

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“OPERACIÓN DE UN SISTEMA FRANCÉS PARA LA
DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN CLIMA
ÁRIDO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÍCOLA**

DIANA CAROLINA SALGUEDO CORDOVA

LIMA - PERÚ

2022

Document Information

Analyzed document	TESIS DIANA CAROLINA SALGUEDO CORDOVA.pdf (D163064564)
Submitted	2023-04-03 16:28:00
Submitted by	Rosa Maria Miglio Toledo
Submitter email	rmiglio@lamolina.edu.pe
Similarity	6%
Analysis address	rmiglio.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

W	URL: https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/4447/leon-menacho-wladimir-a... Fetched: 2022-07-28 09:15:55	 38
W	URL: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2474/JGarcia_and_ACorzo.pdf?sequence=1&isAllowed=y Fetched: 2023-04-03 22:40:00	 17

Entire Document

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA "OPERACIÓN DE UN SISTEMA FRANCÉS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN CLIMA ÁRIDO" TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA AGRÍCOLA DIANA CAROLINA SALGUEDO CORDOVA LIMA - PERÚ 2022

La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación (Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual)

2
DEDICATORIA A mis padres, Emilia y Edwar, mis pilares, a quienes amo y admiro plenamente A mi amado hijo, Martín, mi principal motivo para seguir adelante A mis hermanos, Stefany, Shantal y Emir A mis abuelos, que me hicieron parte de sus anhelos

AGRADECIMIENTOS A Dios por darme la vida, guiar mi camino, por permitirme crecer, caer, levantarme, aprender y continuar hacia Él, y a quien sea la gloria siempre. A mis padres Edwar Salgado Zárate y Emilia Córdova Aroste, por su amor, respaldo y apoyo incondicional en todos los aspectos, por tener paciencia, por confiar en mí y exhortarme a ser mejor cada día. A mi asesora Ing. Rosa Miglio Toledo, siempre dispuesta a compartir y generar conocimiento, por su dedicación, apoyo y confianza. A todo el equipo del proyecto HUMEDART, ingenieros y tesisistas, por brindar sugerencias y comentarios, compartir experiencias y conocimientos que han enriquecido mi investigación. Al Hogar de ancianos Santa Ana y San Joaquín por permitirme el acceso a sus instalaciones, especialmente a Don Mauro por siempre mantenerme informada, por su disposición y apoyo indispensable en el registro de bombeo. A Yeny Taipe, Ernesto Yanque, Rubén Palomino y Roberto Tello que me apoyaron sin duda, más allá de lo planeado, por ser parte de la solución a muchos problemas encontrados. A Stefany y Renzo por estar conmigo en el momento preciso. A Martín por esperar, comprender, acompañarme y animarme. A todos los que en alguna manera lograron impactarme positivamente para que siga adelante con esta investigación.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA

**“OPERACIÓN DE UN SISTEMA FRANCÉS PARA LA DEPURACIÓN
DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN CLIMA ÁRIDO”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERA AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. DIANA CAROLINA SALGUEDO CORDOVA

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dra. LIA RAMOS FERNÁNDEZ
Presidente

Mg. Sc. KENYI GLICERIO CAVALCANTI CÁRDENAS
Miembro

Dr. JOSÉ LUIS CALLE MARAVÍ
Miembro

Mg. Sc. ROSA MARÍA MIGLIO TOLEDO
Asesor

LIMA – PERU

2022

DEDICATORIA

A mis padres, Emilia y Edwar, mis pilares, a quienes amo y admiro plenamente

A mi amado hijo, Martín, mi principal motivo para seguir adelante

A mis hermanos, Stéfany, Shantal y Emir

A mis abuelos, que me hicieron parte de sus anhelos

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida, guiar mi camino, por permitirme crecer, caer, levantarme, aprender y continuar hacia Él, y a quien sea la gloria siempre.

A mis padres Edwar Salgado Zárate y Emilia Córdova Aroste, por su amor, respaldo y apoyo incondicional en todos los aspectos, por tener paciencia, por confiar en mí y exhortarme a ser mejor cada día.

A mi asesora Ing. Rosa Miglio Toledo, siempre dispuesta a compartir y generar conocimiento, por su dedicación, apoyo y confianza.

A todo el equipo del proyecto HUMEDART, ingenieros y tesistas, por brindar sugerencias y comentarios, compartir experiencias y conocimientos que han enriquecido mi investigación.

Al Hogar de ancianos Santa Ana y San Joaquín por permitirme el acceso a sus instalaciones, especialmente a Don Mauro por siempre mantenerme informada, por su disposición y apoyo indispensable en el registro de bombeo.

A Yeny Taipe, Ernesto Yanque, Rubén Palomino y Roberto Tello que me apoyaron sin duda, más allá de lo planeado, por ser parte de la solución a muchos problemas encontrados.

A Stefany y Renzo por estar conmigo en el momento preciso.

A Martín por esperar, comprender, acompañarme y animarme en todo el proceso.

A todos los que en alguna manera lograron impactarme positivamente para que siga adelante con esta investigación.

INDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1	AGUAS RESIDUALES.....	3
2.2	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	3
2.2.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.....	4
2.2.2	COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	8
2.3	TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES	9
2.3.1	NIVELES DE TRATAMIENTO	9
2.4	SITUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL PERÚ.....	12
2.4.1	TIPOS DE TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL PERÚ.....	17
2.5	REÚSO DE AGUAS RESIDUALES EN EL PERÚ	18
2.6	TRATAMIENTO DESCENTRALIZADO DE AGUAS RESIDUALES.....	20
2.6.1	SISTEMAS NATURALES DE DEPURACIÓN	20
2.7	HUMEDALES CONSTRUIDOS	22
2.7.1	COMPONENTES DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS	23
2.7.2	TIPOS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS	25
2.7.3	PROCESOS EN LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES CON HUMEDALES CONSTRUIDOS	28
2.7.4	EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS	33
2.8	SISTEMA FRANCÉS.....	33
2.8.1	PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO Y DE DISEÑO	35
2.8.2	CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO	37
2.8.3	VARIACIONES DE CARGA.....	37
2.8.4	CAPA DE LODO EN EL SISTEMA FRANCÉS	38
2.8.5	MANTENIMIENTO.....	39
2.9	SISTEMA FRANCÉS EVALUADO.....	40
2.9.1	DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO	40
2.9.2	COMPONENTES DEL SISTEMA.....	41

2.10	MARCO NORMATIVO	45
III.	METODOLOGÍA	48
3.1	ÁREA DE ESTUDIO.....	48
3.1.1	UBICACIÓN.....	48
3.1.2	CONDICIONES CLIMÁTICAS.....	49
3.2	ETAPAS DE LA METODOLOGÍA.....	49
3.2.1	DURACIÓN.....	50
3.2.2	PRE OPERACIÓN.....	50
3.2.3	OPERACIÓN.....	52
3.2.4	EVALUACIÓN.....	60
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	61
4.1	CARGA HIDRÁULICA AL INGRESO DEL SISTEMA.....	61
4.2	CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES CRUDAS.....	62
4.3	CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS.....	63
4.4	COMPORTAMIENTO DE CADA PARÁMETRO DURANTE EL MONITOREO.....	67
4.4.1	PARÁMETROS FÍSICOS	67
4.4.2	PARÁMETROS QUÍMICOS	70
4.4.3	PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS.....	75
4.5	ANÁLISIS DE LA CAPA DE LODO ACUMULADA	77
4.5.1	ALTURA DE LA CAPA DE LODOS SOBRE LA SUPERFICIE DE LA CELDA FRANCESA ...	77
4.5.2	CARACTERIZACIÓN DE LA CAPA DE LODO ACUMULADA	78
V.	CONCLUSIONES	81
VI.	RECOMENDACIONES	83
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
VIII.	ANEXOS.....	94

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipos de aguas residuales y sus características	4
Tabla 2: Principales parámetros físicos del agua residual doméstica.....	5
Tabla 3: Principales parámetros químicos de las aguas residuales domésticas.....	6
Tabla 4: Principales organismos presentes en agua residual doméstica.....	7
Tabla 5: Composición típica del agua residual doméstica cruda.....	8
Tabla 6: Procesos y operaciones en el tratamiento de aguas residuales	11
Tabla 7: Brecha de cobertura del servicio de tratamiento de aguas residuales	14
Tabla 8: Disposición final de los efluentes de las PTAR	17
Tabla 9: Calidad microbiológica del agua de reúso para riego ^a	19
Tabla 10: Clasificación de los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales.....	22
Tabla 11: Función de las macrófitas en humedales construidos	24
Tabla 12: Tipos de humedales construidos para tratamiento de aguas residuales.....	25
Tabla 13: Procesos de depuración según el tipo de humedal	29
Tabla 14: Eficiencias típicas en los humedales construidos según su clasificación.....	33
Tabla 15: Profundidades de la celda francesa	43
Tabla 16: Profundidades del humedal en la segunda etapa de tratamiento	44
Tabla 17: Normativa relacionada al proyecto	45
Tabla 18: Límites máximos permisibles (LMP).....	46
Tabla 19: Condiciones climáticas durante la etapa de muestreo	49
Tabla 20: Parámetros medidos en campo.....	57
Tabla 21: Parámetros analizados en laboratorios externos.....	57
Tabla 22: Parámetros analizados en laboratorio de agua, saneamiento y medio ambiente UNALM	58
Tabla 23: Carga hidráulica en línea 1 del Sistema Francés.....	61
Tabla 24: Carga hidráulica en línea 2 del Sistema Francés.....	61
Tabla 25: Caracterización del agua residual cruda.....	63
Tabla 26: Caracterización del efluente final.....	64
Tabla 27: Eficiencias de remoción de principales contaminantes	64
Tabla 28: Resultados de monitoreo de PTAR (2013 vs 2021).....	65

Tabla 29: Comparación de las eficiencias año 2013 vs 2021	65
Tabla 30: Resultados del conteo de larvas y huevos de helminto presentes en el agua residual cruda, pretratada y efluente final	77
Tabla 31: Resultados de medición de altura de la capa de lodo acumulada sobre línea 1 y línea 2 de la celda francesa.....	78
Tabla 32: Porcentaje de sólidos en la capa de lodos acumulada	80
Tabla 33: Cantidad de coliformes totales en lodo acumulado de celda francesa	80

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Etapas de tratamiento de lodos del agua residual, ordenadas secuencialmente de izquierda a derecha.	12
Figura 2: Evolución de la cobertura del tratamiento de aguas residuales en el Perú, período 2016 - 2020.	13
Figura 3: Descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento en millones de metros cúbicos, período 2013 - 2019.	13
Figura 4: Número de localidades administradas por las grandes empresas prestadoras de servicios de saneamiento, año 2020.	15
Figura 5: Número de localidades administradas por las medianas empresas prestadoras de servicio de saneamiento, año 2020.	16
Figura 6: Número de localidades administradas por las pequeñas empresas prestadoras de servicio de saneamiento, año 2020.	16
Figura 7. Tecnologías utilizadas en las plantas de tratamiento de aguas residuales de las EPS en el Perú.	18
Figura 8. Humedal de flujo subsuperficial horizontal y sus componentes.	26
Figura 9. Humedal de flujo subsuperficial vertical y sus componentes.	27
Figura 10: Esquema simplificado de los procesos que intervienen en la degradación de la materia orgánica en los humedales.	30
Figura 11. Ciclo del nitrógeno en humedales construidos.	32
Figura 12. Esquema del diseño clásico del Sistema Francés.	34
Figura 13. Vista de perfil de la configuración clásica del Sistema Francés.	35
Figura 14. Sección de la primera etapa de un sistema francés.	36
Figura 15. Procesos implicados en la capa de lodo del Sistema Francés.	39
Figura 16. Esquema de funcionamiento del Sistema Francés en PTAR Chincha.	41
Figura 17. Distribución del agua sobre la superficie de la celda francesa (flujo ascendente). A la izquierda, línea 1 en funcionamiento; a la derecha, línea 2. Cada línea funciona por 3 días alternándose entre ellas.	42
Figura 18. Humedal vertical de la segunda etapa del SF, recién plantado y en funcionamiento (año 2011).	44

Figura 19: Ubicación del área de estudio a partir de imágenes de Google Maps.....	48
Figura 20: Etapas del método de investigación.....	49
Figura 21. Vista de EB1: (a) Nivel de agua por encima del máximo, sobre tubería de alimentación y cerca de las conexiones eléctricas (08/10/19), (b) Vista después de limpieza, renovación de bombas y boyas (11/03/20).....	51
Figura 22. Vista de EB2: (a) Inoperativa, el agua se extrae con bomba externa (08/10/2019), (b) Bomba reparada y boyas nuevas (11/03/20).....	51
Figura 23. Vista de celda francesa y humedal de tratamiento previo al monitoreo.	52
Figura 24. Medición de caudal al ingreso del sistema.....	53
Figura 25. Puntos de muestreo en la PTAR. P1: afluente, P2: agua pretratada y P3: efluente.	55
Figura 26. Toma de muestra de agua residual cruda en celda francesa (P1) y agua residual pretratada que ingresa a la EB2 (P2).	56
Figura 27. Medición de la altura de capa de lodo acumulada cada 50 cm a partir del tubo de distribución, hasta los 2 m: (a) línea de distribución 1 y (b) línea de distribución 2.....	59
Figura 28. Variación de la temperatura del agua residual cruda, pretratada y efluente final, y temperatura ambiental durante el monitoreo.	67
Figura 29. Valores de pH durante el monitoreo del agua residual cruda, pretratada y efluente final. Las líneas horizontales representan los LMP mín. y máx. respecto al pH.....	68
Figura 30. Valores de conductividad eléctrica del agua residual cruda, pretratada y efluente final durante el monitoreo.	69
Figura 31. Valores de turbidez del agua residual cruda, pretratada y efluente final durante el monitoreo.....	70
Figura 32. Valores de DQO del agua residual cruda, pretratada y efluente final durante el monitoreo. La línea horizontal representa el límite máximo permisible para la DQO.	71
Figura 33. Valores de DBO ₅ del agua residual cruda, pretratada y efluente final durante el monitoreo. La línea horizontal representa el límite máximo permisible para la DBO ₅	72
Figura 34. Valores de sólidos suspendidos totales del agua residual cruda, pretratada y efluente final durante el monitoreo. La línea horizontal representa el límite máximo permisible para SST.	72
Figura 35. Diagrama de cajas y bigotes de los resultados obtenidos de las formas de nitrógeno presentes en el agua residual cruda, pretratada y efluente final. Ntotal: nitrógeno total, NH ₄ -N: amonio, NO ₂ ⁻ : nitritos y NO ₃ -N: nitratos.....	74

Figura 36. Valores promedio de concentración de las formas de nitrógeno en el agua residual cruda, pretratada y efluente final.	74
Figura 37. Coliformes termotolerantes presentes en el agua residual cruda, pretratada y efluente final durante el monitoreo. La línea horizontal representa el límite máximo permisible para dicho parámetro.	76
Figura 38. Altura y distribución de capa de lodos acumulada en la línea 1 y 2 de la celda francesa.	78
Figura 39. Composición del lodo acumulado. A la izquierda, lodo sobre superficie de celda francesa y a la derecha, una muestra aleatoria del lodo acumulado antes de ser analizado.	79

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Panel Fotográfico.....	94
Anexo 2: Informes de laboratorios externos.....	99
Anexo 3: Planos definitivos del Sistema Francés ubicado en Chincha.....	103

RESUMEN

En el año 2011, se construyó el primer “Sistema Francés” en Perú, para tratar las aguas residuales domésticas producidas en el hogar de ancianos Santa Ana y San Joaquín, ubicado en Chincha-Ica. Hoffmann *et al.* (2013) reportaron altos rendimientos en el segundo año de operación de este sistema (99% de remoción de DBO₅, DQO, SST y 100% para amonio). Transcurridos ocho años de este primer monitoreo, surgió la inquietud de evaluar cómo habían variado los rendimientos de este sistema y analizar la influencia de la capa de lodo acumulada. Fueron monitoreados tres puntos para caracterizar las aguas residuales crudas, el efluente de la primera etapa y el efluente de la segunda etapa del Sistema Francés. Las remociones obtenidas en todo el sistema fueron de 98.3%, 99.1%, 99.5%, 100% y 19.8% en los parámetros de DQO, DBO₅, SST, NH₄-N y P_{TOTAL} respectivamente. Se determinó que la capa de lodo sobre la superficie de la celda francesa se acumuló en una relación de 1.05 cm por año, obteniéndose una altura promedio de 9.4 cm. Los parámetros microbiológicos del efluente sugieren una calidad de agua apta para uso en riego restringido y para otro tipo de riego requiere de un proceso de desinfección. Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos, se observó que habiendo transcurrido más de ocho años, el sistema mantiene una alta eficiencia de tratamiento y en comparación con sus primeros años de operación sólo ha descendido ligeramente (<1%), lo cual además demuestra que el Sistema Francés es una buena alternativa de tratamiento sostenible.

Palabras claves: Sistema Frances, celda francesa, clima árido, agua residual cruda, capa de lodo, reúso.

ABSTRACT

In 2011, the first “French System” was built in Peru, to treat domestic wastewater produced in the Santa Ana and San Joaquín nursing home, located in Chíncha-Ica. Hoffmann et al. (2013) reported high yields in the second year of operation of this system (99% removal of BOD₅, COD, TSS and 100% for ammonium). Eight years after the first monitoring, the concern arose to evaluate how the yields of this system had changed and to analyze the influence of the accumulated layer of sludge. Three points were monitored to characterize the raw wastewater, the effluent from the first stage and the effluent from the second stage of the French System. The removals obtained throughout the system were 98.3%, 99.1%, 99.5%, 100% and 19.8% in the COD, BOD₅, TSS, NH₄-N and P_{TOTAL} parameters, respectively. The sludge layer on the French cell surface accumulated at a rate of 1.05 cm/year, obtaining an average height of 9.4 cm. The microbiological parameters of the effluent suggest a quality of water suitable for use in restricted irrigation and for other types of irrigation it requires a disinfection process. Finally, according to the results obtained, it was observed that after more than eight years, the system maintains a high treatment efficiency and compared to its first years of operation it has only decreased slightly (<1%), which also demonstrates that the French System is a good alternative for sustainable treatment.

Keywords: French system, French cell, arid climate, raw wastewater, sludge layer, reuse.

I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de las Empresas Prestadoras de Servicios de Saneamiento (EPS), la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS, 2021) refiere que, en el año 2020, sólo el 77,4 % de las aguas residuales fueron tratadas en plantas de tratamiento (PTAR) del país y el resto se descargó directamente a un cuerpo de agua (mar, ríos o lagos), se infiltró en el suelo o se usó clandestinamente para fines agrícolas.

Considerando los graves problemas ambientales y de salud que genera la deficiente cobertura de tratamiento, así como el inutilizado potencial para el reúso del agua tratada, surgen alternativas sostenibles descentralizadas para aquellas poblaciones desatendidas, como el denominado “Sistema Francés” que trata el agua residual cruda en sólo dos etapas de humedales construidos de flujo vertical, sin necesidad de pre o post tratamiento adicional (Dotro et al., 2017).

Los humedales construidos son un ejemplo de tecnología sostenible, pues realizan un proceso natural de depuración, es decir no requieren aditivos químicos para eliminar las sustancias contaminantes, sino vegetación acuática, suelo y microorganismos. Estos sistemas presentan ventajas debido a sus altos niveles de eficiencia en el tratamiento, bajo costo de operación e instalación, además de ser sencillos de operar y de bajo consumo de energía (García y Corzo, 2008).

En el año 2011, se construyó el primer “Sistema Francés” en Perú, para tratar las aguas residuales domésticas producidas en el hogar de ancianos Santa Ana y San Joaquín, ubicado en Chincha-Ica. Hoffmann et al. (2013) reportaron altos rendimientos en el segundo año de operación de este sistema (99% de remoción de DBO_5 , DQO, SST y 100% para amonio).

A pesar de las ventajas mencionadas anteriormente, existen distintas variables que con el paso del tiempo influyen en la operación del sistema tales como la acumulación de lodo en la superficie de la primera etapa, fallos en el sistema de bombeo, crecimiento de plantas, obstrucción de tuberías, aumento de población, etc. Molle *et al.* (2015) afirma que, si bien se requiere poco esfuerzo en la operación y mantenimiento, algunas acciones o la ausencia de acción, pueden generar serios problemas para el funcionamiento de un humedal.

En el Perú aún falta una investigación sistematizada que permita concluir sobre las especificaciones de su diseño y medidas de operación adaptadas a las condiciones locales, teniendo en cuenta los objetivos de reúso que existen a nivel nacional.

Bajo esta premisa y en el marco del proyecto “Optimización del diseño de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas y municipales con fines de reúso del efluente tratado” financiado por FONDECYT, se elaboró un diagnóstico tras nueve años de operación de la planta de tratamiento ubicada en Chincha, evaluando qué factores han intervenido con el paso del tiempo y qué repercusión tienen en la eficiencia de depuración y potencial de reúso del efluente.

Se considera esta investigación como contribución al reporte de experiencias con el “Sistema Francés” en el Perú y su aporte a la generación de criterios de diseño, operación y mantenimiento, en la aplicación de esta tecnología en costa peruana.

Expuesto lo anterior, el objetivo general de esta investigación fue:

- Evaluar la operación de un “sistema de humedales tipo francés” instalado en el hogar de ancianos Santa Ana y San Joaquín de Chincha Alta, para el tratamiento de aguas residuales domésticas, y determinar su eficiencia.

Asimismo, los objetivos específicos fueron:

- Determinar los parámetros de operación del Sistema Francés.
- Evaluar la remoción de carga contaminante, comparando las eficiencias al inicio de su operación con los resultados actuales.
- Analizar la formación de una capa de sólidos en la superficie de la primera unidad de tratamiento.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 AGUAS RESIDUALES

Se denomina aguas residuales a aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, 2014).

Desde el punto de vista de las fuentes de generación, se puede definir el agua residual como la combinación de residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes de residencias, instituciones públicas, establecimientos industriales y comerciales; a los que pueden agregarse, aguas subterráneas, superficiales y pluviales (Metcalf y Eddy, 1995). La clasificación de las aguas residuales depende de su origen ya que este determina las características en su composición.

En la Tabla 1 se muestra la clasificación de aguas residuales y sus características.

2.2 AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Las aguas residuales domésticas pueden provenir de zonas residenciales o comerciales. Son producto del uso del agua con fines higiénicos y en las distintas actividades del hogar, poseen un nivel de contaminación que se visualiza con la presencia de sólidos, desechos orgánicos, detergentes, jabones y grasas. Por tanto, hay un cambio en su composición original y es necesario que sean tratadas antes de ser vertidas a un cuerpo de agua para no perjudicar su calidad (Romero, 2016).

Tabla 1: Tipos de aguas residuales y sus características

Tipo de agua	Definición	Características
Agua residual doméstica	Aguas residuales que provienen de viviendas, edificios comerciales e institucionales	Compuestas principalmente carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno, poseen sólidos y patógenos
Agua residual industrial	Aguas residuales provenientes de las descargas de diferentes industrias	Su contenido depende del tipo de industria y/o procesos industriales
Agua residual municipal	Son residuos líquidos trasportados por el alcantarillado de una ciudad y tratados en una planta de tratamiento municipal	Contiene materia orgánica, nutrientes, patógenos
Aguas amarillas	Es la orina transportada con o sin agua	Alto contenido de nutrientes, sales, productos farmacéuticos y hormonas.
Aguas grises	Provenientes de tinas, duchas, lavamanos y lavadoras	Aportantes de sólidos suspendidos, fosforo, grasas y detergentes.
Aguas negras	Provenientes de inodoros, transportan excrementos humanos y orinas	Alto contenido de solidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales

Fuente: Adaptado de Romero (2004) y Roeleveld y Zeeman (2006).

2.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Las características del agua residual permiten conocer su potencial contaminante y determinar su calidad, se analizan características físicas, químicas y biológicas.

a. Características físicas

Metcalf y Eddy (1995) afirman que los parámetros físicos, además de caracterizar el agua, ejercen un efecto en sus otras características, así por ejemplo la temperatura afecta tanto la actividad biológica como la cantidad de gases disueltos en el agua residual. Ramalho (1996) considera que características como la turbidez y el color, pueden afectar el paso de luz a través de la capa de agua e influir en el desarrollo de organismos fotosintéticos.

En la Tabla 2 se pueden observar los principales parámetros físicos de las aguas residuales domésticas.

Tabla 2: Principales parámetros físicos del agua residual doméstica

Parámetros	Descripción
Temperatura	<ul style="list-style-type: none">• Ligeramente más alta que la del agua potable• Variaciones según las estaciones del año (más estables que la temperatura del aire).• Influencia de la actividad microbiana.• Influencias de la solubilidad de los gases.• Influencias de la viscosidad del líquido.
Color	<ul style="list-style-type: none">• Alcantarillado fresco: ligero gris.• Alcantarillado séptico: gris oscuro o negro.
Olor	<ul style="list-style-type: none">• Alcantarillado fresco: olor aceitoso, relativamente desagradable.• Alcantarillado séptico: mal olor (desagradable), debido al sulfuro de hidrógeno gas y otros subproductos de descomposición.
Turbidez	<ul style="list-style-type: none">• Causada por una gran variedad de sólidos en suspensión.• Alcantarillado más fresco o más concentrado: turbidez generalmente mayor.

Fuente: Adaptado de Von Sperling y Chernicharo (2005).

b. Características químicas

Son definidas por sus componentes orgánicos, inorgánicos (generalmente de origen mineral) y gaseosos. Un aspecto fundamental resultante de la contaminación por compuestos orgánicos es la disminución de oxígeno, producto de su utilización en el proceso de degradación biológica; mientras que los compuestos inorgánicos provocan un efecto tóxico en las aguas residuales (Ramalho, 1996). En la Tabla 3 se muestran los principales parámetros químicos en las aguas residuales domésticas.

c. Características biológicas

Las características biológicas son de gran importancia, porque se asocian principalmente a la presencia de microorganismos que pueden causar enfermedades a humanos y animales. Los microorganismos presentes en las aguas servidas pueden ser bacterias, protozoos, virus, helmintos, rotíferos, algas, entre otros, siendo las bacterias, las que se encuentran en mayor abundancia (Martín *et al.*, 2006). En la Tabla 4 se muestran los principales microorganismos que se encuentran en el agua residual doméstica.

Tabla 3: Principales parámetros químicos de las aguas residuales domésticas

Parámetros	Descripción
SÓLIDOS TOTALES	Orgánicos e inorgánicos Suspendidos: Parte de sólidos orgánicos que no son filtrables - Fijos: Compuestos minerales, no oxidables por calor, inertes. - Volátil: Compuestos orgánicos, oxidables por calor. Disuelto: Parte de sólidos orgánicos e inorgánicos que son filtrables. Normalmente se considera que tiene una dimensión inferior a 10–3 µm. - Fijos: Compuestos minerales de los sólidos disueltos. - Volátil: Compuestos orgánicos de los sólidos disueltos. Sedimentables: Parte de sólidos orgánicos e inorgánicos que se depositan en 1 hora en un cono Imhoff. Indicación aproximada del asentamiento en un tanque de sedimentación.
MATERIA ORGÁNICA	Mezcla heterogénea de varios compuestos orgánicos. Principales componentes: proteínas, carbohidratos y lípidos.
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno. Medido a los 5 días y 20°C. Asociada a la fracción biodegradable de compuestos orgánicos carbonosos. Medida del oxígeno consumido, después de 5 días, por los microorganismos en la estabilización bioquímica de la materia orgánica.
DQO	Demanda química de oxígeno. Representa la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar químicamente la materia orgánica carbonosa. Utiliza agentes oxidantes fuertes bajo condiciones ácidas.
Ultima DBO	Última demanda bioquímica de oxígeno. Representa el oxígeno total consumido al final de varios días, por los microorganismos en la estabilización bioquímica de la materia orgánica.
TOC	Carbono orgánico total. Medida directa de la materia orgánica carbonosa. Determinado a través de la conversión del carbono orgánico en dióxido de carbono.
NITRÓGENO TOTAL	El nitrógeno total incluye nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato. Es un nutriente esencial para el crecimiento de microorganismos en tratamiento biológico de aguas residuales. Nitrógeno orgánico y el amoníaco en conjunto se llama Nitrógeno Total Kjeldahl (TKN).
Nitrógeno orgánico	Nitrógeno en forma de proteínas, aminoácidos y urea.
Amoniaco	Producido en la primera etapa de la descomposición de compuestos orgánicos de nitrógeno.
Nitrito	Etapas intermedia en la oxidación del amoníaco. Prácticamente ausente en aguas residuales crudas.
Nitrato	Producto final en la oxidación del amoníaco. Prácticamente ausente en aguas residuales crudas.
FÓSFORO TOTAL	El fósforo total existe en formas orgánicas e inorgánicas. Es un nutriente esencial en el tratamiento biológico de aguas residuales.
Fósforo orgánico	Combinado con materia orgánica.
Fósforo inorgánico	Ortofosfatos y polifosfatos.
pH	Indicador de las condiciones ácidas o alcalinas de las aguas residuales. Una solución es neutra a pH 7. Procesos de oxidación biológica normalmente tienden a reducir el pH.
ALCALINIDAD	Indicador de la capacidad amortiguadora del medio (resistencia a variaciones en el pH). Causado por la presencia de bicarbonato, carbonato y iones hidroxilo.
CLORIDOS	Originarios de agua potable y desechos humanos e industriales.
ACEITES Y GRASAS	Fracción de materia orgánica soluble en hexano. En las aguas residuales domésticas, las fuentes son los aceites y grasas utilizados en los alimentos.

Fuente: Adaptado de Von Sperling y Chernicharo (2005).

Tabla 4: Principales organismos presentes en agua residual doméstica

Organismo	Descripción
Bacterias	<ul style="list-style-type: none">• Organismos Unicelulares.• Presente en diversas formas y tamaños.• Principales organismos responsables de la estabilización de la materia orgánica.• Algunas bacterias son patógenas, causando principalmente enfermedades intestinales.
Arqueas	<ul style="list-style-type: none">• Similar a las bacterias en tamaño y componentes celulares básicos.• Diferentes a las bacterias en su pared celular, material celular y composición de ARN.• Importante en los procesos anaeróbicos.
Algas	<ul style="list-style-type: none">• Organismos fotosintéticos autótrofos, que contienen clorofila.• Importante en la producción de oxígeno en cuerpos de agua y en algunos procesos de tratamiento de aguas residuales.• En lagos y embalses pueden proliferar en exceso, deteriorando la calidad del agua.
Hongos	<ul style="list-style-type: none">• Predominantemente aeróbicos, multicelulares, no fotosintéticos, organismos heterótrofos.• También de importancia en la descomposición de la materia orgánica.• Puede crecer bajo condiciones de pH bajo.
Protozoos	<ul style="list-style-type: none">• Generalmente organismos unicelulares sin pared celular.• La mayoría son aeróbicos o facultativos.• Se alimentan de bacterias, algas y otros microorganismos.• Esencial en el tratamiento biológico para mantener un equilibrio entre los diversos grupos.• Algunos son patógenos.
Virus	<ul style="list-style-type: none">• Organismos parasitarios, formados por la asociación de material genético (ADN o ARN) y una estructura proteica.• Patógeno y frecuentemente difícil de eliminar en agua o aguas residuales tratadas.
Helmintos	<ul style="list-style-type: none">• Animales de orden superior.• Los huevos de helmintos presentes en las aguas residuales pueden causar enfermedades.

Nota. Las algas normalmente no están presentes en las aguas residuales no tratadas, pero están presentes en el efluente tratado de algunos procesos de depuración.

Fuente: Adaptado de Von Sperling y Chernicharo (2005).

2.2.2 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

La composición de las aguas residuales se refiere a las cantidades de constituyentes físicos, químicos y biológicos presentes en las aguas residuales. El conocer estos parámetros nos permitirá abordar con mayor seguridad el diseño de una planta de tratamiento y los procesos a utilizar. La Tabla 5 presenta la composición típica del agua residual doméstica cruda en concentración baja, media y alta.

Tabla 5: Composición típica del agua residual doméstica cruda

Contaminantes	Unidades	Concentración baja	Concentración media	Concentración alta
Sólidos totales (ST)	mg l ⁻¹	350	720	1200
Sólidos disueltos totales (SD)	mg l ⁻¹	250	500	850
Fijos (SDF)	mg l ⁻¹	145	300	525
Volátiles (SDV)	mg l ⁻¹	105	200	325
Sólidos en suspensión (SS)	mg l ⁻¹	100	220	350
Fijos (SSF)	mg l ⁻¹	20	55	75
Volátiles (SSV)	mg l ⁻¹	80	165	275
Sólidos sedimentables	ml l ⁻¹	5	10	20
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅ , 20° C)	mg l ⁻¹	110	220	400
Carbono orgánico total (COT)	mg l ⁻¹	80	160	290
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg l ⁻¹	250	500	1000
Nitrógeno Total (N)	mg l ⁻¹	20	40	85
Orgánico	mg l ⁻¹	8	15	35
Amoniacal libre	mg l ⁻¹	12	25	50
Nitritos	mg l ⁻¹	0	0	0
Nitratos	mg l ⁻¹	0	0	0
Fósforo total (P)	mg l ⁻¹	4	8	15
Orgánico	mg l ⁻¹	1	3	5
Inorgánico	mg l ⁻¹	3	5	10
Cloruros ^a	mg l ⁻¹	30	50	100
Sulfato ^a	mg l ⁻¹	20	30	50
Alcalinidad (como CaCO ₃)	mg l ⁻¹	50	100	200
Grasa	mg l ⁻¹	50	100	150
Coliformes totales	N°/100 ml	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹
Compuestos orgánicos volátiles (COVs)	µg l ⁻¹	< 100	100-400	>400

^a Los valores se deben aumentar en la cantidad en que estos compuestos se hallen presentes en las aguas de suministro.

Fuente: Metcalf y Eddy (1995)

2.3 TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

Los sistemas o plantas de tratamiento de aguas residuales son un conjunto integrado de operaciones y procesos unitarios de tipo físico, químico y biológico, que se utilizan con la finalidad de depurar las aguas residuales hasta un nivel tal que permita alcanzar la calidad requerida para su disposición final o su aprovechamiento mediante el reúso.

Noyola y Morgan (2013) afirman que el propósito del tratamiento del agua residual es remover el material contaminante, orgánico e inorgánico, el cual puede encontrarse en forma de partículas en suspensión y/o disueltas. Para proteger el estado ecológico de los medios receptores (embalses, ríos, acuíferos, mar, etc.) y evitar riesgos a la salud pública, se deben producir efluentes con características físicas, químicas y microbiológicas aptas para su descarga y/o reutilización (Martín et al., 2006).

2.3.1 NIVELES DE TRATAMIENTO

El Ministerio del Ambiente (2009), en su Manual para Municipios Ecoeficientes, señala que la complejidad del sistema de tratamiento está en función de los objetivos que se establezca para el efluente resultante de dicho tratamiento. Además, clasifica el tratamiento de aguas residuales en los siguientes niveles:

a. Pre tratamiento o tratamiento preliminar

Como su nombre lo indica esta es una etapa previa al tratamiento, propiamente dicho; consiste en una serie de operaciones físicas y mecánicas necesarias para retener y eliminar sólidos de gran tamaño, arenas, material flotante como plásticos, papeles, ramas, aceites, grasas, etc. que por su naturaleza o tamaño pueden ocasionar problemas, en etapas posteriores de tratamiento, tal como obstrucción de tuberías, válvulas y bombas, desgaste de equipos y formación de costras.

Durante esta etapa se pueden aplicar las siguientes operaciones:

- **Desbaste:** El agua residual pasa a través de rejas que retienen el material sólido de mayor volumen.
- **Dilacerador:** Realiza la operación de triturar los sólidos gruesos que contiene el agua residual

- Desarenador: Disminuye los residuos pesados de mediano tamaño. Aparte de las arenas, también se eliminan gravas, partículas minerales y hasta sólidos orgánicos como semillas, huesos, granos, etc.
- Desengrasado: En esta etapa se eliminan las grasas y demás materias flotantes más ligeras que el agua.

b. Tratamiento primario

Esta etapa tiene como principal objetivo la eliminación de sólidos en suspensión por medio de procesos físicos o físico-químicos. Cabe mencionar que, durante este proceso, además, se consigue eliminar la materia orgánica sedimentable, reduciendo hasta un 30% la contaminación biodegradable del agua residual (MINAM, 2009).

Los tratamientos primarios más comunes son la decantación primaria, procesos de coagulación- floculación y sedimentación en tecnologías como los tanques Imhoff, tanque séptico, entre otros.

c. Tratamiento secundario

Este nivel de tratamiento se caracteriza por utilizar procesos biológicos donde ocurren reacciones bioquímicas, a través de microorganismos (principalmente bacterias) que degradan la materia orgánica presente en el agua residual. Puede clasificarse en sistemas aerobios o anaerobios, dependiendo de la presencia o ausencia de oxígeno, respectivamente. Aquellos procesos que eliminan la materia orgánica tanto de forma aerobia como anaerobia reciben el nombre de facultativos.

Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran las lagunas de estabilización, lodos activados, reactores anaerobios, biofiltros y otros.

d. Tratamiento terciario

La aplicación de este nivel de tratamiento permite obtener efluentes con calidad apta para ser vertidos o reutilizados. Tiene como objetivo remover nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo para evitar eutrofización en el cuerpo de agua receptor. Además, se reducen sustancias orgánicas e inorgánicas como detergentes, metales pesados, nutrientes y otras sustancias tóxicas. Los procesos más usados son la precipitación química de nutrientes, procesos de filtración, destilación, flotación, ósmosis inversa, entre otros.

Los niveles de tratamiento necesarios y el tipo de tecnología de una PTAR dependerán de la calidad requerida en el efluente para ser vertido a un cuerpo natural o ser reusado cumpliendo con la norma ambiental vigente. En la Tabla 6 se resume los procesos y operaciones empleados para el tratamiento de aguas residuales domésticas y la eficiencia de remoción en cada nivel.

Tabla 6: Procesos y operaciones en el tratamiento de aguas residuales

Etapa	Objetivo	Proceso unitario	Operación	Eficiencia de remoción
Pretratamiento	Eliminación de objetos gruesos, arena y grasas	Físico	Desbaste	Sólidos en suspensión: 5-15%
			Dilacerador	DBO ₅ : 5-10%
			Desarenador	Escherichia Coli: 10-25%
			Desengrasado	
Tratamiento primario	Eliminación de sólidos en suspensión de pequeño tamaño y densidad	Físico	Decantación primaria	Sólidos en suspensión: 40-70%
		Químico	Coagulación / Flocculación	DBO ₅ : 25-40% Escherichia Coli: 25-70%
Tratamiento secundario	Eliminación de la materia orgánica disuelta o coloidal	Biológico	Degradación bacteriana	Sólidos en suspensión: 80-90%
		Físico	Sedimentación	DBO ₅ : 80-95%
			Flocculación	Escherichia Coli: 90-98%
Tratamiento terciario	Eliminación de sólidos en suspensión, materia orgánica residual, nutrientes y patógenos	Físico	Filtración	Sólidos en suspensión: 90-95%
		Químico	Eliminación de nutrientes (N y P)	DBO ₅ : 95-98%
		Biológico	Precipitación química	Escherichia Coli: 98-99%
			Desinfección	

Fuente: Adaptado de Alianza por el Agua (2008).

Cabe resaltar que, en los sistemas de tratamiento convencionales, durante el tratamiento de las aguas residuales, se originan subproductos conocidos como lodos que también deben ser tratados. La Figura 1 presenta los tratamientos correspondientes a la línea de lodos, así como sus objetivos y la naturaleza de los procesos en cada nivel.



Figura 1: Etapas de tratamiento de lodos del agua residual, ordenadas secuencialmente de izquierda a derecha.

Fuente: Alianza por el Agua (2008).

2.4 SITUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL PERÚ

En el ámbito de las Empresas Prestadoras de Servicios de Saneamiento (EPS), el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS, 2017) refiere que, en el año 2016, sólo el 68 % de las aguas residuales fueron tratadas en plantas de tratamiento (PTAR) del país y el resto se descargó directamente a un cuerpo de agua (mar, ríos o lagos), se infiltró en el suelo o se usó clandestinamente para fines agrícolas.

En el año 2021 la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), en su informe de Benchmarking regulatorio de las EPS, reportó que para el período 2016-2020 la cobertura de tratamiento de aguas residuales promedio a nivel nacional aumentó de 66,4% a 77,5%. No obstante, el incremento que se dio a partir del 2016, debido a la puesta en marcha de la PTAR La Chira, se vio afectado desde el 2019 por un menor caudal de ingreso, debido a acciones de operación y mantenimiento. La Figura 2 muestra la cobertura de tratamiento en porcentaje.

Cabe resaltar que existe un porcentaje de aguas residuales recolectadas por los servicios de alcantarillado a cargo de las EPS, que no reciben un tratamiento efectivo, antes de la descarga a un cuerpo receptor o de ser reutilizadas.



Figura 2: Evolución de la cobertura del tratamiento de aguas residuales en el Perú, período 2016 - 2020.
Fuente: SUNASS (2021).

Según el Anuario de estadísticas ambientales del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2020), en el año 2019, la descarga de aguas residuales domésticas sin tratamiento se incrementó en 8,1% respecto al año anterior.

La Figura 3 muestra el volumen anual de agua residual sin tratar durante el período 2013-2019.

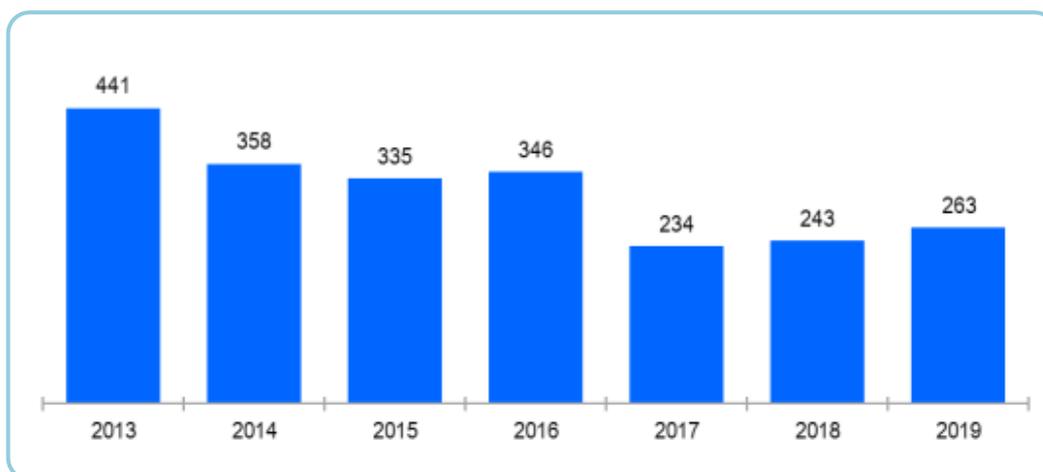


Figura 3: Descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento en millones de metros cúbicos, período 2013 - 2019.

Fuente: INEI (2020).

También en el 2019, la SUNASS reportó que, durante ese año, el volumen de aguas residuales recolectado por los servicios de alcantarillado de las EPS, a nivel nacional, fue de 1 207 036 989 m³, del cual, el volumen tratado fue del 78,2% quedando un déficit por tratar del 21,8% (como se cita en MVCS, 2021, p.16).

La Tabla 7 presenta la brecha de cobertura del tratamiento de aguas residuales en el Perú y a nivel departamental.

Tabla 7: Brecha de cobertura del servicio de tratamiento de aguas residuales

Departamento/ País	Volumen recolectado de aguas residuales (m ³) al 2019	Volumen tratado de aguas residuales (m ³) al 2019	Por implementar (m ³)	Brecha (%)
Amazonas	4 600 050	0	4 600 050	100%
Ancash	27 086 028	10 453 916	16 632 112	61,4%
Apurímac	4 565 208	0	4 565 208	100%
Arequipa	55 915 866	52 657 354	3 258 512	5,8%
Ayacucho	12 578 576	12 567 354	10 606	0,08%
Cajamarca	14 027 062	5 626 022	8 401 040	59,9%
Cusco	24 996 174	15 856 012	9 140 162	36,6%
Huancavelica	2 341 298	0	2 341 298	100%
Huánuco	11 863 666	4 042	11 859 624	99,9%
Ica	34 835 402	27 402 577	7 432 825	21,3%
Junín	33 167 379	5 160 831	28 006 548	84,4%
La libertad	36 288 693	24 029 893	12 258 800	33,8%
Lambayeque	43 746 818	43 362 729	384 089	0,88%
Lima	767 387 636	678 828 572	88 559 064	11,5%
Loreto	12 645 911	0	12 645 911	100%
Madre de dios	2 099 715	0	2 099 715	100%
Moquegua	8 277 587	7 988 788	288 799	3,5%
Pasco	2 940 949	0	2 040 949	100%
Piura	48 703 721	37 733 605	10 970 116	22,5%
Puno	15 842 442	8 952 477	6 889 965	43,5%
San Martín	11 000 655	335 131	10 665 524	96,9%
Tacna	15 498 053	10 406 880	5 091 173	32,9%
Tumbes	6 076 265	2 429 298	3 646 967	60,02%
Ucayali	10 551 835	544 027	100 078 081	94,8%
Perú	1 207 036 989	944 340 124	262 696 865	21,8%

Fuente: MVCS (2021).

En el 2020, la SUNASS (2021) reportó que de las 50 EPS que hay en el Perú, fueron 23 empresas prestadoras que registraron 0% de tratamiento de sus aguas residuales, además mencionó que 18 de ellas no contaban con una planta de tratamiento de aguas residuales.

La Figura 4, Figura 5 y Figura 6 muestran la cantidad de localidades administradas por las grandes, medianas y pequeñas EPS, respectivamente; a la par, se resaltan de amarillo las barras de las EPS que no contaban con una PTAR y de rojo aquellas que teniendo una PTAR, no realizaron el servicio de tratamiento de aguas residuales durante el 2020.

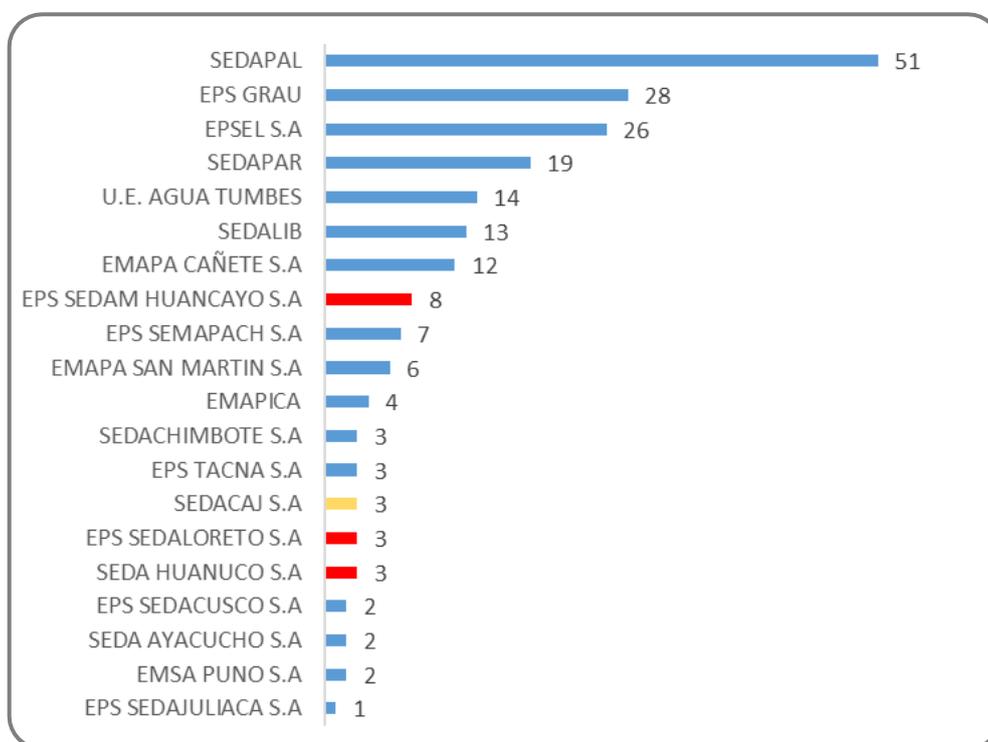


Figura 4: Número de localidades administradas por las grandes empresas prestadoras de servicios de saneamiento, año 2020.

Nota: Las barras en rojo corresponden a las EPS que no cuentan con una PTAR y las barras en amarillo corresponde a aquellas que contando con una PTAR no realizaron servicio de tratamiento de aguas residuales.

Fuente: SUNASS (2021).

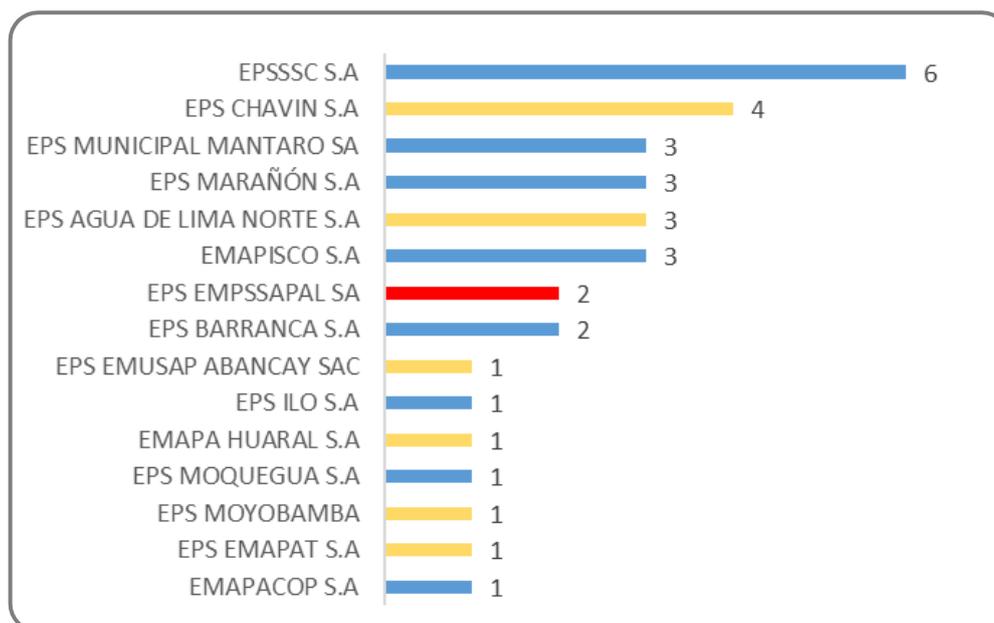


Figura 5: Número de localidades administradas por las medianas empresas prestadoras de servicio de saneamiento, año 2020.

Nota: Las barras en rojo corresponden a las EPS que no cuentan con una PTAR y las barras en amarillo corresponde a aquellas que contando con una PTAR no realizaron servicio de tratamiento de aguas residuales.
Fuente: SUNASS (2021).

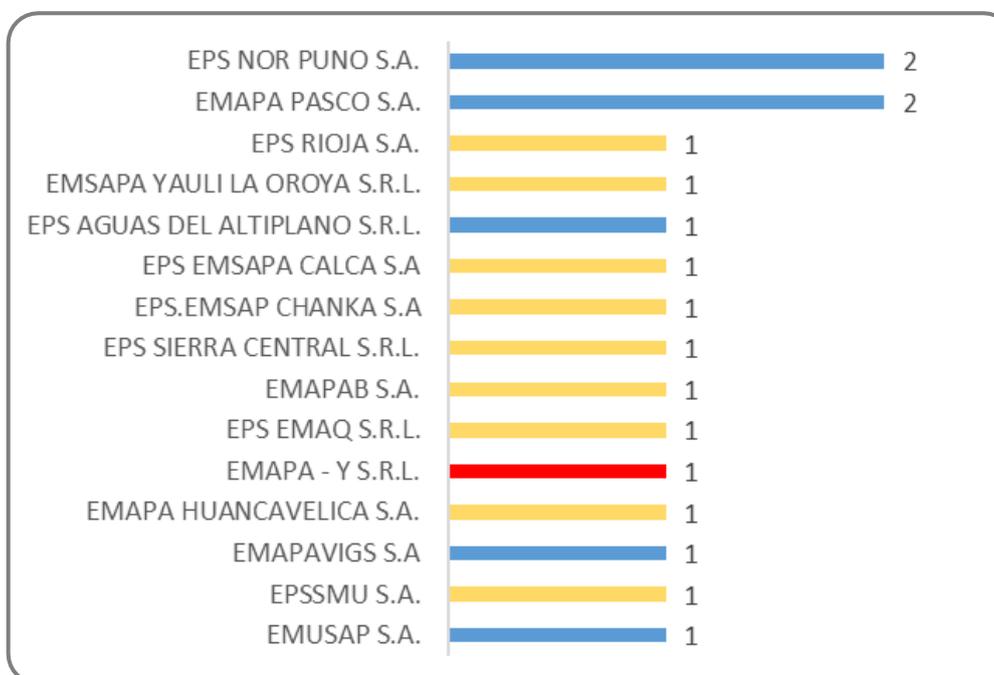


Figura 6: Número de localidades administradas por las pequeñas empresas prestadoras de servicio de saneamiento, año 2020.

Nota: Las barras en rojo corresponden a las EPS que no cuentan con una PTAR y las barras en amarillo corresponde a aquellas que contando con una PTAR no realizaron servicio de tratamiento de aguas residuales.
Fuente: SUNASS (2021).

a. Disposición final

En la Tabla 8 se indican los tipos de disposición final de los efluentes de las PTAR de las EPS con datos actualizados al 2021. Una PTAR puede tener uno o más tipos de disposición final:

- 73 PTAR vierten al río, lago o mar y están obligadas a cumplir los LMP y ECA-Agua.
- 73 PTAR vierten a canales de riego y drenaje, donde no se aplican los ECA-Agua.
- 44 PTAR vierten a quebradas secas o infiltran su efluente al terreno, sin considerar una posible contaminación del suelo y de la capa freática.
- 10 PTAR no vierten el efluente porque este se infiltra o evapora en las lagunas.
- 90 PTAR reportan el reúso de una parte, o de todo el efluente en el riego de áreas verdes, cultivos de tallo alto, cultivos de tallo bajo y otros.

Tabla 8: Disposición final de los efluentes de las PTAR

PUNTO DE DESCARGA	Cuerpo natural			Canal de drenaje o canal de regadío	Quebrada seca	Falta del punto de vertimiento	Otro	Reúso
	Río	Lago	Mar					
TOTAL	51	1	21	73	22	22	10	90

Fuente: SUNASS (2021).

2.4.1 TIPOS DE TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL PERÚ

En un reciente informe de diagnóstico de las PTAR en el ámbito de las EPS, publicado por la SUNASS (2022), se afirma que de las 171 PTAR operativas, 133 plantas corresponden a lagunas facultativas, 8 a lagunas aireadas, 11 a lodos activados, 8 filtros percoladores, 6 son tanque Imhoff y 2 son tanques sépticos. Adicionalmente, se cuenta con 2 PTAR que vierten las aguas residuales a través de emisario submarino, cuya tecnología es denominada como tratamiento preliminar avanzado y 1 PTAR conformada por un sedimentador clasificado como “otros”.

La Figura 7 muestra las tecnologías aplicadas en plantas de tratamiento de aguas residuales en el ámbito de las empresas prestadoras de servicio de saneamiento (EPS).

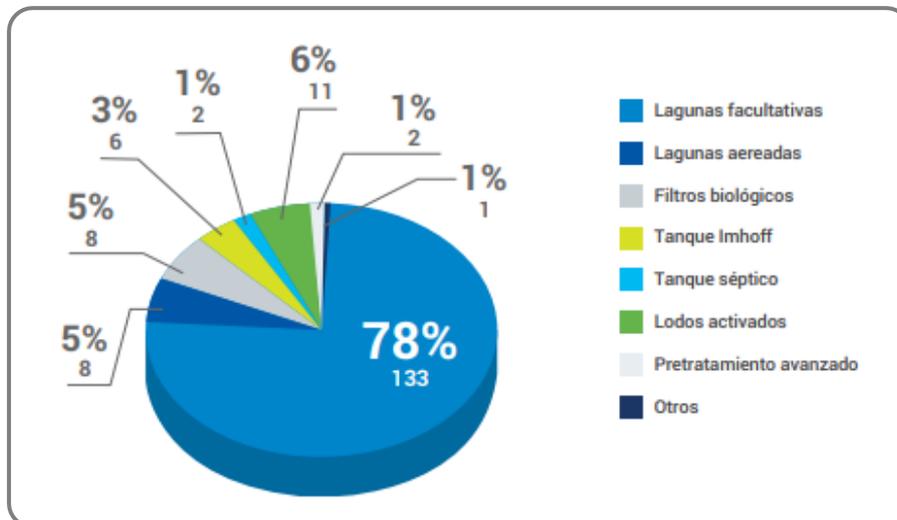


Figura 7. Tecnologías utilizadas en las plantas de tratamiento de aguas residuales de las EPS en el Perú.
Fuente: SUNASS (2022).

2.5 REÚSO DE AGUAS RESIDUALES EN EL PERÚ

Conforme a lo establecido en el artículo 147 del reglamento la Ley de Recursos Hídricos (*Ley N° 29338*) «se entiende por reúso de agua residual a la utilización de aguas residuales tratadas resultantes de las actividades antropogénicas». Además, el documento precisa los lineamientos en torno al reúso de las aguas residuales y designa a la Autoridad Nacional del Agua (ANA) como responsable de autorizar el reúso de las aguas residuales tratadas y a la Autoridad Administrativa del Agua (AAA) correspondiente, como la encargada del control y vigilancia.

Asimismo, según el artículo 148, para obtener la autorización de reúso de las aguas residuales tratadas, estas deben haber sido sometidas a tratamientos previos y cumplir con los parámetros de calidad establecidos para los usos sectoriales, se debe contar con el Instrumento de Gestión Ambiental (IGA) aprobado por la autoridad ambiental competente y debe garantizarse la salud humana, así como el normal desarrollo de la flora y fauna.

Con respecto a los criterios para evaluar la calidad del agua para reúso, el artículo 150 señala que se deben cumplir los valores establecidos por el sector de la actividad a la que se destine el reúso o, en su defecto, las guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

La Tabla 9 presenta las directrices recomendadas por la OMS, sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura.

Tabla 9: Calidad microbiológica del agua de reúso para riego ^a

Tipo	Condiciones de reúso	Grupo expuesto	Helmintos intestinales ^b (media aritmética N° de huevos por litro ^c)	Coliformes fecales (media geométrica N° de huevos por 100 ml ^c)	Tratamiento de aguas residuales
A	Riego de cultivos que se consumen crudos, campos deportivos y parques públicos ^d	Trabajadores consumidores usuarios	≤ 1	≤ 1000 ^d	Lagunas de estabilización en serie diseñadas para lograr calidad microbiológica indicada o tratamiento similar
B	Riego de cereales, cultivos industriales, forrajes y árboles ^e	Trabajadores	≤ 1	No hay un estándar de calidad recomendado	Retención en lagunas de estabilización por 8 a 10 días o remoción equivalente de helmintos y coliformes fecales
C	Riego de cultivos de la categoría B, si no hay exposición de trabajadores y del público	Ninguno	Sin aplicación	Sin aplicación	Tratamiento preliminar según el requerimiento de la tecnología de riego, pero no menor que la sedimentación primaria

a) En casos particulares, se deberán tener en cuenta factores epidemiológicos, socioculturales y medioambientales para modificar las directrices según corresponda.

b) Especies de *Áscaris*, *Trichuris* y anquilostomas.

c) Durante el período de riego.

d) Para césped público donde puede existir contacto directo con personas se recomiendan valores más estrictos (≤ 200 coliformes fecales/100 ml).

e) En el caso de frutales, el riego debe ser paralizado dos semanas antes de la cosecha y las frutas no deben ser recogidas del suelo. No se debería usar en riego por aspersión.

Fuente: OMS (1989)

2.6 TRATAMIENTO DESCENTRALIZADO DE AGUAS RESIDUALES

La gestión descentralizada de aguas residuales se define como la recolección, tratamiento y reutilización o eliminación de aguas residuales en/o cerca de su punto de generación, puede incluir diferentes tamaños de plantas y tecnologías de tratamiento, tales como plantas de tratamiento in situ para hogares individuales, plantas que atienden pequeños grupos de hogares de tamaño medio o incluso comunidades enteras (Crites y Tchobanoglous, 1998; van Afferden *et al.*, 2015).

Los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales tratan y llevan a disposición final volúmenes relativamente pequeños de aguas residuales, procedentes de viviendas aisladas o de viviendas situadas en zonas relativamente cercanas, enfocándose en la extracción de nutrientes y energía y en el reúso de las aguas residuales. La descentralización es una solución lógica y sostenible para abordar los problemas de gestión de las aguas residuales en las zonas rurales y periurbanas.

No sólo reducen los efectos sobre el medio ambiente y la salud pública local, también aumentan las posibilidades de reutilización final de las aguas residuales, dependiendo del tipo de comunidad, las opciones técnicas y los entornos locales. Además, los sistemas descentralizados se adecúan a las condiciones particulares del sitio; de esta forma, se evita la costosa implementación de sistemas de tratamiento centralizados en donde se requieren mayores requisitos para su construcción e instalación (Massoud *et al.*, 2009; de Anda Sánchez, 2017).

2.6.1 SISTEMAS NATURALES DE DEPURACIÓN

Se denominan a aquellos procedimientos o técnicas en los que la eliminación de las sustancias contaminantes se produce mediante componentes del medio natural, sin emplear aditivos químicos. En todos ellos, el efecto depurador se debe a la acción combinada de la vegetación, del suelo y de los microorganismos presentes en ambos, y en menor medida, a la acción de plantas y animales superiores (Moreno, 2003).

Estos procesos se caracterizan por un menor nivel de industrialización, menor consumo de energía eléctrica, bajo coste de mantenimiento relativo y una menor producción de lodos; sin embargo, requieren una mayor superficie de tratamiento por habitante. Es por ello que

estos tratamientos se suelen implementar en núcleos pequeños, donde la relación entre la superficie disponible y el caudal a tratar son más favorables (Carrasco y Menéndez, 2010).

Se suelen diferenciar dos grandes grupos de técnicas de depuración natural: aquellas basadas en la aplicación del agua sobre el terreno y aquellas basadas en procesos que ocurren en sistemas acuáticos.

Según la Red Madrileña de Tratamientos Avanzados para Aguas Residuales (2010) en el tratamiento mediante aplicación directa en el terreno, el suelo es el medio receptor de las aguas residuales, así como el agente activo donde se produce el proceso de depuración eliminando nutrientes, materia orgánica, metales pesados, etc.

Entre los métodos de tratamiento en el terreno se incluyen habitualmente a los siguientes tipos:

- Filtro verde
- Infiltración rápida
- Escorrentía superficial

En el tratamiento basado en procesos que ocurren en el medio acuático, la acción principal de depuración se ejerce en el seno del medio acuático, participando en el proceso plantas emergentes (especialmente sus raíces) y la actividad microbiológica asociada. Son sistemas que pueden funcionar estacionalmente o a lo largo de todo el año, dependiendo fundamentalmente del clima, y que con frecuencia se diseñan para mantener un flujo continuo (Moreno, 2003)

Los llamados métodos acuáticos, diseñados en la creación de un flujo controlado en agua residual en el que microorganismos y plantas principalmente, incluyen tres tipos:

- Lagunajes
- Humedales de flujo superficial
- Cultivos acuáticos

En la Tabla 10 se muestran la clasificación de los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales basados en aplicaciones y procesos.

Tabla 10: Clasificación de los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales

Sistemas Naturales de Tratamiento de aguas residuales				
Basados en la aplicación del agua en el terreno		Basados en los procesos que suceden en la masa de agua		
Aplicación subsuperficial	Aplicación superficial			
- Zanjas y lechos filtrantes	- Filtros verdes	Sistemas con plantas flotantes	Lagunaje Natural	Humedales construidos de flujo superficial
- Humedales construidos de flujo subsuperficial	- Infiltración/Percolación			
	- Filtros de arena			

Fuente: Recuperado de Garcia y Corzo (2008).

2.7 HUMEDALES CONSTRUIDOS

También conocidos como humedales artificiales, son sistemas diseñados y construidos con el fin de tratar aguas residuales reproduciendo el ecosistema que se tiene en los humedales naturales, es decir, mediante la interacción entre los microorganismos presentes en el agua, el suelo, la vegetación e incluso la fauna, pero con un mayor grado de control sobre el régimen hidráulico del sistema. De este modo, se tiene establecido, según diseño, la composición del sustrato, el tipo de vegetación y los patrones de flujo con el fin de optimizar el tratamiento (Vymazal, 2005; Merino, 2017).

Brix (1993) señala que los contaminantes en tales sistemas se eliminan mediante una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos que incluyen sedimentación, precipitación, adsorción a las partículas del suelo, asimilación por los tejidos de las plantas y transformaciones microbiológicas.

Por lo anteriormente expuesto, se considera a los humedales construidos como tecnologías de tratamiento natural, amigables con el ambiente y sustentables. En comparación con otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales, los humedales construidos tienen bajos requerimientos de operación y mantenimiento y son resistentes en el sentido de que su rendimiento es menos susceptible a las variaciones de carga y a la concentración de contaminantes en el afluente, incluso pueden depurar eficientemente aguas negras crudas, primarias, secundarias o terciarias (Dotro et al., 2017).

Además de la depuración de aguas residuales, Arias (2017) describe otros beneficios asociados a los humedales construidos, entre ellos, que albergan flora y fauna, son de fácil integración paisajística y, con respecto a la sociedad, son un aporte educativo, recreativo y hasta económico con la posible producción de plantas.

2.7.1 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS

Alarcón *et al.* (2018) afirman que los humedales construidos están constituidos básicamente por cuatro elementos: afluente, sustrato, vegetación y microorganismos.

a. Afluente

Es el agua residual que entra al humedal, puede ser doméstica, industrial, o una mezcla, e incluso drenajes de precipitación pluvial que, tras pasar o no por algún tratamiento previo, es distribuido uniformemente en la superficie del humedal, a través de tuberías perforadas.

b. Sustrato

Es el material que se coloca en el lecho del humedal, puede incluir arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación. Debe ser permeable ya que actúa como medio filtrante, sirve como soporte para las plantas y el desarrollo del ecosistema.

La importancia del sustrato radica en que soporta a los organismos vivos, influye en el movimiento del agua a través del sistema, además de que las transformaciones microbianas tienen lugar principalmente dentro del sustrato y de que éste almacena muchos contaminantes, acumula los restos de la vegetación, incrementando la materia orgánica (Lara, 1999).

c. Vegetación

El término más utilizado para denominar a la vegetación que se incorpora a un humedal construido es el de macrófitas, estas poseen la cualidad de crecer bajo condiciones de suelos saturados de agua, la capacidad de sobrevivir en condiciones secas y la habilidad para metabolizar el amonio con su alto contenido de proteínas (Delgadillo, 2010; Alarcón *et al.*, 2018). La Tabla 11 presenta en resumen la función de las macrófitas en humedales construidos.

Según Vymazal (2011) el género de plantas más utilizado en humedales construidos es *Phragmites australis* (caña común) pero también es muy común el uso de especies de los géneros *Typha* (*latifolia*, *angustifolia*, *domingensis*, *orientalis* y *glauca*) y *Scirpus* (por ejemplo, *lacustris*, *validus*, *californicus* y *acutus*). Además, sostiene que, en muchos países, y especialmente en los trópicos y subtrópicos, se utilizan plantas locales incluyendo especies ornamentales para humedales horizontales.

Tabla 11: Función de las macrófitas en humedales construidos

Parte de la macrófita	Función
Tejido vegetal aéreo	Atenuación de la luz, reduce crecimiento de fitoplancton.
	Influye en el microclima, aislamiento durante el invierno.
	Reduce la velocidad del viento, y riesgos de resuspensión.
	Almacenamiento de nutrientes.
	Mejora el paisaje.
Tejido vegetal sumergido	Promueve la filtración
	Reduce la velocidad de la corriente, favorece la sedimentación.
	Proporciona área superficial para el crecimiento de la biopelícula.
	Liberación de oxígeno en la fotosíntesis, aumenta la degradación aeróbica de la materia orgánica.
	Absorción de nutrientes.
Raíces y rizomas en el sedimento	Estabilización de la superficie del suelo, evita la erosión.
	Previene la colmatación del medio granular.
	Incorpora oxígeno incrementando la degradación y la nitrificación.
	Absorción de nutrientes.
	Exudado de antibióticos.

Fuente: Recuperado de Brix (1997).

d. Microorganismos

Los principales microorganismos presentes en la biopelícula de los humedales son: bacterias, levaduras, hongos y protozoarios.

Arias (2004) afirma que, en la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios, mientras que en el resto del lecho granular predominan los microorganismos anaerobios y anóxicos.

Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes, elementos traza y la desinfección; en otras palabras, la actividad microbiana tiene la función de transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles, también de alterar las condiciones de potencial de reducción y oxidación del sustrato. Asimismo, gracias a la actividad biológica, muchas de las sustancias contaminantes se convierten en gases que son liberados a la atmósfera (Lara, 1999).

2.7.2 TIPOS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

Son muy diversas las clasificaciones que existen en la identificación de los humedales construidos. Los principales criterios son la presencia o ausencia de agua libre superficial, el tipo de macrófitas utilizadas y la dirección de flujo.

En la Tabla 12 se muestra la clasificación de humedales construidos.

Tabla 12: Tipos de humedales construidos para tratamiento de aguas residuales

Tipos de humedales construidos					
Nivel de agua	Superficial			Subsuperficial	
Plantas	Flotantes libres	Hojas flotantes	Sumergidas	Emergentes	Emergentes
Flujo	Horizontal			Horizontal	Vertical
Dirección de flujo	Según la pendiente			Según pendiente	Ascendente Descendente

Fuente: Recuperado de Vymazal (2008).

a. Humedales construidos de flujo libre superficial (FS)

En estos sistemas, el agua está expuesta a la atmósfera y circula preferentemente a través de tallos y hojas de las plantas. United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2000) afirma que pueden albergar distintos tipos de vegetación macrófita, ya sea emergente, flotante o sumergida. Estos tipos de humedales se pueden entender como una modificación del lagunaje natural con una profundidad de la lámina de agua entre 0,3 y 0,4 m. Se suelen aplicar para mejorar la calidad de efluentes que ya han sido previamente tratados en una depuradora (García y Corzo, 2008).

b. Humedales construidos de flujo subsuperficial (FSS)

En los humedales de flujo subsuperficial la circulación del agua es de tipo subterráneo a través de un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. La profundidad de la lámina de agua suele ser entre 0,3 y 0,9 m. La biopelícula que crece adherida al medio granular y a las raíces y rizomas de las plantas tiene un papel fundamental en los procesos de descontaminación del agua.

Los humedales de flujo subsuperficial se clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales o verticales (García y Corzo, 2008).

c. Humedal de flujo subsuperficial horizontal (HFSS)

Según experiencias recopiladas por Dotro *et al.* (2017), en un humedal de flujo horizontal, el lecho de grava está saturado y plantado con macrófitas emergentes. El agua ingresa al sistema de tratamiento por un extremo, fluye a través de grava y se recoge en el extremo opuesto del lecho antes de descargarse. Un tubo vertical ubicado fuera del lecho del humedal controla el nivel del agua dentro del medio de grava. Todo el lecho está aislado de la tierra circundante por una combinación de un forro de plástico y una membrana de geotextil.

La profundidad de este tipo de humedales no suele exceder los 0,6 m. Alarcón *et al.* (2018) recomienda que deben ser construidos con una pendiente menor del 1% para asegurar el flujo del agua. La Figura 8 presenta la sección longitudinal, componentes y la dirección del flujo en un humedal horizontal.

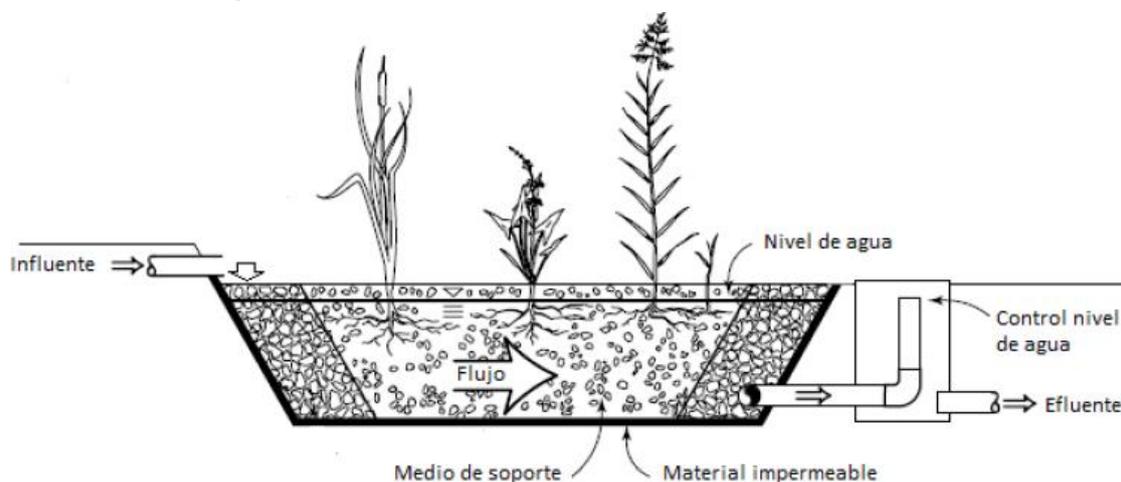


Figura 8. Humedal de flujo subsuperficial horizontal y sus componentes.

Fuente: Adaptado de Kadlec y Knight (1996).

d. Humedal de flujo subsuperficial vertical (VFSS)

En esta unidad, el agua se vierte y se distribuye homogéneamente sobre toda la superficie del lecho, percola y fluye verticalmente entre el material filtrante de relleno. El material de relleno es típicamente material inerte (arenas, gravas) que favorece la adhesión y crecimiento de biopelículas. El lecho debe tener una profundidad efectiva de alrededor de 1 m (Vidal y Hormazábal, 2018).

Normalmente, estos humedales funcionan de manera secuencial, por pulsos, y sus lechos no están saturados. Una vez el agua percola a través del lecho, se recoge en el fondo y se evacúa por medio de tubería, para permitir que el lecho se recargue de aire y el siguiente pulso tenga suficiente oxígeno para facilitar los procesos de degradación (Dotro *et al.*, 2017).

Es muy importante lograr una distribución y recogida del agua uniforme en toda el área del sistema. Para la distribución se utilizan redes de tuberías dispuestas sobre la superficie, ya sea en forma radial o a lo largo del lecho. Debido al flujo discontinuo, en climas fríos se suelen colocar enterradas en el lecho entre 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie con el fin de evitar la congelación (García y Corzo, 2008).

Según Vymazal (2008), los humedales de flujo vertical requieren menos terreno, de 1-3 $\text{m}^2 \text{PE}^{-1}$ (PE=población equivalente) en comparación con los sistemas de flujo horizontal que requieren de 5-10 $\text{m}^2 \text{PE}^{-1}$. Por otra parte, son más susceptibles a la colmatación.

La Figura 9 ilustra la configuración de un humedal construido de flujo vertical.

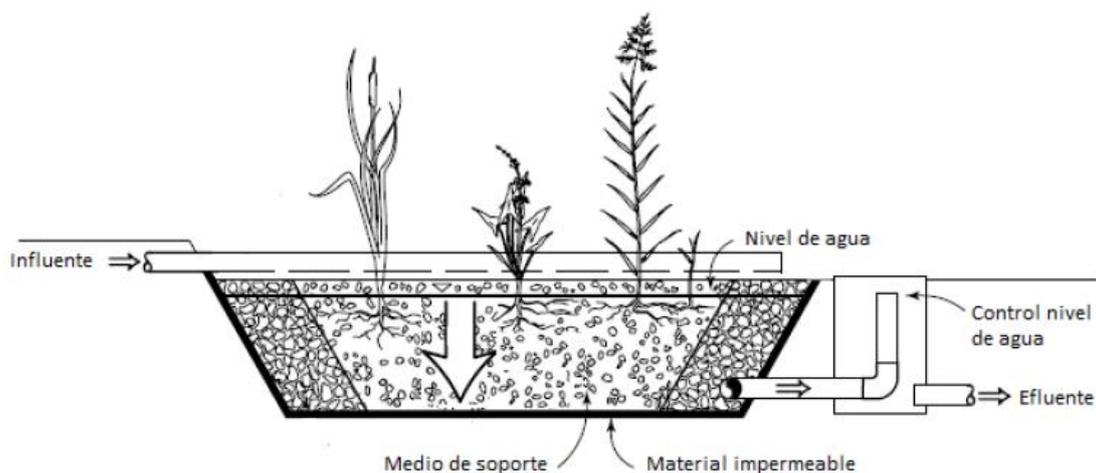


Figura 9. Humedal de flujo subsuperficial vertical y sus componentes.

Fuente: Adaptado de Kadlec y Knight (1996).

2.7.3 PROCESOS EN LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES CON HUMEDALES CONSTRUIDOS

La depuración del agua ocurre por la interacción entre los elementos que componen el humedal a través de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar dentro del sistema. La Tabla 13 muestra los principales procesos de depuración que ocurren en cada tipo de humedal construido.

a. Degradación de la materia orgánica

La materia orgánica (MO) presente en el afluente puede ser de tipo particulada o soluble. La materia orgánica particulada es retenida por procesos físicos como la filtración y sedimentación cerca de la entrada o superficie del sistema, dependiendo del tipo de humedal construido. García y Corzo (2008) describen que esta fracción particulada, por fragmentación abiótica, se convierte en partículas más pequeñas que son hidrolizadas por enzimas extracelulares, excretadas por bacterias heterótrofas aeróbicas y fermentativas facultativas. El resultado de la hidrólisis es la formación de sustratos sencillos como glucosa, aminoácidos o ácidos grasos, que pueden ser asimilados por las bacterias heterótrofas aeróbicas o fermentativas facultativas. Los ácidos a su vez son asimilados por bacterias sulfatoreductoras y metanogénicas, en un medio anaerobio y por bacterias heterótrofas aeróbicas cuando existe disponibilidad de oxígeno.

Asimismo, Dotro et al. (2017) explican que la eliminación de la materia orgánica soluble se da porque las bacterias inducen a una reacción química en la que la MO transfiere electrones a un compuesto específico liberando energía para el crecimiento celular. Además, señalan que, la vía específica de las reacciones está definida por el receptor de electrones y enumeran aquellas que se producen en los humedales, las cuales son: respiración aerobia, con oxígeno como aceptor de electrones, y dióxido de carbono como producto principal; desnitrificación, con nitrato y nitrito como aceptor de electrones, y nitrógeno gas junto a dióxido de carbono como productos principales; sulfato reducción, con sulfato como aceptor de electrones, y sulfuro y dióxido de carbono como productos principales; y metanogénesis, en la que la materia orgánica es simultáneamente el donante y receptor de electrones, y dióxido de carbono y metano son los productos principales.

En la Figura 10 se muestra un esquema de los procesos implicados en la degradación de la materia orgánica en los humedales.

Tabla 13: Procesos de depuración según el tipo de humedal

Contaminante	HFS	HFSS	VFSS
Materia orgánica	Reducción de la materia orgánica soluble por conversión biológica por efecto de bacterias aerobias, facultativas y anaerobias que crecen en la superficie de las plantas y sobre los detritos. La materia orgánica particulada se elimina por adsorción, por filtración y por sedimentación en el fondo del lecho.	Reducción por conversión biológica por intervención de bacterias facultativas y anaeróbicas adheridas a la superficie de las plantas y los detritos del medio de relleno del humedal.	Reducción por conversión biológica por medio de bacterias facultativas y anaeróbicas adheridas a la superficie de las plantas y detritos.
Materia en suspensión	Filtración y sedimentación	Filtración y sedimentación	Filtración
Nitrógeno	Nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización.	Nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización.	Nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización.
Fósforo	Reducción por sedimentación y por asimilación por parte de las plantas y microorganismos.	Por filtración, sedimentación, adsorción, y asimilación por parte de las plantas y microorganismos.	Filtración, sedimentación, adsorción y asimilación por las plantas.
Metales pesados	Adsorción a las plantas, superficie de detritos y por sedimentación.	Adsorción a las raíces de las plantas y los detritos, sedimentación.	Adsorción a las raíces de las plantas, sedimentación y filtración.
Trazas de contaminantes orgánicos	Volatilización, adsorción, biodegradación, radiación UV.	Adsorción, biodegradación.	Volatilización, adsorción, biodegradación.
Patógenos	Muerte natural, depredación, radiación UV, sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.	Muerte natural, depredación, sedimentación, secreción de antibióticos desde las raíces de las plantas.	Muerte natural, depredación, sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.

Fuente: Adaptado de Crites & Tchobanoglous (1998) y Brix & Arias (2005).

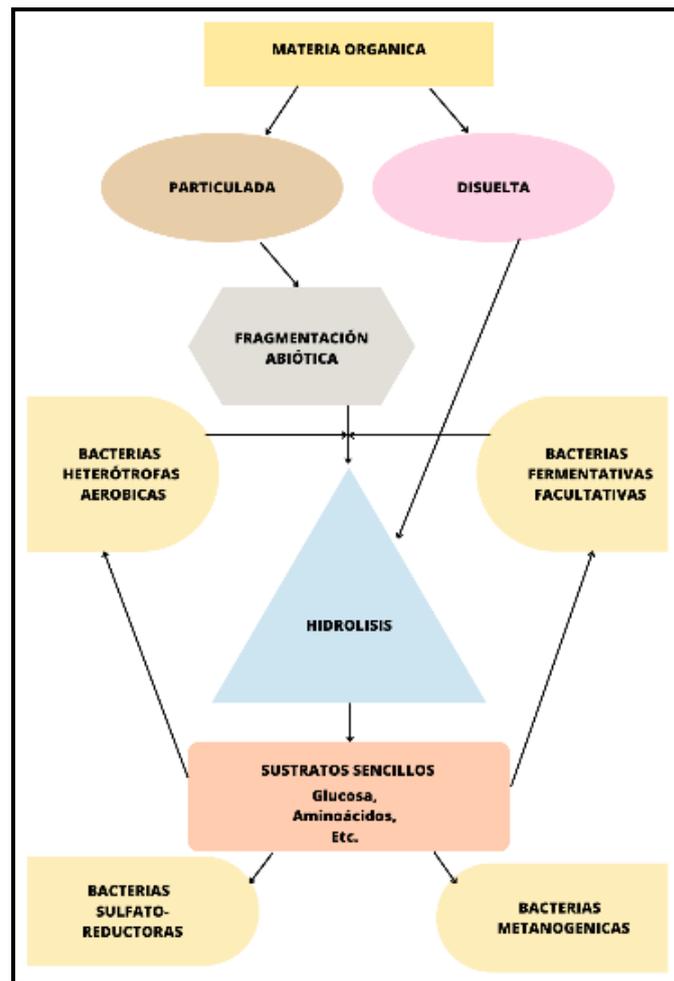


Figura 10: Esquema simplificado de los procesos que intervienen en la degradación de la materia orgánica en los humedales.

Fuente: García y Corzo (2008).

b. Eliminación de sólidos en suspensión

En los humedales construidos, la eliminación de Sólidos Suspendedos (SS) ocurre principalmente a través de procesos físicos; por filtración, cuando el afluente pasa a través del medio granular, raíces y rizomas de las plantas; por sedimentación de la materia particulada, cuando se tiene baja velocidad de circulación del agua y por floculación, debido a las fuerzas de adhesión entre los sólidos, que promueven la formación de partículas de mayor tamaño que terminan sedimentando (Alarcón et al., 2018).

García y Corzo (2008) señalan que en los humedales horizontales la mayor parte de la eliminación de la materia en suspensión sucede cerca de la zona de entrada y su concentración va disminuyendo de forma exponencial a lo largo del lecho; asimismo, en

los sistemas verticales, la eliminación de los sólidos suspendidos ocurre en los primeros centímetros del medio granular, su concentración disminuye de forma similar a como ocurre en los horizontales, pero en sentido vertical.

c. Remoción del nitrógeno

El nitrógeno existe en muchas formas y varios procesos interrelacionados lo convierten de una forma a otra en un sistema complejo llamado ciclo del nitrógeno (Dotro, 2017).

Tal como afirman Alarcón et al. (2018), el nitrógeno (N) existe tanto en forma orgánica como inorgánica. Los compuestos orgánicos incluyen las proteínas, los ácidos nucleicos, los amino azúcares y la urea; las formas del N inorgánico, incluyen el nitrógeno amoniacal (NH_4^+), el nitrato (NO_3^-) y el nitrito (NO_2^-) y las formas gaseosas del N, incluyen el amoníaco (NH_3), el nitrógeno gas (N_2) y el óxido nitroso (N_2O).

En las aguas residuales urbanas, el nitrógeno se encuentra fundamentalmente en forma de nitrógeno orgánico y amonio, aunque también podrían contener insignificantes cantidades nitratos y nitrito (García y Corzo, 2008).

IWA (2000) resume que, el principal mecanismo de eliminación del nitrógeno orgánico en los humedales construidos son los procesos secuenciales de amonificación, nitrificación y desnitrificación. El nitrógeno amoniacal (NH_4) es oxidado a nitrato (NO_3) por las bacterias nitrificantes en las zonas aeróbicas. El N orgánico se mineraliza a N amoniacal por hidrólisis y degradación bacteriana. Los nitratos se convierten en gas nitrógeno (N_2) y óxido nitroso (N_2O) por las bacterias denitrificantes en las zonas anóxica y anaerobia. El oxígeno necesario para la nitrificación se proporciona por difusión de la atmósfera y fuga de las raíces de macrófitas. El nitrógeno también es absorbido por las plantas, incorporado a la biomasa y liberado de nuevo como nitrógeno orgánico después de la descomposición de estas. Otros mecanismos de eliminación incluyen volatilización y adsorción. En general, estos mecanismos tienen menos importancia que la nitrificación-desnitrificación, pero pueden ser importantes estacionalmente.

La Figura 11 muestra las vías y los procesos principales del ciclo biogeoquímico del nitrógeno en los humedales construidos, donde ANAMOX es la oxidación anaerobia del amonio.

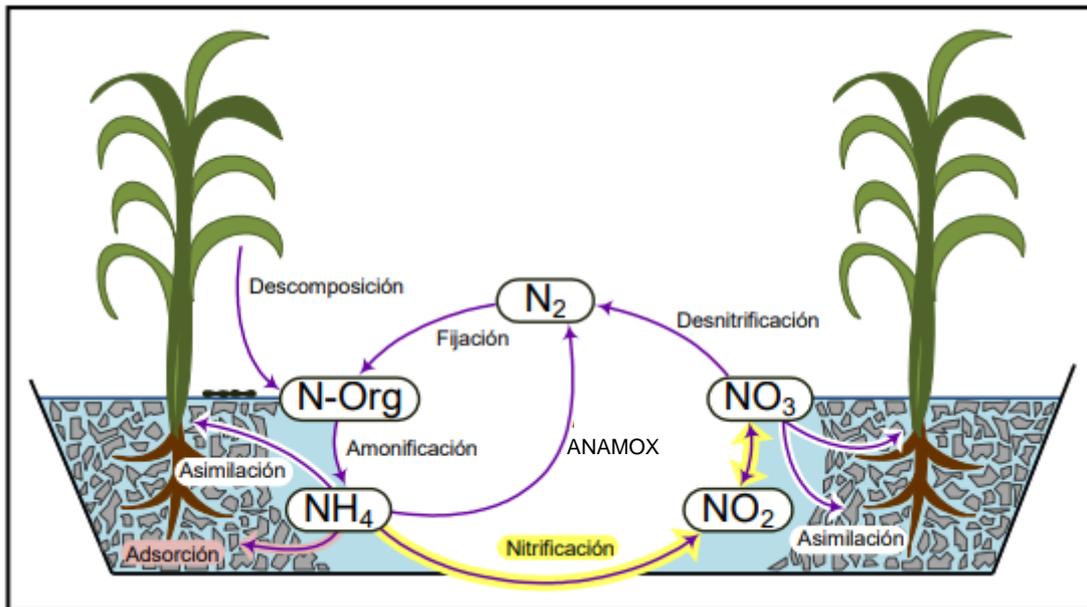


Figura 11. Ciclo del nitrógeno en humedales construidos.

Nota. ANAMOX= oxidación anaerobia del ion amonio. Fuente: Merino (2017).

d. Remoción del fósforo

Los mecanismos de eliminación del fósforo pueden ser de tipo biótico y abiótico. Los bióticos incluyen la asimilación por parte de las plantas y los microorganismos. Los abióticos abarcan fundamentalmente la adsorción por el medio granular. En muchos estudios se ha observado que después de la puesta en marcha de humedales se obtiene una buena eficiencia de eliminación del fósforo para después reducirse rápidamente en poco tiempo. Esto es debido a que el medio granular limpio tiene buena capacidad de adsorción, pero esta se va perdiendo rápidamente (García y Corzo, 2008).

e. Eliminación de patógenos o coliformes

Brix (1993) señala que, en los humedales construidos, los patógenos se eliminan por sedimentación y filtración, durante el paso de las aguas residuales a través del sistema; por extinción natural en un entorno desfavorable para los patógenos (oxidación) y por radiación ultravioleta en sistemas de aguas superficiales. Además, menciona que otra forma de eliminación podría deberse a los metabolitos de la raíz de las macrófitas, que tienen un efecto antibiótico sobre las bacterias.

Asimismo, Alarcón et al. (2018) añade la adsorción al medio filtrante y la materia orgánica, la depredación por los nematodos, protozoos o rotíferos y la competencia por los nutrientes.

La eliminación de patógenos depende del tipo de humedal, las condiciones operativas y las características de las aguas residuales afluentes; entre los principales indicadores para determinar la eficiencia de remoción están los coliformes fecales o termotolerantes y los huevos de helminto.

2.7.4 EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS

La Tabla 14 resume las eficiencias que se pueden esperar en los diseños tradicionales de los cuatro tipos principales de humedales construidos.

Para cada uno de los cuatro tipos principales existe una gran cantidad de modificaciones que pueden resultar en eficiencias de eliminación más elevadas (Dotro et al., 2017).

Tabla 14: Eficiencias típicas en los humedales construidos según su clasificación

Parámetros	HF (Flujo Horizontal)	VF (Flujo vertical)	French VF (Humedales Franceses)	FWS (Flujo Superficial)
Etapas de tratamiento	Secundario	Secundario	Combinado primario y secundario	Terciario
Sólidos suspendidos totales	> 80%	> 90%	> 90%	> 80%
Materia orgánica (demanda de oxígeno)	> 80%	> 90%	> 90%	> 80%
Nitrógeno amoniacal	20 – 30%	> 90%	> 90%	> 80%
Nitrógeno total	30 – 50%	< 20%	< 20%	30 – 50%
Fósforo total	10 – 20%	10 – 20%	10 – 20%	10 – 20%
Coliformes	2 log10	2 – 4 log10	1 – 3 log10	1 log10

Fuente: Dotro et al. (2017).

2.8 SISTEMA FRANCÉS

El sistema francés (SF) es un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas que consta de dos etapas sucesivas de humedales construidos de flujo vertical. Se caracteriza por tratar directamente aguas residuales crudas (tan solo desbastadas), sin necesidad de pasar por un tratamiento primario previo, es decir, este sistema trata los lodos y las aguas residuales simultáneamente.

Cada etapa puede tener una o más celdas que operan alternadamente y cabe resaltar que, de acuerdo a los objetivos de tratamiento, el medio de filtración y la distribución del agua es diferente en cada etapa. La primera etapa tiene como objetivo principal el tratamiento de lodos, la remoción de la materia orgánica y la retención de sólidos en suspensión. Además, en ella, se produce la remoción parcial del nitrógeno amoniacal por nitrificación. La segunda etapa complementa la remoción de contaminantes y contribuye principalmente a la nitrificación (Dotro et al., 2017).

Este sistema debe su nombre a que se desarrolló inicialmente en Francia y en virtud de sus altas eficiencias, actualmente se le conoce a nivel mundial y existe mayor investigación acerca de las posibles variaciones de diseño de acuerdo al clima, población equivalente, reducción de área, recirculación de flujo, entre otros (Lana et al., 2013; Proust-Boucle et al., 2015; Lombard y Molle, 2017; Von Sperling y Sezerino, 2018).

En la configuración clásica de un sistema francés, la primera etapa se divide en tres filtros paralelos y la segunda etapa en dos filtros, tal como se ve en la Figura 12.

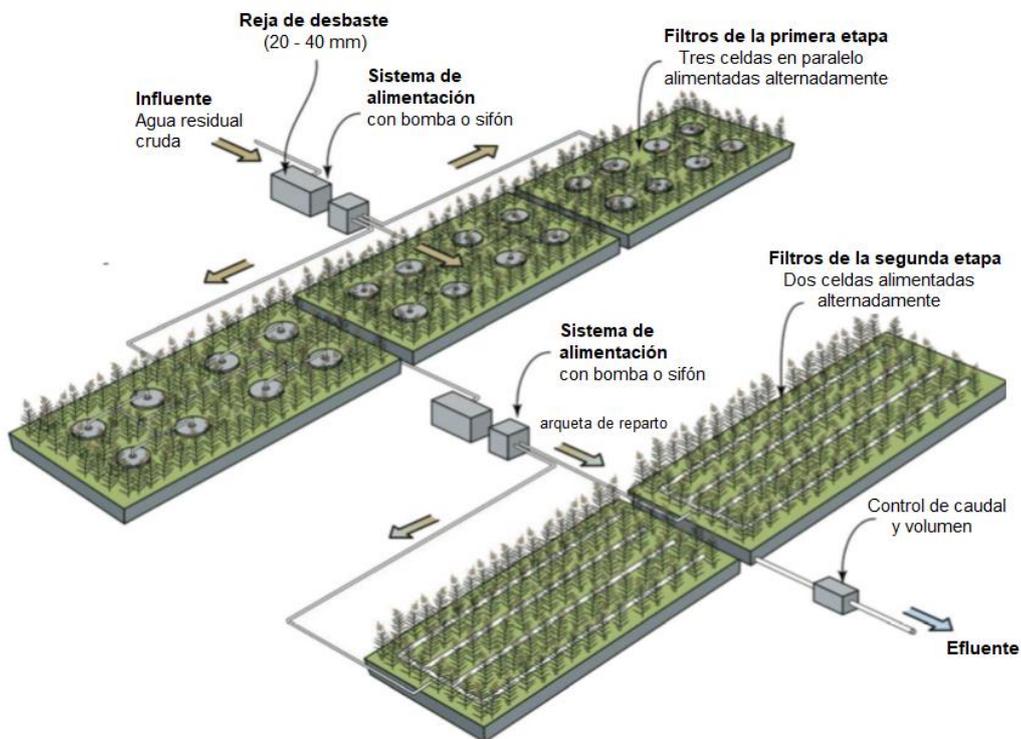


Figura 12. Esquema del diseño clásico del Sistema Francés.

Fuente: Adaptado de Dotro et al. (2017).

2.8.1 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO Y DE DISEÑO

Antes de ingresar al sistema, las aguas residuales crudas pasan por rejillas para remover los sólidos de gran tamaño, se almacenan en un tanque y posteriormente son vertidas sobre la superficie de uno de los filtros de la primera etapa. En líneas generales, la primera etapa del Sistema Francés comprende tres humedales de flujo subsuperficial vertical, cuyo medio filtrante es grava y está diseñada para actuar como pretratamiento; cuando el agua residual ingresa, el lodo se acumula en la superficie y el líquido filtrado pasa a la segunda etapa conformada por dos humedales de flujo subsuperficial vertical con arena como medio filtrante; allí se complementa el tratamiento y el efluente puede ser vertido o almacenado para reúso, si su calidad lo permite.

La Figura 13 presenta una vista de perfil del diseño clásico francés propuesto por Molle (2005), en ella, se detalla la profundidad y la granulometría de las capas que componen el medio filtrante en cada etapa.

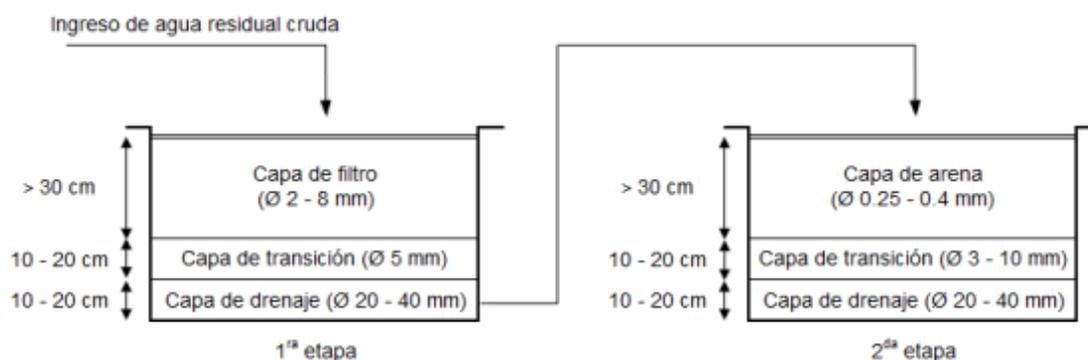


Figura 13. Vista de perfil de la configuración clásica del Sistema Francés.

Fuente: León (2020).

Un aspecto importante es que los filtros que componen cada etapa se dosifican de forma alterna, de modo que mientras un filtro se alimenta, los demás paralelos descansan. Molle y Esser (2021) afirman que, la alternancia en la dosificación es un aspecto fundamental para la operación adecuada del SF, porque promueve la mineralización y estabilización del lodo acumulado en las celdas de la primera etapa, mantienen condiciones aerobias en el lecho del filtro en las celdas de ambas etapas, y asegura que las plantas en cada celda reciban agua de manera frecuente, para evitar estrés hídrico.

De acuerdo con Molle (2005), cada filtro de la primera etapa se alimenta de manera intermitente durante 3,5 días y se deja reposar durante 7 días. Los filtros de segunda etapa se alimentan generalmente durante 3,5 días y se dejan reposar durante 3,5 días.

Los humedales que componen el sistema son plantados con macrófitas ya que mejoran la capacidad de infiltración y promueven una aireación pasiva de los filtros. En Francia se usa comúnmente el carrizo, pero, en otros países se han utilizado con éxito otras plantas nativas del lugar (Dotro *et al.*, 2017).

La distribución del afluente es diferente para las celdas de la primera y segunda etapa. Molle y Esser (2021) señalan que, las celdas de la primera etapa, por lo general, utilizan tuberías de gran diámetro (>90mm) que se encuentran a una determinada altura para la distribución radial del agua residual y permitir la acumulación de lodos; mientras que, las celdas de la segunda etapa son alimentadas con tuberías que están instaladas directamente sobre la superficie del filtro y los puntos de alimentación son perforaciones a lo largo de las tuberías de distribución. Además, recomiendan que los diámetros de las tuberías y las perforaciones deben ser escogidas de manera que se minimicen las pérdidas de presión. Asimismo, para mantener condiciones aerobias en el filtro, la oxigenación pasiva del fondo del filtro es necesaria a través de las tuberías de drenaje (diámetro mínimo de 125 mm) que poseen ranuras (con una longitud de 1/3 de la circunferencia de la tubería, aberturas > 8 mm) por al menos cada 25 cm de longitud de tubería.

La Figura 14 muestra el detalle de un humedal o filtro de la primera etapa de un Sistema Francés.

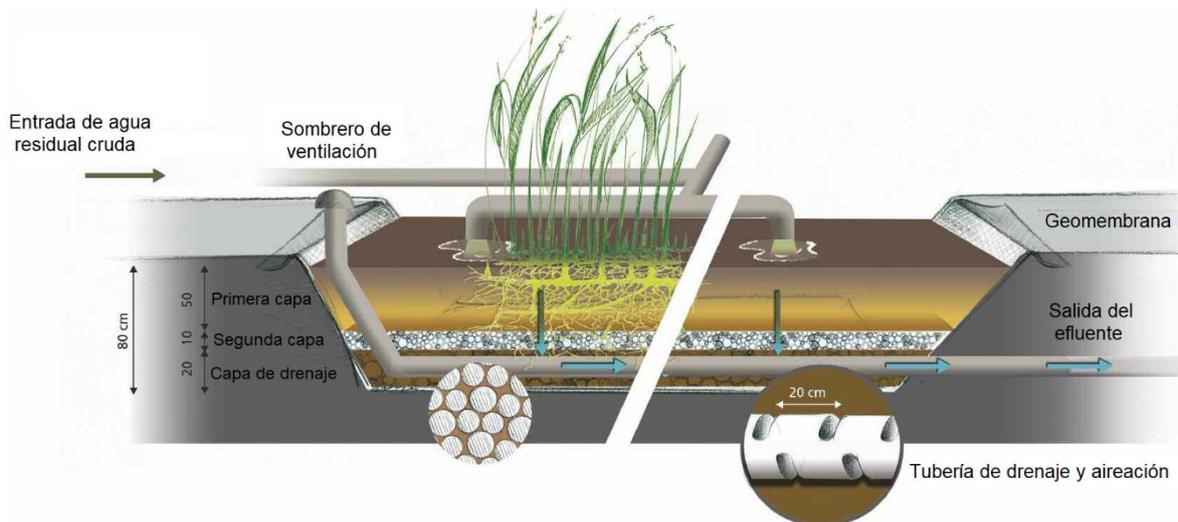


Figura 14. Sección de la primera etapa de un sistema francés.

Fuente: Adaptado de Lombard y Molle (2017).

Cuando la diferencia de altura entre la entrada y la salida de la PTAR es suficiente, la planta puede funcionar sin fuente de energía gracias a sifones autoaspirantes. Estos mecanismos de alimentación utilizan principalmente la gravedad (60% por sifón en la primera etapa y 75% en la segunda etapa) y así evitan la necesidad de suministro eléctrico a la planta (Molle, 2005).

2.8.2 CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO

El diseño general planteado por Molle *et al.* (2005) considera 2 m² PE⁻¹ divididos de la siguiente manera:

- Para la primera etapa: 1,2 m² PE⁻¹ dividido en 3 unidades idénticas alimentadas alternadamente (equivalente a una carga promedio de 300 g DQO m⁻² d⁻¹, 150 g de SS m⁻² d⁻¹, 25-30 g de NTK m⁻² d⁻¹ y una carga hidráulica de 0,37 m d⁻¹ en el filtro en funcionamiento).
- Para la segunda etapa: 0,8 m² PE⁻¹ dividido en 2 unidades paralelas idénticas alimentadas alternadamente (con un resultado de carga muy baja en el efluente, un promedio de 60 mg l⁻¹ en DQO, 15 mg l⁻¹ en SS y 8 mg l⁻¹ en NTK).

Este diseño se basa en un aporte de contaminantes por habitante equivalente de 120 g DQO PE⁻¹, 60 g SS PE⁻¹, 10-12 g NTK PE⁻¹ y 150 l PE⁻¹, que son valores comunes para pequeñas comunidades en Francia. Alarcón *et al.* (2018) sugieren que con estos valores se puede extrapolar el diseño para aguas residuales con cargas mayores o menores.

2.8.3 VARIACIONES DE CARGA

León (2020) evaluó el comportamiento de un Sistema Francés a escala piloto, adaptado a condiciones de costa peruana, frente a diferentes incrementos de carga hidráulica y orgánica; en sus conclusiones resalta que, el Sistema Francés demostró buena capacidad para soportar concentraciones pico e incluso obtuvo altas tasas de eliminación de contaminantes, aplicando cargas mayores a la de diseño, a excepción del N_{Total}. Esto lo explica Morvannou *et al.* (2014) quienes afirman que las sobrecargas orgánicas aumentan el consumo de oxígeno y saturan los sitios de adsorción de amonio más rápido, lo cual debe evitarse, porque la adsorción de amonio sobre la materia orgánica es un parámetro clave importante en la nitrificación.

Por otro lado, según Boutin y Prost-Boucle, (2015), se pueden aplicar mayores cargas orgánicas en verano debido a las mayores tasas de cinética biológica. Esto significa que el sistema no necesita ser sobredimensionado para tener en cuenta las variaciones en la carga orgánica durante la temporada de verano, cuando la población puede aumentar en las áreas turísticas.

Molle *et al.* (2005) consideran que las sobrecargas hidráulicas pueden inducir períodos de permanencia más largos que también pueden afectar la transferencia de oxígeno a la capa de depósito y la capa de filtro principal. Al mismo tiempo, las sobrecargas hidráulicas disminuyen el tiempo de retención de agua dentro del filtro.

2.8.4 CAPA DE LODO EN EL SISTEMA FRANCÉS

Debido a su diseño y modo de operación, los humedales construidos de tipo francés acumulan los sólidos en suspensión de las aguas residuales entrantes, en forma de capa de lodo, sobre la superficie del primer filtro o celda francesa (Kania *et al.*, 2019).

Molle (2014) afirma que es necesario mineralizar los lodos para evitar obstrucciones, y también permitir que el depósito drene y transfiera correctamente el oxígeno. Por ello, es muy importante la alternancia entre los canteros que conforman la primera etapa de tratamiento.

Molle (2005) explica que las bacterias en la capa de lodo, que se encuentran en una higrometría óptima y protegidas de los rayos UV por la sombra de las cañas, pueden iniciar fácilmente su actividad aeróbica. Esta capa de depósito se convierte en parte de los medios biológicamente eficientes y tiende a aumentar las tasas de eliminación de DQO, SST y TKN. El aumento de la capa de depósito no afecta drásticamente la capacidad hidráulica del filtro. De hecho, debido al papel mecánico de las cañas, sólo la capa delgada de lodos más nuevos es la que limita hidráulicamente.

La tasa de mineralización se encuentra entre 60 - 65% (Boutin *et al.*, 1997; Molle, 2005) por ello se genera un aumento de lodo de aproximadamente 1,5 cm por año que debe eliminarse una vez que alcanza un máximo de 20 cm, es decir, aproximadamente cada 10 a 15 años.

La Figura 15 ilustra los procesos que tienen lugar en la capa de lodo acumulada sobre la celda francesa.

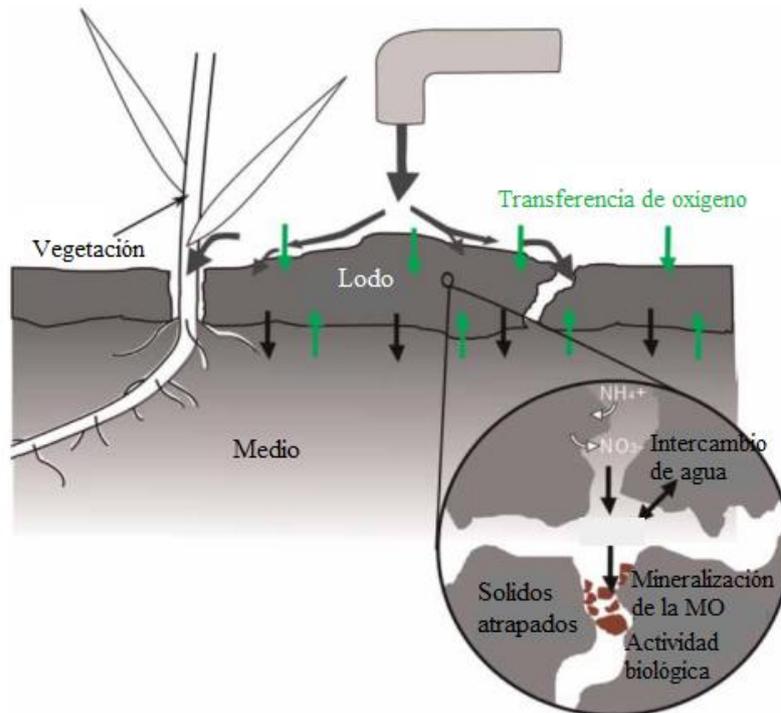


Figura 15. Procesos implicados en la capa de lodo del Sistema Francés.

Fuente: Adaptado de Molle (2014).

Es posible la reutilización de estos lodos con fines agrícolas, pero depende de sus características y del cumplimiento de la normativa. Molle y Esser (2021) afirman que, por lo general, la capa de lodo tiene un contenido de materia seca $> 25 \%$ y un contenido de materia orgánica inferior al 40% .

2.8.5 MANTENIMIENTO

Hoffman *et al.* (2011) afirman que, aunque los humedales artificiales son "tecnologías sencillas", el sistema requiere de un mantenimiento adecuado por parte de un operador capacitado con los conocimientos básicos.

De acuerdo con Boutin y Lienard (2003), la rutina de mantenimiento de los sistemas tipo francés debe tener entre sus actividades:

- La limpieza de rejillas al ingreso de la PTAR.
- Si la alimentación de los filtros depende de un sistema de bombeo automatizado, se debe controlar su buen funcionamiento; caso contrario será necesario realizar manualmente la apertura y cierre de válvulas para cambiar el filtro en funcionamiento, esto debe realizarse una o dos veces por semana.

- La limpieza del tanque de almacenamiento, bombas o sifón y las tuberías de alimentación debe realizarse al menos una vez al año.
- Las malezas deben ser removidas mensualmente y de ser necesario se debe cosechar la vegetación una vez por año.
- La capa de lodo depositado debe ser removida cuando alcance una profundidad de 20 – 25 cm (generalmente cada 10 – 15 años), de lo contrario pueden ocurrir estancamientos problemáticos. La remoción se lleva a cabo con maquinaria mecánica, no hay necesidad de un periodo de descanso antes de la remoción de lodo y el humedal puede volver a operar inmediatamente después de la remoción de la capa de lodo.

2.9 SISTEMA FRANCÉS EVALUADO

La PTAR ubicada en Chincha trata las aguas residuales domesticas producidas en el hogar de ancianos Santa Ana y San Joaquín y fue diseñada para una población equivalente (PE) de 50 habitantes, considerando una dotación de $150 \text{ l hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Está compuesta por un Sistema Francés completo con dos etapas: la primera, llamada también celda francesa, consta de un humedal construido de flujo vertical con relleno de piedra y gravilla el cual cuenta con dos canteros de mineralización; la segunda etapa consta de un humedal vertical con relleno de arena.

2.9.1 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

El desagüe crudo llega a la planta de tratamiento y se almacena en la primera estación de bombeo (EB1), la cual cuenta con dos bombas sumergibles que impulsan el agua hacia la celda francesa, alimentando de forma alterna cada cantero. El agua pre tratada es colectada en la segunda estación de bombeo (EB2), equipada con una bomba sumergible que impulsa el agua hacia un humedal construido de flujo vertical para el tratamiento secundario. Finalmente, el agua tratada es colectada en una cisterna para su posterior reúso. En la Figura 16 se observa el esquema de funcionamiento del Sistema Francés.

Todo el sistema de tratamiento es controlado por un tablero automático que activa las bombas según la necesidad y el diseño realizado.

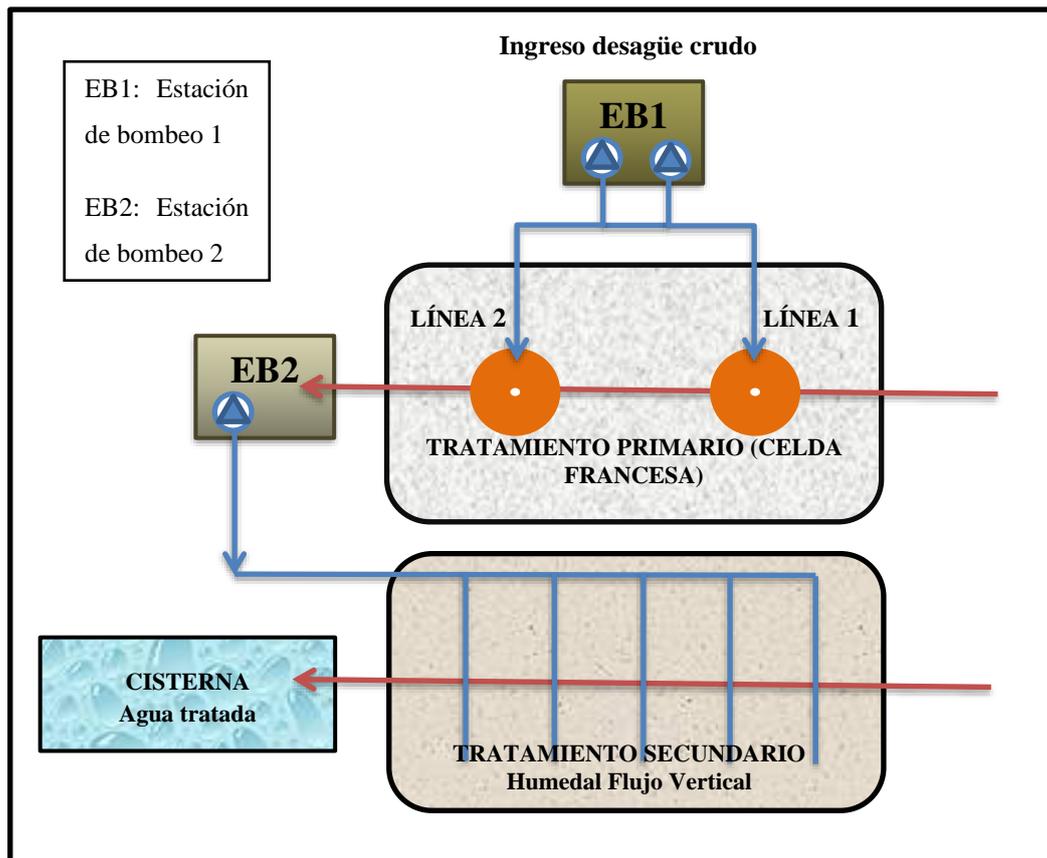


Figura 16. Esquema de funcionamiento del Sistema Francés en PTAR Chinchá

2.9.2 COMPONENTES DEL SISTEMA

Para dar mayor detalle de cada componente del sistema se utilizará información proporcionada por la empresa Rotaria del Perú, la cual diseñó e implementó el proyecto “Tratamiento de Aguas Residuales por medio del Sistema Francés para el Hogar de Ancianos Santa Ana y San Joaquín” en el año 2011.

a. Estación de bombeo 1

Las aguas residuales del recinto son desviadas antes de que lleguen al alcantarillado público hacia la primera Estación de bombeo (EB1). Dicha estación cuenta con dos bombas sumergibles de lodo con trituradora de 0.75 HP cada una, las cuales funcionan en alterno y alimentan a cada una de las subunidades de la celda francesa. A su vez cada bomba cuenta con una boya eléctrica conectada a un tablero de control que regula el encendido y apagado, según el volumen máximo y mínimo respectivamente. Sus paredes son inclinadas para evitar la acumulación de lodos lejos de las bombas.

b. Estación de bombeo 2

La segunda estación de bombeo es más sencilla, ya que en esta unidad el agua pre filtrada viene con menos sólidos suspendidos, lista para ser bombeada al segundo humedal donde recibirá el tratamiento biológico. Esta estación cuenta con una sola bomba sumergible de lodos, también de 0.75 HP, pero sin trituradora. Las dimensiones son muy parecidas a la EB1 con la diferencia que sus paredes son totalmente perpendiculares al suelo.

c. Humedales de tratamiento primario y secundario

Los humedales construidos se encuentran en la parte posterior del hogar de ancianos y se integran al paisajismo junto al huerto y áreas verdes. Están revestidos con geomembrana de HDPE, de 1mm de espesor, para garantizar su impermeabilización y evitar la pérdida del agua tratada. A simple vista los dos humedales son muy parecidos, pero considerando sus propósitos, estas tienen características diferentes.

- **Celda francesa**

La celda francesa tiene un área superficial de 60 m² (1,2 m² PE⁻¹) y está dividida en dos subunidades o canteros de 30 m² cada uno. En cada subunidad, el agua ingresa con un flujo ascendente a través de una tubería de 3" que está rodeada por una placa circular de concreto de 80 cm de diámetro, la cual permite distribuir radialmente el agua y los sólidos sobre la superficie. Cada unidad funciona durante 3 días alternadamente, permitiendo la mineralización de los lodos acumulados en la unidad en reposo.

La Figura 17 muestra fotografías de la celda francesa a inicios de operación del SF.



Figura 17. Distribución del agua sobre la superficie de la celda francesa (flujo ascendente). A la izquierda, línea 1 en funcionamiento; a la derecha, línea 2. Cada línea funciona por 3 días alternándose entre ellas.

Fuente: Rotaria del Perú

Los materiales que componen este filtro son grava y confitillo con valores especificados en la Tabla 15.

Tabla 15: Profundidades de la celda francesa

Espesor de capas	Valor	Unidad
Borde libre	0,40	m
Confitillo (de 2 a 6mm)	0,60	m
Grava (de 20 a 40mm)	0,25	m
Grava (de 30 a 40mm)	0,15	m
Profundidad total	1,40	m

Fuente: Rotaria del Perú

- **Humedal de flujo vertical**

Este humedal presenta un área de 56.8 m², con una profundidad de 1.15 m, los materiales de filtro utilizados son confitillo y arena lavada. La Tabla 16 brinda mayor detalle del espesor de capas.

El efluente pretratado, es transportado hacia este humedal impulsado por una bomba 0,75 HP a través de una tubería de DN50 mm. Dicha tubería reparte el caudal en 5 ramales que distribuyen el agua sobre toda la superficie, cada uno tiene una reducción de DN50 a DN38 seguido de una válvula globo, la cual permite controlar el flujo del agua.

Para una correcta distribución, los tubos de distribución están posicionados horizontalmente sobre el humedal y están perforados diametralmente cada 80 cm, con agujeros de 8mm. La distancia entre líneas de distribución es de 1,96 m al eje de la tubería, el primer y el último tubo fueron colocados a 98 cm del borde del humedal. El extremo final de los tubos cuenta con tapas removibles en caso de mantenimiento.

Posteriormente, el agua repartida en toda la superficie del humedal es infiltrada de forma vertical a través de las diferentes capas del sistema. Tras este proceso, el agua tratada, es captada en la parte inferior del humedal a través de una tubería de dren con perforaciones de 10 mm de diámetro, su ubicación es transversal a lo largo de todo el humedal y está protegida por una capa de confitillo para así evitar la pérdida del material filtrante.

Tabla 16: Profundidades del humedal en la segunda etapa de tratamiento

Espesor de capas	Valor	Unidad
Borde libre	0,25	m
Confitillo	0,10	m
Arena lavada	0,60	m
Confitillo (de 2 a 6mm)	0,20	m
Profundidad total	1,15	m

Fuente: Rotaria del Perú

La Figura 18 muestra una fotografía del humedal de flujo vertical que compone la segunda etapa del Sistema Francés.



Figura 18. Humedal vertical de la segunda etapa del SF, recién plantado y en funcionamiento (año 2011).

- **Vegetación**

La especie predominante en ambos humedales es *Cyperus alternifolius* también conocido como paragüitas o papiro paraguas, esta especie de planta macrófita ha demostrado ser resistente a las concentraciones de las aguas residuales y al contenido de sal. Además de aporta un ambiente apropiado para la fijación microbiana, son estéticas y se integran visualmente al follaje del lugar.

d. Cisterna

El agua tratada llega a la cisterna con el mismo nivel de fondo del humedal a través de un tubo de desagüe con DN100. Al interior del reservorio, se conecta un codo de 90° y una extensión de tubo de 30 cm que es colocado hacia arriba, lo cual favorece el control de agua en el humedal.

Esta cisterna presenta un volumen total de 14,4 m³ y puede almacenar el agua de dos días, como seguridad tiene una tubería de rebose para evitar desbordes por falla de bombeo.

e. Tablero de control

Todo el proyecto es automatizado por un controlador lógico programable instalado en el tablero de control que se activa según el diseño y la necesidad del funcionamiento.

Mayor detalle sobre el diseño y los componentes del sistema en planos, pueden apreciarse en el Anexo 3.

2.10 MARCO NORMATIVO

La Tabla 17 presenta la normativa relacionada al proyecto.

Tabla 17: Normativa relacionada al proyecto

Instrumento Legal	Fecha	Título
Ley N° 29338	22/03/2009	Ley General de Recursos Hídricos
D.S. N° 003-2010-MINAM	17/03/2010	Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas o Municipales
D.S. N° 273-2013	24/10/2013	Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento Municipales - PTAR de Aguas Residuales Domésticas o Municipales - PTAR
D.S 015-2017	22/06/2017	Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

a. Ley N° 29338 Ley general de recursos hídricos

Esta ley regula el uso y gestión de los recursos hídricos. Comprende el agua superficial, subterránea, continental y los bienes asociados a esta. Se extiende al agua marítima y atmosférica en lo que resulte aplicable.

b. D.S. N° 003-2010-MINAM Límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas o municipales

Aprueba límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales. Según el artículo 2 del mencionado Decreto Supremo, se tienen las siguientes definiciones:

- Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR): Infraestructura y procesos que permiten la depuración de las aguas residuales Domésticas o Municipales.
- Límite Máximo Permisible (LMP): Es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente.
- Protocolo de Monitoreo: Procedimientos y metodologías establecidas por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento en coordinación con el MINAM y que deben cumplirse en la ejecución de los Programas de Monitoreo.

La Tabla 18 muestra los límites máximos permisibles para los efluentes de las PTAR que son aplicables en el ámbito nacional.

Tabla 18: Límites máximos permisibles (LMP)

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de agua
Aceites y grasas	mg l ⁻¹	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	10 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg l ⁻¹	100
Demanda Química de Oxígeno	mg l ⁻¹	200
pH	unidad	6,5 - 8,5
Sólidos Totales en Suspensión	ml l ⁻¹	150
Temperatura	°C	< 35

Fuente: Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM

c. D.S. N° 273-2013 Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento municipales de aguas residuales domésticas o municipales

Esta ley se encarga de establecer los procedimientos y metodologías que deben cumplirse en la ejecución de los Programas de Monitoreo.

La aplicación de los procedimientos establecidos en el Protocolo de Monitoreo representa asimismo una herramienta de evaluación, fiscalización y mejora de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) existentes. A través de la aplicación de este instrumento se contribuye además a realizar una verificación del funcionamiento de la PTAR.

d. D.S 015-2017 Decreto supremo que aprueba el reglamento para el reaprovechamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales

La finalidad de este reglamento es la de promover el reaprovechamiento de los lodos generados en las PTAR, que luego de ser transformados en biosólidos, pueden ser utilizados en actividades agrícolas, forestales, industria cerámica, entre otras, considerando los riesgos a la salud y el ambiente.

III. METODOLOGÍA

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

3.1.1 UBICACIÓN

La presente investigación se llevó a cabo en el Hogar de Ancianos Santa Ana y San Joaquín, específicamente en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del mismo, y los análisis correspondientes, en el laboratorio de Saneamiento y Medioambiente de la UNALM en Lima.

Políticamente la PTAR del Hogar de Ancianos Santa Ana y San Joaquín se ubica en el distrito de Grocio Prado, provincia de Chincha, departamento de Ica. La Figura 19 muestra una vista en planta del hogar de ancianos y resalta la ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales del recinto.



Figura 19: Ubicación del área de estudio a partir de imágenes de *Google Maps*.

3.1.2 CONDICIONES CLIMÁTICAS

La provincia de Chíncha, ubicada en la costa peruana, presenta un clima árido, templado con deficiencia de humedad en todas las estaciones del año. En esta región desértica, se presentan solo lloviznas ocasionales que acumulan 2 mm en todo el año (SENAMHI, 2021).

Las condiciones climáticas durante la etapa de monitoreo de calidad de agua (octubre 2020 hasta enero 2021) se presentan en la Tabla 19. Los parámetros meteorológicos de temperatura, humedad relativa y precipitación fueron recolectados de la estación meteorológica FONAGRO de Chíncha.

Tabla 19: Condiciones climáticas durante la etapa de muestreo

Año	Mes	Temperatura			Humedad Relativa (%)	Precipitación (mm)
		Máximo	Mínimo	Promedio		
2020	Octubre	21,4	15,5	18,5	82,6	0
2020	Noviembre	21,9	15,6	18,8	81,9	0
2020	Diciembre	24,2	18,1	21,2	82,9	0
2021	Enero	25,9	19,6	22,7	81,9	0

Fuente: SENAMHI

3.2 ETAPAS DE LA METODOLOGÍA

La presente investigación se estructuró de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 20.

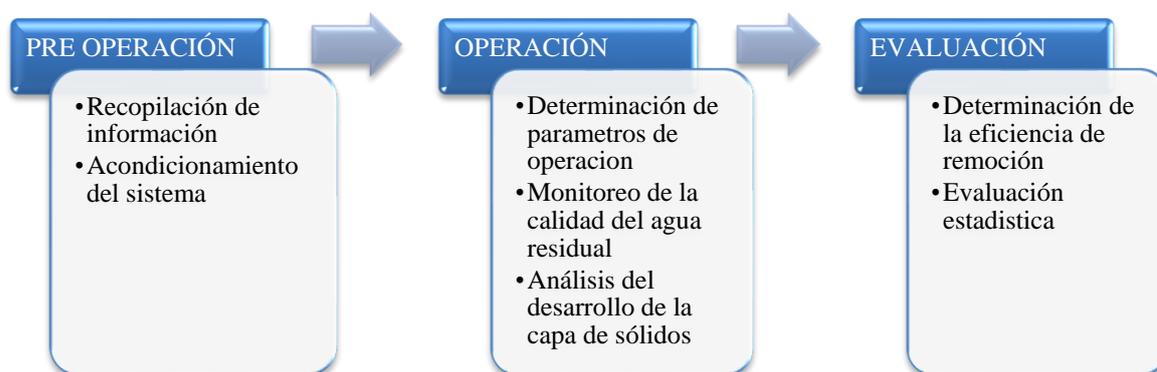


Figura 20: Etapas del método de investigación.

3.2.1 DURACIÓN

El desarrollo de la presente investigación inició en octubre del 2019 y, hasta inicios del 2020, se ejecutó la etapa de pre operación y determinación de los parámetros de operación. Debido a la coyuntura en la que atravesó el país por motivos de pandemia, la investigación no pudo retomarse hasta setiembre del 2020 y se continuó hasta enero del 2021, periodo en el cual se realizó el monitoreo de la calidad de las aguas residuales. Es así que se considera un tiempo efectivo de 8 meses.

3.2.2 PRE OPERACIÓN

Esta etapa consideró las siguientes acciones:

a. Recopilación de información

En primer lugar, se solicitó la memoria técnica y planos del proyecto “Tratamiento de Aguas Residuales por medio del Sistema Francés para el Hogar de Ancianos Santa Ana y San Joaquín”, información proporcionada por la empresa Rotaria del Perú, la cual diseñó e implementó dicho proyecto en el año 2011.

Luego, se realizó un diagnóstico in situ, observando cada componente del sistema e interrogando sobre su funcionamiento al personal encargado de la PTAR.

b. Acondicionamiento del sistema

Corresponde a todas las actividades previas a la operación del Sistema Frances, las cuales fueron necesarias y tomaron más tiempo del previsto debido a que la PTAR se encontró inoperativa por falta de mantenimiento.

A continuación, se detalla todas las actividades realizadas para la puesta en marcha del Sistema Frances ubicado en Chincha.

Tras un diagnóstico inicial, fue necesario la limpieza y el mantenimiento de las estaciones de bombeo. Se renovaron las boyas de nivel, se reparó la bomba de la EB2 y en la EB1, las bombas habían cumplido su vida útil, por lo que se tuvieron que reemplazar. La Figura 21 y Figura 22 muestran el antes y después de las estaciones de bombeo.

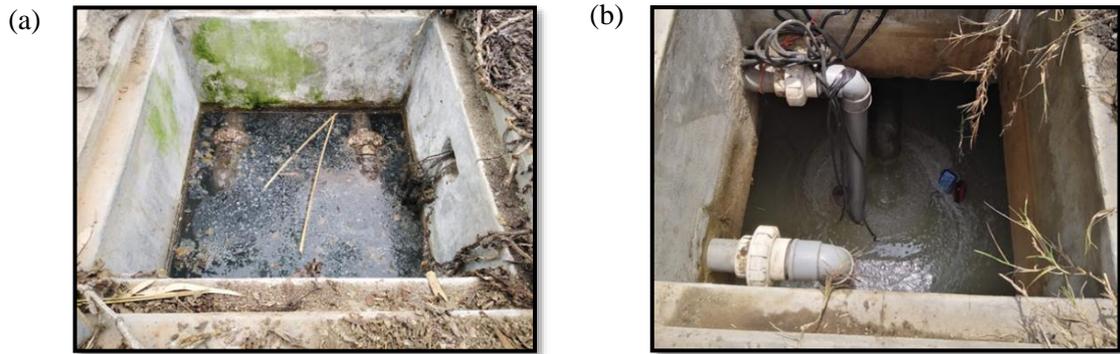


Figura 21. Vista de EB1: (a) Nivel de agua por encima del máximo, sobre tubería de alimentación y cerca de las conexiones eléctricas (08/10/19), (b) Vista después de limpieza, renovación de bombas y boyas (11/03/20).

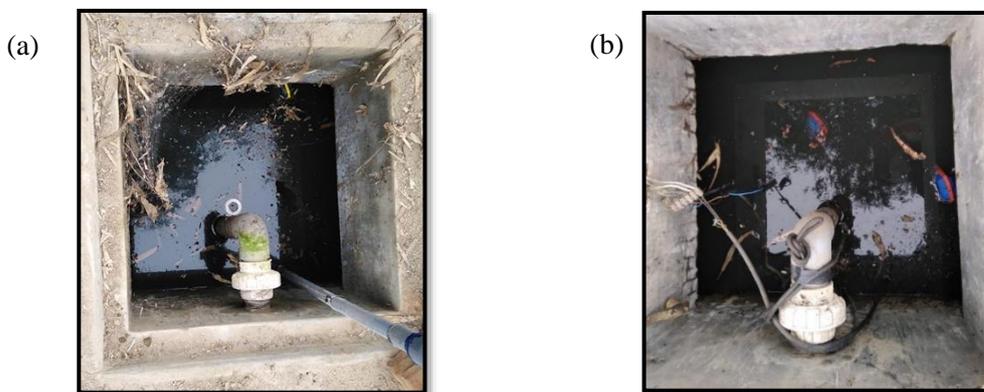


Figura 22. Vista de EB2: (a) Inoperativa, el agua se extrae con bomba externa (08/10/2019), (b) Bomba reparada y boyas nuevas (11/03/20).

En lo que respecta a los humedales construidos, debido al gran crecimiento de la vegetación que impedía la toma de muestras, se precisó el corte de plantas y la eliminación de materia seca y maleza. Además, fue necesario replantar y abrir surcos en la celda francesa porque la capa de sólidos acumulada había cubierto los platos de distribución.

Mayor detalle sobre el diagnóstico y actividades realizadas previas al monitoreo se aprecia en el Anexo 1.

La Figura 23 muestra una fotografía de la primera y segunda etapa del Sistema Francés después de las actividades de pre operación.



Figura 23. Vista de celda francesa y humedal de tratamiento previo al monitoreo.

Por otro lado, en el tablero de control, se renovó la fuente de alimentación del controlador lógico programable (CLP) y se mejoró el empalme de cables con las estaciones de bombeo. Se logró la automatización de las bombas gracias a la conexión de nuevas boyas de nivel al tablero, la cuales regulaban el encendido y apagado de las bombas, según el nivel máximo y mínimo, respectivamente.

Cabe mencionar que el registro de tiempos de bombeo (hora de encendido y duración) se realizó in situ por personal del asilo.

3.2.3 OPERACIÓN

a. Determinación de los parámetros de operación

Se calcularon y establecieron los parámetros de operación del Sistema francés de acuerdo a los objetivos de la presente investigación.

- **Alternancia de líneas en la celda francesa**

Conforme a la configuración de un sistema francés y los criterios de diseño señalados en el ítem 2.8.1 de la presente investigación, se alternó el funcionamiento de las líneas cada 3 días.

Se denomina línea activa a aquella que se encuentra en funcionamiento mientras que la otra línea descansa, esto se realiza para garantizar el secado de lodo en el cantero inactivo.

- **Carga de operación**

Considerando el objetivo de evaluar la operación del Sistema Francés bajo las mismas condiciones de diseño, durante toda la fase de operación se procuró mantener una carga hidráulica de 0,25 m d⁻¹ al ingreso del sistema. Esto se logró con una frecuencia de bombeo de 2 o 3 veces al día; con un tiempo de bombeo de 20 o 15 minutos, respectivamente, dependiendo de la producción de agua residual en el recinto. El volumen de carga promedio fue de 2,5 m³ d⁻¹.

- **Medición de caudal (Q)**

Este parámetro se determinó a través del método volumétrico en la alimentación de ambas líneas de la celda francesa. Se realizaron tres repeticiones por cada línea.

Para facilitar la medición, se instaló un arco de dos codos de 3", esto puede observarse en la Figura 24.



Figura 24. Medición de caudal al ingreso del sistema

El caudal se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V_{\text{recipiente}}}{t} \dots (l s^{-1})$$

Donde:

V recipiente = Volumen del recipiente (l)

T = Tiempo de llenado (s)

- **Carga hidráulica (CH)**

Se calculó mediante el cociente entre el caudal de ingreso y el área superficial del humedal.

$$CH = Q/As \dots (m \text{ d}^{-1})$$

Donde:

Q = Caudal de ingreso ($m^3 \text{ d}^{-1}$)

As = Área superficial del humedal (m^2)

- **Carga orgánica (C)**

Se calculó mediante el producto de la concentración de un determinado contaminante por el caudal (kg DBO₅ o DQO d^{-1}), en un determinado punto del sistema.

$$C = 10^{-3} Q \times DBO_5 \dots (\text{kg DBO } d^{-1})$$

Donde:

Q = Caudal de ingreso ($m^3 \text{ d}^{-1}$).

DBO₅ = Valor promedio de la DBO₅ a la entrada del humedal ($g \text{ m}^{-3}$).

DQO = Valor promedio de la demanda química de oxígeno.

b. Monitoreo de la calidad del agua residual

- **Tiempo y frecuencia del monitoreo**

Las muestras fueron tomadas cada 15 días durante 3 meses. Se inició en noviembre del 2020 y se concluyó en enero del 2021, debido al inesperado cierre del asilo a consecuencia de la pandemia.

De acuerdo al tiempo de bombeo del sistema, el horario de la toma de muestra fue los días miércoles entre las 12:00 m y 3:00pm.

- **Puntos de monitoreo**

Se establecieron tres puntos de monitoreo para caracterizar:

- P1: Afluente o agua residual cruda (ingreso a la primera unidad de tratamiento)
- P2: Agua residual pre tratada (salida de la celda francesa)
- P3: Efluente (salida del humedal de tratamiento secundario)

Estos puntos se localizaron estratégicamente con el fin de permitir representatividad en el flujo, homogeneidad de la muestra y que sean accesibles.

La Figura 25 señala la ubicación de los puntos de muestreo dentro del esquema del Sistema Francés de la investigación.

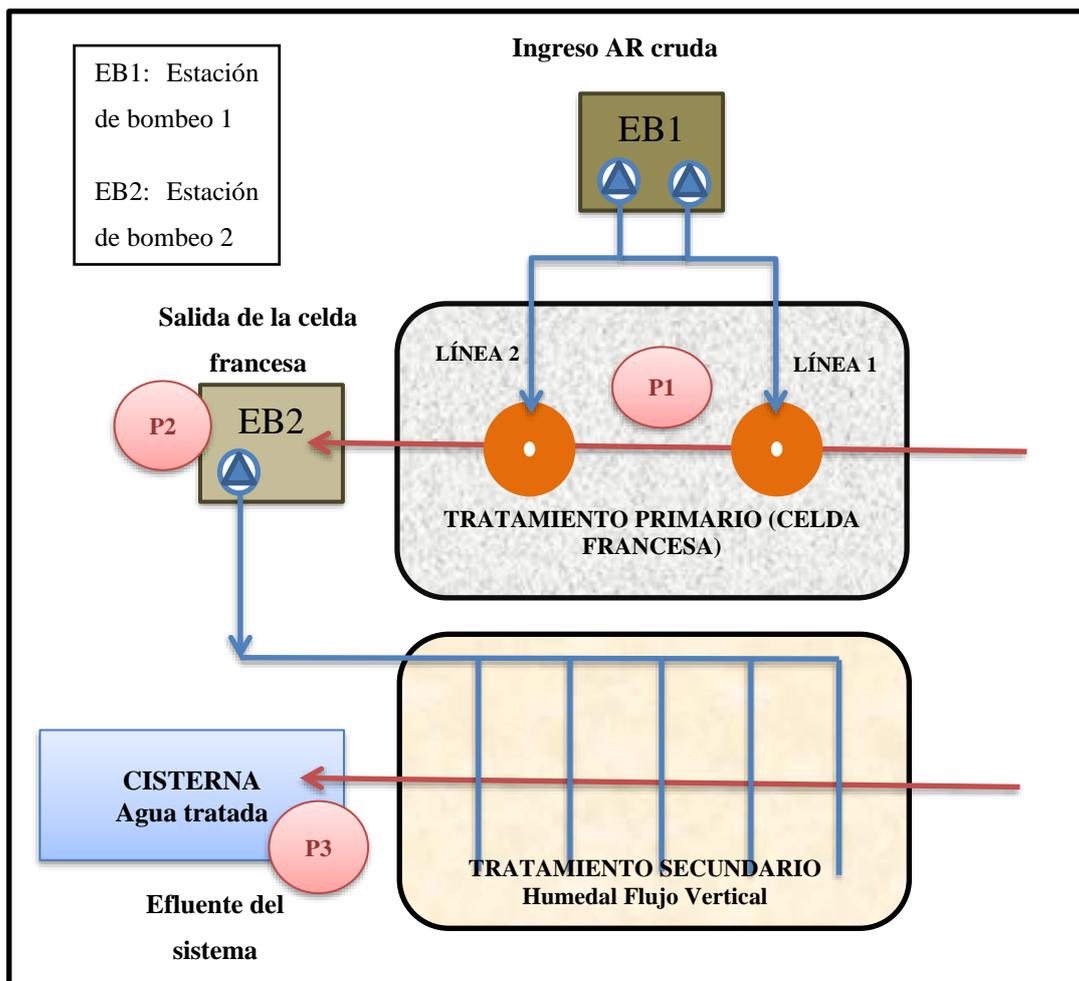


Figura 25. Puntos de muestreo en la PTAR. P1: afluente, P2: agua pretratada y P3: efluente.

- **Toma de muestras**

Se tomaron las muestras de agua residual siguiendo el Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, resuelto por el MVCS (2013).

Para lograr la homogeneidad de las muestras y del flujo se tuvo que esperar un tiempo determinado antes de muestrear en cada punto.

- P1: La muestra del afluente se tomó 8 minutos después de encendida la bomba que impulsa el agua residual cruda hacia la primera etapa de tratamiento, específicamente en el tubo de alimentación de la celda francesa, se tuvieron muestras de ambas líneas dependiendo de su actividad en el día de muestreo.
- P2: La muestra de desagüe pre tratado fue tomado en la tubería que descarga hacia la estación de bombeo 2 (salida de la celda francesa), aproximadamente 25 minutos después del bombeo en la EB1.
- P3: El efluente final fue muestreado a la salida del tratamiento secundario, en la tubería que alimenta a la cisterna, a unos 40 minutos iniciado el proceso de depuración en el Sistema Francés.

La Figura 26 presenta fotografías de la toma de muestra en P1 Y P2.



Figura 26. Toma de muestra de agua residual cruda en celda francesa (P1) y agua residual pretratada que ingresa a la EB2 (P2).

- **Medición de parámetros de campo**

La Tabla 20 presenta los parámetros medidos en campo y detalla algunas características del protocolo utilizado.

Tabla 20: Parámetros medidos en campo

Parámetro	Unidad	Equipo	Volumen de muestra	Tipo de envase	Preservante
pH	-	Multiparámetro PCSTestr	100 ml	Plástico	Medido in situ
Temperatura	°C	35 OAKTON	100 ml	Plástico	Medida in situ
Conductividad Eléctrica	μS	Medidor de conductividad EC Tester 11+ OAKTON	100 ml	Plástico	Medida in situ

- **Medición de parámetros de laboratorio**

En su mayoría, los parámetros de monitoreo fueron analizados en el laboratorio de Agua, Saneamiento y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la UNALM. Los parámetros analizados en laboratorios externos se muestran en la Tabla 21, mientras que los parámetros analizados en la UNALM se muestran en la Tabla 22.

Tabla 21: Parámetros analizados en laboratorios externos

Parámetro	Unidad	Laboratorio	Método de medición/ensayo
Fósforo Total	mgP l ⁻¹	Analytical Laboratory (ALAB)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-P B(Item 5) y E, 23 rd Ed. 2017
Nitrógeno Total	mgN l ⁻¹	Analytical Laboratory (ALAB)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-N C, 23 rd Ed. 2017
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ml	Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso"	SMEWW 21st Ed. 2005, Part 9221. APHA-AWWA-WEF
Larvas y huevos de Helmintos	Nº l ⁻¹	Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso"	SMEWW 21st Ed. 2005, Part 10750. APHA-AWWA-WEF

Cabe mencionar que el nitrógeno total sólo se analizó en el afluente (P1), con fines de caracterizar el desagüe crudo. Para evaluar el proceso de nitrificación en el sistema, se cuantificó la concentración de amonio, nitritos y nitratos.

Tabla 22: Parámetros analizados en laboratorio de agua, saneamiento y medio ambiente UNALM

Parámetro	Unidad	Equipo	Método de medición/ensayo	Rango	Volumen de muestra	Tipo de envase	Preservante
Turbidez	NTU	Turbidímetro portátil HACH 2100Q	Método USEPA 180.1.	0-1000	10 ml	P, V	Refrigerar a 4°C
Nitratos	mg l ⁻¹	Espectrofotómetro HACH DR6000 UV-VIS	Método HACH 8039	0-30	10 ml	P, V	Refrigerar a 4°C
Nitritos	mg l ⁻¹		Método HACH 8507	0.003-0.300	10 ml	P, V	Refrigerar a 4°C
DQO	mg l ⁻¹	Reactor de digestión digital DRB 200 HACH	Método HACH 8000	Viales HR (20-1500)	100 ml	P, V	Refrigerar a 4°C
		Espectrofotómetro HACH DR6000 UV-VIS	USEPA (1990) e ISO 8644	Viales LR (3-150)			Agregar H2SO4 hasta pH<2
DBO ₅	mg l ⁻¹	Incubadora Ambi-Hi-LO CHAMBER BODTrak II marca HACH	Respirometric Method SMEWW Part.5210 D Ed.21	Según puntos de muestreo 1°(0-350), 2°(0-70) y 3°(0-35)	1000 ml	P, V	Refrigerar a 4°C
SST	mg l ⁻¹	Balanza analítica TYP Bomba de succión YX930D Horno de secado BINDER	Método Estándar de USEPA 2540 D	-	1000 ml	P, V	Refrigerar a 4°C
Amonio	mg l ⁻¹	Espectrofotómetro HACH DR6000 UV-VIS	Nitrogen-Ammonia, Salicylate TNT Method HACH	0.4-50	10 ml	P, V	Refrigerar a 4°C

Nota. P= plástico, V= vidrio

c. Caracterización de la capa de solidos

Se caracterizó la capa de lodo acumulada, tras nueve años de operación de la PTAR, en base a los lineamientos del Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales aprobado por el Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA. Los parámetros analizados fueron de estabilización (sólidos totales y volátiles) y de higienización (coliformes fecales).

Para caracterizar la capa acumulada se tomó una muestra puntual aleatoria de la línea 2, a la que le correspondía su tercer día de reposo.

Además, se midió la altura y distribución de la capa de solidos sobre la superficie de cada cantero de mineralización de la celda francesa, para esta actividad se midió la altura a cada 50 cm distante del tubo de alimentación, hasta los 2 metros de distancia, tal como se puede ver en la Figura 27.

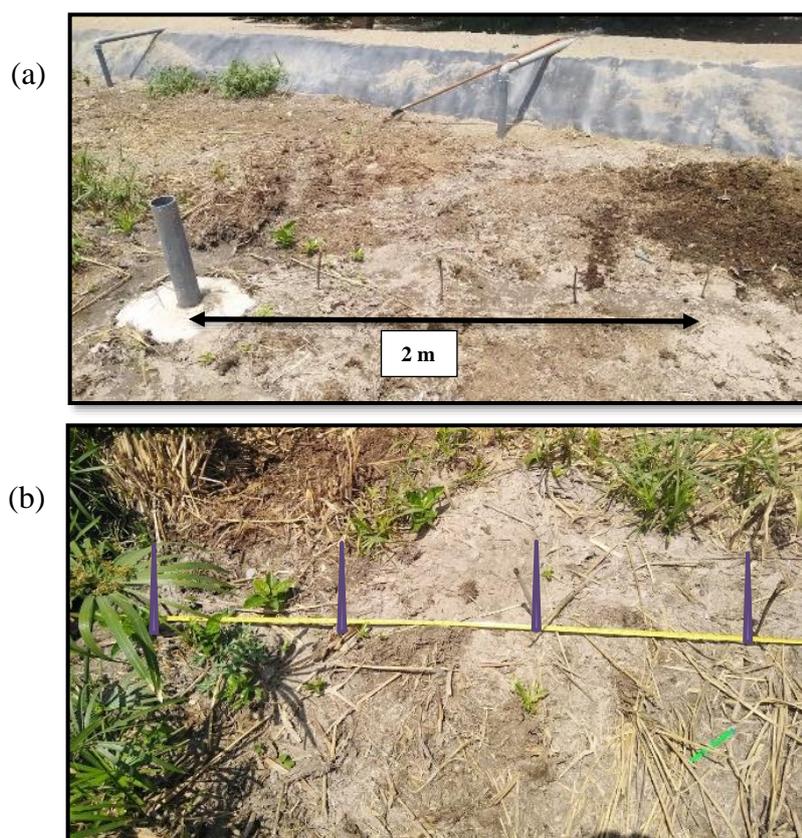


Figura 27. Medición de la altura de capa de lodo acumulada cada 50 cm a partir del tubo de distribución, hasta los 2 m: (a) línea de distribución 1 y (b) línea de distribución 2.

3.2.4 EVALUACIÓN

a. Determinación de la eficiencia de remoción

La determinación de la eficiencia del Sistema Francés consistió en calcular el porcentaje de remoción de contaminantes de acuerdo con los resultados en laboratorio a la entrada y salida de cada etapa de tratamiento y en la totalidad del sistema.

La eficiencia de remoción de contaminantes se expresó en porcentaje, usando la siguiente fórmula:

$$C = (C_i - C_f) C_i^{-1} \times 100$$

Donde:

E: eficiencia de remoción de contaminantes (porcentaje)

C_i: Concentración inicial

C_f: Concentración final

b. Evaluación estadística

Se aplicó el test de normalidad Shapiro Wilk para probar si los resultados obtenidos provienen de muestras normalmente distribuidas o no. Además, se realizó la prueba de valores atípicos, al 95% de confianza, en cada uno de los parámetros y de los puntos muestreados, con la finalidad de conocer si existen datos anómalos o extremos que disten de los demás datos, y determinar su posible causa. En todos los casos para establecer diferencias significativas se utilizó el criterio de $p < 0,05$.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La siguiente sección comprende la presentación y discusión de resultados en base a cada objetivo específico planteado en la tesis, incluyendo también la comparación con los datos reportados por Hoffmann *et al.* (2013) cuando el Sistema Francés (Chincha) tenía 15 meses de operación.

4.1 CARGA HIDRÁULICA AL INGRESO DEL SISTEMA

La Tabla 23 y Tabla 24 muestran las cargas hidráulicas aplicadas en la línea 1 y 2 de la celda francesa, respectivamente. Además, se incluyen las variables de cálculo de dicho parámetro de operación.

Tabla 23: Carga hidráulica en línea 1 del Sistema Francés

Variable	Unidad	Valor
Caudal Bomba 1	$l\ s^{-1}$	2,96
Tiempo de bombeo	min	14
Nº de activaciones por día	-	3
Caudal de Ingreso	$m^3\ d^{-1}$	7,4
Área cantero 1	m^2	30
Carga hidráulica	$m\ d^{-1}$	0,25

Tabla 24: Carga hidráulica en línea 2 del Sistema Francés

Variable	Unidad	Valor
Caudal Bomba 2	$l\ s^{-1}$	2,72
Tiempo de bombeo	min	15
Nº de activaciones por día	-	3
Caudal de Ingreso	$m^3\ d^{-1}$	7,3
Área cantero 2	m^2	30
Carga hidráulica	$m\ d^{-1}$	0,24

Las cargas hidráulicas calculadas de la línea 1 y 2 de la celda francesa fueron de $0,25 \text{ m d}^{-1}$ y $0,24 \text{ m d}^{-1}$, respectivamente; estos valores no difieren significativamente entre sí y la diferencia puede atribuirse a la independencia de bombas en cada línea, que probablemente no tengan la misma potencia efectiva, al nivel de regulación de las boyas eléctricas, que encienden y apagan los motores, o a la desestimación de segundos en el tiempo de bombeo.

Durante el desarrollo de la investigación se mantuvo una carga hidráulica de ingreso de $0,25 \text{ m d}^{-1}$ en cada línea activa, este valor no excede a $0,37 \text{ m d}^{-1}$ que es la carga hidráulica máxima de diseño de un Sistema Francés en clima seco, según Dotro et al. (2017).

Cabe mencionar que la carga hidráulica que se aplicó al sistema es la misma carga de diseño ($0,25 \text{ m d}^{-1}$).

4.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES CRUDAS

Todas las aguas residuales que ingresan al sistema de tratamiento, provienen exclusivamente del Hogar de ancianos Santa Ana y San Joaquín, estas son aguas residuales domésticas que incluyen las aguas de los sanitarios, duchas, lavamanos, lavanderías y cocina. Durante la etapa de monitoreo, se tuvo un total de 40 personas residiendo en el asilo.

La Tabla 25 muestra el valor promedio de los principales parámetros del afluente del sistema. El valor de pH promedio de las aguas residuales afluentes fue 7, es decir, tiende a ser neutro y la temperatura promedio fue de 24.4°C .

La concentración promedio del nitrógeno total fue de $25,3 \text{ mg l}^{-1}$ y el amonio representó el 65,4 % del N_{TOTAL} , por tanto, se podría decir que el 34,6 % correspondía al nitrógeno orgánico. Sin embargo, también se halló pocas cantidades de nitratos y nitritos. Von Sperling (2007) sostiene que estas formas de nitrógeno se encuentran presentes en el agua residual cuando la contaminación de la misma no es reciente, esta afirmación concuerda con que las aguas residuales permanecen en la estación de bombeo hasta llenar el volumen óptimo de operación para recién ahí ser bombeadas hacia la primera etapa del sistema.

Por otro lado, la concentración promedio de P_{TOTAL} fue $4,7 \text{ mg l}^{-1}$ y las concentraciones promedio de DQO y DBO_5 fueron $376,7 \text{ mg l}^{-1}$ y $244,7 \text{ mg l}^{-1}$ respectivamente.

La relación DBO₅/DQO fue de 0,65. De acuerdo con Von Sperling y Chernicharo (2005), este valor indica que el afluente es altamente biodegradable y que es posible aplicar cualquier tratamiento biológico en su depuración.

Los resultados de DQO, SST, CE y turbidez presentan una alta desviación estándar, esto quiere decir que los datos están dispersos con respecto al promedio.

Tabla 25: Caracterización del agua residual cruda

Parámetro	Unidad	N	Min	Promedio	Max	SD
DQO	mg l ⁻¹	6	279	376,7	613	123,1
DBO ₅	mg l ⁻¹	6	195	244,7	347	64,1
SST	mg l ⁻¹	6	54,2	194,7	367,9	109,2
Nitrógeno Total	mg l ⁻¹	3	14,9	25,3	31	15,3
Amonio (NH ₄ -N)	mgN l ⁻¹	3	15,2	16,6	17,8	9,1
Nitritos (NO ₂ -)	mg l ⁻¹	6	0,012	0,024	0,036	0,008
Nitratos (NO ₃ -)	mg l ⁻¹	5	4,9	7,3	10,8	3,8
Fosforo Total	mgP l ⁻¹	3	3	4,7	6,7	2,9
Turbidez	NTU	6	106	221,7	348	108,3
Ph	-	6	6,8	7	7,3	0,2
T°	°C	6	23,1	24,4	26,3	1,2
CE	μS cm ⁻¹	6	568	685,7	902	134,9

En general, el afluente del sistema presenta valores dentro del rango de aguas residuales de concentración media según lo señalado en la Tabla 5 por Metcalf y Eddy (1995).

4.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS

La Tabla 26 muestra el valor promedio de los principales parámetros de calidad del efluente del sistema, donde N es el número de muestras tomadas y SD es la desviación estándar.

Por otro lado, la Tabla 27 presenta el valor promedio de los parámetros de calidad en cada punto de monitoreo y a la par, muestra las eficiencias de remoción de contaminantes en cada etapa y del sistema en conjunto (1ra + 2da etapa).

Tabla 26: Caracterización del efluente final

Parámetro	Unidad	N	Min	Promedio	Max	SD
DQO	mg l ⁻¹	6	2	6,3	9	2,7
DBO ₅	mg l ⁻¹	6	0,2	2,2	3,4	1,1
SST	mg l ⁻¹	6	0,4	1,0	2,3	0,7
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg l ⁻¹	6	0,005	0,009	0,013	0,003
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg l ⁻¹	6	1,9	4,4	6,1	1,4
Fosforo Total	mgP l ⁻¹	4	2,2	3,7	6,1	2,3
Turbidez	NTU	6	0,5	0,9	1,4	0,3
Ph	-	6	6,5	6,7	6,8	0,1
T°	°C	6	23,5	25,1	27	1,5
CE	μS cm ⁻¹	6	537	639	825	103,5

Tabla 27: Eficiencias de remoción de principales contaminantes

Parámetro	Afluente	AR pre tratada	Efluente	Eficiencia de remoción (%)		
	Promedio ± SD	Promedio ± SD	Promedio ± SD	1era etapa	2da etapa	(1era+2da)
DQO (mg l ⁻¹)	376,7 ± 123	77,5 ± 42,7	6,3 ± 2,7	79	92	98,3
DBO ₅ (mg l ⁻¹)	244,7 ± 64	28,8 ± 13,9	2,2 ± 1,1	88	92	99,1
SST (mg l ⁻¹)	194,7 ± 109,2	12,6 ± 9,4	1 ± 0,7	94	92	99,5
NH ₄ -N (mg l ⁻¹)	16,6 ± 9,1	2,2 ± 0,3	0	87	100	100,0
Ptotal (mgP l ⁻¹)	4,7 ± 2,9	4,7 ± 2	3,7 ± 2,3	0	21	19,8
Turbidez (NTU)	221,7 ± 108,3	21,3 ± 16,4	0,9 ± 0,3	90	96	99,6

La Tabla 28 muestra la comparación entre los datos reportados por Hoffmann et al. (2013) y los correspondientes a la presente investigación. Cabe resaltar que en ambos casos se tienen los mismos puntos de monitoreo, siendo P-1, el desagüe crudo o afluente; P-2, el agua residual pre tratada y P-3, el efluente final del sistema; no obstante, en el primer monitoreo (año 2013) se tuvo un caudal de 12 m³ d⁻¹, lo cual es mucho mayor a los 7,4 m³ d⁻¹ con que se operó al momento de la investigación (año 2021). La comparación entre eficiencias de ambos monitoreos se presenta en la Tabla 29.

De acuerdo con los resultados, en la primera etapa se obtuvo una remoción del 79% y 88% para la DQO y DBO₅ respectivamente. En comparación con las eficiencias registradas por Hoffmann et al. en abril del 2013 que obtuvo un 96% en ambos parámetros, se puede afirmar

que, en términos de remoción de la materia orgánica, el rendimiento de la primera etapa disminuyó con el pasar de los años.

Por el contrario, con respecto a la remoción de NH₄-N y SST a la salida del primer filtro, se tuvieron eficiencias de 87% y 94% respectivamente, lo cual mayor al 75% obtenido ocho años atrás en remoción de amonio (de la primera etapa). Estas altas tasas de rendimiento son en virtud de la capa de lodo acumulada en la superficie de la celda francesa pues tiene un menor tamaño medio de poro, lo que limita el flujo y aumenta el tiempo de retención en el filtro, favoreciendo así la adsorción de amonio y retención de sólidos (Molle et al., 2005; Molle, 2014).

Tabla 28: Resultados de monitoreo de PTAR (2013 vs 2021)

Parámetro	Unidad	PROMEDIO ENE - ABR 2013			PROMEDIO NOV 2020 - ENE 2021		
		P-1	P-2	P-3	P-1	P-2	P-3
DQO	mg l ⁻¹	1960	74,5	16,5	376,7	77,5	6,3
DBO ₅	mg l ⁻¹	656	23	4	244,7	28,8	2,2
SST	mg l ⁻¹	N. D	N.D	N. D	194,7	12,6	1,0
Amonio (NH ₄ -N)	mg l ⁻¹	23	5,7	0	16,6	2,2	0
Nitritos (NO ₂ -)	mg l ⁻¹	0	0,5	0,1	0,024	0,566	0,009
Nitratos (NO ₃ -)	mg l ⁻¹	0	10,6	8,4	7,3	7,9	4,4
Fósforo Total	mgP l ⁻¹	7,9*	5,5*	4,4*	4,7	4,7	3,7
Turbidez	NTU	470	7,5	0,3	221,7	21,3	0,9
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ml	4,30x10 ⁷	5,10x10 ⁶	9,40x10 ³	6,32x10 ⁷	2,39x10 ⁷	6,38x10 ³
Helminetos	NMP/100 ml	< 1	<1	< 1	145.0	7,5	0

N. D= No determinado

*Se midieron fosfatos

Tabla 29: Comparación de las eficiencias año 2013 vs 2021

Parámetro	Unidad	EFICIENCIA PRIMERA ETAPA		EFICIENCIA TOTAL DEL SISTEMA	
		2013	2021	2013	2021
DQO	mg l ⁻¹	96,2	79,4	99,2	98,3
DBO ₅	mg l ⁻¹	96,5	88,2	99,4	99,1
Amonio (NH ₄ -N)	mg l ⁻¹	75,2	86,7	100	100
Fósforo Total	mgP l ⁻¹	30,4	0	44,3	19,8
Turbidez	NTU	98,4	90,4	99,9	99,6
Coliformes termotolerantes	NMP/100ml	1 log10	< 1 log 10	4 log 10	4 log 10
Helminetos	NMP/100ml	99,9	94,8	99,9	100

En general, las eficiencias obtenidas solo en la primera etapa del sistema, son menores a las registradas por Hoffmann et al. (2013), excepto en la nitrificación. Ver Tabla 29.

Según la Tabla 27, las eficiencias de remoción en la 2^{da} etapa de tratamiento fueron 92%, 92%, 92% y 100% para la DQO, DBO₅, SST y NH₄-N respectivamente. En este caso los resultados obtenidos son mayores que los presentados en anteriores publicaciones con el mismo sistema y similares condiciones climáticas (Gómez, 2017; Hoffmann et al., 2013 y León, 2020).

En cuanto al P_{TOTAL}, no hubo remoción de este parámetro en la primera etapa del sistema y en la segunda etapa se obtuvo sólo un 19,8%, lo cual es considerablemente menor respecto a las eficiencias reportadas en el segundo año de operación del sistema (44%), dicho comportamiento se atribuye a la posibilidad de saturación en la capacidad de adsorción de las gravas y/o material filtrante. Tal como indican Lombard y Molle (2017), la capacidad de adsorción de las gravas no se regenera y disminuye con el tiempo. Además, el resultado obtenido, concuerda con la eficiencia típica de remoción de fósforo en los humedales que es entre 10-20% (Ver Tabla 14).

Las eficiencias de remoción de todo el sistema en conjunto (1ra + 2da etapa) fueron de 98,3%, 99,1%, 99,5%, 100% para la DQO, DBO₅, SST y NH₄-N respectivamente, estos resultados son incluso mayores a los registrados por León (2020) teniendo la misma carga de operación (0,25 m d⁻¹) en condiciones de costa peruana, que fueron de 98,6%, 98,6%, 99,4% y 91,5% en los mismos parámetros respectivamente. En comparación con los resultados de eficiencia de la misma PTAR en sus primeros años de operación, reportados por Hoffmann et al. (2013), se puede decir que hay una ligera disminución para la descomposición de la materia orgánica (99,2% y 99,4% para DQO y DBO₅) y se mantienen en el caso de remoción de sólidos y de amonio (99% y 100%).

Alarcón et al. (2018) destacan que, los humedales construidos de flujo vertical subsuperficial alcanzan altas eficiencias de eliminación de materia orgánica (expresada como DBO₅ y DQO) y SST, debido a que la alimentación intermitente permite que se generen zonas aeróbicas y anaeróbicas de manera simultánea, logrando eficiencias mayores a 90%.

La remoción de coliformes termotolerantes se realizó principalmente en la segunda etapa reduciéndose aproximadamente 4 unidades logarítmicas. Los helmintos fueron eliminados completamente (remoción de 100%), no encontrándose ninguno en el efluente.

4.4 COMPORTAMIENTO DE CADA PARÁMETRO DURANTE EL MONITOREO

4.4.1 PARÁMETROS FÍSICOS

a. Temperatura

La Figura 28 muestra los valores de temperatura registrados por el multiparámetro de campo y al mismo tiempo la temperatura ambiental registrada en la estación meteorológica Fonagro de Chincha.

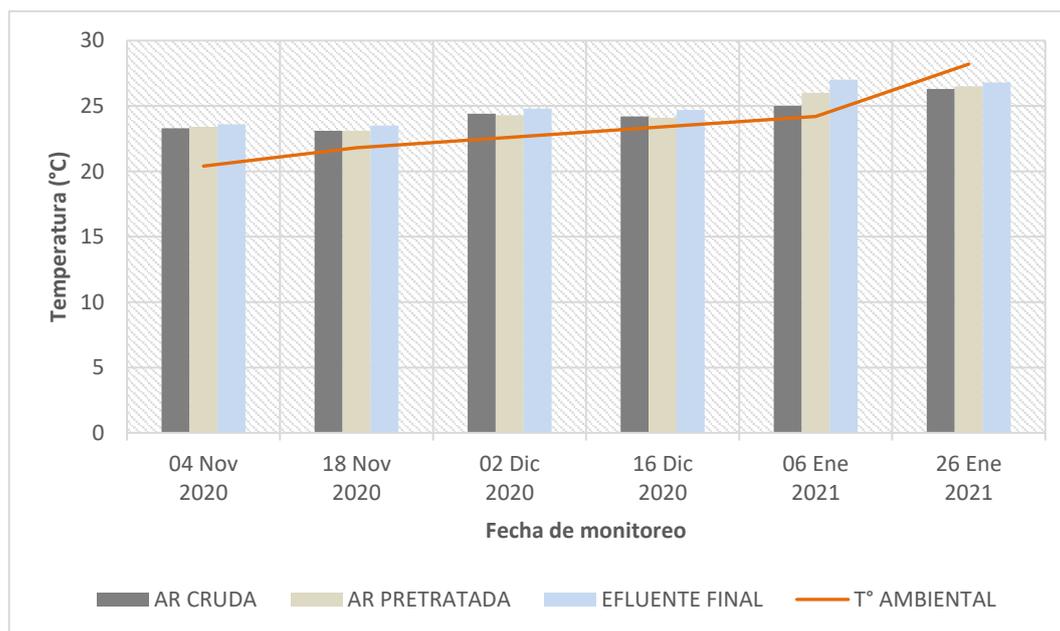


Figura 28. Variación de la temperatura del agua residual cruda, pretratada y efluente final, y temperatura ambiental durante el monitoreo.

Como puede observarse, la temperatura en las aguas residuales tiene una relación directa con la temperatura ambiental y a la vez es mayor que esta última. Metcalf y Eddy (1995) afirman que dado que el calor específico del agua es mucho mayor que el del aire, las temperaturas registradas de las aguas residuales son más altas que la temperatura del aire durante la mayor parte del año, y sólo son menores que ella durante los meses más calurosos del verano; esto se observó en la última fecha de muestreo donde la temperatura ambiental fue mayor a la de las aguas residuales.

Además, se nota una constante en que la temperatura de los efluentes es mayor que la de los afluentes, esto puede deberse al aumento de temperatura horaria mientras se tomaron las muestras.

En términos generales, la temperatura de las aguas residuales tuvo un rango entre 23,1°C y 26,8°C, lo cual es favorable para el desarrollo de la actividad microbiana y se encuentra dentro de los límites máximos permisibles (LMP) aprobado por el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, que exige que el efluente tenga una temperatura menor a 35°C.

b. Potencial de hidrógeno – pH

La Figura 29 presenta los valores de pH de las aguas residuales en cada punto de muestreo y a la vez el rango permitido según los LMP para los efluentes.

En todos los casos se observa que, al pasar por las etapas de tratamiento, el valor de pH en el agua residual disminuye, tendiendo a una condición ligeramente ácida, esto se debe a que los procesos de oxidación biológica normalmente tienden a reducir el pH (Von Sperling y Chernicharo, 2005).

El ph de los efluentes se encuentra entre 6,5 y 6,8 lo cual está dentro del rango de los LMP.

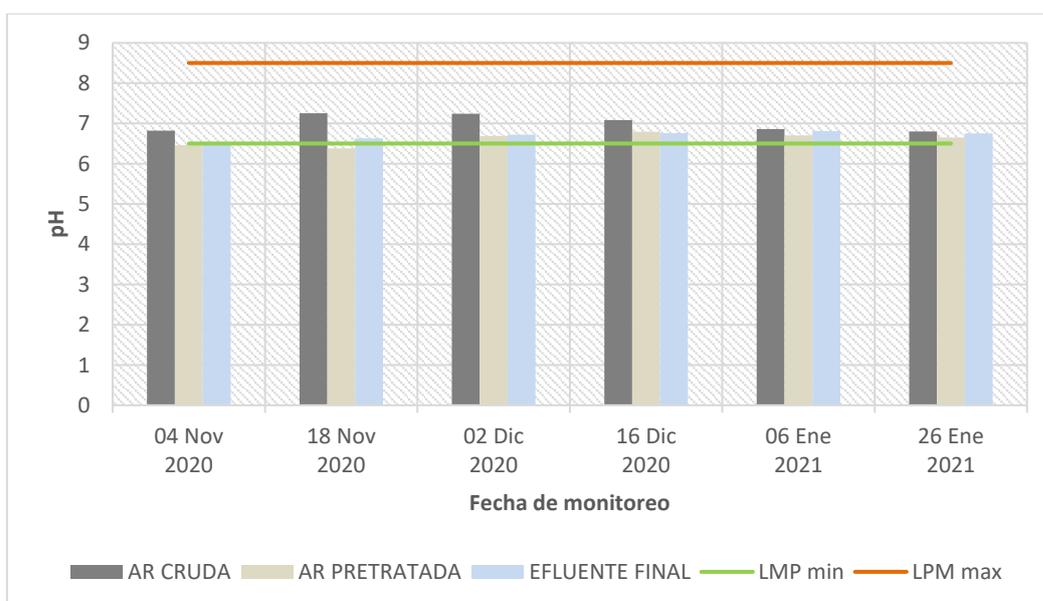


Figura 29. Valores de pH durante el monitoreo del agua residual cruda, pretratada y efluente final. Las líneas horizontales representan los LMP mín. y máx. respecto al pH.

c. Conductividad eléctrica

La Figura 30 muestra los valores de conductividad eléctrica obtenidos en cada fecha y punto de muestreo. Este parámetro no se encuentra dentro de la normativa para vertimiento.

En la mayoría de los casos reportados, se observa un aumento de conductividad en el efluente, uno de los factores que influye en el incremento de este parámetro es la exudación de las raíces de las plantas, dado que estas liberan sales y minerales al interactuar con el sustrato y demás componentes del humedal.

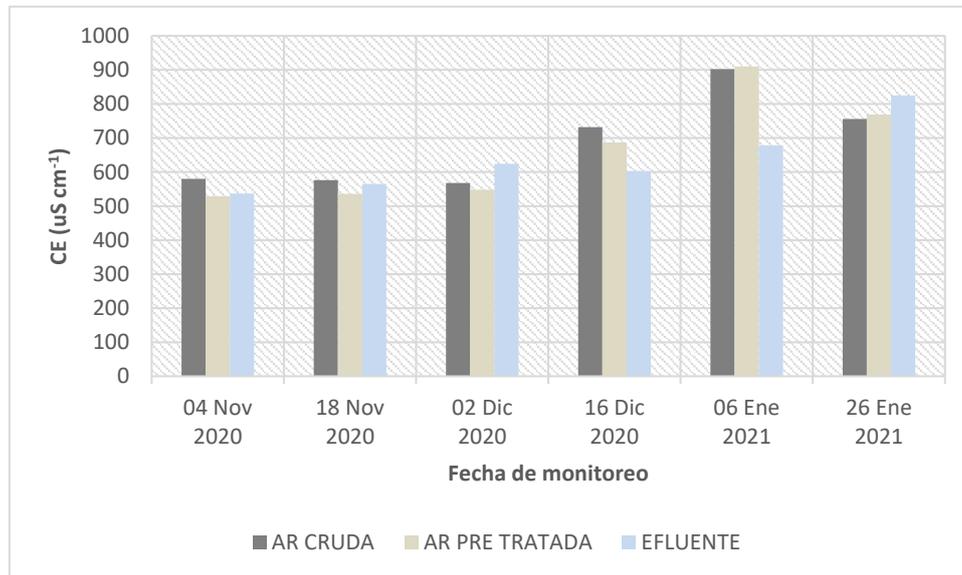


Figura 30. Valores de conductividad eléctrica del agua residual cruda, pretratada y efluente final durante el monitoreo.

d. Turbidez

La Figura 31 presenta los valores de turbidez en las aguas residuales del sistema. En el gráfico se observa que, en todos los casos, a medida que estas pasan por las etapas de tratamiento existe una notable disminución en el valor de la turbidez, lo cual demuestra la alta capacidad de filtración en los humedales verticales que componen el sistema francés, teniendo en promedio eficiencias de 90%, 96% y 99,6%, en la primera, segunda etapa y en el sistema en conjunto respectivamente.

Además, los bajos valores de turbidez en los efluentes se mantienen independientemente de los valores en el afluente.

A pesar que el D.S. N° 003-2010-MINAM, que aprueba los límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, no considera el grado de turbidez dentro de sus parámetros, este es un buen indicador visual de calidad.

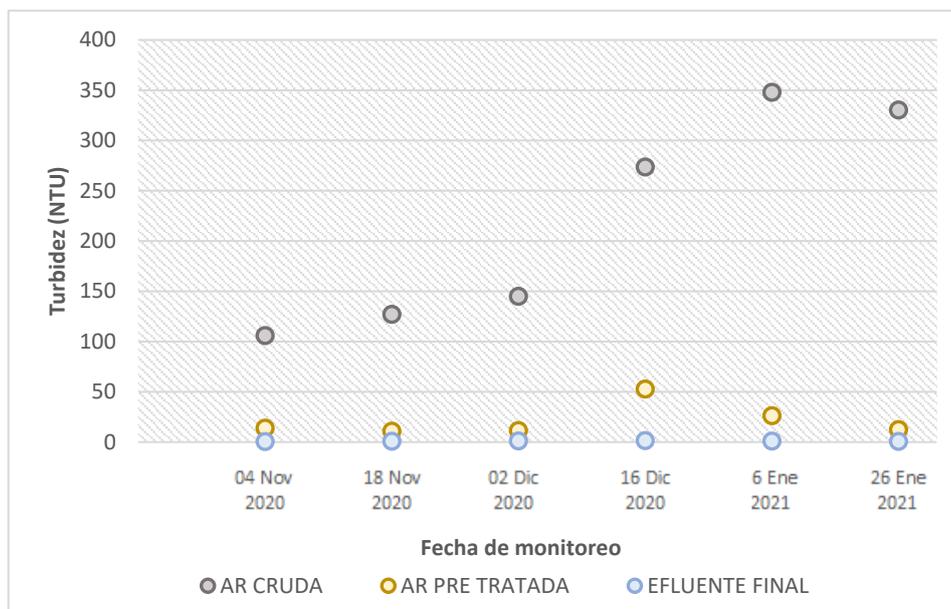


Figura 31. Valores de turbidez del agua residual cruda, pretratada y efluente final durante el monitoreo.

4.4.2 PARÁMETROS QUÍMICOS

a. Demanda química de oxígeno - DQO

La Figura 32 muestra los valores de la demanda química de oxígeno en las aguas residuales, por cada fecha de monitoreo, contrastado con el límite máximo permisible para los efluentes.

Tal y como se menciona en apartados anteriores el sistema francés tiene altas tasas de remoción en términos de DQO, esto independientemente de la carga del afluente que, como puede observarse en la cuarta fecha de monitoreo, aún cuando se tuvieron altas cargas en el desagüe crudo (613 mg l^{-1}), el efluente presentó cargas muy bajas (7 mg l^{-1}).

Si bien se realizó el monitoreo el mismo día de la semana (todos los miércoles) y a la misma hora (excepto el último), se observa que la concentración de la DQO en el afluente no es constante y tiende a aumentar al paso del tiempo. Sabiendo que la carga contaminante está estrechamente relacionada al uso del agua, es posible que la variabilidad se debe al cambio de estación del año, pues la población suele utilizar más agua en el verano.

Cabe resaltar que incluso sólo con el pre tratamiento, en todos los casos, el valor de Demanda Química de Oxígeno en el efluente se encuentra por debajo de los Límites Máximos Permisibles (D.S. N° 003-2010- MINAM) el cual es de 200 mg l^{-1} .

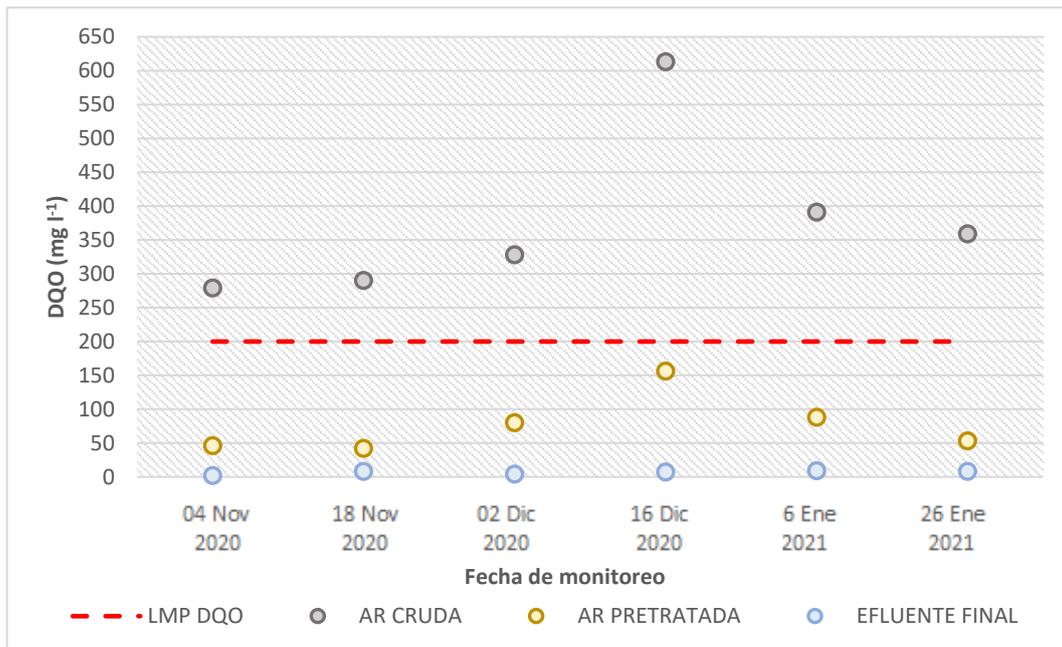


Figura 32. Valores de DQO del agua residual cruda, pretratada y efluente final durante el monitoreo. La línea horizontal representa el límite máximo permisible para la DQO.

b. Demanda bioquímica de oxígeno – DBO₅

La Figura 33 muestra los valores de la demanda bioquímica de oxígeno en las aguas residuales por cada fecha de monitoreo contrastado con el límite máximo permisible para los efluentes.

Este parámetro muestra un comportamiento similar al de la DQO, ya que están relacionadas entre sí. Al ingreso se tiene un promedio de 245 mg l⁻¹ y en el efluente final, 2,2 mg l⁻¹.

Al igual que en la DQO, basta con la primera etapa para cumplir con los Límites Máximos Permisibles (D.S. N° 003-2010- MINAM) el cual es de 100 mg l⁻¹ para la DBO₅.

c. Sólidos suspendidos totales – SST

La Figura 34 presenta los valores de sólidos suspendidos totales en cada fecha de monitoreo. Al igual que los parámetros antes evaluados, se observa que independientemente de los valores que se presentan en el afluente, se retiene un alto porcentaje de sólidos. Además, cabe resaltar que su eficiencia de remoción es mayor en la primera etapa (94%) en comparación con la segunda etapa (92%) esto es debido a la capa de sólidos acumulada en la superficie del primer filtro.

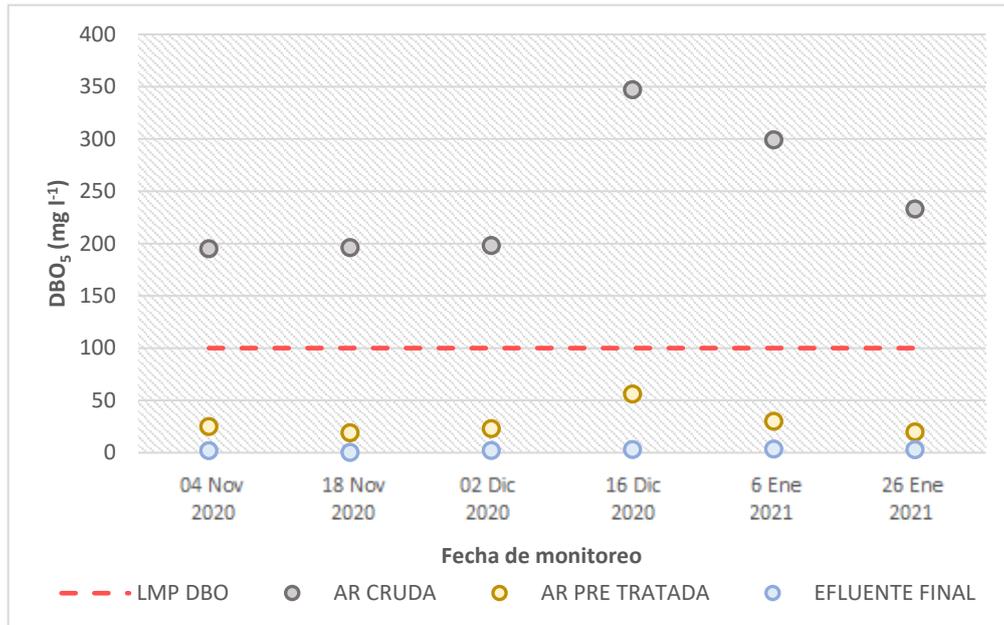


Figura 33. Valores de DBO_5 del agua residual cruda, pretratada y efluente final durante el monitoreo. La línea horizontal representa el límite máximo permisible para la DBO_5 .

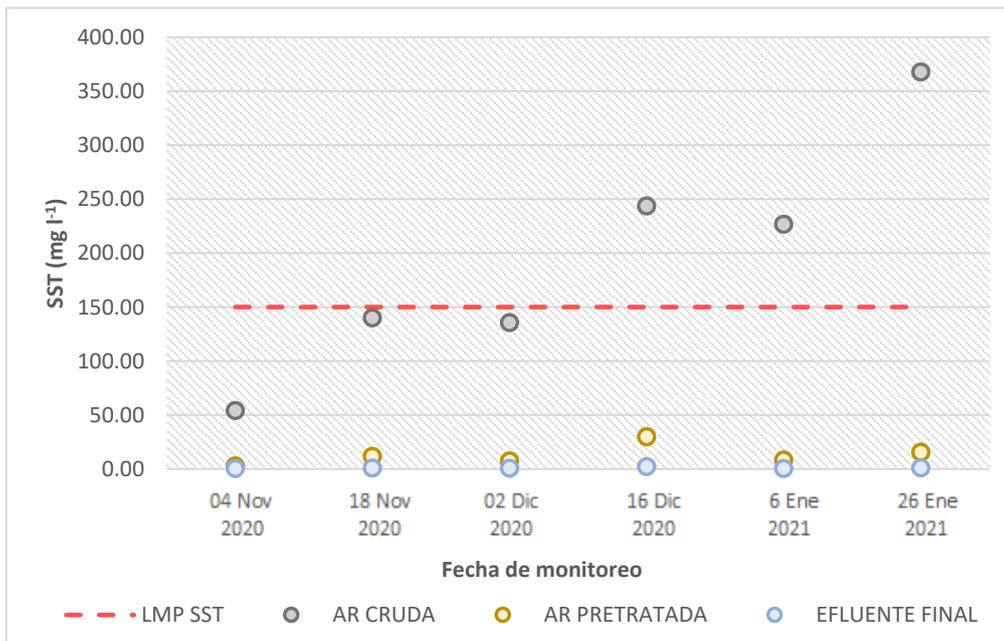


Figura 34. Valores de sólidos suspendidos totales del agua residual cruda, pretratada y efluente final durante el monitoreo. La línea horizontal representa el límite máximo permisible para SST.

d. Nitrógeno

La Figura 35 muestra la distribución de las concentraciones de amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$), nitrito (NO_2^-) y nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$) en el afluente, efluente de la 1^{ra} etapa y efluente de la 2^{da} etapa, la concentración de nitrógeno total se midió sólo en el afluente. Debido a que no se tenía el mismo número de muestra en todos los grupos, se utilizó el diagrama de cajas y bigotes verticales para evaluar la dispersión y la tendencia central de cada conjunto de datos.

En el agua residual cruda, las concentraciones promedio de N_{TOTAL} y $\text{NH}_4\text{-N}$ fueron 25,3 mg l^{-1} y 16,6 mg l^{-1} respectivamente y se halló una baja cantidad de NO_2^- y $\text{NO}_3\text{-N}$, de 0,02 mg l^{-1} y 7,3 mg l^{-1} , respectivamente.

Las concentraciones promedio en el agua residual pretratada fueron 2,2 mg l^{-1} , 0,32 mg l^{-1} y 7,9 mg l^{-1} para $\text{NH}_4\text{-N}$, NO_2^- y $\text{NO}_3\text{-N}$ respectivamente. En esta etapa, la concentración de $\text{NH}_4\text{-N}$ disminuyó en 86,7% respecto al afluente, este valor es aún mayor que la remoción de amonio en los primeros años de funcionamiento de la PTAR, que fue de 75,2% (Hoffmann et. al, 2013), esto se le atribuye a la acumulación de lodo en la superficie de la celda francesa (primera etapa) que al retiene mayor tiempo al agua y al estar en contacto con el aire hay una mayor oxigenación que favorece la nitrificación.

Respecto a la concentración de $\text{NO}_2\text{-N}$ se comprobó que, como explican Metcalf y Eddy (1995), su presencia en las aguas residuales es relativamente inestable y fácilmente oxidable a la forma de nitrato; sus concentraciones no pasaron de 0,7 mg l^{-1} .

Las concentraciones promedio en el efluente final fueron 0 mg l^{-1} , 0,01 mg l^{-1} y 4,35 mg l^{-1} para amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$), nitritos ($\text{NO}_2\text{-N}$) y nitratos ($\text{NO}_3\text{-N}$), respectivamente. La concentración $\text{NH}_4\text{-N}$ disminuyó en 100% respecto al afluente, lo que demuestra su gran capacidad para la nitrificación.

La Figura 36 muestra los valores promedio de cada forma de nitrógeno presentes en el agua residual cruda, agua residual pretratada y efluente final.

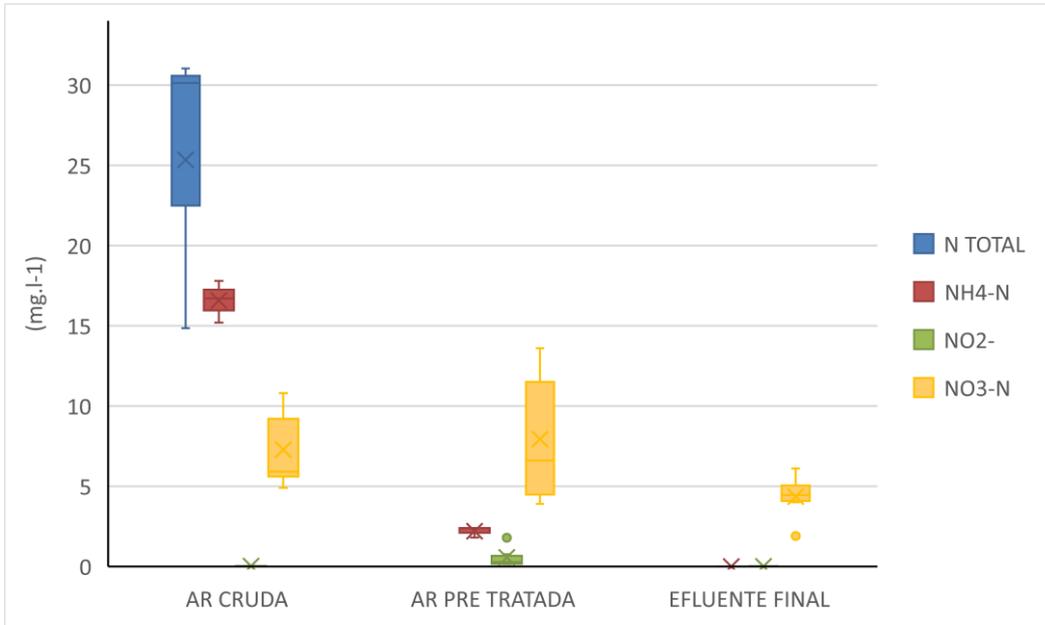


Figura 35. Diagrama de cajas y bigotes de los resultados obtenidos de las formas de nitrógeno presentes en el agua residual cruda, pretratada y efluente final. Ntotal: nitrógeno total, NH₄-N: amonio, NO₂-: nitritos y NO₃-N: nitratos.

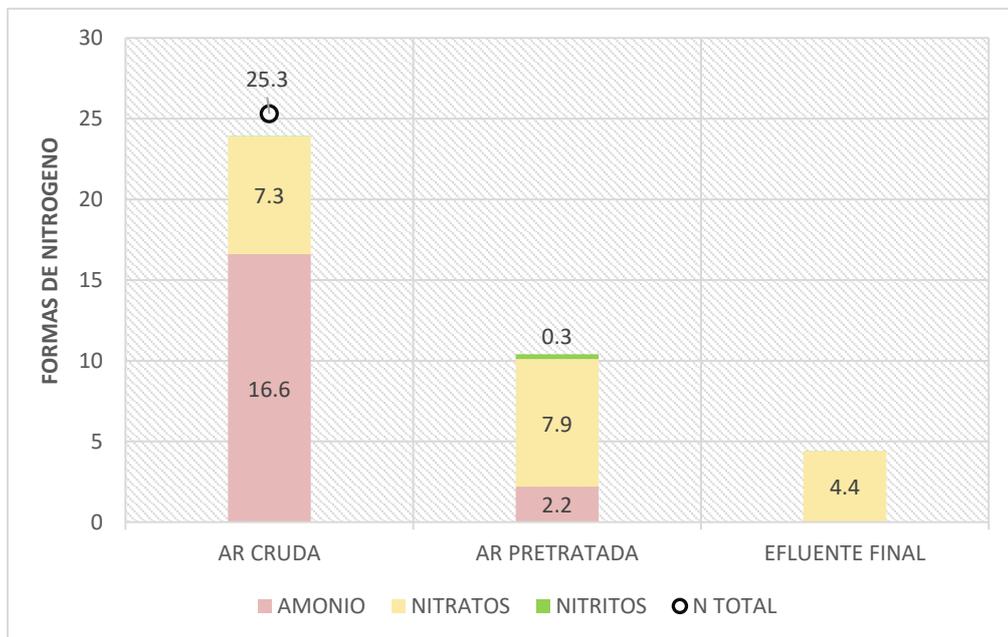


Figura 36. Valores promedio de concentración de las formas de nitrógeno en el agua residual cruda, pretratada y efluente final.

4.4.3 PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS

a. Coliformes termotolerantes

La Figura 37 presenta el número de coliformes termotolerantes (CT) presentes en el agua residual cruda, agua residual pre tratada y en el efluente final de la PTAR, durante las últimas cuatro fechas del monitoreo, y a la vez el límite máximo permisible según normativa para este parámetro. Se cumple que en todos los casos existe una remoción >99% de coliformes termotolerantes comparando la cantidad de entrada y salida del sistema en conjunto.

El afluente ingresa con una media geométrica de 6.3×10^7 NMP/100ml y a la salida en promedio se tiene valores de 2.4×10^7 y 6.4×10^3 NMP/100ml luego de la primera y segunda etapa respectivamente. Sin embargo, cabe resaltar que en el efluente final existe una marcada diferencia entre las dos primeras fechas y las dos últimas, que oscilan entre el rango máximo permisible. Esta diferencia puede estar relacionada a la temperatura, Alarcón et al (2018) refieren que a temperaturas más altas aumenta la remoción de coliformes, dado que las reacciones proceden a velocidades más altas.

Lombard y Molle (2017) afirman que el tiempo de residencia de los efluentes en el sistema es relativamente bajo (menos de un día) y no permite el tratamiento de gérmenes patógenos, por lo que se espera una reducción de 2 a 3 unidades logarítmicas como máximo. No obstante, en el mes de enero se logró reducir hasta 5 unidades logarítmicas, este valor de remoción es aún mayor que lo reportado por Hofmann et al. (2013) que obtuvo un efluente con una reducción de 4 unidades logarítmicas respecto al afluente.

Debido a la variabilidad de resultados en el efluente final se tiene que algunos valores se encuentran por encima y otros por debajo del límite máximo permisible para vertimiento ($<10^4$ NMP/100ml) y de igual manera para el reúso del agua en riego sin restricción, que según las directrices recomendadas por la Organización Mundial de la Salud (1989) se exige una media geométrica menor o igual a 10^3 NMP/100ml. En los casos que no se cumpla con los valores normados, las aguas deberán pasar por un proceso de desinfección.

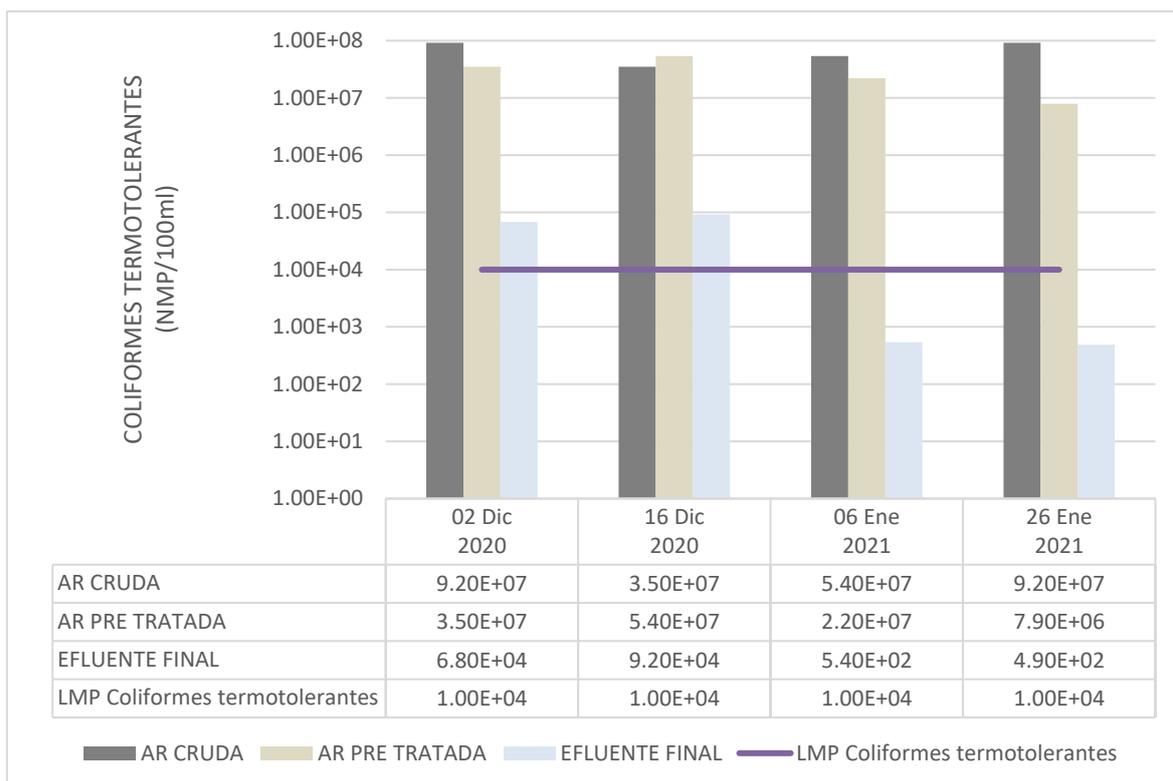


Figura 37. Coliformes termotolerantes presentes en el agua residual cruda, pretratada y efluente final durante el monitoreo. La línea horizontal representa el límite máximo permisible para dicho parámetro.

b. Huevos de helminto

En la Tabla 30 se muestran los resultados obtenidos en el conteo de larvas y huevos de helminto en número de especies encontradas por litro de agua ($N^{\circ} l^{-1}$).

En los afluentes se tienen valores entre 50 - 370 N° huevos l^{-1} y en el efluente la cantidad se reduce a cero. Teniendo una eliminación total de huevos de helminto (HH) podemos afirmar que se cumple con las recomendaciones establecidas por la Organización Mundial de la Salud (1989) para el reúso de las aguas residuales, en el cual se establece que el contenido de HH en el agua debe ser menor o igual a 1 (N° de huevos l^{-1}) tanto para riego restringido y no restringido.

Tabla 30: Resultados del conteo de larvas y huevos de helminto presentes en el agua residual cruda, pretratada y efluente final

	Fecha de muestreo	Unidad	AR cruda	AR pre tratada	Efluente final
	2/12/2020	N° l ⁻¹	370	0	0
Larvas y huevos de	16/12/2020	N° l ⁻¹	40	0	0
helminto	6/01/2021	N° l ⁻¹	120	0	0
	26/01/2021	N° l ⁻¹	50	30	0

4.5 ANALISIS DE LA CAPA DE LODO ACUMULADA

4.5.1 ALTURA DE LA CAPA DE LODOS SOBRE LA SUPERFICIE DE LA CELDA FRANCESA

Luego de nueve años de operación, la celda francesa tenía un promedio de 9,4 cm de capa de lodo sobre su superficie, es decir, la tasa de acumulación en un clima árido fue de 1,05 cm por año lo cual refuerza la teoría, propuesta por Molle (2005), de que esta capa tiene una acumulación de 1- 1,5 cm por año.

Se observó que la distribución de esta capa no es uniforme, en la Figura 38 se muestra la variación de altura respecto a la distancia del punto o tubo de alimentación de la celda francesa, en las subunidades o líneas que componen esta unidad.

Ambas líneas presentan una disminución de altura radial, es decir a medida que distan del tubo de alimentación, las capas de lodo tienen menor altura. Además, se observa que la línea 2 tiene una mayor altura de capa de lodo acumulada sobre su superficie, esto se debe a que durante el último año de operación de la PTAR (previo al muestreo) sólo se descargaba el agua residual sobre la superficie de la línea 2 por fallas en el bombeo; otro factor que influye en la diferencia de altura de capas es la alternancia de líneas (cada 3 días) que mientras una recibe la carga de agua residual, la otra descansa para mineralizar los lodos que acumuló durante su operación. La Tabla 31 muestra la altura de capa de lodos cada 50 cm a partir del tubo de distribución, hasta los 2 metros.

Tabla 31: Resultados de medición de altura de la capa de lodo acumulada sobre línea 1 y línea 2 de la celda francesa

Distancia a partir del tubo de alimentación (cm)	Altura de capa de lodos de la línea 1 (cm)	Altura de capa de lodos de la línea 2 (cm)
0	10	12
50	9	11
100	10	9
150	9,5	10,5
200	6,3	7

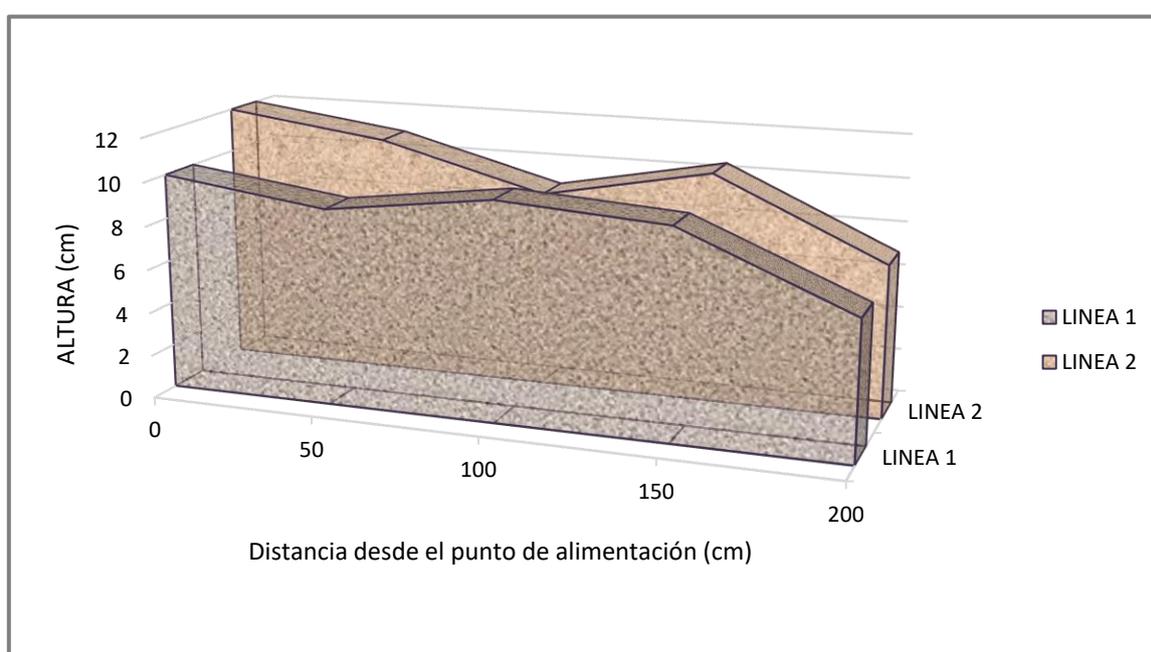


Figura 38. Altura y distribución de capa de lodos acumulada en la línea 1 y 2 de la celda francesa.

4.5.2 CARACTERIZACION DE LA CAPA DE LODO ACUMULADA

En su composición, la capa de lodo acumulada presentó sólidos mineralizados, materia vegetal seca, raíces, semillas y lombrices de tierra, lo cual concuerda con lo mencionado por Molle (2005) como composición típica de lodo en una PTAR madura.

La Figura 39 muestra fotografías del lodo acumulado sobre la superficie de la primera etapa del Sistema Francés.



Figura 39. Composición del lodo acumulado. A la izquierda, lodo sobre superficie de celda francesa y a la derecha, una muestra aleatoria del lodo acumulado antes de ser analizado.

a. Parámetros de estabilización

La Tabla 32 presenta los parámetros analizados para determinar la fracción de materia orgánica presente en los lodos. El contenido de materia orgánica de los sólidos se determinó con la relación de sólidos volátiles (SV) entre sólidos totales (ST).

La muestra 1 (M1) se tomó al inicio del monitoreo con el fin de caracterizar la capa acumulada tras nueve años de operación de la PTAR, esta corresponde a una muestra puntual aleatoria de la línea 2 (en su tercer día de reposo) e incluye todo el espesor de la capa (8 cm).

En la M1, M2 y M3 se obtuvo un contenido de materia orgánica de 11,3%, 29,8% y 30,7% respectivamente. La diferencia de la fracción orgánica presente en las muestras se debe a que, como se mencionó antes, la primera contempla todo el espesor acumulado por años mientras que las dos últimas se tomaron de la capa que se acumuló tres días antes. En todos los casos se cumple con el parámetro de estabilización dispuesto en el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales ($SV \leq 60\%ST$).

Tabla 32: Porcentaje de sólidos en la capa de lodos acumulada

	Fecha de muestreo		
	M1	M2	M3
	5/11/2020	17/12/2020	26/01/21
%ST	76,9	69,4	60,4
%SV	9,1	20,7	18,5

Nota. %ST= Porcentaje de sólidos totales y %SV= Porcentaje de sólidos volátiles. M1: muestra de capa de lodo acumulada por años, M2 y M3: muestra de lodo mineralizado por tres días

Las bajas tasas de MO contenida en las capas de lodos demuestran un buen diseño en la PTAR pues con sólo dos líneas de tratamiento se consigue una alta mineralización de la materia orgánica además de complementarse con el clima árido, un factor importante durante dicho proceso.

b. Parámetros de higienización

La Tabla 33 muestra las cantidades de coliformes totales presentes en las muestras de lodos por cada mes de monitoreo.

Se observa cantidades de hasta 9 unidades logarítmicas lo cual nos muestra la capacidad de retención de patógenos, favoreciendo las eficiencias de remoción microbiológica en el sistema.

Tabla 33: Cantidad de coliformes totales en lodo acumulado de celda francesa

Análisis microbiológico	Muestras		
	M1	M2	M3
UFC E.coli/gST	5,00E+07	1,00E+08	1,10E+09
UFC Coliformes Totales/gST	2,24E+09	5,90E+09	7,10E+09

Nota. M1: muestra de capa de lodo acumulada por años, M2 y M3: muestra de lodo mineralizado por tres días

V. CONCLUSIONES

- El sistema francés adaptado a condiciones de clima árido presenta altas eficiencias de remoción de contaminantes presentes en el agua residual, obteniéndose un 98.3%, 99.1%, 99.6%, 100% y 19.8% en los parámetros de DQO, DBO₅, turbidez, NH₄-N y P_{TOTAL} respectivamente. Estas eficiencias no tienen diferencia significativa respecto a las que Hoffmann *et al.* (2013) reportó en los primeros años de operación de la misma PTAR, que fueron 99.4%, 99.2%, 99.9%, 100% y 44.3% en los mismos parámetros respectivamente, lo que demuestra su gran capacidad de resiliencia, ya que, a pesar de diversos problemas encontrados previos al monitoreo, pudo recuperar sus eficiencias de depuración en poco tiempo.
- Aunque no fue materia de este estudio aplicar variación de cargas hidráulicas, se observó una favorable respuesta del sistema respecto a variaciones de carga orgánica consecuente al uso de los contribuyentes (aporte de DQO entre 279 mg l⁻¹ y 613 mg l⁻¹).
- Los valores de calidad del efluente final (6.3 mg l⁻¹ de DQO, 2.2 mg l⁻¹ de DBO₅ y 1±0.7 en SST y 6.4x10³ NMP/100ml en coliformes termotolerantes) se encuentran dentro de los rangos permitidos para verter dichas aguas residuales a un cuerpo receptor según los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.
- Asimismo, de acuerdo al resultado obtenido, respecto a los coliformes termotolerantes, equivalente a 6.4x 10³ como media geométrica, la OMS (1989) indica que esta es apta para su uso en riego restringido a pesar de haber obtenido un valor de 0 huevos de helminto en todas las muestras.
- La capa de lodo en clima árido se acumuló sobre la superficie de la celda francesa a una razón de 1.05 cm por año. Además, se ha podido comprobar su importancia en mejorar la eficiencia de retención de SST y reducir el valor de turbidez (94% y 90% respectivamente) así como para favorecer la nitrificación (87% adsorción de amonio).

- Los resultados obtenidos en la presente investigación, respaldan el criterio de diseño adaptado al clima de la costa peruana, con solo dos unidades de tratamiento en alternancia; a diferencia de la configuración clásica del Sistema francés propuesto por Molle (2005) que tiene tres unidades en la primera etapa del sistema.

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar periódicamente un diagnóstico de todos los componentes del sistema, sobre todo en las estaciones de bombeo, ya que de estas depende la alternancia en la primera etapa, lo cual es indispensable para un óptimo funcionamiento, de no cumplirse podría desencadenar en problemas de obstrucción de los filtros.
- Podar regularmente la vegetación de acuerdo a su especie, ya que un excesivo crecimiento afectara negativamente la mineralización de lodo, impedirá notar si existe una mala distribución o limitará el acceso en caso se requiera mantenimiento en las tuberías.
- Continuar estudiando el comportamiento y composición de la capa de lodo acumulada en la superficie de la primera celda, ya que esta información complementará las medidas de operación, mantenimiento y disposición a largo plazo.
- Sistematizar la información sobre experiencias con el Sistema Francés en Perú para proporcionar alternativas sostenibles en la depuración de aguas residuales a nivel nacional.
- Elaborar un manual de operación y mantenimiento del Sistema Francés en clima árido.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, GIZ Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN (2011). *Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*. Recuperado de <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Revision-T--cnica-de-Humedales-Artificiales.pdf>
- Alarcón, M.T., Zurita, F., Hadad, H., García Perez, A., Vidal, G., Maine, M.,... Vera-Puerto, I. (2018). *Humedales de tratamiento : alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/325722763_Humedales_de_tratamiento_alternativa_de_tratamiento_de_aguas_residuales_aplicable_en_America_Latina
- Alianza por el agua (2008). *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*. Monograficos Agua en centroamérica (3), 261p. Recuperado de <http://idiagua.eu/web/wp-content/uploads/2018/07/monografico3.pdf>
- Arias, C. y Brix, H. (2003). *Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, (13), 17-24. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/911/91101302.pdf>
- Arias, C. (2017). Diseño de humedales construidos. En R. Pastor, C. Arias y R. Miglio. *Humedales construidos para la depuración de aguas residuales*. (pp. 23-62). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Arias, O. (2004). *Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial* [Tesina]. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima y Ambiental, Barcelona. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3339>.

Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2010). Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos – Ley N° 29338. Recuperado de https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/reglamento_lrh_-_no_29338_0.pdf

Brix, Hans. (1993). Wastewater Treatment in Constructed Wetlands: System Design, Removal Processes, and Treatment Performance. En G.A. Moshiri. (Ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement* (pp. 9-22). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/230563369_Wastewater_treatment_in_constructed_wetlands_system_design_removal_processes_and_treatment_performance.

Brix, Hans. (1997). Do Macrophytes Play a Role in Constructed Treatment Wetlands?. *Water Science and Technology*, 35(5), 11-17. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00047-4)

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

Boutin, C., Lienard, A. y Esser, D. (1997). Development of a new generation of reed-bed filters in France: First results. *Water Science and Technology*, 35(5), 315 –322. <https://doi.org/10.2166/wst.1997.0226>

Boutin, C y Lienard, A. (mayo del 2003). *Constructed wetlands for wastewater treatment: the French experience*. 1st international seminar on the use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands. Lisboa, Portugal.

Boutin C. y Prost-Boucle S. (2015) Vertical flow constructed wetlands subject to load variations: an improved design methodology connected to outlet quality objectives. *Water Science and Technology*, 72(5), 817-823. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.271>

- Crites, R. y Tchobanoglous, G. (1998). *Small and decentralized wastewater management systems*. Boston, USA: Editorial McGraw-Hill.
- Carrasco, F. y Menéndez, J.A. (2010). *Nuevos materiales y tecnologías para el tratamiento del agua*. Sevilla, España: Universidad Internacional de Andalucía.
- De Anda Sánchez, José (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y Ambiente*, (14), 119-143. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=4557/455752575007>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y uso del Agua.
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O. y Von Sperling, M. (2017). Treatment wetlands. *Biological Wastewater Treatment Series*, 7, 154 p. IWA Publishing. Recuperado de <https://www.iwapublishing.com/open-access-ebooks/3567>
- García, J., y Corzo, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos*. Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2474/JGarcia_and_ACorzo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Gomez Y. (2017). *Evaluación de la Eficiencia de Humedales Artificiales Verticales Empleando Cyperus alternifolius y Chrysopogon zizanioides para el Tratamiento de Aguas Servidas* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, M y Von Muench, E. (2011). *Technology Review of Constructed Wetlands: Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*. Recuperado de <https://www.susana.org/resources/documents/default/2-930-giz2011-en-technology-review-constructed-wetlands.pdf>

- Hoffmann, H., Gamarra, J., Villafranca, B. y Platzer, C. (junio, 2013). *Combinación de tratamiento primario y secundario de aguas residuales domesticas en sistemas de filtros plantados como solución descentralizada de alta eficiencia y bajo costo operacional*. IV Congreso Nacional del Agua, Lima, Perú.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2020) *Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales*. Recuperado de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1760/1ibro.pdf
- Kadlec, H. y Knight, R. (1996). *Treatment Wetlands*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers.
- Kania, M., Gautier, M., Imig, G., Michel, P. y Gourdon, R. (2019). Comparative characterization of surface sludge deposits from fourteen French vertical flow constructed wetlands sewage treatment plants using biological, chemical and thermal indices. *Science of The Total Environment*, 647, 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.440>
- Lara Borrero, J.A. (1999). *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales* [Tesis de maestría]. Universidad Politecnica de Cataluña. Instituto Catalan de Tecnología, Barcelona.
- León, V. (2020). *Incremento de cargas y su efecto en la operación de un sistema francés para tratar aguas residuales domésticas* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú.
- Lombard Latune, R. y Molle, P. (2017). *Les filtres plantés de végétaux pour le traitement des eaux usées domestiques en milieu tropical*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/322357954_Les_filtres_plantes_de_vegetaux_pour_le_traitement_des_eaux_usees_domestiques_en_milieu_tropical_Guide_de_dimensionnement_de_la_filiere_tropicalisee

Lopez, S. y Martín, S. (2015). *UF 1666: Depuración de aguas residuales*. España: Editorial Elearning S.L.

Martín, I., Betancort, J., Salas, J., Peñate, B., Pidre, J. y Sardón, N. (2006). *Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población: Mejora de la calidad de los efluentes*. Canarias, España: Instituto Tecnológico de Canarias.

Massoud, M. A., Tarhini, A. y Nasr, J. A. (2009). Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 652–659.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.001>

Merino, M. (2017). *Mecanismos de remoción de materia orgánica y nutrientes en un sistema de tratamiento pasivo de aguas residuales municipales* [Tesis de doctorado]. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Recuperado de:
<https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/422/1/Mar%C3%ADa%20de%20la%20Luz%20Merino%20Sol%C3%ADs.pdf>

Metcalf y Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización*. Madrid, España: McGraw-Hill.

Ministerio del Ambiente (2009). *Manual para municipios ecoeficientes*. Recuperado de
https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/manual_para_municipios_ecoeficientes.pdf

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS) (2013). RM-273-2013-VIVIENDA. *Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales*. Recuperado de:
<https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/13762-273-2013-vivienda>

Ministerio de Vivienda , Construcción y Saneamiento (MVCS) (2017). Decreto Supremo N° 018-2017-VIVIENDA y *Plan Nacional de Saneamiento 2017-2021*, publicado el 23 de junio del 2017. Diario Oficial El Peruano. Recuperado de <http://direccionsaneamiento.vivienda.gob.pe/DocumentosSecciones/Libro%20Plan%20Nacional%20de%20Saneamiento.pdf>

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS) (2020) *Reporte de monitoreo de Calidad de Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales*. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1913691/Reporte%20Monitoreo%20de%20Calidad.pdf>

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS) (2021) *Diagnóstico de la Situación de brechas de infraestructura o de acceso a Servicios Públicos del Sector Vivienda, Construcción y Saneamiento*. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1552487/Diagnostico%20de%20Brechas.pdf>

Molle, P., Lienard, A., Boutin, C., Merlin, G. y Iwema, A. (2005). How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems. *Water Science & Technology*, 51(9), 11–21.

Molle, P. (2014). French vertical flow constructed wetlands: a need of a better understanding of the role of the deposit layer. *Water Science and Technology*, 69(1), 106-12.

Molle, P., Lombard Latune, R., Riegel, C., Lacombe, G., Esser, D. y Mangeot, L. (2015), French vertical-flow constructed wetland design: Adaptations for tropical climates. *Water Science and Technology*, 71(10), 1516–1523.

- Molle, P y Esser, D. (2021). Humedales verticales tipo francés. En Arias, C. y Lara-Borrero, J. (Eds.). Tecnología de humedales para tratamiento: Información práctica para el diseño y aplicación de humedales para tratamiento. (pp. 86-90). IWA (27). <https://doi.org/10.2166/9781789062342>
- Moreno, L. (Ed.) (2003). *La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno: fundamentos y casos prácticos*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Recuperado de http://www.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/indice.htm
- Morvannou, A., Choubert, J., Vanclooster, M. y Molle, P. (2014). Modeling nitrogen removal in a vertical flow constructed wetland treating directly domestic wastewater. *Ecological Engineering*, 70(1), 379-386. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.06.034. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.034>
- Noyola A., Morgan J. y Güereca, L. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. Mexico: Instituto de Ingeniería UNAM.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (2014). *Fiscalización Ambiental en aguas residuales*. Recuperado de http://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (1989). *Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura*. Serie de Informes Técnicos N° 778. Ginebra, Suiza. Recuperado de http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/39333/WHO_TRS_778_spa.pdf;jsessionid=2FA4FDB2D93C0A8F9003B25CBA526C8A?sequence=1
- Paucar, F. e Iturregui, P. (2020). *Los desafíos de la reutilización de las aguas residuales en el Perú*. South Sustainability, 1(1), 7. <https://doi.org/10.21142/SS-0101-2020-004>

- Platzer, C., Hoffmann, H. y Miglio, R. M. (setiembre de 2016). Long term experiences with dimensioning and operation of vertical flow constructed wetlands in warm climate regions of South America. *Wetland Systems for Water Pollution Control*. Ponencia llevado a cabo en la Conferencia de Especialistas de la IWA, Gdansk, Polonia.
- Ramalho, R.S. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Quebec, Canadá: Editorial Reverté.
- Red Madrileña de Tratamientos Avanzados para Aguas Residuales (REMTAVARES). (22 de diciembre de 2010). Tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales: experiencias en pequeños municipios de España [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/12/22/131541>
- Roeleveld, K. y Zeeman, G. (2006). Anaerobic treatment in decentralised and source-separation-based sanitation concepts. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 5(1), 115-139. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/225823719_Anaerobic_Treatment_in_Dece
[ntralised and Source-Separation-Based Sanitation Concepts](https://www.researchgate.net/publication/225823719_Anaerobic_Treatment_in_Dece)
- Romero, J. (2004). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogota, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ruiz, F (2020) *Uso de Humedales Construidos Subsuperficiales de Flujo horizontal sembrados con policultivos de especies nativas bajo condiciones del trópico americano para la eliminación de materia orgánica, nitrógeno y metales pesados de lixiviados de relleno sanitario*. (Maestría). Universidad del Valle, Colombia.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) (2021). CLIMAS DEL PERÚ - Mapa de Clasificación Climática Nacional. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-4.pdf>
<https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=ica&p=estaciones>

Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS) (2021) *Benchmarking Regulatorio de las Empresas Prestadoras (EP)*. (N°0698). Recuperado de <https://www.sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2021/08/INFORME-N%C2%B00698-2021-SUNASS-DF-F-1.pdf>

Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS) (2022). *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el ámbito de las Empresas Prestadoras*. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3212482/Informe%20de%20diagn%C3%B3stico%20de%20las%20PTAR.pdf>

United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2000). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial*. Recuperado de https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/cs_00_023.pdf

van Afferden, M., Cardona, J., Lee, M., Subah, A. y Müller, R. (2015). A new approach to implementing decentralized wastewater treatment concepts. *Water Science & Technology*, 72(11), 1923–1930. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.393>

Vidal, G. y Hormazábal, S. (2018) *Humedales construidos. Diseño y operación*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.

Von Sperling, M. y Chernicharo, C.A. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*. Londres, Reino Unido: IWA Publishing.

Von Sperling, M. y Sezerino, P.H (diciembre de 2018). Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil. *Boletim Wetlands Brasil*, Edição Especial. Recuperado de <https://gesad.ufsc.br/boletins/>

Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering* 25 (5), 478–490. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.010>

Vymazal, J. (2008). Constructed Wetland for Wastewater Treatment: A Review. *Proceedings of Taal 2007*. Trabajo presentado en la 12^{va} Conferencia Mundial de Lagos, Jaipur, India. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/228407635 Constructed Wetlands for Wastewater Treatment A Review](https://www.researchgate.net/publication/228407635_Constructed_Wetlands_for_Wastewater_Treatment_A_Review)

Vymazal, J. (2011). Constructed Wetland for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 61-69. <https://doi.org/10.1021/es101403q>

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Panel Fotográfico

1. Diagnóstico y acondicionamiento del sistema



Foto 1. Vista de la parte trasera de la segunda etapa del SF. Altura de vegetación promedio 2 m, con gran cantidad de materia seca en la parte baja de la vegetación.



Foto 2. Vista lateral del Sistema Francés. A la izquierda, segunda etapa y a la derecha, primera etapa. Inaccesibilidad a las tuberías de alimentación.



Foto 3. Limpieza y revisión de bombas de la EB1.



Foto 4. Capacitor de bomba quemado.



Foto 5. Poda de la celda francesa, retiro de vegetación seca.



Foto 6. Replantación en la primera etapa del SF.



Foto 7. Poda de la segunda etapa del Sistema Francés.



Foto 8. Crecimiento de vegetación tras la poda en la segunda etapa del SF.



Foto 9. Lodo acumulado alrededor de la tubería de alimentación. Platos de distribución cubiertos de lodo.



Foto 10. Apertura de surcos sobre la superficie de la celda francesa para mejorar la distribución del afluente. Instalación provisional de codos de pvc para facilitar la medición del caudal de ingreso.

2. Puesta en marcha del sistema y actividades de campo



Foto 11. Funcionamiento de la línea 1 en la primera etapa del SF. Flujo ascendente en la distribución del agua residual cruda.



Foto 12. Distribución del agua residual pretratada en la segunda etapa del sistema.



Foto 13. Vista del Sistema Francés completo, crecimiento de vegetación. Abajo: primera etapa y arriba: segunda etapa del sistema.



Foto 14. Medición de la altura de capa de lodos.

REGISTRO DE BOMBEO PTAR CHINCHA

	FECHA	N° BOMBA	HORA ENCENDIDO	HORA APAGADO	TIEMPO DE BOMBEO	INTERVALO DE BOMBEO
M	1	2	1-28	1-41	8	2
	2	4	4-22	4-36	9	2
M	2	2	8-30	8-45	15	2
J	3	2	4-10	4-30	20	2
V	4	1	9-45	10-07	22	1
S	5	1	8-11	8-23	22	1
L	7	1	7-06	7-28	22	1
	1	4	4-30	4-52	22	1
M	9	2	11-10	11-32	22	2
10	2	9-10	9-32	22	2	
J	11	1	10-20	10-42	22	1
V	12	1	9-14	9-36	22	1
S	-	2	3-26	3-48	22	2
L	14	1	11-13	11-35	22	1
15	1	3-10	3-32	22	1	
M	16	1	10-23	10-45	22	2
J	17	2	9-32	9-54	22	2
V	18	2	10-30	10-52	22	2
S	19	1	10-58	11-20	22	2
L	21	2	11-05	11-27	22	1
22	2	3-10	3-32	22	1	
M	23	2	2-25	2-47	22	
J	24	2	7-07	7-29	22	
S	26	1	12-30	12-52	22	
L	28	2	10-12	10-34	22	
M	29	2	8-15	8-37	22	
M	30	2	11-22	11-44	22	
J	31	1	9-15	9-37	22	
S	2	1	2-25	2-47	22	
L	4	2	7-05	7-27	22	

Foto 15. Registro de bombeo.



Foto 16. Toma de muestra en celda francesa.



Foto 17. Medición de pH in situ

3. Análisis de laboratorio



Foto 18. Muestras de agua residual. De izquierda a derecha: agua residual cruda, agua residual pretratada y efluente final.



Foto 19. Uso de BODTrak para la determinación de la DBO₅ en cada punto de monitoreo.

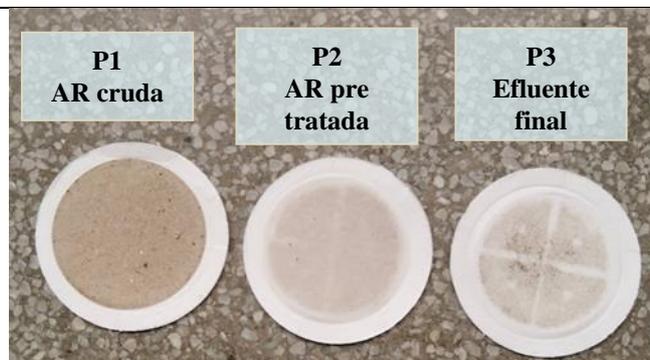


Foto 20. Vista de filtros después del ensayo de sólidos.

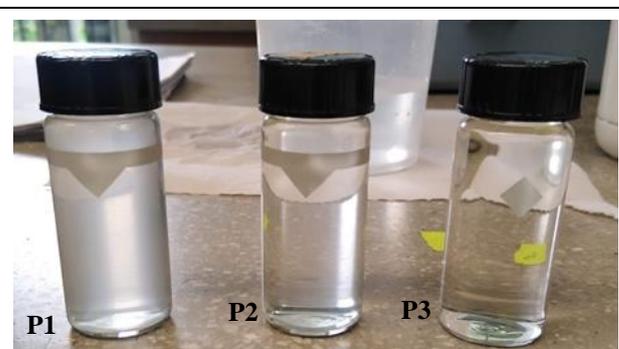


Foto 21. Turbidez en cada punto de monitoreo

4. Análisis de lodos



Foto 23. Muestra de lodo



Foto 24. Análisis de sólidos en lodos.

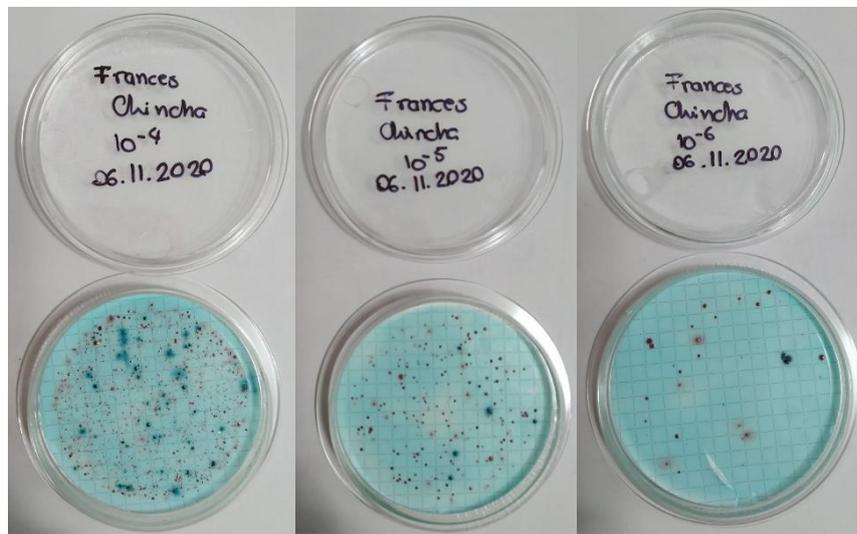


Foto 25. Coliformes totales y E.coli en muestra de lodo acumulado por años, en tres diluciones distintas.

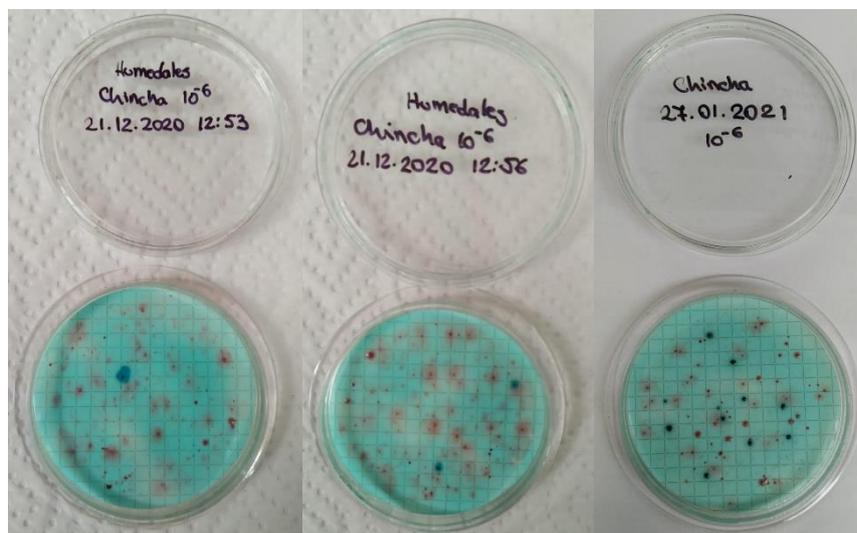


Foto 26. Resultado de coliformes en lodos que secaron por tres días.

Anexo 2: Informes de laboratorios externos

<p align="center">UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA LABORATORIO DE ECOLOGÍA MICROBIANA Y BIOTECNOLOGÍA</p> <p align="center">INFORME DE ENSAYO N° 2012350 - LMT</p> <p>SOLICITANTE : PROYECTO "HUMEDART" DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO MUESTRA : DESAGUE CRUDO 2012350) CH-1</p> <p>PROCEDENCIA : Entrada al primer filtro de PTAR TIPO DE ENVASE : Botella de plástico CANTIDAD DE MUESTRA : 01 muestra x 01 und. x 3.500 ml aprox. ESTADO Y CONDICIÓN : En buen estado y cerrado FECHA DE MUESTREO : 2020 - 12 - 02 FECHA DE RECEPCIÓN : 2020 - 12 - 03 FECHA DE INICIO DE ENSAYO : 2020 - 12 - 09 FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 2020 - 12 - 09</p> <p align="center">RESULTADOS DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Análisis Microbiológico</th> <th>Muestra 2012350</th> <th>Agua de Consumo (DIGESA)¹</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>¹Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)</td> <td>92 x 10⁶</td> <td>< 2.2</td> </tr> <tr> <td>²Conteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)</td> <td>370</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> <p><small>(¹Especificaciones dadas por DIGESA para agua de consumo, en la NTS N° 071-MINSA/DIGESA-V.01, Norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano. XVI.4 Agua y hielo para consumo humano. Nota: Los valores <1.8 y <2.2 indican ausencia de microorganismos en ensayo.</small></p> <p>Método: ¹SMEWW 21st Ed. 2005, Part 9221. APHA-AWWA-WEF. ²SMEWW 21st Ed. 2005, Part 10750. APHA-AWWA-WEF.</p> <p>Observaciones: Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio, en muestra proporcionada por el solicitante. Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita. Validez del documento: Este documento es válido solo para la muestra descrita.</p> <p align="right">La Molina, 18 de febrero de 2021</p> <p align="center"> DRA. DORIS ZÚÑIGA DÁVILA Jefe del Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso" Universidad Nacional Agraria La Molina</p>	Análisis Microbiológico	Muestra 2012350	Agua de Consumo (DIGESA) ¹	¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	92 x 10 ⁶	< 2.2	² Conteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)	370	0	<p align="center">UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA LABORATORIO DE ECOLOGÍA MICROBIANA Y BIOTECNOLOGÍA</p> <p align="center">INFORME DE ENSAYO N° 2012351 - LMT</p> <p>SOLICITANTE : PROYECTO "HUMEDART" DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO MUESTRA : EFLUENTE PRETRATADO 2012351) CH-2</p> <p>PROCEDENCIA : Salida del primer filtro TIPO DE ENVASE : Botella de plástico CANTIDAD DE MUESTRA : 01 muestra x 01 und. x 3.500 ml aprox. ESTADO Y CONDICIÓN : En buen estado y cerrado FECHA DE MUESTREO : 2020 - 12 - 02 FECHA DE RECEPCIÓN : 2020 - 12 - 03 FECHA DE INICIO DE ENSAYO : 2020 - 12 - 09 FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 2020 - 12 - 09</p> <p align="center">RESULTADOS DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Análisis Microbiológico</th> <th>Muestra 2012351</th> <th>Agua de Consumo (DIGESA)¹</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>¹Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)</td> <td>35 x 10⁶</td> <td>< 2.2</td> </tr> <tr> <td>²Conteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> <p><small>(¹Especificaciones dadas por DIGESA para agua de consumo, en la NTS N° 071-MINSA/DIGESA-V.01, Norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano. XVI.4 Agua y hielo para consumo humano. Nota: Los valores <1.8 y <2.2 indican ausencia de microorganismos en ensayo.</small></p> <p>Método: ¹SMEWW 21st Ed. 2005, Part 9221. APHA-AWWA-WEF. ²SMEWW 21st Ed. 2005, Part 10750. APHA-AWWA-WEF.</p> <p>Observaciones: Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio, en muestra proporcionada por el solicitante. Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita. Validez del documento: Este documento es válido solo para la muestra descrita.</p> <p align="right">La Molina, 18 de febrero de 2021</p> <p align="center"> DRA. DORIS ZÚÑIGA DÁVILA Jefe del Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso" Universidad Nacional Agraria La Molina</p>	Análisis Microbiológico	Muestra 2012351	Agua de Consumo (DIGESA) ¹	¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	35 x 10 ⁶	< 2.2	² Conteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)	0	0
Análisis Microbiológico	Muestra 2012350	Agua de Consumo (DIGESA) ¹																	
¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	92 x 10 ⁶	< 2.2																	
² Conteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)	370	0																	
Análisis Microbiológico	Muestra 2012351	Agua de Consumo (DIGESA) ¹																	
¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	35 x 10 ⁶	< 2.2																	
² Conteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)	0	0																	
<p align="center">UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA LABORATORIO DE ECOLOGÍA MICROBIANA Y BIOTECNOLOGÍA</p> <p align="center">INFORME DE ENSAYO N° 2012352 - LMT</p> <p>SOLICITANTE : PROYECTO "HUMEDART" DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO MUESTRA : EFLUENTE FINAL TRATADO 2012352) CH-3</p> <p>PROCEDENCIA : Salida del segundo filtro TIPO DE ENVASE : Botella de plástico CANTIDAD DE MUESTRA : 01 muestra x 01 und. x 3.500 ml aprox. ESTADO Y CONDICIÓN : En buen estado y cerrado FECHA DE MUESTREO : 2020 - 12 - 02 FECHA DE RECEPCIÓN : 2020 - 12 - 03 FECHA DE INICIO DE ENSAYO : 2020 - 12 - 09 FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 2020 - 12 - 09</p> <p align="center">RESULTADOS DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Análisis Microbiológico</th> <th>Muestra 2012352</th> <th>Agua de Consumo (DIGESA)¹</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>¹Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)</td> <td>68 x 10³</td> <td>< 2.2</td> </tr> <tr> <td>²Conteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> <p><small>(¹Especificaciones dadas por DIGESA para agua de consumo, en la NTS N° 071-MINSA/DIGESA-V.01, Norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano. XVI.4 Agua y hielo para consumo humano. Nota: Los valores <1.8 y <2.2 indican ausencia de microorganismos en ensayo.</small></p> <p>Método: ¹SMEWW 21st Ed. 2005, Part 9221. APHA-AWWA-WEF. ²SMEWW 21st Ed. 2005, Part 10750. APHA-AWWA-WEF.</p> <p>Observaciones: Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio, en muestra proporcionada por el solicitante. Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita. Validez del documento: Este documento es válido solo para la muestra descrita.</p> <p align="right">La Molina, 18 de febrero de 2021</p> <p align="center"> DRA. DORIS ZÚÑIGA DÁVILA Jefe del Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso" Universidad Nacional Agraria La Molina</p>	Análisis Microbiológico	Muestra 2012352	Agua de Consumo (DIGESA) ¹	¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	68 x 10 ³	< 2.2	² Conteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)	0	0	<p align="center">UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA LABORATORIO DE ECOLOGÍA MICROBIANA Y BIOTECNOLOGÍA</p> <p align="center">INFORME DE ENSAYO N° 2012370 - LMT</p> <p>SOLICITANTE : PROYECTO "HUMEDART" DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO MUESTRA : DESAGUE CRUDO 2012370) CH-1</p> <p>PROCEDENCIA : Entrada al primer filtro de PTAR TIPO DE ENVASE : Botella de plástico CANTIDAD DE MUESTRA : 01 muestra x 01 und. x 3.500 ml aprox. ESTADO Y CONDICIÓN : En buen estado y cerrado FECHA DE MUESTREO : 2020 - 12 - 16 FECHA DE RECEPCIÓN : 2020 - 12 - 17 FECHA DE INICIO DE ENSAYO : 2020 - 12 - 17 FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 2020 - 12 - 21</p> <p align="center">RESULTADOS DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Análisis Microbiológico</th> <th>Muestra 2012370</th> <th>Agua de Consumo (DIGESA)¹</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>¹Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)</td> <td>35 x 10⁶</td> <td>< 2.2</td> </tr> <tr> <td>²Conteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)</td> <td>40</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> <p><small>(¹Especificaciones dadas por DIGESA para agua de consumo, en la NTS N° 071-MINSA/DIGESA-V.01, Norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano. XVI.4 Agua y hielo para consumo humano. Nota: Los valores <1.8 y <2.2 indican ausencia de microorganismos en ensayo.</small></p> <p>Método: ¹SMEWW 21st Ed. 2005, Part 9221. APHA-AWWA-WEF. ²SMEWW 21st Ed. 2005, Part 10750. APHA-AWWA-WEF.</p> <p>Observaciones: Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio, en muestra proporcionada por el solicitante. Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita. Validez del documento: Este documento es válido solo para la muestra descrita.</p> <p align="right">La Molina, 18 de febrero de 2021</p> <p align="center"> DRA. DORIS ZÚÑIGA DÁVILA Jefe del Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso" Universidad Nacional Agraria La Molina</p>	Análisis Microbiológico	Muestra 2012370	Agua de Consumo (DIGESA) ¹	¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	35 x 10 ⁶	< 2.2	² Conteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)	40	0
Análisis Microbiológico	Muestra 2012352	Agua de Consumo (DIGESA) ¹																	
¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	68 x 10 ³	< 2.2																	
² Conteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)	0	0																	
Análisis Microbiológico	Muestra 2012370	Agua de Consumo (DIGESA) ¹																	
¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	35 x 10 ⁶	< 2.2																	
² Conteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)	40	0																	



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ECOLOGIA MICROBIANA Y BIOTECNOLOGIA



INFORME DE ENSAYO N° 2012371 - LMT

SOLICITANTE : PROYECTO "HUMEDART"
DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO
MUESTRA : EFLUENTE PRETRATADO
2012371) CH-2

PROCEDENCIA : Salida del primer filtro
TIPO DE ENVASE : Botella de plástico
CANTIDAD DE MUESTRA : 01 muestra x 01 und. x 3.500 ml aprox.
ESTADO Y CONDICIÓN : En buen estado y cerrado
FECHA DE MUESTREO : 2020 - 12 - 16
FECHA DE RECEPCIÓN : 2020 - 12 - 17
FECHA DE INICIO DE ENSAYO : 2020 - 12 - 17
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 2020 - 12 - 21

RESULTADOS DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Análisis Microbiológico	Muestra 2012371	Agua de Consumo (DIGESA)*
¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	54 x 10 ⁶	< 2.2
² Conteo de larvas y huevos de Helminintos (N°L)	0	0

(*Especificaciones dadas por DIGESA para agua de consumo, en la NTS N° 071-MINSA/DIGESA-V.01, Norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano. XVI.4 Agua y hielo para consumo humano.

Nota: Los valores <1.8 y <2.2 indican ausencia de microorganismos en ensayo.

Método:

¹SMEWW 21st Ed. 2005, Part 9221. APHA-AWWA-WEF.
²SMEWW 21st Ed. 2005, Part 10750. APHA-AWWA-WEF.

Observaciones:

Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio, en muestra proporcionada por el solicitante.

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita.
Validez del documento: Este documento es válido solo para la muestra descrita.



La Molina, 18 de febrero de 2021

DRA. DORIS ZÚNIGA DÁVILA

Jefa del Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso"
Universidad Nacional Agraria La Molina



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ECOLOGIA MICROBIANA Y BIOTECNOLOGIA



INFORME DE ENSAYO N° 2012372 - LMT

SOLICITANTE : PROYECTO "HUMEDART"
DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO
MUESTRA : EFLUENTE FINAL TRATADO
2012372) CH-3

PROCEDENCIA : Salida del segundo filtro
TIPO DE ENVASE : Botella de plástico
CANTIDAD DE MUESTRA : 01 muestra x 01 und. x 3.500 ml aprox.
ESTADO Y CONDICIÓN : En buen estado y cerrado
FECHA DE MUESTREO : 2020 - 12 - 16
FECHA DE RECEPCIÓN : 2020 - 12 - 17
FECHA DE INICIO DE ENSAYO : 2020 - 12 - 17
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 2020 - 12 - 21

RESULTADOS DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Análisis Microbiológico	Muestra 2012372	Agua de Consumo (DIGESA)*
¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	92 x 10 ³	< 2.2
² Conteo de larvas y huevos de Helminintos (N°L)	0	0

(*Especificaciones dadas por DIGESA para agua de consumo, en la NTS N° 071-MINSA/DIGESA-V.01, Norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano. XVI.4 Agua y hielo para consumo humano.

Nota: Los valores <1.8 y <2.2 indican ausencia de microorganismos en ensayo.

Método:

¹SMEWW 21st Ed. 2005, Part 9221. APHA-AWWA-WEF.
²SMEWW 21st Ed. 2005, Part 10750. APHA-AWWA-WEF.

Observaciones:

Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio, en muestra proporcionada por el solicitante.

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita.
Validez del documento: Este documento es válido solo para la muestra descrita.



La Molina, 18 de febrero de 2021

DRA. DORIS ZÚNIGA DÁVILA

Jefa del Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso"
Universidad Nacional Agraria La Molina



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ECOLOGIA MICROBIANA Y BIOTECNOLOGIA



INFORME DE ENSAYO N° 2012374 - LMT

SOLICITANTE : PROYECTO "HUMEDART"
DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO
MUESTRA : DESAGUE CRUDO
2012374) CH-1

PROCEDENCIA : Entrada al primer filtro de PTAR
TIPO DE ENVASE : Botella de plástico
CANTIDAD DE MUESTRA : 01 muestra x 01 und. x 3.500 ml aprox.
ESTADO Y CONDICIÓN : En buen estado y cerrado
FECHA DE MUESTREO : 2021 - 01 - 06
FECHA DE RECEPCIÓN : 2021 - 01 - 06
FECHA DE INICIO DE ENSAYO : 2021 - 01 - 06
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 2021 - 01 - 12

RESULTADOS DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Análisis Microbiológico	Muestra 2012374	Agua de Consumo (DIGESA)*
¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	54 x 10 ⁶	< 2.2
² Conteo de larvas y huevos de Helminintos (N°L)	120	0

(*Especificaciones dadas por DIGESA para agua de consumo, en la NTS N° 071-MINSA/DIGESA-V.01, Norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano. XVI.4 Agua y hielo para consumo humano.

Nota: Los valores <1.8 y <2.2 indican ausencia de microorganismos en ensayo.

Método:

¹SMEWW 21st Ed. 2005, Part 9221. APHA-AWWA-WEF.
²SMEWW 21st Ed. 2005, Part 10750. APHA-AWWA-WEF.

Observaciones:

Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio, en muestra proporcionada por el solicitante.

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita.
Validez del documento: Este documento es válido solo para la muestra descrita.



La Molina, 01 de febrero de 2021

DRA. DORIS ZÚNIGA DÁVILA

Jefa del Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso"
Universidad Nacional Agraria La Molina



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ECOLOGIA MICROBIANA Y BIOTECNOLOGIA



INFORME DE ENSAYO N° 2012375 - LMT

SOLICITANTE : PROYECTO "HUMEDART"
DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO
MUESTRA : EFLUENTE PRETRATADO
2012375) CH-2

PROCEDENCIA : Salida del primer filtro
TIPO DE ENVASE : Botella de plástico
CANTIDAD DE MUESTRA : 01 muestra x 01 und. x 3.500 ml aprox.
ESTADO Y CONDICIÓN : En buen estado y cerrado
FECHA DE MUESTREO : 2021 - 01 - 06
FECHA DE RECEPCIÓN : 2021 - 01 - 06
FECHA DE INICIO DE ENSAYO : 2021 - 01 - 06
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 2021 - 01 - 12

RESULTADOS DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Análisis Microbiológico	Muestra 2012375	Agua de Consumo (DIGESA)*
¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	22 x 10 ⁶	< 2.2
² Conteo de larvas y huevos de Helminintos (N°L)	0	0

(*Especificaciones dadas por DIGESA para agua de consumo, en la NTS N° 071-MINSA/DIGESA-V.01, Norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano. XVI.4 Agua y hielo para consumo humano.

Nota: Los valores <1.8 y <2.2 indican ausencia de microorganismos en ensayo.

Método:

¹SMEWW 21st Ed. 2005, Part 9221. APHA-AWWA-WEF.
²SMEWW 21st Ed. 2005, Part 10750. APHA-AWWA-WEF.

Observaciones:

Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio, en muestra proporcionada por el solicitante.

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita.
Validez del documento: Este documento es válido solo para la muestra descrita.



La Molina, 01 de febrero de 2021

DRA. DORIS ZÚNIGA DÁVILA

Jefa del Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso"
Universidad Nacional Agraria La Molina



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ECOLOGIA MICROBIANA Y BIOTECNOLOGIA



INFORME DE ENSAYO N° 2012376 - LMT

SOLICITANTE : PROYECTO "HUMEDART"
DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO
MUESTRA : EFLUENTE FINAL TRATADO
2012376) CH-3

PROCEDENCIA : Salida del segundo filtro
TIPO DE ENVASE : Botella de plástico
CANTIDAD DE MUESTRA : 01 muestra x 01 und. x 3.500 ml aprox.
ESTADO Y CONDICIÓN : En buen estado y cerrado
FECHA DE MUESTREO : 2021 - 01 - 06
FECHA DE RECEPCIÓN : 2021 - 01 - 06
FECHA DE INICIO DE ENSAYO : 2021 - 01 - 06
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 2021 - 01 - 12

RESULTADOS DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Análisis Microbiológico	Muestra 2012376	Agua de Consumo (DIGESA) ¹
¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	54 x 10 ⁶	< 2.2
² Corteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)	0	0

(¹Especificaciones dadas por DIGESA para agua de consumo, en la NTS N° 071-MINSA/DIGESA-V.01, Norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano. XVII.4 Agua y hielo para consumo humano.

Nota: Los valores <1.8 y <2.2 indican ausencia de microorganismos en ensayo.

Método:

¹SMEWW 21st Ed. 2005, Part 9221, APHA-AWWA-WEF.
²SMEWW 21st Ed. 2005, Part 10750, APHA-AWWA-WEF.

Observaciones:

Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio, en muestra proporcionada por el solicitante.

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita.

Validez del documento: Este documento es válido solo para la muestra descrita.



La Molina, 01 de febrero de 2021

DRA. DORIS ZUÑIGA DÁVILA

Jefe del Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Merino Tabusso"
Universidad Nacional Agraria La Molina



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ECOLOGIA MICROBIANA Y BIOTECNOLOGIA



INFORME DE ENSAYO N° 2101014 - LMT

SOLICITANTE : PROYECTO "HUMEDART"
DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO
MUESTRA : DESAGUE CRUDO
2101014) CH-1

PROCEDENCIA : Entrada al primer filtro de PTAR
TIPO DE ENVASE : Botella de plástico
CANTIDAD DE MUESTRA : 01 muestra x 01 und. x 3.500 ml aprox.
ESTADO Y CONDICIÓN : En buen estado y cerrado
FECHA DE MUESTREO : 2021 - 01 - 25
FECHA DE RECEPCIÓN : 2021 - 01 - 26
FECHA DE INICIO DE ENSAYO : 2021 - 01 - 26
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 2021 - 01 - 29

RESULTADOS DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Análisis Microbiológico	Muestra 2101014	Agua de Consumo (DIGESA) ¹
¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	92 x 10 ⁶	< 2.2
² Corteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)	50	0

(¹Especificaciones dadas por DIGESA para agua de consumo, en la NTS N° 071-MINSA/DIGESA-V.01, Norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano. XVII.4 Agua y hielo para consumo humano.

Nota: Los valores <1.8 y <2.2 indican ausencia de microorganismos en ensayo.

Método:

¹SMEWW 21st Ed. 2005, Part 9221, APHA-AWWA-WEF.
²SMEWW 21st Ed. 2005, Part 10750, APHA-AWWA-WEF.

Observaciones:

Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio, en muestra proporcionada por el solicitante.

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita.

Validez del documento: Este documento es válido solo para la muestra descrita.



La Molina, 18 de febrero de 2021

DRA. DORIS ZUÑIGA DÁVILA

Jefe del Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Merino Tabusso"
Universidad Nacional Agraria La Molina



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ECOLOGIA MICROBIANA Y BIOTECNOLOGIA



INFORME DE ENSAYO N° 2101015 - LMT

SOLICITANTE : PROYECTO "HUMEDART"
DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO
MUESTRA : EFLUENTE PRETRATADO
2101015) CH-2

PROCEDENCIA : Salida del primer filtro
TIPO DE ENVASE : Botella de plástico
CANTIDAD DE MUESTRA : 01 muestra x 01 und. x 3.500 ml aprox.
ESTADO Y CONDICIÓN : En buen estado y cerrado
FECHA DE MUESTREO : 2021 - 01 - 25
FECHA DE RECEPCIÓN : 2021 - 01 - 26
FECHA DE INICIO DE ENSAYO : 2021 - 01 - 26
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 2021 - 01 - 29

RESULTADOS DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Análisis Microbiológico	Muestra 2101015	Agua de Consumo (DIGESA) ¹
¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	79 x 10 ⁶	< 2.2
² Corteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)	30	0

(¹Especificaciones dadas por DIGESA para agua de consumo, en la NTS N° 071-MINSA/DIGESA-V.01, Norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano. XVII.4 Agua y hielo para consumo humano.

Nota: Los valores <1.8 y <2.2 indican ausencia de microorganismos en ensayo.

Método:

¹SMEWW 21st Ed. 2005, Part 9221, APHA-AWWA-WEF.
²SMEWW 21st Ed. 2005, Part 10750, APHA-AWWA-WEF.

Observaciones:

Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio, en muestra proporcionada por el solicitante.

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita.

Validez del documento: Este documento es válido solo para la muestra descrita.



La Molina, 18 de febrero de 2021

DRA. DORIS ZUÑIGA DÁVILA

Jefe del Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Merino Tabusso"
Universidad Nacional Agraria La Molina



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ECOLOGIA MICROBIANA Y BIOTECNOLOGIA



INFORME DE ENSAYO N° 2101016 - LMT

SOLICITANTE : PROYECTO "HUMEDART"
DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO
MUESTRA : EFLUENTE FINAL TRATADO
2101016) CH-3

PROCEDENCIA : Salida del primer filtro
TIPO DE ENVASE : Botella de plástico
CANTIDAD DE MUESTRA : 01 muestra x 01 und. x 3.500 ml aprox.
ESTADO Y CONDICIÓN : En buen estado y cerrado
FECHA DE MUESTREO : 2021 - 01 - 25
FECHA DE RECEPCIÓN : 2021 - 01 - 26
FECHA DE INICIO DE ENSAYO : 2021 - 01 - 26
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 2021 - 01 - 29

RESULTADOS DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Análisis Microbiológico	Muestra 2101016	Agua de Consumo (DIGESA) ¹
¹ Enumeración de coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	49 x 10 ⁶	< 2.2
² Corteo de larvas y huevos de Helminthos (N°/L)	0	0

(¹Especificaciones dadas por DIGESA para agua de consumo, en la NTS N° 071-MINSA/DIGESA-V.01, Norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano. XVII.4 Agua y hielo para consumo humano.

Nota: Los valores <1.8 y <2.2 indican ausencia de microorganismos en ensayo.

Método:

¹SMEWW 21st Ed. 2005, Part 9221, APHA-AWWA-WEF.
²SMEWW 21st Ed. 2005, Part 10750, APHA-AWWA-WEF.

Observaciones:

Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio, en muestra proporcionada por el solicitante.

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita.

Validez del documento: Este documento es válido solo para la muestra descrita.

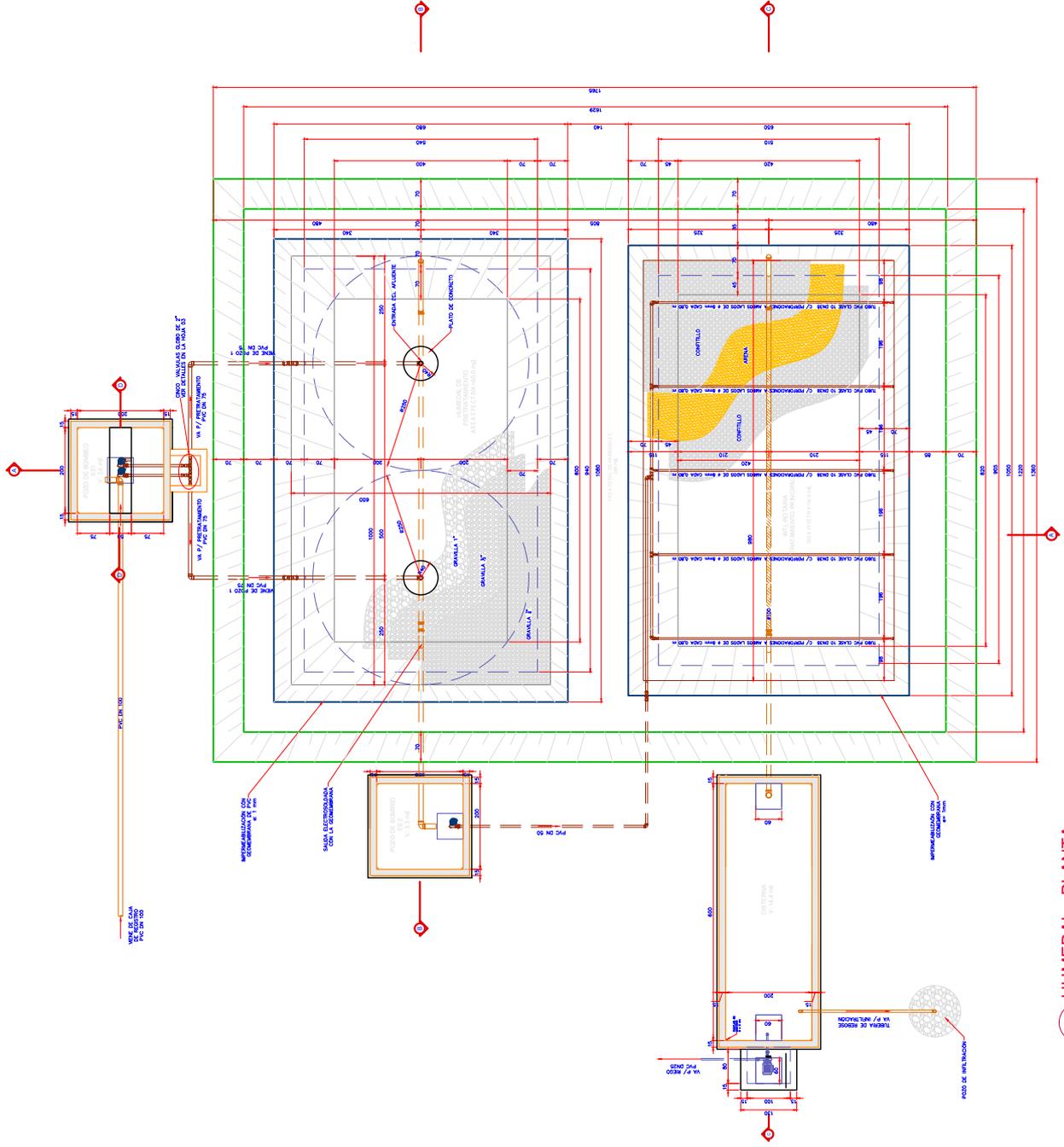


La Molina, 18 de febrero de 2021

DRA. DORIS ZUÑIGA DÁVILA

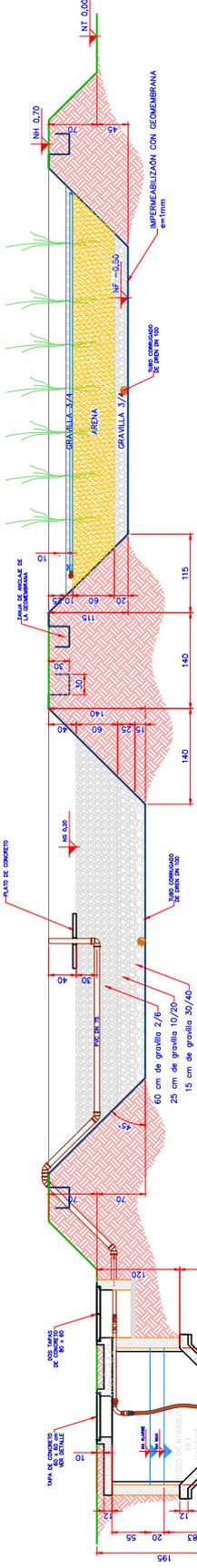
Jefe del Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Merino Tabusso"
Universidad Nacional Agraria La Molina

Anexo 3: Planos definitivos del Sistema Francés ubicado en Chincha

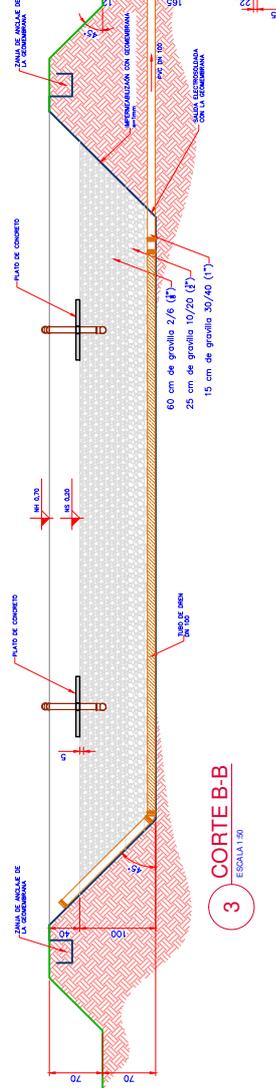


1 HUMEDAL - PLANTA
ESCALA 1/75

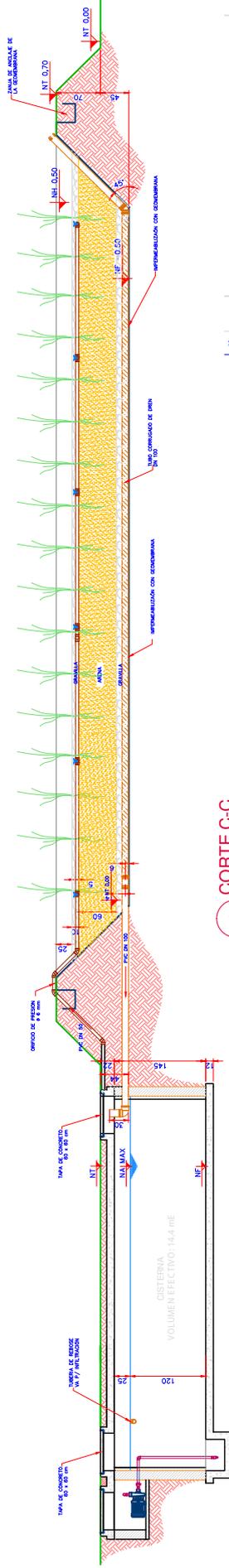
05					
04					
03					
02					
01	SET 2011	AMPAZACIÓHAL SISTEMA DE AGUAS SERVIDAS	TÍTULO DE PROYECTO	PROYECTANTE	BVM
00	FECHA	REVISIÓN	REVISOR	REVISOR	REVISOR
 ROTARIA DEL PERU					
DR. ING. CRISTÓBAL PUCOZE SR. E22					
HOGAR DE ANCIANO SANTA ANA Y SAN JOAQUIN					
RM 196 PANAMERICANA SUR, GROCIO PRADO-CHINCHA					
TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS					
SISTEMA DE TRATAMIENTO POR MEDIO DE HUMEDALES					
PRETRATAMIENTO Y TRATAMIENTO PRINCIPAL					
VISTA DE PLANTA					
FECHA	NOV 2011	NOVA			
01/03					



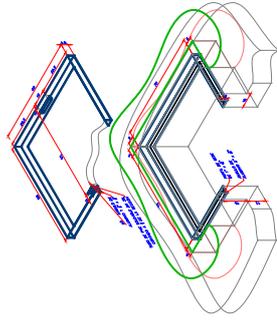
2 CORTE A-A
ESCALA 1:50



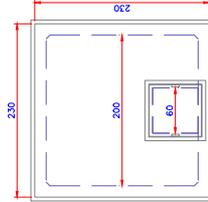
3 CORTE B-B
ESCALA 1:50



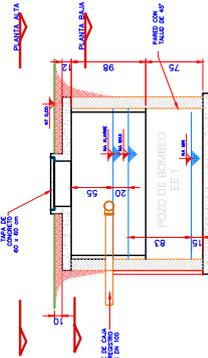
4 CORTE C-C
ESCALA 1:50



7 DETALLES TAPA DE CONCRETO
ESCALA 1:20



6 VISTA ALTA
ESCALA 1:75



5 CORTE D-D
ESCALA 1:50

05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
FEEDBACK		ROTARIA DEL PERU		INSTRUMENTO		PROYECTO		HOGAR DE ANCIANO SANTA ANA Y SAN JOAQUIN		AUTOR		DR. INGI. CHRISTOPHER TRAYNER		FECHA		MAR 2019		VISTA DE CORTE		02/03		TITULO		SISTEMA DE TRATAMIENTO POR MEDIO DE HUMEDALES PRETRATAMIENTO Y TRATAMIENTO PRINCIPAL		LUGAR		KM 196 PANAMERICANA SUR, CIRCOLO PRADO CHINCHA		PROYECTO		TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS		FECHA		MAR 2019		VISTA DE CORTE		02/03		AUTOR		DR. INGI. CHRISTOPHER TRAYNER		FECHA		MAR 2019		VISTA DE CORTE		02/03																																											