$L_{reja} = 0.71 / \operatorname{sen} 60^\circ$$

$$H = 0.82 \text{ m}$$

**B.11 Número de barras que conforman la reja (Nbarras)**

$$Nbarras = \frac{(B - a)}{(e + a)} \quad (Ecuación 19)$$

Donde:

$Nbarras$  : Número de barras

$B$  : Ancho del canal

$a$  : Separación libre entre cada barra (0.0254 m)

$e$  : Espesor de la barra (0.0064 m)

Número de barras (Nbarras)

$$Nbarras = \frac{(0.30 - 0.0254)}{(0.0064 + 0.0254)}$$

$$Nbarras = 9 \text{ unid}$$

**B.12 Cálculo del radio hidráulico (RH)**

$$RH = \frac{Ac}{(2Y_{max} + B)} \quad (Ecuación 20)$$

Donde:

$RH$  : Radio hidráulico

$Ac$  : Área mínima del canal

$Y_{max}$  : Tirante máximo

$B$  : Ancho del canal

Radio hidráulico (R)

$$RH = \frac{0.0012}{(2(0.004) + 0.30)}$$

$$RH = 0.004 \text{ m}$$

### B.13 Pendiente del canal (S)

$$S = \left( \frac{Q_{max} \times n}{A_c \times R_H^2} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde:

$Q_{max}$  : Tirante máximo

$n$  : Coeficiente de rugosidad 0.013

$A_c$  : Área del canal

$RH$  : Radio hidráulico

Pendiente del canal (S)

$$S = \left( \frac{2.09 * 0.013}{(0.004 * 0.011(2/3))} \right)^2$$

$$S = 5.19 \%$$

### B.14 Velocidad antes de las rejas (Va)

$$V_a = \frac{Q_{max}}{A_c} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Donde:

$V_a$  : Velocidad antes de las rejas

$Q_{max}$  : Tirante máximo

$A_c$  : Área del canal

Velocidad antes de las rejas (Va)

$$V_a = \frac{2.09}{(1000 * 0.004)}$$

$$V_a = 0.56 \text{ m/s}$$

### B.15 Velocidad con colmatación (Vb)

$$V_b = \frac{V}{t} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Donde:

$V_b$  : Velocidad con colmatación

$V$  : Velocidad máxima en la rejilla

$t$  : 50% obstrucción en las rejas

Velocidad con colmatación (Vb)

$$V_b = \frac{0.70}{0.05}$$

$$V_b = 1.40 \text{ m/s}$$

### B.16 Pérdida de carga (Hv)

$$H_v = \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Ecuación 24})$$

Donde:

$H_v$  : Pérdida de carga

$V$  : Velocidad máxima en la rejilla (0.70 m/s)

$g$  : Gravedad 9.81 m/s<sup>2</sup>

Pérdida de carga (Hv)

$$H_v = \frac{0.70^2 \text{ m/s}}{2 * 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$H_v = 0.02 \text{ m}$$

## C. Cálculo del diseño de tratamiento preliminar: desarenador

Se tiene como datos de diseño:

Caudal de diseño : 0.32 lps

Densidad relativa de la arena : 2.65

Diámetro de la partícula : 0.02 cm

Temperatura : 20°

### C.1 Longitud de desarenador (Ld)

$$Ld = 25 * H \quad (\text{Ecuación 25})$$

Donde:

Ld : Longitud de desarenador  
H : Altura de agua (0.101 m)

Longitud de desarenador (Ld)

$$Ld = 25 * 0.101$$

$$Ld = 2.51 \text{ m}$$

### C.2 Longitud real de desarenador (Lr)

$$Lr = 25\% * Ld \quad (\text{Ecuación 26})$$

Donde:

Lr : Longitud real de desarenador

Longitud real de desarenador (Lr)

$$Lr = 25\% * 2.51 \text{ m}$$

$$L = 3.14 \text{ m}$$

Se asume L = 3.20 m

### C.3 Ancho de desarenador (A)

$$A = \frac{Q_{max}}{V * H} \quad (\text{Ecuación 27})$$

Donde:

Q<sub>max</sub> : Caudal máximo horario

V : Velocidad horizontal (0.30 m/s)

H : Altura del agua (0.101 m)

Ancho de desarenador (Lr)

$$A = \frac{0.001 \text{ m}^3/\text{s}}{0.30 * 0.101}$$

$$A = 0.04 \text{ m}$$

Se asume A = 0.50 m

### C.4 Profundidad del desarenador (H)

$$H = \frac{Ld}{25} \quad (\text{Ecuación 28})$$

Donde:

Ld : Longitud de desarenador

Profundidad de desarenador (Lr)

$$H = \frac{2.51}{25}$$

$$L = 0.10 \text{ m}$$

## D. Cálculo del diseño de tratamiento primario: humedal sub superficial de flujo vertical

Se tienen como datos de diseño:

Población de diseño	: 36 habitantes
Dotación de agua	: 90 l/hab.dia
Contribución de aguas residuales	: 80%
Temperatura mes más frío	: 16° (RM 192-2018-VIVIENDA)
Contribución per cápita de DBO <sub>5</sub>	: 50 gr DBO <sub>5</sub> /habitante. Día
DBO <sub>5</sub> requerido en el efluente	: 15.00 mg/L
Caudal de aguas residuales	: 15.50 m <sup>3</sup> /día

Eficiencia del humedal sub superficial

: 91.04%

Material de relleno

: Arena =0.50, Grava ½" a 1" =0.35

Porosidad

: 0.30

Pendiente del fondo de lecho	: 1%
Borde libre	: 0.40 m
Profundidad	: 0.85 m
Relación ancho: largo	: 1:1.5

#### D.1 Cálculo de la constante de temperatura (Kt)

$$Kt = K_{20}(1.06)^{T-20} \quad (\text{Ecuación 29})$$

Donde:

Kt : Constante de temperatura

K<sub>20</sub> : Constante de temperatura a 20° = 1.104

T : Temperatura de localidad de investigación

$$Kt = 1.104 (1.06)^{16-20}$$

$$Kt = 0.874$$

#### D.2 Cálculo del área superficial (As)

$$As = \frac{Q (\ln Co - \ln Ce)}{Kt * y * n} \quad (\text{Ecuación 30})$$

Donde:

As : Área superficial

Ln Co : Concentración de ingreso de agua residual

Ln Ce : Concentración de salida de agua residual

Kt : Constante de temperatura = 0.825

y : Altura del sistema (0.85)

n : Porosidad del sustrato (0.30)

$$As = \frac{15.50 (\ln (248) - \ln (15))}{0.874 * 0.85 * 0.3}$$

$$As = 7.95 \text{ m}^2$$

Para lograr alternancia en el uso del humedal sub superficial se asumen 2 celdas de 4.00 m<sup>2</sup>.

#### D.3 Cálculo del tiempo de retención hidráulico (TRH)

$$TRH = \frac{As * y * n}{Q} \quad (\text{Ecuación 31})$$

Donde:

TRH : Tiempo de retención hidráulico

As : Área superficial

Q : Caudal de diseño

y : Altura del sistema (0.85)

n : Porosidad del sustrato (0.30)

$$TRH = \frac{7.95 * 0.874 * 0.3}{21.96}$$

$$TRH = 2.28 \text{ días}$$

Se asume 2.5 días de retención hidráulica

#### D.4 Cálculo del ancho de celda de humedal sub superficial (b)

$$b = \frac{\sqrt{As}}{1.5} \quad (\text{Ecuación 32})$$

Donde:

b : Ancho de celda de humedal superficial

As : Área superficial

$$b = \frac{\sqrt{4.00}}{1.5}$$

$$b = 1.07 \text{ m}$$

Se asume 1.00 m de ancho en cada celda de humedal

**D.5 Cálculo del largo de humedal sub superficial (L)**

$$L = 1.5 * b \quad (\text{Ecuación 33})$$

Donde:

b : Ancho de celda de humedal superficial

L : Largo del humedal sub superficial

$$L = 2.10 \text{ m}$$

Se asume 2.20 m de largo en cada celda de humedal

**D.6 Cálculo de la altura del humedal sub superficial (H)**

$$H = y + B libre \quad (\text{Ecuación 34})$$

Donde:

H : Altura del humedal sub superficial

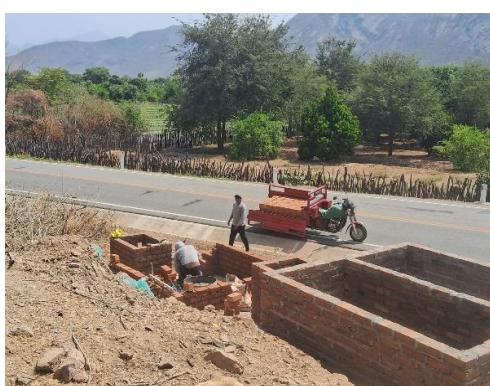
y : Altura del sistema (0.85)

B libre : Borde libre (0.40 m)

$$H = 0.85 + 0.40$$

$$H = 1.25 \text{ m}$$

## ANEXO 7: Registro fotográfico

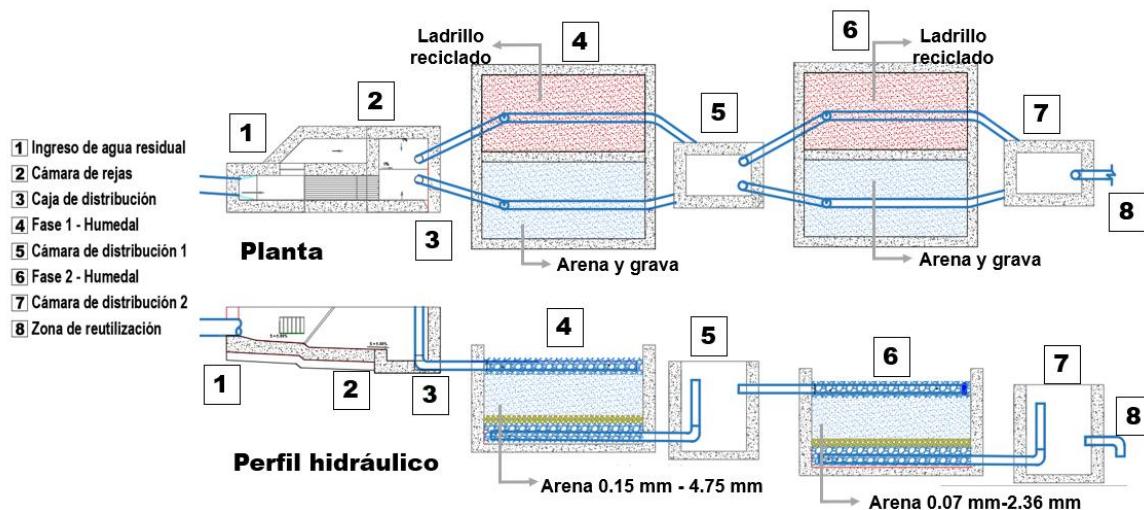


*Nota:* Procedimiento constructivo de celdas del sistema de depuración de aguas residuales

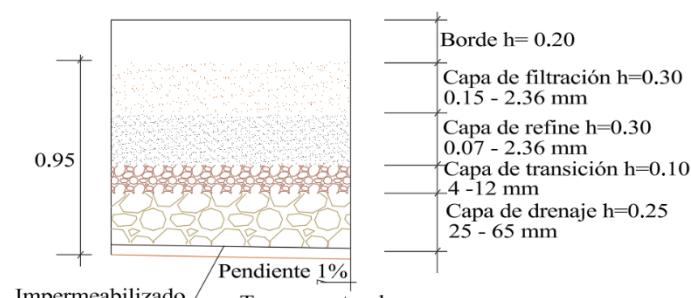
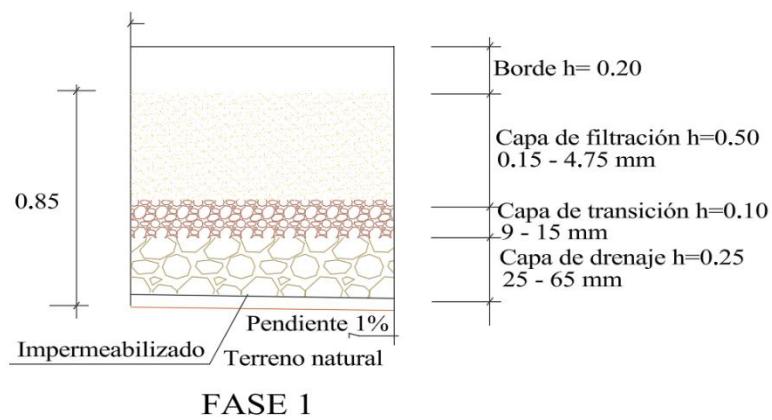


*Nota:* Operación del sistema de depuración de aguas residuales y medición de parámetros

## ANEXO 8: Diseño del sistema



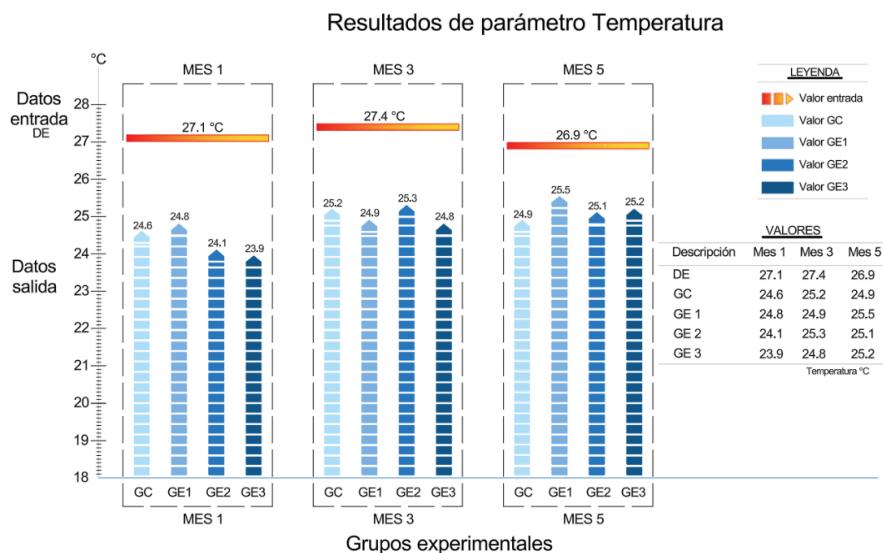
Nota: Diseño de la planta de depuración de aguas residuales



Nota: Secciones típicas en las etapas 1 y 2 de la planta de depuración de aguas residuales

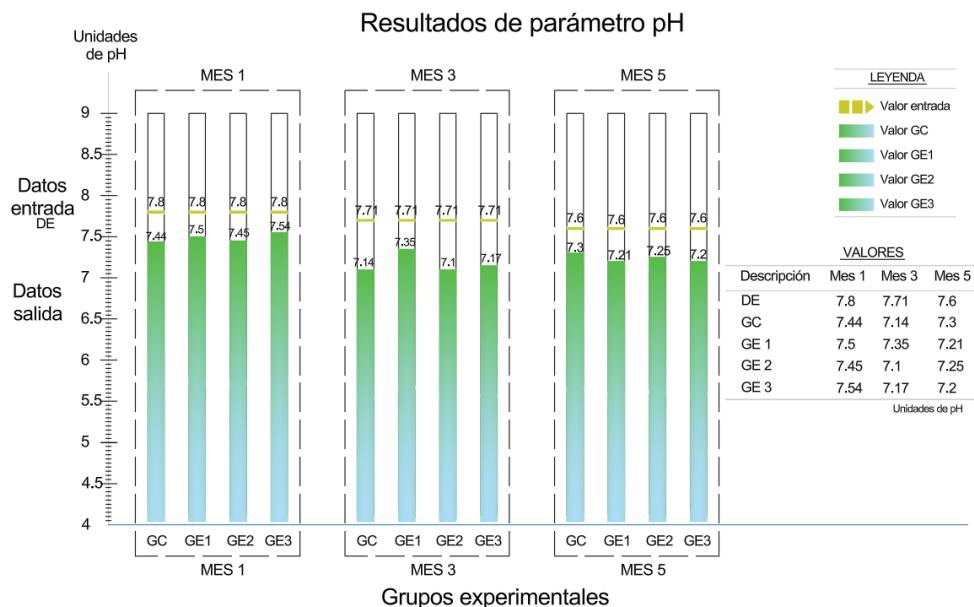
## Anexo 9: Resultados de temperatura y pH

### Valores obtenidos del parámetro Temperatura.



*Nota:* Como se muestra en la figura se obtuvieron los valores de variación del parámetro temperatura y se verifica que en el grupo experimental 1 se tienen variaciones entre 1.4 y 2.3 °C; asimismo se observa que durante el mes 5 en el grupo experimental 2 tuvo una temperatura de 25.1°C. En el grupo experimental 3 se tuvieron valores entre 23.9 °C y 25.2 °C.

### Valores obtenidos del parámetro pH



*Nota:* En la figura se observa que durante la primera muestra realizada en el mes de octubre del 2024 los valores de pH del agua residual tratada se encuentran entre 7.44 y 7.54. Se observa que el grupo de control tiene valores de pH entre 7.14 y 7.44.

## Anexo 10: Reporte de datos de la variable independiente

La recolección de datos de la presente investigación se realizó entre los meses de octubre a diciembre del año 2024 y de enero a febrero del año 2025, con un diseño de humedal de flujo vertical de dos etapas con una superficie de 1.87 m<sup>2</sup>. El diseño de la cámara de rejas, las cámaras de control y distribución, así como los componentes del sistema fueron establecidos siguiendo lo indicado por Zidan et al citado en Santos et al. (2024).

*Características constructivas de los humedales de flujo vertical*

Etapa	Tipo	Superficie m <sup>2</sup>	Sustrato mm	Altura m
Etapa 1	Humbral construido arena	1.87	0.15-4.75	0.50
	Humbral construido ladrillo reciclado		9-15	0.10
			25-65	0.25
Etapa 2	Humbral construido arena	1.87	0.15-2.36	0.30
	Humbral construido ladrillo reciclado		0.07-2.36	0.30
			4-12	0.10
			25-65	0.25

*Nota.* En la Tabla se muestran las características constructivas de cada una de las celdas.

*Propiedades físicas e hidráulicas del medio filtrante de ambas etapas del sistema*

Ensayo	Unidad	Valores	
		Etapa 1	Etapa 2
Contenido de humedad	%	3.76	2.02
Coeficiente de uniformidad	valor	5.12	3.87
Peso específico	gr/cm <sup>3</sup>	2.58	2.58
Peso unitario	gr/cm <sup>3</sup>	1.621	1.586
Porcentaje de absorción	%	0.70	0.70
Porosidad	%	38.07	39.41
Capacidad de infiltración	mm/segundo	4.00	3.53

*Nota:* Resultados obtenidos en laboratorio sobre las propiedades físicas e hidráulicas del medio filtrante colocado en ambas etapas de los humedales de flujo vertical.

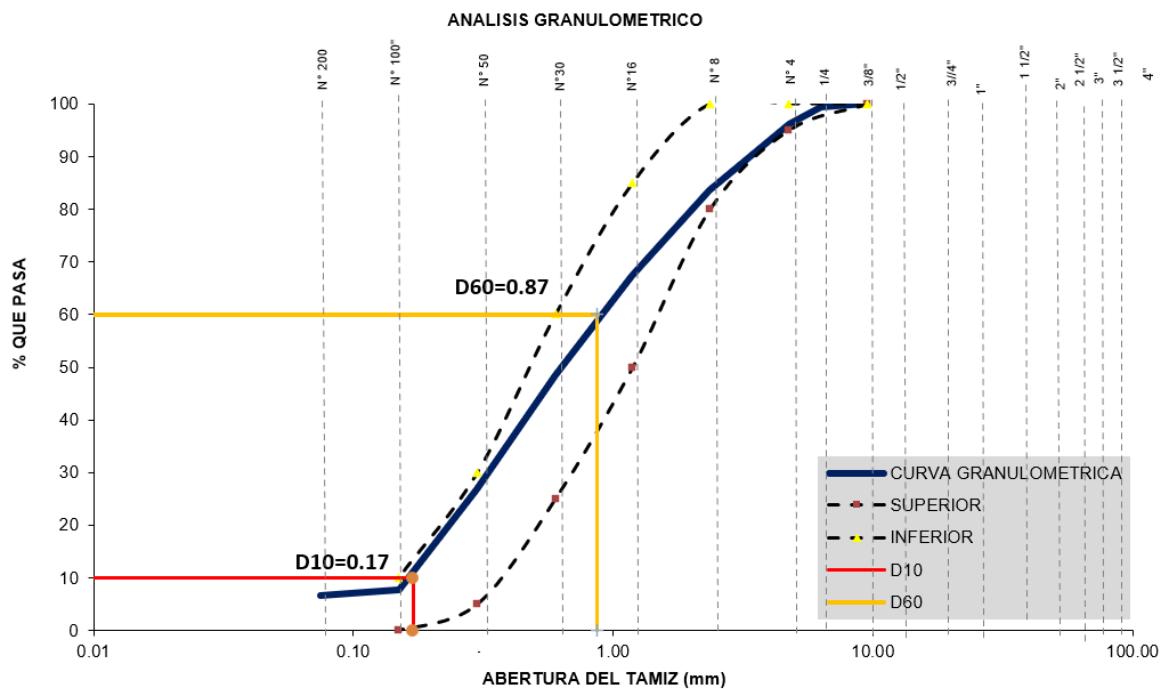
Como se puede observar en la tabla se tiene que el coeficiente uniformidad en la etapa 1 fue de 5.12 y en la etapa 2 de 3.87. Asimismo, se tiene que el porcentaje de absorción de agua fue de 0.70% en ambas etapas. Sobre los valores de porosidad se tuvo un valor de 38.07 % para la etapa 1 y 39.41 % para la etapa 2. Finalmente, la capacidad de infiltración de la arena fue de 3.53 mm/segundo en la primera etapa y de 4.00 mm/segundo en la etapa dos. El peso específico de la arena para ambas etapas fue de 2.58 gr/cm<sup>3</sup>.

### Granulometría del medio filtrante de la etapa 1 del sistema

Tamicos ASTM	Abertura (mm.)	Peso retenido (gr.)	Porcentaje parcial retenido (%)	Porcentaje acumulado		Especificaciones	
				Retenido (%)	Que pasa (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)
1/4"	6.3	1.28	0.5	0.5	99.5		
Nº 4	4.75	8.31	3.3	3.8	96.2	95	100
Nº 8	2.36	31.29	12.5	16.4	83.6	80.0	100.0
Nº 16	1.18	40.44	16.2	32.5	67.5	50.0	85.0
Nº 30	0.600	47.38	19.0	51.5	48.5	25.0	60.0
Nº 50	0.300	54.13	21.7	73.1	26.9	5.0	30.0
Nº 100	0.150	47.74	19.1	92.2	7.8	0.0	10.0
Nº 200	0.075	3.02	1.2	93.4	6.6		
BANDEJA		16.41	6.6	100.0	0.0		

Nota: Gradación del medio filtrante de la etapa 1 del sistema de humedal de flujo vertical. Se observa que el porcentaje menor a 0.150 mm es del 19.1 % y los valores menores a 0.075 es de 1.2 %. Siendo el mayor valor de concentración los diámetros de 0.30 mm y 1.18 mm.

### Análisis granulométrico del sustrato etapa I



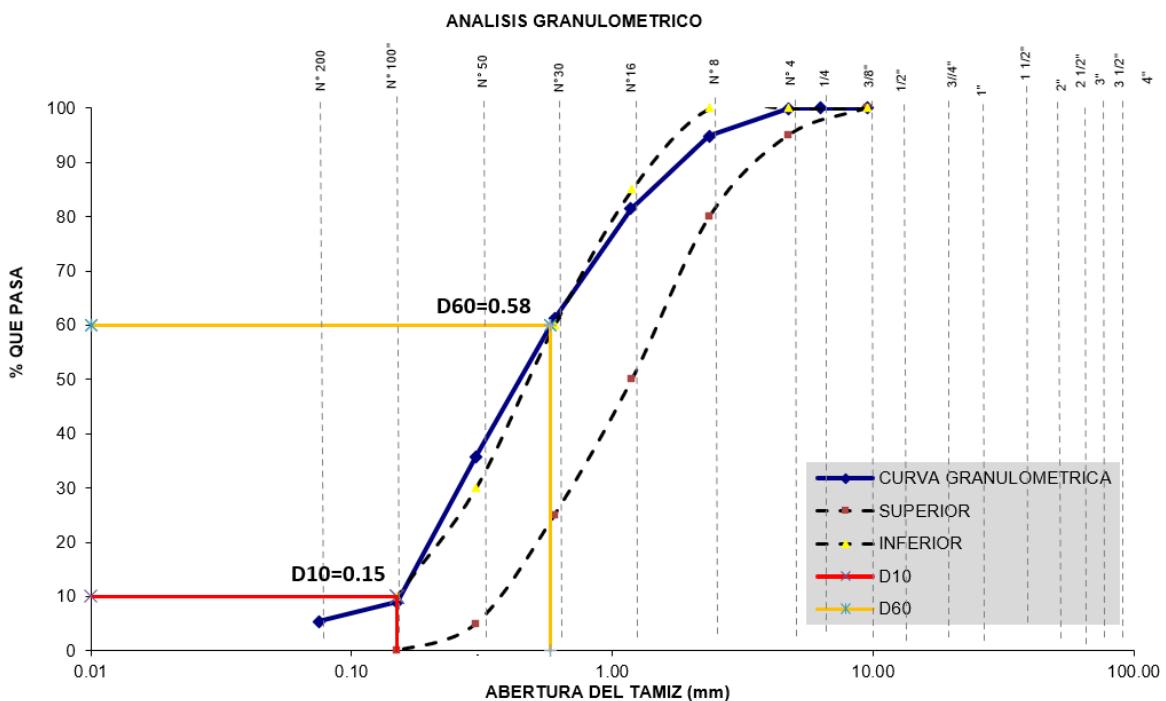
Nota: En la figura se tiene que el valor de D10 es 0.17 mm y el valor de D60 es de 0.87 mm, determinando un coeficiente de uniformidad de 5.12 en el sustrato de la etapa 1. Asimismo, se verifica que la curva granulométrica se encuentra entre los valores máximos y mínimos establecidos en la experiencia citada por Obeng et al. (2023) para la conformación de este tipo de sistemas.

### Granulometría del medio filtrante de la etapa 2 del sistema

Tamices ASTM	Abertura (mm.)	Peso retenido (gr.)	Porcentaje parcial retenido (%)	Retenido (%)	Porcentaje acumulado Que pasa (%)	Especificaciones	
						MINIMO (%)	MAXIMO (%)
Nº 4	4.75	0.29	0.1	0.1	99.9	95	100
Nº 8	2.36	12.43	5.0	5.1	94.9	80.0	100.0
Nº 16	1.18	33.70	13.5	18.6	81.4	50.0	85.0
Nº 30	0.600	50.52	20.2	38.8	61.2	25.0	60.0
Nº 50	0.300	63.92	25.6	64.3	35.7	5.0	30.0
Nº 100	0.150	66.76	26.7	91.0	9.0	0.0	10.0
Nº 200	0.075	8.98	3.6	94.6	5.4		
BANDEJA	13.40	5.4	100.0	0.0			

Nota: Gradación del medio filtrante de la etapa 2 del sistema de humedal de flujo vertical. Se observa que el porcentaje menor a 0.150 mm es del 26.7 % y los valores menores a 0.075 es de 3.6 %. Siendo el mayor valor de concentración los diámetros de 0.300 mm y 0.60 mm.

### Análisis granulométrico del sustrato etapa 2



Nota: En la figura se tiene que el valor de D10 es 0.15 mm y el valor de D60 es de 0.58 mm, determinando un coeficiente de uniformidad de 3.87 en el sustrato de etapa 2. Asimismo, se verifica que la curva granulométrica se encuentra entre los valores máximos y mínimos establecidos en la experiencia citada por Obeng et al. (2023) para la conformación de este tipo de sistemas.

## Diseño de investigación experimental

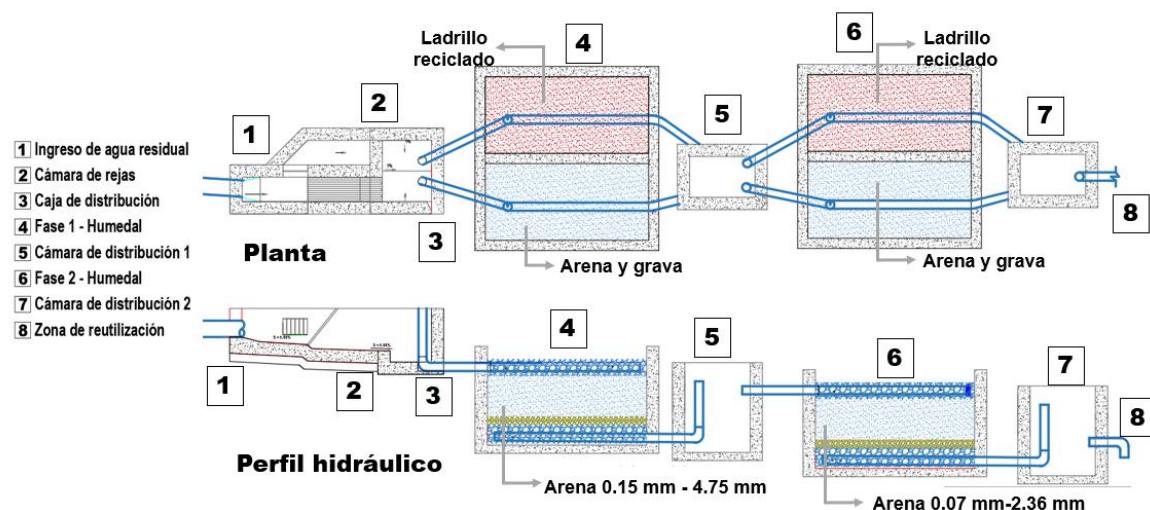
El vertido de las aguas residuales municipales al modelo de investigación experimental se realizó de manera directa sin pre tratamiento, se trataron aguas que llegaron directamente a través de una cámara de rejas, luego del cual se distribuyeron a las celdas de tratamientos. Previamente se verificó que los datos de los parámetros analizados provengan de una distribución normal. La prueba de normalidad se realizó mediante el test de Shapiro Wilk, ya que los datos fueron menores a 50.

### *Caracterización de las aguas residuales en la localidad de investigación*

Parámetro	Unidad	Ingreso
Temperatura	°C	29.5
pH	Unid de pH	7.40
Turbiedad	UNT	90
DBO <sub>5</sub>	mg/L	338
DQO	mg/L	658
Coliformes termo tolerantes	NMP/100ml	35x10 <sup>4</sup>

*Nota.* En la tabla se muestran los valores promedio de la composición de los contaminantes y se puede concluir que se trata de valores típicos de poblaciones pequeñas.

### *Diseño del sistema de dos etapas de humedal de flujo vertical*



*Nota.* En la figura se muestra el diseño del sistema con dos etapas. En la etapa 1 se construyeron dos celdas tanto la que se conformó con ladrillo reciclado como la de arena. Del mismo modo se aprecia en la etapa 2. Se muestra también el perfil hidráulico del sistema que se inicia con la cámara de rejas y las celdas de humedal de flujo vertical. En la primera etapa las arenas tienen una granulometría que va desde los 0.15 mm hasta 4.75 mm. y en la etapa 2 se tuvo una granulometría desde 0.07 mm hasta 2.36 mm.

## Anexo 11: Prueba de normalidad de datos

Para proporcionar información con altas bases de confiabilidad de la normalidad de datos se utilizó la prueba de Shapiro – Wilk, con el objeto de comprobar si los datos están modelados por una distribución normal, fijándose un  $\alpha$  del 5%.

Se asumió:

$H_0$  : Los datos no provienen de una distribución normal.

$H_i$  : Los datos provienen de una distribución normal.

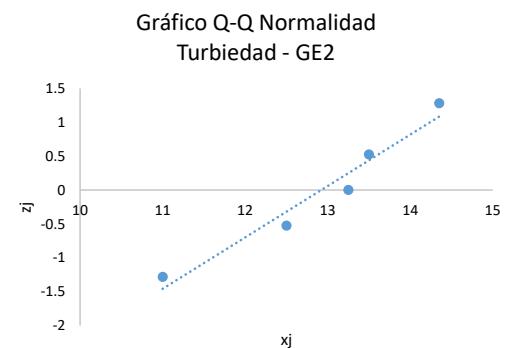
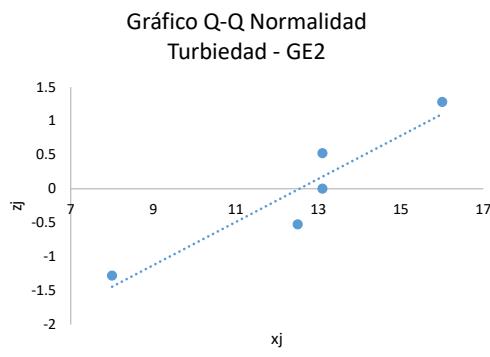
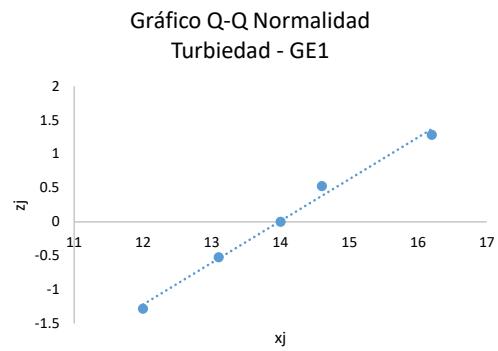
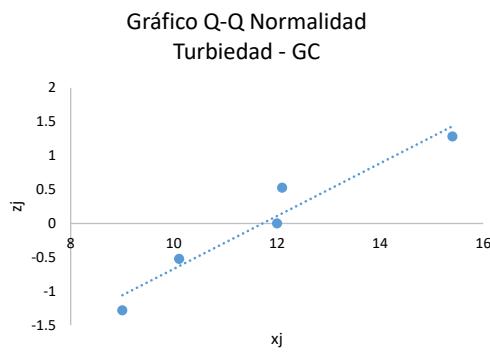
Aceptar la  $H_0$  si  $\text{sig} < \alpha$  (0.05)

Aceptar la  $H_i$  si  $\text{sig} > \alpha$  (0.05)

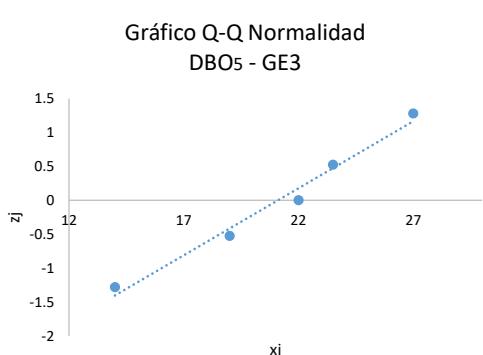
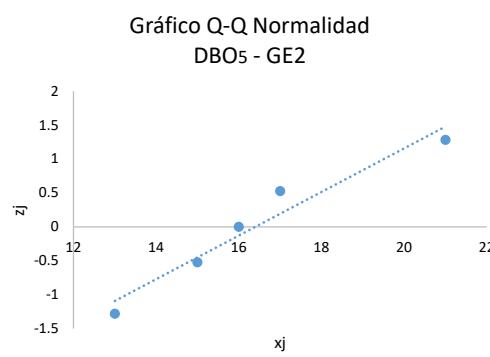
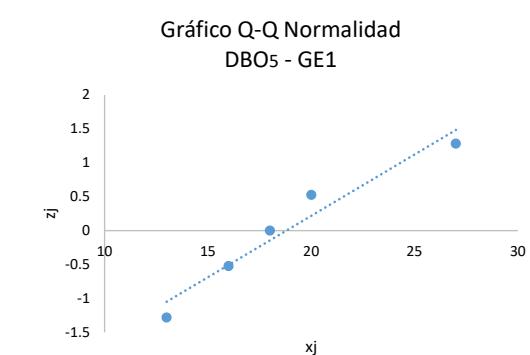
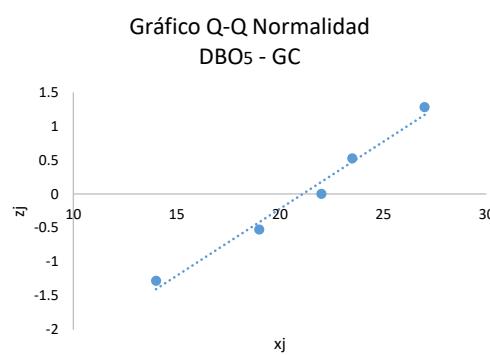
<b>Prueba de normalidad Shapiro Wilk</b>				
	<b>Valores</b>	<b>Estadístico</b>	<b>gl.</b>	<b>Sig.</b>
<i>Turbiedad</i>	Entrada	0.77296	4	0.0690
	Grupo de control	0.76054	4	0.0600
	Grupo experimental 1	0.77852	4	0.0731
	Grupo experimental 2	0.85115	4	0.1257
	Grupo experimental 3	0.78025	4	0.0743
<b>Prueba de normalidad Shapiro Wilk</b>				
	<b>Valores</b>	<b>Estadístico</b>	<b>gl.</b>	<b>Sig.</b>
<i>Demanda bioquímica de oxígeno</i>	Entrada	0.77800	4	0.0727
	Grupo de control	0.77595	4	0.0712
	Grupo experimental 1	0.78133	4	0.0751
	Grupo experimental 2	0.80308	4	0.0909
	Grupo experimental 3	0.77595	4	0.0712
<b>Prueba de normalidad Shapiro Wilk</b>				
	<b>Valores</b>	<b>Estadístico</b>	<b>gl.</b>	<b>Sig..</b>
<i>Demanda química de oxígeno</i>	Entrada	0.78914	4	0.0808
	Grupo de control	0.77919	4	0.0735
	Grupo experimental 1	0.77776	4	0.0725
	Grupo experimental 2	0.76253	4	0.0615
	Grupo experimental 3	0.79872	4	0.0877
<b>Prueba de normalidad Shapiro Wilk</b>				
	<b>Valores</b>	<b>Estadístico</b>	<b>gl.</b>	<b>Sig.</b>
<i>Coliformes termotolerantes</i>	Entrada	0.76763	4	0.0652
	Grupo de control	0.77429	4	0.0700
	Grupo experimental 1	0.77067	4	0.0674
	Grupo experimental 2	0.79472	4	0.0848
	Grupo experimental 3	0.76323	4	0.0620

*Nota.* Se observó que los valores de “Sig” en los parámetros analizados son mayores a 0.05, tanto en los valores de entrada como en la salida de los grupos experimentales, por lo que se determinó que los datos en los parámetros físico, químicos y biológico se ajustan a una distribución normal.

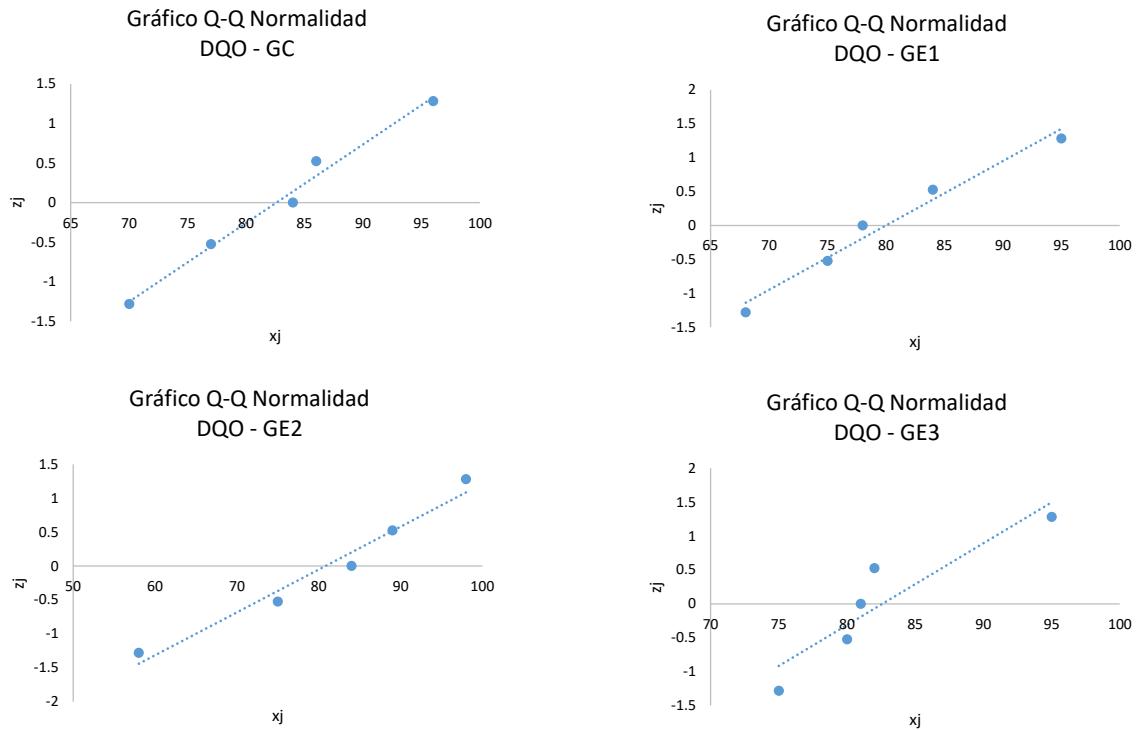
### Prueba gráfica de normalidad Turbiedad



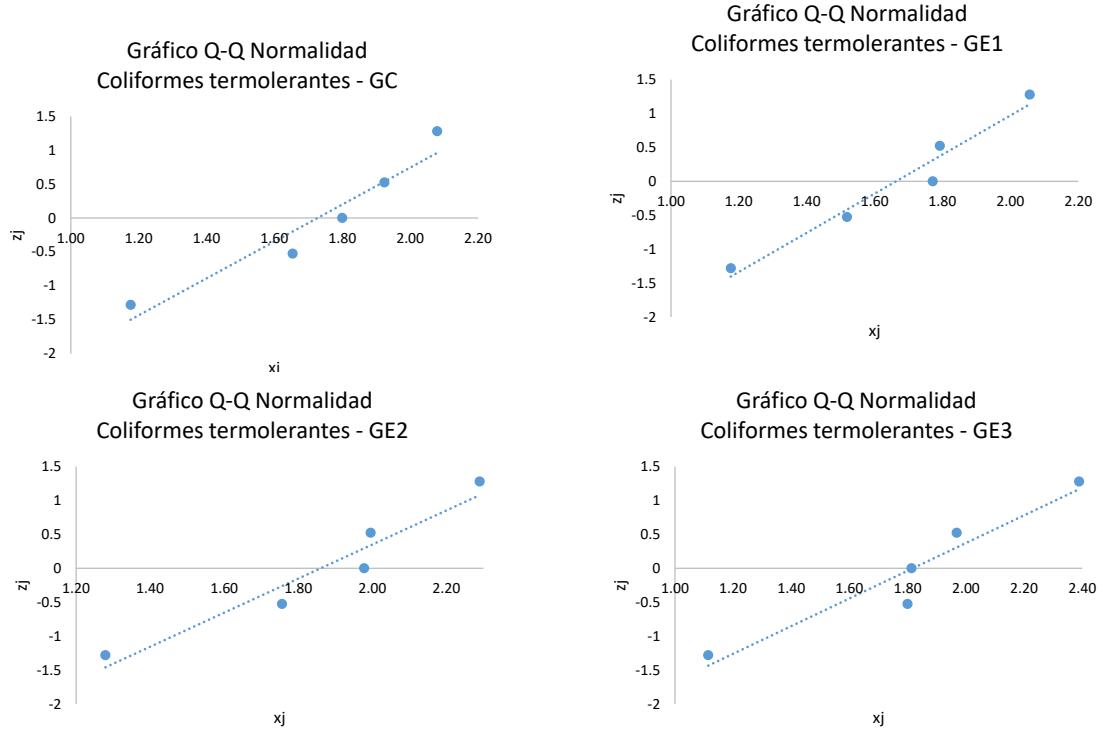
### Prueba gráfica de normalidad Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días



### Prueba gráfica de normalidad Demanda química de oxígeno



### Prueba gráfica de normalidad Coliformes termotolerantes



## Anexo 12: Prueba de análisis de varianza Prueba ANOVA – Prueba de Tukey

Para comparar las medias del efecto que generó el tratamiento en las aguas residuales urbanas entre el grupo de control y los 3 grupos experimentales se realizó el análisis de varianza a fin de determinar diferencias estadísticamente representativas. Se fijó un  $\alpha$  del 5%.

Se asumió:

$H_0$ : Las medias de los tratamientos de los grupos experimentales son iguales.

$H_i$ : Las medias de los tratamientos de los grupos experimentales son diferentes.

Se asumió:

Rechazar la  $H_0$  si  $\text{sig} < \alpha$  (0.05)

Aceptar la  $H_0$  si  $\text{sig} > \alpha$  (0.05)

Asimismo, después de realizar el ANOVA se realizó la prueba de Tukey a fin de realizar comparaciones múltiples entre las medias de los grupos experimentales.

Se asumió que si 0.05 es mayor al “p value” se acepta que hay diferencias entre las medias de los grupos.

### ANOVA: TURBIEDAD

DESCRIPTION		Alpha				0.05		
Group	Count	Sum	Mean	Variance	SS	Std Err	Lower	Upper
GC	5	58.6	11.72	5.947	23.788	0.957607696	9.68996237	13.7500376
GE1	5	69.9	13.98	2.502	10.008	0.957607696	11.94996237	16.0100376
GE2	5	62.7	12.54	8.303	33.212	0.957607696	10.50996237	14.5700376
GE3	5	64.6	12.92	1.58825	6.353	0.957607696	10.88996237	14.9500376

ANOVA								
Sources	SS	df	MS	F	P value	Eta-sq	RMSSE	Omega Sq
Between Groups	13.202	3	4.40066667	0.95978335	0.43562583	0.152513198	0.438128601	-0.00606911
Within Groups	73.361	16	4.5850625					
Total	86.563	19	4.55594737					

TUKEY HSD/KRAMER		alpha			0.05		
group	mean	n	ss	df	q-crit		
GC	11.72	5	23.788				
GE1	13.98	5	10.008				
GE2	12.54	5	33.212				
GE3	12.92	5	6.353				
		20	73.361	16	4.046		

group 1	group 2	mean	std err	q-stat	lower	upper	p-value	mean-crit	Cohen d
GC	GE1	2.26	0.957607696	2.360047866	-1.61448074	6.13448074	0.37103538	3.87448074	1.05544549
GC	GE2	0.82	0.957607696	0.856300553	-3.05448074	4.69448074	0.92884363	3.87448074	0.38294925
GC	GE3	1.2	0.957607696	1.253122761	-2.67448074	5.07448074	0.81204899	3.87448074	0.56041354
GE1	GE2	1.44	0.957607696	1.503747313	-2.43448074	5.31448074	0.71581718	3.87448074	0.67249624
GE1	GE3	1.06	0.957607696	1.106925105	-2.81448074	4.93448074	0.86117092	3.87448074	0.49503196
GE2	GE3	0.38	0.957607696	0.39682208	-3.49448074	4.25448074	0.99198396	3.87448074	0.17746429

En el parámetro turbiedad se verificó que el p es igual a 0.435 y resultó mayor a 0.05 por tanto se acepta la hipótesis nula y se verificó que no existen diferencias significativas entre los tratamientos. Del mismo modo mediante la prueba de Tukey de confirmó que los valores “p” son mayores a 0.05 entre las comparaciones de los grupos experimentales, por tanto, se confirma que no hay diferencias en las medias de los 3 tratamientos.

### ANOVA: DB05

DESCRIPTION					Alpha	0.05		
Group	Count	Sum	Mean	Variance	SS	Std Err	Lower	Upper
GC	5	105.5	21.1	24.05	96.2	2.05669638	16.7399984	25.4600016
GE 1	5	94	18.8	27.7	110.8	2.05669638	14.4399984	23.1600016
GE2	5	82	16.4	8.8	35.2	2.05669638	12.0399984	20.7600016
GE3	5	105.5	21.1	24.05	96.2	2.05669638	16.7399984	25.4600016

### ANOVA

Sources	SS	df	MS	F	P value	Eta-sq	RMSSE	Omega Sq
Between Grc	75.65	3	25.21666667	1.192277384	0.34420988	0.1827074	0.48831903	0.02803309
Within Group	338.4	16	21.15					
Total	414.05	19	21.79210526					

### TUKEY HSD/KRAMER

			alpha	0.05	
group	mean	n	ss	df	q-crit
GC	21.1		5	96.2	
GE 1	18.8		5	110.8	
GE2	16.4		5	35.2	
GE3	21.1		5	96.2	
		20	338.4	16	4.046

### Q TEST

group 1	group 2	mean	std err	q-stat	lower	upper	p-value	mean-crit	Cohen d
GC	GE 1		2.3	2.05669638	1.11829827	-6.02139355	10.6213936	0.85758103	8.32139355 0.50011819
GC	GE2		4.7	2.05669638	2.2852182	-3.62139355	13.0213936	0.39793449	8.32139355 1.02198065
GC	GE3		0	2.05669638	0	-8.32139355	8.32139355	1	8.32139355 0
GE 1	GE2		2.4	2.05669638	1.16691993	-5.92139355	10.7213936	0.84177595	8.32139355 0.52186246
GE 1	GE3		2.3	2.05669638	1.11829827	-6.02139355	10.6213936	0.85758103	8.32139355 0.50011819
GE2	GE3		4.7	2.05669638	2.2852182	-3.62139355	13.0213936	0.39793449	8.32139355 1.02198065

### ANOVA: DQO

DESCRIPTION					Alpha	0.05		
Group	Count	Sum	Mean	Variance	SS	Std Err	Lower	Upper
GC	5	413	82.6	95.8	383.2	4.93102423	72.1466956	93.0533044
GE1	5	400	80	103.5	414	4.93102423	69.5466956	90.4533044
GE2	5	404	80.8	231.7	926.8	4.93102423	70.3466956	91.2533044
GE3	5	413	82.6	55.3	221.2	4.93102423	72.1466956	93.0533044

### ANOVA

Sources	SS	df	MS	F	P value	Eta-sq	RMSSE	Omega Sq
Between Group	25.8	3	8.6	0.070738227	0.97476029	0.0130898	0.11894388	-0.16196552
Within Groups	1945.2	16	121.575					
Total	1971	19	103.736842					

### TUKEY HSD/KRAMER

			alpha	0.05	
group	mean	n	ss	df	q-crit
GC	82.6	5	383.2		
GE1	80	5	414		
GE2	80.8	5	926.8		
GE3	82.6	5	221.2		
		20	1945.2	16	4.046

### Q TEST

group 1	group 2	mean	std err	q-stat	lower	upper	p-value	mean-crit	Cohen d
GC	GE1		2.6	4.93102423	0.52727382	-17.3509241	22.5509241	0.98168467	19.9509241 0.23580402
GC	GE2		1.8	4.93102423	0.36503572	-18.1509241	21.7509241	0.99372673	19.9509241 0.16324894
GC	GE3		0	4.93102423	0	-19.9509241	19.9509241	1	19.9509241 0
GE1	GE2		0.8	4.93102423	0.1622381	-19.1509241	20.7509241	0.99943607	19.9509241 0.07255508
GE1	GE3		2.6	4.93102423	0.52727382	-17.3509241	22.5509241	0.98168467	19.9509241 0.23580402
GE2	GE3		1.8	4.93102423	0.36503572	-18.1509241	21.7509241	0.99372673	19.9509241 0.16324894

#### ANOVA: COLIFORMES TERMOTOLERANTES

DESCRIPTION						Alpha	0.05		
Group	Count	Sum	Mean	Variance	SS	Std Err	Lower	Upper	
GC	5	327	65	1572.3	6289.2	27.44795074	7.213	123.59	
GE1	5	283	57	1404.3	5617.2	27.44795074	-1.587	114.79	
GE2	5	465	93	4304	17216	27.44795074	34.81	151.19	
GE3	5	479	95.8	7787.2	31148.8	27.44795074	37.61	153.99	

#### ANOVA

Sources	SS	df	MS	F	P value	Eta-sq	RMSSE	megase
Between Groups	5791	3	1930.33	0.5124393	0.6794481	0.087659812	0.32	-0.079
Within Groups	60271.2	16	3766.95					
Total	66062.2	19	3476.96					

TUKEY HSD/KRAMER			alpha	0.05	
group	mean	n	ss	df	q-crit
GC	65	5	6289.2		
GE1	57	5	5617.2		
GE2	93	5	17216		
GE3	95.8	5	31148.8		
		20	60271.2	16	4.046

Q TEST									
group 1	group 2	mean	std err	q-stat	lower	upper	p-value	mean-crit	Cohen d
GC	GE1	8.8	27.4479507	0.32060681	-102.254409	119.854409	0.99572117	111.054409	0.14337973
GC	GE2	27.6	27.4479507	1.00553955	-83.4544087	138.654409	0.89126498	111.054409	0.44969096
GC	GE3	30.4	27.4479507	1.10755081	-80.6544087	141.454409	0.8609745	111.054409	0.49531178
GE1	GE2	36.4	27.4479507	1.32614636	-74.6544087	147.454409	0.78534387	111.054409	0.59307068
GE1	GE3	39.2	27.4479507	1.42815762	-71.8544087	150.254409	0.74608394	111.054409	0.6386915
GE2	GE3	2.8	27.4479507	0.10201126	-108.254409	113.854409	0.99985932	111.054409	0.04562082

En el parámetro DBO<sub>5</sub> se verificó que el p es igual a 0.344 y resultó mayor a 0.05; en el parámetro DQO se verificó que el p es igual a 0.974 y resultó mayor a 0.05; y, en el parámetro coliformes termotolerantes se verificó que el p es igual a 0.679 y resultó mayor a 0.05; por tanto, se aceptan las hipótesis nulas y se verificó que no existen diferencias significativas entre los tratamientos. Del mismo modo mediante la prueba de Tukey se confirmó que los valores “p” son mayores a 0.05 entre las comparaciones de los grupos experimentales, por tanto, se confirma que no hay diferencias en las medias de los 3 tratamientos en los parámetros de turbiedad, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y coliformes termotolerantes de las aguas residuales urbanas tratadas mediante humedales de flujo vertical construidos con sustratos reciclados.



## Anexo 13: Certificados de laboratorio

**LABORATORIO ENSAYOS  
DE MATERIALES, SUELOS,  
CONCRETO Y ASFALTO**  
RUC 20607462756

PROYECTO	"DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES URBANAS CON HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL CONSTRUIDO CON SUSTRATO RECICLADO "		
SOLICITA	CRISTHIAN JUAN MOGOLLON VIZUETA		FECHA DE INFORME : OCTUBRE DEL 2024

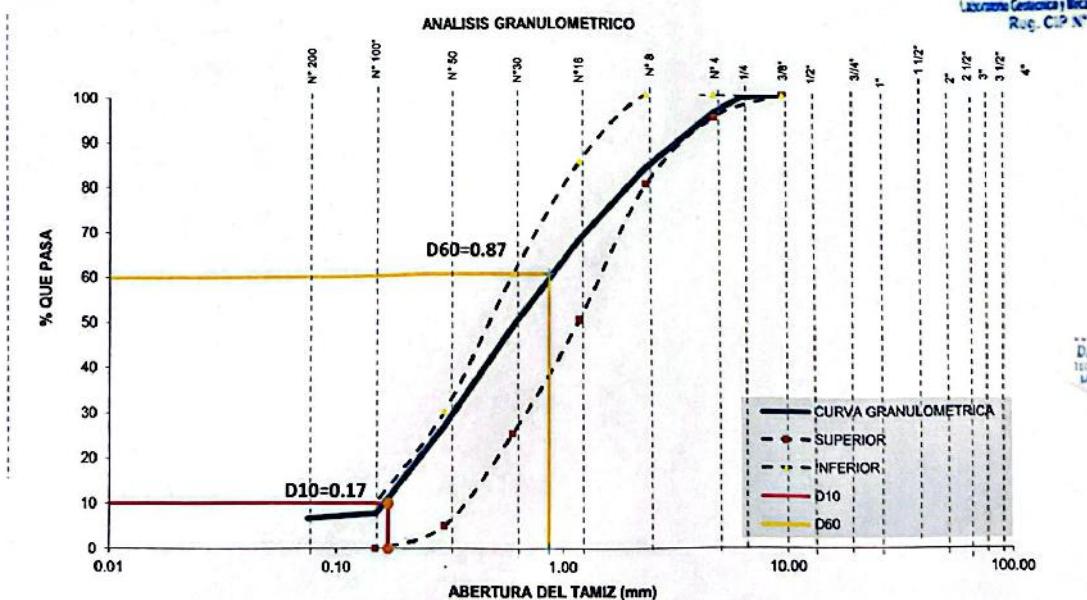
### ANALISIS GRANULOMETRICO DEL AGREGADO FINO (NTP 400.012)

PROCEDENCIA	CANTERA EL OLGIN		
MUESTRA	M - 1		
MATERIAL	ARENA GRUESA		



TAMICES ASTM	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr.)	PORCENTAJE PARCIAL RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO		ESPECIFICACIONES		DESCRIPCION DE LA MUESTRA
				RETENIDO (%)	QUE PASA (%)	MINIMO (%)	MÁXIMO (%)	
4"	100							PESO INICIAL (gr) 250.00
3 1/2"	90							CONTENIDO DE HUMEDAD (%) 3.8
3"	75							TAMAÑO MAXIMO (") -
2 1/2"	63							GRAVA (Pasa 3", retiene N°4) (%) 3.8
2"	50							ARENA (Pasa N°4, retiene N°200) (%) 89.6
1 1/2"	37.5							PASANTE N° 200 (%) 6.6
1"	25.0							LIMITE LIQUIDO 0
3/4"	19.0							LIMITE PLASTICO 0
1/2"	12.5							INDICE DE PLASTICIDAD 0
3/8"	9.5	0.00	0.0	0.0	100.0	100	100	MODULO DE FINEZA 2.70
1/4"	6.3	1.28	0.5	0.5	99.5			OBSERVACIONES:
Nº 4	4.75	8.31	3.3	3.8	96.2	95	100	
Nº 8	2.36	31.29	12.5	16.4	83.6	80.0	100.0	
Nº 16	1.18	40.44	16.2	32.5	67.5	50.0	85.0	
Nº 30	0.600	47.38	19.0	51.5	48.5	25.0	60.0	
Nº 50	0.300	54.13	21.7	73.1	26.9	5.0	30.0	
Nº 100	0.150	47.74	19.1	92.2	7.8	0.0	10.0	
Nº 200	0.075	3.02	1.2	93.4	6.6			
BANDEJA	16.41	6.6	100.0	0.0				

Rafael Luciano Zavala Feria  
Ing. Civil Jefe  
Laboratorio Geotecnico y Mecanica de Suelos y Asfalto  
Ruc. CIP N° 145580



Observacion: material proporcionado por el solicitante  
EL LEM L&D EIRL ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEM - L&D EIRL se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo.  
EL LEM - L&D EIRL no asume de toda responsabilidad quedarán de la interpretación y uso posterior de la información.

SUELOS L&D



LABORATORIO ENSAYOS  
DE MATERIALES, SUELOS,  
CONCRETO Y ASFALTO  
RUC 20607462754

PROYECTO	"DPURACION DE AGUAS RESIDUALES URBANAS CON HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL CONSTRUIDO CON SUSTRATO RECICLADO "	
SOLICITA	CRISTHIAN JUAN MOGOLLON VIZUETA	FECHA DE INFORME : OCTUBRE DEL 2024

ANALISIS GRANULOMETRICO DEL AGREGADO FINO  
(NTP 400.012)

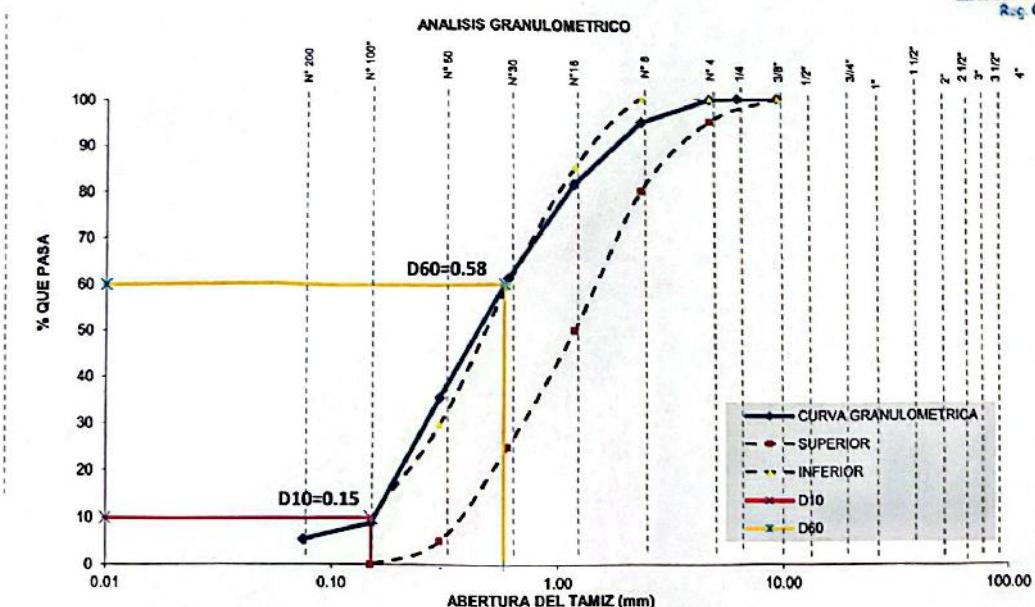
PROCEDENCIA	CANTERA EL OLGUIN
MUESTRA	M - 2
MATERIAL	ARENA GRUESA

TAMICES ASTM	ABERTURA (mm.)	PESO RETENIDO (g.)	PORCENTAJE PARCIAL RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO		ESPECIFICACIONES		DESCRIPCION DE LA MUESTRA
				RETENIDO (%)	% QUE PASA (%)	MÍNIMO (%)	MÁXIMO (%)	
4"	100							PESO INICIAL (gr) 250.00
3 1/2"	90							CONTENIDO DE HUMEDAD (%) 2.02
3"	75							TAMAÑO MAXIMO (%) -
2 1/2"	63							GRAVA (Pasa 3", retiene N°4) (%) 0.1
2"	50							ARENA ( Pasa N°4, retiene N°200) (%) 94.5
1 1/2"	37.5							PASANTE N° 200 (%) 5.4
1"	25.0							LIMITE LIQUIDO 0
3/4"	19.0							LIMITE PLASTICO 0
1/2"	12.5							INDICE DE PLASTICIDAD 0
3/8"	9.5	0.00	0.0	0.0	100.0	100	100	MÓDULO DE FINEZA 2.18
1/4"	6.3	0.00	0.0	0.0	100.0	95	100	OBSERVACIONES:
Nº 4	4.75	0.29	0.1	0.1	99.9			
Nº 8	2.36	12.43	5.0	5.1	94.9	80.0	100.0	
Nº 16	1.18	33.70	13.5	18.6	81.4	50.0	85.0	
Nº 30	0.600	50.52	20.2	38.8	61.2	25.0	60.0	
Nº 50	0.300	63.92	25.6	64.3	35.7	5.0	30.0	
Nº 100	0.150	66.76	26.7	91.0	9.0	0.0	10.0	
Nº 200	0.075	8.98	3.6	94.6	5.4			
BANDEJA	13.40	5.4	100.0	0.0				

Rafael Luciano Zavala Feria  
Ing. Civil Jefe  
Laboratorio Científico y Técnico de Suelos y Asfalto  
Ruc. C.P. N° 145503



DANIEL IPIMAQUE OLIVA  
TECNICO DE CONCRETO Y ASFALTO  
LABORATORIO CIENTIFICO Y TECNICO DE SUELOS Y ASFALTO



Observacion: material proporcionado por el solicitante

EL LEM L&D EIRL ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEM - L&D EIRL se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. EL LEM - L&D EIRL está exento de responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o terceros.

SUELOS L&D



PROYECTO	"DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES URBANAS CON HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL CONSTRUIDO CON SUSTRATO RECICLADO "	
SOLICITA	CRISTHIAN JUAN MOGOLLON VIZUETA	FECHA DE INFORME : OCTUBRE DEL 2024

**METODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA DETERMINAR LA MASA POR UNIDAD DE VOLUMEN O DENSIDAD ("PESO UNITARIO") Y LOS VACIOS EN LOS AGREGADOS  
(NTP 400.017)**

PROCEDENCIA	:CANTERA OLGUIN
MUESTRA	: M-2
MATERIAL	:ARENA GRUESA

**PESO UNITARIO DEL AGREGADO FINO SUELTO**

IDENTIFICACION	Peso de la Muestra (gr.)			VOL. MOLDE (cm3)	PROMEDIO (gr/cm3)
	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3		
ARENA GRUESA	1290	1280	1288	939	1.370

**PESO UNITARIO DEL AGREGADO FINO VARILLADO**

IDENTIFICACION	Peso de la Muestra (gr.)			VOL. MOLDE (cm3)	PROMEDIO (gr/cm3)
	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3		
ARENA GRUESA	1495	1483	1489	939	1.586

**Observacion:**

- 1.- La muestra ha sido proporcionada por el solicitante.
- 2.- Material zarandeadido en el Laboratorio
- 3.- Los datos de identificacion de la muestra y del proyecto han sido proporcionados por el solicitante, siendo responsabilidad de este la veracidad de los mismos.

DANIEL IPIMAQUE OLIVA  
INGENIERO EN CONCRETO Y ASFALTO  
LABORATORIO DE MATERIALES, SUELOS Y ASFALTO

Rafael Luciano Zavala Feria  
Ing. Civil Jefe  
Laboratorio Construcción y Reciclaje de Suelos y Asfalto  
Ruc. C.P. N° 14-5560



945 515 326 ☎

Av.Tacna 125 Castilla- Piura ☎

LABORATORIO DE  
SUELOS L&D ☎



LABORATORIO ENSAYOS  
DE MATERIALES, SUELOS,  
CONCRETO Y ASFALTO  
RUC 20407442754

PROYECTO	"DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES URBANAS CON HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL CONSTRUIDO CON SUSTRATO RECICLADO "	
SOLICITA	CRISTHIAN JUAN MOGOLLON VIZUETA	FECHA DE INFORME : OCTUBRE DEL 2024

**MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA DETERMINAR LA MASA POR UNIDAD DE VOLUMEN O DENSIDAD ("PESO UNITARIO") Y LOS VACÍOS EN LOS AGREGADOS  
(NTP 400.017)**

PROCEDENCIA	:CANTERA OLGUIN
MUESTRA	: M-1
MATERIAL	:ARENA GRUESA

**PESO UNITARIO DEL AGREGADO FINO SUELTO**

IDENTIFICACION	Peso de la Muestra (gr.)			VOL. MOLDE (cm3)	PROMEDIO (gr/cm3)
	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3		
ARENA GRUESA	1380	1394	1390	939	1.478

**PESO UNITARIO DEL AGREGADO FINO VARILLADO**

IDENTIFICACION	Peso de la Muestra (gr.)			VOL. MOLDE (cm3)	PROMEDIO (gr/cm3)
	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3		
ARENA GRUESA	1524	1522	1520	939	1.621

**Observacion:**

- 1.- La muestra ha sido proporcionada por el solicitante.
- 2.- Material zarandeado en el Laboratorio
- 3.- Los datos de identificación de la muestra y del proyecto han sido proporcionados por el solicitante, siendo responsabilidad de este la veracidad de los mismos.

DANIEL IFAMAQUE OLIVA  
LICENCIADO EN INGENIERIA CIVIL  
LABORATORIO DE MATERIALES  
DE SUELOS Y ASFALTO



Rafael Luciano Zavala Feria  
Ing. Civil Jefe  
Laboratorio Geotecnico y Reciclaje de Suelos y Asfalto  
Ruc. C.P N° 142550

945 515 326 ☎

Av.Tacna 125 Castilla- Piura

LABORATORIO DE  
SUELOS L&D



LABORATORIO EN SAYOS  
DE MATERIALES, SUELOS,  
CONCRETO Y ASFALTO  
RUC: 20407442754

PROYECTO	"DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES URBANAS CON HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL CONSTRUIDO CON SUSTRATO RECICLADO "	
SOLICITA	CRISTHIAN JUAN MOGOLLON VIZUETA	FECHA DE INFORME : OCTUBRE DEL 2024

### MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZANDO PARA PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO

PROCEDENCIA	: CANTERA EL OLGUIN
MUESTRA	:M-1
MATERIAL	: ARENA GRUESA

#### AGREGADO FINO (NTP 400.022)

DETERMINACION N°		1	2	
A	Peso del frasco mas agua aforado (gr)	666.91	666.90	
B	Peso de la muestra seca la horno (gr)	248.37	248.30	
C	Peso de la muestra saturada superficialmente seca (gr)	250.00	250.00	
D	Peso del frasco mas agua mas muestra aforado (gr)	820.50	820.52	PROMEDIO
Pem : Peso específico de masa seca	B/(C-(D-A)) gr/cm <sup>3</sup>	2.58	2.58	2.58
PeSSS:Peso específico de masa saturada superficialmente seca	C/(C-(D-A)) gr/cm <sup>3</sup>	2.59	2.59	2.59
Pea: Peso específico aparente	B/(B-(D-A)) gr/cm <sup>3</sup>	2.62	2.62	2.62
Ab: absorción de agua	((C-B)*100)/B %	0.7	0.7	0.7

#### Observacion:

- 1.- La muestra ha sido proporcionada por el solicitante.
- 2.- Material zarandead o en el Laboratorio
- 3.- Los datos de identificación de la muestra y del proyecto han sido proporcionados por el solicitante, siendo responsabilidad de este la veracidad de los mismos.

EL LEM L&D EIRL ha emitido este reporte de ensayo , según los datos proporcionados por el cliente con la aceptación de los datos y resultados de este reporte , las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEM - L&D EIRL se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo . EL LEM - L&D EIRL esta exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o terceros

Rafael Luciano Zavala Ferri  
Ing. Civil Jefe  
Laboratorio Construcción y Materiales de Suelos y Asfalto  
RUC: CP N° 445569

DANIEL IBARRAQUE OLIVA  
TÉCNICO SUPERIOR EN CONCRETO Y ALTAZ  
LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES  
DE SUELOS Y ASFALTO



945 515 326

Av.Tacna 125 Castilla- Piura



LABORATORIO DE

SUELOS L&D





LABORATORIO ENsayos  
DE MATERIALES, SUELOS,  
CONCRETO Y ASFALTO  
RUC 20407463754

PROYECTO	"DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES URBANAS CON HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL CONSTRUIDO CON SUSTRATO RECICLADO "		
SOLICITA	CRISTHIAN JUAN MOGOLLON VIZUETA		FECHA DE INFORME : OCTUBRE DEL 2024

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO TOTAL DE HUMEDAD EVAPORABLE EN AGREGADOS POR SECADO

( NTP 339.185 )

IDENTIFICACION	Muestra	PROCEDENCIA	PESO SUELLO HUMEDO + TARA (gr)	PESO SUELLO SECO + TARA (gr)	PESO TARA (gr)	PESO AGUA (gr)	PESO SUELLO SECO (gr)	% DE HUMEDAD
ARENA GRUESA	M-1	CANTERA EL OLGIN	383.05	371.79	72.01	11.26	299.78	3.76
ARENA GRUESA	M-2	CANTERA EL OLGIN	468.40	460.56	72.15	7.84	388.41	2.02

Observación:

Ensayos efectuados al material en estado natural

EL LEM L&D EIRL ha emitido este reporte de ensayo , según los datos proporcionados por el cliente con la aceptación de los datos y resultados de este reporte , las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEM - L&D EIRL se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecucion y al resultado del reporte de ensayo . EL LEM - L&D EIRL esta exento de toda responsabilidad que derive de la interpretacion y uso posterior de la informacion contenida en este reporte por parte del cliente o terceros

Rafael Luciano Zavala Fera  
Ing. Civil Jefe  
Laboratorio de Materiales, Suelos, Concreto y Asfalto  
Ruc. C.P. N° 142552



DANIEL IPALAQUE OLIVA  
TÉCNICO EN EL CONCRETO Y ALTAZ  
LABORATORIO DE MATERIALES, SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO  
DE SUELOS Y ASFALTO

945 515 326

Av.Tacna 125 Castilla- Piura

LABORATORIO DE  
SUELOS L&D



PROYECTO	"DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES URBANAS CON HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL CONSTRUIDO CON SUSTRATO RECICLADO "	
SOLICITA	CRISTHIAN JUAN MOGOLLON VIZUETA	FECHA DE INFORME : OCTUBRE DEL 2024

METODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA DETERMINAR LA MASA POR UNIDAD DE VOLUMEN O DENSIDAD ("PESO UNITARIO") Y LOS VACÍOS EN LOS AGREGADOS  
(NTP 400.017)

PROCEDENCIA	:CANTERA OLGUIN
MUESTRA	: M-2
MATERIAL	:ARENA GRUESA

PESO UNITARIO DEL AGREGADO FINO SUELTO

IDENTIFICACION	Peso de la Muestra (gr.)			VOL. MOLDE (cm3)	PROMEDIO (gr/cm3)
	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3		
ARENA GRUESA	1290	1280	1288	939	1.370

PESO UNITARIO DEL AGREGADO FINO VARILLADO

IDENTIFICACION	Peso de la Muestra (gr.)			VOL. MOLDE (cm3)	PROMEDIO (gr/cm3)
	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3		
ARENA GRUESA	1495	1483	1489	939	1.586

Observacion:

- 1.- La muestra ha sido proporcionada por el solicitante.
- 2.- Material zarandeado en el Laboratorio
- 3.- Los datos de identificacion de la muestra y del proyecto han sido proporcionados por el solicitante, siendo responsabilidad de este la veracidad de los mismos.

Rafael Luciano Zavala Feria  
Ing. Civil Jefe  
Laboratorio Geotecnico y Suelos de Sistemas  
R.c.p. C.P. N° 145500



DANIEL P. OLIVA  
Tecnico Superior en Concreto y Asfalto  
LABORATORIO DE MATERIALES, SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO  
DE TACNA Y AREQUIPA

945 515 326

Av.Tacna 125 Castilla - Piura



LABORATORIO DE

SUELOS L&D





LABORATORIO ENSAYOS  
DE MATERIALES, SUELOS,  
CONCRETO Y ASFALTO  
RUC 20607462754

PROYECTO	"DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES URBANAS CON HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL CONSTRUIDO CON SUSTRATO RECICLADO "	
SOLICITA	CRISTHIAN JUAN MOGOLLON VIZUETA	FECHA DE INFORME : OCTUBRE DEL 2024

METODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA DETERMINAR EL PORCENTAJE DE POROS EN LOS AGREGADOS  
(NTP 400.036)

PROCEDENCIA	:CANTERA OLGUIN
MUESTRA	: M-2
MATERIAL	:ARENA GRUESA

PORCENTAJE DE POROS EN EL AGREGADO

IDENTIFICACION	Peso unitario	Peso unit agua	Peso especifico	VOL. MOLDE (cm3)	Porosidad (%)
	(gr/cm3)	(Kg/cm3)	VALOR		
ARENA GRUESA	1.586	999	2.62	939	39.41%



Observacion:

- 1.- La muestra ha sido proporcionada por el solicitante.
- 2.- Material zarandeado en el Laboratorio
- 3.- Los datos de identificacion de la muestra y del proyecto han sido proporcionados por el solicitante, siendo responsabilidad de este la veracidad de los mismos.

Rafael Luciano Zavala Feria  
Ing. Civil Jefe  
Laboratorio Geotecnico y Mecanica de Suelos y Asfalto  
R.U.C C.P.N° 142550

DANIEL P. OLIVA  
BENEFICIOS PARA CONSTRUCTORES Y ASFALTOS  
LABORATORIO GEOTECNICO Y MECANICA DE SUELOS Y ASFALTO

945 515 326

Av.Tacna 125 Castilla- Piura

LABORATORIO DE  
SUELOS L&D



LABORATORIO ENSAYOS  
DE MATERIALES, SUELOS,  
CONCRETO Y ASFALTO  
RUC 20607462756

PROYECTO	"DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES URBANAS CON HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL CONSTRUIDO CON SUSTRATO RECICLADO "	
SOLICITA	CRISTHIAN JUAN MOGOLLON VIZUETA	FECHA DE INFORME : OCTUBRE DEL 2024

METODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA DETERMINAR EL PORCENTAJE DE POROS EN LOS AGREGADOS  
(NTP 400.036)

PROCEDENCIA	: CANTERA OLGUIN
MUESTRA	: M-1
MATERIAL	: ARENA GRUESA

PORCENTAJE DE POROS EN EL AGREGADO

IDENTIFICACION	Peso unitario (gr/cm3)	Peso unit agua (Kg/cm3)	Peso específico VALOR	VOL. MOLDE (cm3)	Porosidad (%)
ARENA GRUESA	1.621	999	2.62	939	38.07%



Observacion:

- 1.- La muestra ha sido proporcionada por el solicitante.
- 2.- Material zarandeado en el Laboratorio
- 3.- Los datos de identificación de la muestra y del proyecto han sido proporcionados por el solicitante, siendo responsabilidad de este la veracidad de los mismos.

Rafael Luciano Zavala Feria  
Ing. Civil Jefe  
Laboratorio Geotecnico y Biomecanica de Suelos y Asfalto  
Ruc. C.I.P N° 145560

DANIEL ITAMAQUE OLIVA  
TECNICO SUPERIOR CONCRETO Y ASFALTO  
LABORATORIO GEOTECNICO Y BIOMECANICA  
DE SUELOS Y ASFALTO

945 515 326 ☎

Av.Tacna 125 Castilla- Piura

LABORATORIO DE  
SUELOS L&D



## INFORME DE ENSAYO N° A1159/25

**Solicitante** : MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE BUENOS AIRES  
**Dirección** : Av Grau N° 576 - Buenos Aires - Morropón - Piura

**(º) Procedencia** : AGUA RESIDUAL – PTAR  
**Distrito:** Buenos Aires - **Provincia:** Morropón - **Departamento:** Piura

**(º) Matriz de la muestra** : Agua Residual Municipal

**(º) Fecha de Muestreo** :  
**Responsable del muestreo** : Personal Técnico - Empresa Solicitante

Fecha y Hora de Recepción : / 07:04 h  
 Fecha de Ejecución del Ensayo :  
 Código Interno : L115

PARÁMETROS	1159 - 1 <sup>(a)</sup>		Expresado en:	<b>MÉTODOS DE ENSAYO</b>
	(º)	AR-01 <sup>(b)</sup> (15:00 h)		
Demanda Bioquímica de Oxígeno		338	mg/L	APHA 5210 B (*)
Demanda Química de Oxígeno		658	mgO <sub>2</sub> /L	APHA 5220 D (*)
<b>Microbiológico</b>				
Coliformes Termotolerantes			NMP/100 mL	APHA 9221 E (Item 1) (*)
(º) Código de Laboratorio		(º) Código del Solicitante y hora de muestreo		

**REFERENCIA DE MÉTODOS ANALÍTICOS, -**

- Standard Methods for The Examination Of Water And Wastewater, 23 rd Ed, APHA, AWWA WEF, 2017.
- (\*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que han sido acreditados por el INACAL – DA.

**ESTADO Y CONDICIÓN DE LA MUESTRA, -**

- Las muestras cumplen con los requisitos de calidad para ser analizadas.

**OBSERVACIONES, -**

- (\*) Datos proporcionados por el cliente. EQUAS S.A. no asume responsabilidad de los datos brindados que puedan afectar la validez de los resultados.
- Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

**EQUAS S.A.**  
  
 Ing. Eusebio Víctor Cóndor Evaristo  
 Gerente General

Prohibida su reproducción parcial o total sin la autorización del Gerente General – EQUAS S.A.

Los resultados obtenidos se refieren solamente a las muestras ensayadas.

Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de productos o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

El laboratorio mantendrá en custodia por 30 días, la muestra dirimente para los ensayos de metales, la solicitud de dirimencia ante la comisión debe realizarse diez días útiles antes de su vencimiento.

## Anexo 14: Certificados de calibración



ISO/IEC 17025:2017

### CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° CC-0540-2025

Fecha de Emisión 2025-09-05

Página 1 de 2

1. Solicitante	: LABORATORIO ENSAYO MATERIALES L & D E.I.R.L.
2. Dirección	: AV. PROGRESO NRO. 543 - PIURA - PIURA - CASTILLA
3. Instrumento de medición	: HUMEDÓMETRO - SPEEDY
Marca	: PERUTEST
Modelo	: NO INDICA
Número de Serie	: NO INDICA
Identificación	: SP-01
Procedencia	: NO INDICA
Capacidad	: 10 g de muestra
Ubicación	: LABORATORIO
Datos del Manómetro	
Tipo	: ANALÓGICO
Marca	: PERUTEST
Modelo	: NO INDICA
Número de Serie	: NO INDICA
Identificación	: NO INDICA
Alcance	: 20 %H.R.
Resolución	: 0,5 %H.R.
4. Lugar de Calibración	: LAB. DE SUELOS, ASFALTO, CONCRETO Y MATERIALES DE LABORATORIO ENSAYO MATERIALES L & D
5. Fecha de Calibración	: 2025-09-05
6. Método de Calibración	

La calibración se realizó utilizando el método de comparación directa.  
Se emplearon patrones certificados.

#### 7. Trazabilidad

Los resultados de la calibración tienen trazabilidad a los patrones nacionales e internacionales.

Instrumento Patrón	Certificado de Calibración
Instrumento de Medición de Presión Relativa	LFP - 235 - 2024

#### B. Condiciones Ambientales de calibración

Temperatura : Inicio : 26,1 °C Final : 26,5 °C  
Humedad : Inicio : 34 % H.R. Final : 35 % H.R.



Ricardo Sotomayor Jaime  
Gerente del L.C.

MTW36-08

TOTAL WEIGHT & SYSTEMS S.A.C.  
Jr. Alfonso Bernal Montoya N° 1020 Urb. San Amadeo de Garagay, S.M.P.  
Telef.: 569-9750 / 569-9750 / 569-9751  
Website: www.totalweight.com

Responsable: Dpto. Metrología  
Pág. 1 de 2

## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° CC-0539-2025

Fecha de Emisión : 2025-09-03

Página 1 de 2

1. **Solicitante** : LABORATORIO ENSAYO MATERIALES L & D E.I.R.L.
2. **Dirección** : AV. PROGRESO NRO. 543 - PIURA - PIURA - CASTILLA
3. **Instrumento de medición** : TAMIZ
  - **Marca** : METAUT
  - **Modelo** : MBA200
  - **Serie** : 21001
  - **Código Identificación** : NO INDICA
  - **Procedencia** : NO INDICA
  - **Malla** : N° 200
  - **Diámetro** : 8"
  - **Ubicación** : LABORATORIO
4. **Lugar de Calibración** : LAB. DE SUELOS, ASFALTO, CONCRETO Y MATERIALES DE LABORATORIO ENSAYO MATERIALES L & D
5. **Fecha de Calibración** : 2025-09-05
6. **Método de Calibración**  
La calibración se realizó utilizando el método de comparación directa. Tomando como referencia la norma técnica ASTM E 11 - Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves. Se emplearon patrones certificados.
7. **Trazabilidad**  
Los resultados de la calibración realizada tienen trazabilidad a los patrones nacionales del INACAL - DM, en concordancia con el Sistema Internacional de Unidades de Medida (SI) y el Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú (SLUMP).

Los resultados del certificado son válidos solo para el objeto calibrado y se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones y no deben utilizarse como certificado de conformidad con normas de producto.

Se recomienda al usuario recalibrar el instrumento a intervalos adecuados, los cuales deben ser elegidos con base en las características del trabajo realizado, el mantenimiento, conservación y el tiempo de uso del instrumento.

Total Weight & Systems S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento o equipo después de su calibración, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

Este certificado de calibración es trazable a patrones nacionales o los internacionales, los cuales realizan las unidades de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Este certificado de calibración no podrá ser reproducido parcialmente, excepto con autorización previa por escrito de Total Weight & Systems S.A.C.

El certificado de calibración no es válido sin la firma del responsable técnico de Total Weight & Systems S.A.C.

Instrumento Patrón	Certificado de Calibración
Reticula Micrométrica	LLA - 099- 2024
Pie de Rey Digital	CL-1010-2025

### 8. Condiciones Ambientales de calibración

Temperatura : Inicio : 24,5 °C : Final : 24,5 °C  
Humedad : Inicio : 53 % HR : Final : 53 % HR



Ricardo Sotomayor Jaime  
Gerente del L.C.

## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° CC-0535-2025

Fecha de Emisión : 2025-09-05

Página 1 de 2

1. Solicitante : LABORATORIO ENSAYO MATERIALES L & D E.I.R.L.
2. Dirección : AV. PROGRESO NRO. 543 - PIURA - PIURA - CASTILLA.
3. Instrumento de medición : TAMIZ
  - Marca : NO INDICA
  - Modelo : NO INDICA
  - Serie : NO INDICA
  - Código Identificación : T40-01
  - Procedencia : NO INDICA
  - Malla : N° 40
  - Diámetro : 8"
  - Ubicación : LABORATORIO
4. Lugar de Calibración : LAB. DE SUELOS, ASFALTO, CONCRETO Y MATERIALES DE LABORATORIO ENSAYO MATERIALES L & D
5. Fecha de Calibración : 2025-09-05
6. Método de Calibración  
 La calibración se realizó utilizando el método de comparación directa. Tomando como referencia la norma técnica ASTM E 11 - Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves. Se emplearon patrones certificados.

### 7. Trazabilidad

Los resultados de la calibración realizada tienen trazabilidad a los patrones nacionales del INACAL - DM, en concordancia con el Sistema Internacional de Unidades de Medida (SI) y el Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú (SLUMP).

Instrumento Patrón	Certificado de Calibración
Reticula Micrométrica	LLA - 099- 2024
Pie de Rey Digital	CL-1016-2025

### 8. Condiciones Ambientales de calibración

Temperatura : Inicio : 24,5 °C : Final : 24,5 °C  
 Humedad : Inicio : 53 % HR : Final : 53 % HR

Los resultados del certificado son válidos solo para el objeto calibrado y se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones y no deben utilizarse como certificado de conformidad con normas de producto.

Se recomienda al usuario recalibrar el instrumento a intervalos adecuados, los cuales deben ser elegidos con base en las características del trabajo realizado, el mantenimiento, conservación y el tiempo de uso del instrumento.

Total Weight & Systems S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento o equipo después de su calibración, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

Este certificado de calibración es trazable a patrones nacionales o los internacionales, los cuales realizan las unidades de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Este certificado de calibración no podrá ser reproducido parcialmente, excepto con autorización previa por escrito de Total Weight & Systems S.A.C.

El certificado de calibración no es válido sin la firma del responsable técnico de Total Weight & Systems S.A.C.



Ricardo Sotomayor Jaime  
Gerente del L.C.

## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° CC-0519-2025

Fecha de Emisión : 2025-09-05

Página 1 de 2

1. **Solicitante** : LABORATORIO ENSAYO MATERIALES L & D E.I.R.L.
2. **Dirección** : AV. PROGRESO NRO. 543 - PIURA - PIURA - CASTILLA
3. **Instrumento de medición** : CAZUELA CASAGRANDE
  - **Marca** : ORION
  - **Modelo** : COP-01
  - **Serie** : 21011253
  - **Código Identificación** : NO INDICA
  - **Procedencia** : NO INDICA
  - **Tipo Operación** : MANUAL
  - **Tipo Indicador** : DIGITAL
  - **Alcance Indicación** : 0 A 99 999 VUELTAS
  - **Escala Indicación** : 1 VUELTA
4. **Lugar de Calibración** : LAB. DE SUELOS, ASFALTO, CONCRETO Y MATERIALES DE LABORATORIO ENSAYO MATERIALES L & D
5. **Fecha de Calibración** : 2025-09-05
6. **Método de Calibración**

La calibración se realizó utilizando el método de comparación directa. Tomando como referencia la norma técnica ASTM D 4318 -Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. Se emplearon patrones certificados.

### 7. Trazabilidad

Los resultados de la calibración realizada tienen trazabilidad a los patrones nacionales del INACAL - DM, en concordancia con el Sistema Internacional de Unidades de Medida (SI) y el Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú (SLUMP).

Instrumento Patrón	Certificado de Calibración
Pie de Rey Digital	CL-1016-2025
Juego de Pesas	PE25-C-0173

### 8. Condiciones Ambientales de calibración

Temperatura : Inicio : 24,5 °C Final : 24,5 °C  
 Humedad : Inicio : 35 % H.R. Final : 35 % H.R.

Los resultados del certificado son válidos solo para el objeto calibrado y se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones y no deben utilizarse como certificado de conformidad con normas de producto.

Se recomienda al usuario recalibrar el instrumento a intervalos adecuados, los cuales deben ser elegidos con base en las características del trabajo realizado, el mantenimiento, conservación y el tiempo de uso del instrumento.

Total Weight & Systems S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento o equipo después de su calibración, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

Este certificado de calibración es trazable a patrones nacionales o los Internacionales, los cuales realizan las unidades de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Este certificado de calibración no podrá ser reproducido parcialmente, excepto con autorización previa por escrito de Total Weight & Systems S.A.C.

El certificado de calibración no es válido sin la firma del responsable técnico de Total Weight & Systems S.A.C.



Ricardo Sotomayor Jaime  
Gerente del L.C.

## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° CM-4508-2025

Requerimiento  
6242-2025

Fecha de Emisión  
2025-09-06

**1. SOLICITANTE** : LABORATORIO ENSAYO MATERIALES L & D E.I.RL.

Dirección : Av. Progreso Nro. 543 - Piura - Piura - Castilla

**2. INSTRUMENTO DE MEDICIÓN** : BALANZA

Tipo	: ELECTRÓNICA
Clasificación	: NO AUTOMÁTICA
Marca	: OHAUS
Modelo	: SJX622/E
Número de serie	: B926852556
Identificación	: NO INDICA
Procedencia	: CHINA
Capacidad máxima	: 620 g
Div. de escala (d)	: 0,01 g
Div. de verificación (e)	: 0,01 g
Clase de exactitud	: II
Ubicación	: LABORATORIO

**3. FECHA Y LUGAR DE LA CALIBRACIÓN**

Calibrado el 2025-09-03 en INSTALACIONES DEL CLIENTE

**4. MÉTODO DE CALIBRACIÓN**

La calibración se realizó mediante el método de comparación según el PC-011 4ta Edición, 2010: "Procedimiento para la calibración de balanzas de funcionamiento no automático clase I y clase II" del INDECOP.

**5. TRAZABILIDAD**

Los resultados de la calibración tienen trazabilidad a patrones nacionales e internacionales.

Patrones Utilizados	Certificado
Juego de pesas F1	PE25-C-0491

**6. CONDICIONES DE CALIBRACIÓN**

Temperatura Ambiental : De 25,6 °C a 25,6 °C

Humedad Relativa : De 51,0% H.R. a 52,0% H.R.



Ricardo Sotomayor Jaime  
Gerente del L.C.

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° CT-1731-2025**

Requerimiento	Fecha de Emisión
6242-2025	2025-09-09

**1. SOLICITANTE** : LABORATORIO ENSAYO MATERIALES L & D E.I.R.L.

Dirección : Av. Progreso Nro. 543 - Piura - Piura - Castilla

**2. EQUIPO** : HORNO

Marca : PYX EQUIPOS  
Modelo : STHX-1A  
Número de Serie : 190707  
Identificación : NO INDICA  
Procedencia : NO INDICA  
Ventilación : NATURAL  
Temperatura de Trabajo : 110 °C ± 5 °C

Instrumento de Medición del Equipo :

	Tipo	Alcance	Resolución
Termómetro	DIGITAL	De 20 °C a 300 °C	0,1 °C
Controlador	DIGITAL	De 20 °C a 300 °C	0,1 °C

**3. FECHA Y LUGAR DE LA CALIBRACION**

La calibración se realizó el 2025-09-03 en LAB. DE SUELOS, ASFALTO, CONCRETO Y MATERIALES

**4. MÉTODO DE CALIBRACIÓN**

La calibración se realizó mediante el método de comparación según el PC-015 2da edición, 2009: "Procedimiento para la Calibración o Caracterización de Medios Isotermos con Alte como Medio Termostático" publicada por el SNM/INDECOPI.

**5. TRAZABILIDAD**

Los resultados de la calibración tienen trazabilidad a los patrones nacionales del INACAL-DM.

Patrones utilizados	Certificado
Termómetro multicanal de indicación digital	CT-1227-2025

**6. CONDICIONES DE CALIBRACION**

Temperatura Ambiental : De 25,7 °C a 26,4 °C  
Humedad Relativa : De 56,6 % H.R. a 55,7 % H.R.  
Tensión Eléctrica : 215,2 V  
Posición del Controlador : 110 °C  
Posición de la Ventilación : NO APLICA  
Carga : Se colocó 4 recipientes con muestras de arena representando el 60% de la carga total.



Ricardo Sotomayor Jaime  
Gerente del L.C.