



## **UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**Facultad de Ingeniería  
Carrera de Ingeniería Civil**

**Estudio y propuesta de desinfección natural del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Churuguzo, Cantón Cuenca, Ecuador**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil**

**Autores:**

Paiwa Paccha Acero Mainato

C.I.: 0302917521

paiwis@hotmail.com

Sebastián Ismael Morocho Arenillas

C.I.: 0302503214

ismaelmorecho96@hotmail.com

**Director:**

Ing. Andrés Omar Alvarado Martínez Ph. D.

C.I.: 0102246477

**Cuenca, Ecuador**

**04 de marzo de 2021**



## Resumen

El tratamiento de aguas residuales es un tema de vital relevancia en el mundo, debido a las implicaciones directas en la salud pública y el desarrollo. En Ecuador la descarga de aguas residuales domésticas a los cuerpos de agua sin ningún tratamiento es aún una práctica mayoritaria a lo largo de su territorio a pesar de la incorporación de varios sistemas de tratamiento en sus principales ciudades en los últimos años. La Empresa Pública Municipal a cargo del saneamiento ambiental en Cuenca (ETAPA EP) ha sido pionera en la implementación de sistemas convencionales y descentralizados de tratamiento de aguas residuales en el país. Sin embargo, muchas de las instalaciones localizadas en el área rural del cantón operan con eficiencias muy bajas con respecto a la remoción de materia orgánica y desinfección. Estos sistemas que, en su mayoría compuestos de reactores anaerobios, necesitan mejorar su capacidad de desinfección debido a que los efluentes se descarga principalmente en ríos y arroyos que sirven para actividades agrícolas y ganaderas. En el presente trabajo de titulación se planteó una solución tecnológica natural de desinfección y pulimento del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Churuguzo, ubicada en la parroquia Victoria del Portete, perteneciente al Cantón Cuenca, mismo que servirá como proyecto piloto experimental de escala real. Se realizó una evaluación del estado estructural y del funcionamiento de la planta por medio de visitas de campo y ensayos de laboratorio, seguido de un estudio de selección de tecnología que involucra una matriz de decisión fundamentada en la revisión literaria. Se realizó el rediseño de las estructuras preliminares y se reutilizó la estructura de tratamiento primario con la readecuación del sistema de tuberías. En el tratamiento secundario se modificó la dirección de flujo y distribución de las tuberías en los humedales construidos y para el tratamiento terciario se incluyó la tecnología seleccionada (Vermifiltro) que se diseñó con materiales y suministros disponibles en la región. La propuesta de diseño incluye planos preliminares, memoria técnica, un manual de operación y mantenimiento y el presupuesto referencial.

**Palabras clave:** Churuguzo. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Saneamiento. Vermifiltro. Rediseño. Planta piloto.



## Abstract

Wastewater treatment is an issue of vital relevance in the world, due to the direct implications for public health and development. In Ecuador, the discharge of domestic wastewater into bodies of water without any treatment remains a major practice throughout the country, despite the incorporation of several treatment systems in its main cities in recent years. ETAPA, the municipal public institution in charge of environmental sanitation in Cuenca, has been a pioneer in the implementation of conventional and decentralized wastewater treatment systems in Ecuador. However, many facilities located in Cuenca's rural areas operate with very low efficiency in disinfection and removal of organic matter. These rural systems, mostly made up of anaerobic processes, need to improve disinfection levels as effluents are discharged mainly into rivers and streams used for agricultural and livestock activities. This thesis presents a natural technological solution for disinfection and refinement of the effluent of the Churuguzo Wastewater Treatment Plant located in the parish of Victoria del Portete. Our design proposal will serve as an experimental pilot project of actual scale. First, through field visits and laboratory tests, we carried out an evaluation of the structural condition and operation of the existing plant, followed by a literature review of relevant technologies. With that information we created a decision matrix to evaluate and prioritize options. The preliminary structures were redesigned and the primary treatment structure was reused with the readjustment of the piping system. In the secondary treatment, the flow direction and distribution of the pipes in the constructed wetlands were modified. For the tertiary treatment, the selected technology (Vermifilter) was designed with materials and supplies available in the region. Our design proposal includes preliminary plans, a technical report, an operation and maintenance manual and a referential budget.

**Keywords:** Churuguzo. Wastewater Treatment Plant (WWTP). Sanitation. Vermifilter. Redesign. Pilot plant.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	15
1.1	Antecedentes.....	16
1.2	Justificación.....	16
1.3	Objetivos .....	16
1.3.1	Objetivo General .....	16
1.3.2	Objetivos Específicos .....	16
1.4	Estructura del trabajo de Titulación .....	17
2	MARCO TEÓRICO.....	18
2.1	Saneamiento Mundial, en América Latina y el Caribe.....	18
2.2	Saneamiento en el Ecuador .....	20
2.2.1	Saneamiento en el cantón Cuenca .....	21
2.3	Sistemas de tratamiento de aguas residuales .....	22
2.3.1	Sistemas centralizados de tratamiento de aguas residuales.....	23
2.3.2	Sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales .....	23
2.4	Tecnologías de tratamiento de agua residual .....	24
2.4.1	Proceso aerobio .....	24
2.4.2	Proceso anaerobio .....	25
2.4.3	Sistemas naturales de tratamiento.....	25
2.5	Procesos de tratamiento .....	26
2.5.1	Tratamiento preliminar.....	26
2.5.2	Tratamiento primario .....	28
2.5.3	Tratamiento secundario .....	29
2.5.4	Tratamiento terciario.....	31
2.6	Tecnologías seleccionadas para el tratamiento terciario .....	31
2.6.1	Filtros Percoladores ( <i>Trickling Filter</i> ).....	31
2.6.2	Filtro de medios Horizontal ( <i>Horizontal Roughing Filter - HRF</i> ).....	34
2.6.3	Peat Filter.....	37
2.6.4	Vermifiltro.....	40
2.7	Características del agua residual .....	46
2.7.1	Características físicas.....	47
2.7.2	Características químicas .....	48
2.7.3	Características biológicas .....	49
2.8	Normativa de descarga para efluentes de una PTAR .....	50
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	51



3.1	Ubicación y descripción general de la zona de estudio .....	51
3.1.1	Características generales de la PTAR .....	52
3.2	Metodología de selección de tecnología.....	52
3.3	Caracterización.....	55
3.4	Parámetros de Selección de tecnología .....	56
3.5	Propuesta de Diseño de la Tecnología Seleccionada .....	56
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	57
4.1	Evaluación de la PTAR .....	57
4.1.1	Caracterización de afluentes y efluentes de la PTAR .....	57
4.1.2	Configuración actual y funcionamiento de la PTAR .....	62
4.1.3	Estado de las estructuras actuales .....	64
4.2	Análisis de selección de tecnología.....	66
4.3	Propuesta de rediseño seleccionada.....	68
5	DESARROLLO DE PROPUESTA DE DISEÑO DEFINITIVA .....	69
5.1	Memoria Técnica .....	69
5.1.1	Cálculo de la población aproximada .....	69
5.1.2	Estructuras preliminares .....	72
5.1.3	Tratamiento primario .....	84
5.1.4	Tratamiento secundario .....	87
5.1.5	Tratamiento Terciario .....	90
5.1.6	Eficiencias de remoción de contaminantes en la PTAR de Churuguzo .....	94
5.1.7	Sistema de Bombeo para los Vermifiltros.....	96
5.2	Presupuesto .....	100
6	MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO .....	103
6.1	Personal a cargo de la operación y mantenimiento.....	103
6.2	Tratamiento preliminar .....	103
6.3	Tratamiento primario.....	104
6.4	Tratamiento secundario .....	105
6.5	Tratamiento terciario .....	106
7	CONCLUSIONES.....	108
8	BIBLIOGRAFÍA .....	109
9	ANEXOS Y PLANOS.....	119



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Porcentajes de los niveles de saneamiento mundial .....	18
Figura 2: Porcentajes de los niveles de saneamiento en América Latina y el Caribe .....	19
Figura 3: Porcentajes de Aguas Residuales tratadas mediante sistemas de alcantarillado en países de América Latina .	20
Figura 4: Porcentajes de los niveles de saneamiento en el Ecuador .....	21
Figura 5: Configuración de un tanque séptico. ....	28
Figura 6: Configuración del Humedal de flujo horizontal sub superficial .....	30
Figura 7: Configuración del Trickling Filter - Filtro Percolador .....	32
Figura 8: Diagrama de un filtro de medios horizontal .....	35
Figura 9: Configuración del Peat Filter .....	38
Figura 10: Configuración típica del Vermifiltro .....	40
Figura 11: Remoción de DBO con diferentes cargas hidráulicas .....	44
Figura 12: Configuración típica de las capas de un Vermifiltro .....	45
Figura 13: Mapa Topográfico de la parroquia Victoria del Portete – Ubicación PTAR Churuguzo.....	51
Figura 14: Delimitación del área de cobertura de la PTAR Churuguzo.....	52
Figura 15: Análisis de Sólidos Suspensidos Totales.....	57
Figura 16: Análisis de Sólidos Totales.....	58
Figura 17: Análisis de la Demanda Bioquímica de Oxígeno .....	58
Figura 18: Análisis de la Demanda Química de Oxígeno.....	59
Figura 19: Análisis de la Relación DQO/DBO <sub>5</sub> .....	60
Figura 20: Análisis del Fósforo Total .....	60
Figura 21: Análisis del Nitrógeno Amoniacal.....	61
Figura 22: Análisis del Nitrógeno Total de Kjedahl .....	61
Figura 23: Análisis de Coliformes Termotolerantes .....	62
Figura 24: Configuración de los sistemas de tratamiento presentes en la PTAR Churuguzo.....	63
Figura 25: Esquema de los pozos de ingreso a la PTAR Churuguzo.....	63
Figura 26: Vista en planta de la configuración actual de las Rejas de entrada .....	64
Figura 27: Vista en planta de la configuración actual del Desarenador.....	64
Figura 28: Vista en perfil de la configuración actual de la Fosa Séptica .....	65
Figura 29: Vista en planta de la configuración actual de la fosa séptica y del Lecho de Secado de Lodos .....	65
Figura 30: Vista en planta de la configuración actual de los Humedales .....	66
Figura 31: Coeficiente de Mayoración vs Población.....	70
Figura 32: Esquema de estructuras preliminares .....	72
Figura 33: Coeficiente para las rejas de paso.....	74
Figura 34: Vista en Planta de la Transición.....	81
Figura 35: Vista en perfil de la Transición .....	81
Figura 36: Configuración de un Vertedero Tipo Sutro .....	82
Figura 37: Configuración del Vertedero Tipo Sutro propuesto .....	83
Figura 38: Configuración del Tanque Séptico.....	85
Figura 39: Tanque PVC.....	90



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Plantas de tratamiento de aguas residuales rurales en el cantón Cuenca .....	22
Tabla 2: Características de la Reja de entrada de la PTAR .....	26
Tabla 3: Tamaños de los medios filtrantes para el TRH.....	36
Tabla 4: Requisitos de las turbas para su empleo en la depuración de Aguas Residuales .....	38
Tabla 5: Eficiencia de tratamiento de varias especies de lombrices de tierra, con diferentes tipos de aguas residuales .....	41
Tabla 6: Contaminantes presentes en las Aguas residuales y su importancia de tratamiento .....	47
Tabla 7: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.....	50
Tabla 8: Ponderación de las tecnologías respecto a la aplicabilidad del proceso .....	53
Tabla 9: Ponderación de las tecnologías respecto a la generación de residuos (lodos) .....	53
Tabla 10: Ponderación de las tecnologías respecto a la generación de subproductos .....	53
Tabla 11: Ponderación de las tecnologías respecto al requerimiento de área.....	54
Tabla 12: Ponderación de las tecnologías respecto a los costos de operación y mantenimiento .....	54
Tabla 13: Ponderación de las tecnologías respecto a la operación y personal requerido.....	55
Tabla 14: Ponderación de las tecnologías respecto al impacto ambiental .....	55
Tabla 15: Ponderación de las tecnologías respecto a su implementación dentro del país. ....	55
Tabla 16: Mediana de los contaminantes en el afluente y efluente de la PTAR .....	62
Tabla 17: Matriz cualitativa de decisión.....	67
Tabla 18: Matriz cuantitativa de decisión. ....	68
Tabla 19: Población aproximada .....	71
Tabla 20: Caudales calculados .....	71
Tabla 21: Diseño del canal de Ingreso a la PTAR .....	73
Tabla 22: Dimensiones del Canal de Ingreso a la PTAR .....	73
Tabla 23: Dimensiones de la Reja de Entrada.....	74
Tabla 24: Parámetros de entrada para el diseño del Vertedero Lateral .....	75
Tabla 25: Caudales para el diseño del vertedero lateral de excesos .....	75
Tabla 26: Longitud del Vertedero Lateral .....	75
Tabla 27: Parámetros iniciales para el diseño del Desarenador .....	76
Tabla 28: Reajuste para la velocidad de sedimentación en el Desarenador .....	77
Tabla 29: Área superficial del Desarenador .....	77
Tabla 30: Dimensiones propuestas para el Desarenador .....	78
Tabla 31: Tiempo de retención hidráulico medio en el Desarenador.....	78
Tabla 32: Longitud calculada de la Transición.....	78
Tabla 33: Datos de entrada para el diseño de la Transición .....	79
Tabla 34: Diseño de la Transición .....	80
Tabla 35: Diseño del Vertedero tipo Sutro .....	82
Tabla 36: Diseño de la sección del Vertedero tipo Sutro.....	83
Tabla 37: Concentraciones de contaminantes en el afluente y efluente del tratamiento preliminar .....	84
Tabla 38: Datos iniciales de la Fosa Séptica .....	84
Tabla 39: Periodo de Retención hidráulico medio en la Fosa Séptica .....	84
Tabla 40: Medidas Originales de la Fosa Séptica.....	85
Tabla 41: Dimensionamiento de la Fosa Séptica.....	86
Tabla 42: Concentraciones de contaminantes en el afluente y efluente del tratamiento primario .....	87
Tabla 43: Configuración de los humedales artificiales de flujo horizontal sub superficial .....	87
Tabla 44: Datos generales del Humedal de flujo horizontal sub superficial existente .....	88
Tabla 45: Porcentaje de remoción de contaminantes en el Humedal .....	89
Tabla 46: Concentraciones de CF en el afluente y efluente del tratamiento secundario.....	89
Tabla 47: Datos preliminares para el diseño del Vermifiltro.....	90
Tabla 48: Medidas Comerciales de Tanques de PVC.....	90
Tabla 49: Número de Tanques requeridos para la Desinfección .....	90
Tabla 50: Configuración de las capas que conforman el Vermifiltro.....	91



Tabla 51: Caudal de ingreso para las unidades de Vermifiltración .....	92
Tabla 52: Tiempo de retención hidráulico medio en el Vermifiltro .....	92
Tabla 53: Concentración de DQO del efluente del Vermifiltro .....	93
Tabla 54: Concentración de DQO del efluente del Vermifiltro .....	93
Tabla 55: Concentración de SST del efluente del Vermifiltro .....	93
Tabla 56: Concentración de CF del efluente del Vermifiltro .....	94
Tabla 57: Porcentaje de remoción y Unidades Logarítmicas de remoción .....	95
Tabla 58: Comprobación de los contaminantes del efluente vs TULSMA (2017).....	95
Tabla 59: Potencias vs tiempos de retención de la bomba .....	96
Tabla 60: Volumen de la cámara de bombeo .....	96
Tabla 61: Diámetro de la tubería de impulsión para sistema de bombeo .....	97
Tabla 62: Tubería comercial seleccionada para el sistema de bombeo.....	97
Tabla 63: Velocidad en la tubería de impulsión para el sistema de bombeo .....	97
Tabla 64: Pérdidas locales en la tubería de impulsión del sistema de bombeo.....	98
Tabla 65: Pérdidas por fricción en la tubería de impulsión del sistema de bombeo .....	99
Tabla 66: Altura manométrica total en el sistema de bombeo .....	100
Tabla 67: Potencia de la bomba .....	100
Tabla 68: Presupuesto referencial.....	102

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Procedimiento para el diseño del vertedero lateral .....	119
Anexo 2: Densidad y viscosidad del agua.....	121
Anexo 3: Transición con el caudal máximo de aguas residuales .....	121
Anexo 4: Especificaciones para tuberías PVC con Unión por sellado elastomérico (UZ) y Unión por cementado solvente (EC) PVC - Plastigama.....	123
Anexo 5: Constante de pérdidas por accesorios .....	123
Anexo 6: Coeficiente de Hazen-Williams para diferentes materiales .....	124
Anexo 7: Planos.....	124



## SIMBOLOGÍA Y ABREVIATURAS

<b>PTAR</b>	Planta de Tratamiento de Agua Residual
<b>PTARs</b>	Plantas de Tratamiento de Agua Residual
<b>ETAPA EP</b>	Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca
<b>DBO</b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>COT</b>	Carbono Orgánico Total
<b>CT</b>	Coliformes Totales
<b>CTE</b>	Coliformes Termotolerantes
<b>CF</b>	Coliformes Fecales
<b>SST</b>	Sólidos Suspensidos Totales
<b>ST</b>	Sólidos Totales
<b>pH</b>	Potencial de Hidrógeno
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	Nitrógeno Amoniacal
<b>N</b>	Nitrógeno Orgánico
<b>NTK</b>	Nitrógeno Total de Kjedahl
<b>OD</b>	Oxígeno Disuelto
<b>P</b>	Fósforo Total
<b>m.s.n.m</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>NMP</b>	Número Más Probable
<b>HLR</b>	Tasa de Carga Hidráulica
<b>TRH</b>	Tiempo de Retención Hidráulico
<b>ULR</b>	Unidad Logarítmica de Remoción
<b>mm</b>	Milímetro
<b>cm</b>	Centímetro
<b>m</b>	Metro
<b>km</b>	Kilómetro
<b>cm<sup>2</sup></b>	Centímetro cuadrado
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>ha</b>	Hectárea
<b>ml</b>	Mililitro
<b>l</b>	Litro
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>mg</b>	Miligramos
<b>kg</b>	Kilogramos
<b>s</b>	Segundos
<b>min</b>	Minutos
<b>h</b>	Horas
<b>día</b>	Días
<b>año</b>	Años
<b>kW</b>	Kilovatio
<b>HP</b>	Caballos de fuerza
<b>MPa</b>	Mega Pascales
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>°</b>	Grados con respecto a la horizontal (Ángulo)
<b>° , "</b>	Grados, Minutos y Segundos.
<b>%</b>	Porcentaje



## CLÁUSULA DE DERECHOS DE AUTOR



Universidad de Cuenca  
Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio  
Institucional

Paiwa Paccha Acero Mainato, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Estudio y propuesta de desinfección natural del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Churuguzo, Cantón Cuenca, Ecuador”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 04 de marzo de 2021

Paiwa Paccha Acero Mainato

C.I: 0302917521



## CLÁUSULA DE DERECHOS DE AUTOR



### Universidad de Cuenca Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Sebastián Ismael Morocho Arenillas, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Estudio y propuesta de desinfección natural del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Churuguzo, Cantón Cuenca, Ecuador", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 04 de marzo de 2021

Sebastián Ismael Morocho Arenillas

C.I: 0302503214



## CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL



Universidad de Cuenca  
Cláusula de Propiedad Intelectual

Paiwa Paccha Acero Mainato, autor/a del trabajo de titulación "Estudio y propuesta de desinfección natural del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Churuguzo, Cantón Cuenca, Ecuador", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 04 de marzo de 2021

Paiwa Paccha Acero Mainato

C.I: 0302917521



## CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL



Universidad de Cuenca  
Cláusula de Propiedad Intelectual

Sebastián Ismael Morocho Arenillas, autor/a del trabajo de titulación “Estudio y propuesta de desinfección natural del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Churuguzo, Cantón Cuenca, Ecuador”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 04 de marzo de 2021



Sebastián Ismael Morocho Arenillas

C.I.: 0302503214



## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestro director, Ing. Andrés Alvarado Martínez, PhD, por la paciencia, dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo. Sus amplios conocimientos y experiencia han sido una invaluable guía para culminar con éxito este esmerado proyecto. Le agradecemos también por sus siempre atentas y rápidas respuestas a las diferentes inquietudes surgidas durante el desarrollo de este trabajo de titulación, lo cual se ha visto también reflejado en los buenos resultados obtenidos. Le agradecemos también por siempre brindarnos palabras de aliento que nos han motivado en este arduo trayecto.

De igual manera, a la Empresa Pública ETAPA y de manera especial a la Ing. Verónica Rodas quienes han sabido apoyar el presente trabajo con interés. Les agradecemos por la información brindada y su colaboración durante el proceso de esta investigación.

Finalmente, a las estudiantes Riley, Jessica y Lindsey miembros del Collage of Agriculture and Life Science de la Universidad de Texas A&M, por su valioso aporte en este proyecto, que ha permitido alcanzar los objetivos planteados.



## DEDICATORIA

*A mi abuelita, que ya no está a mi lado, pero su cariño prevalece siempre en mi corazón. A mi querida madre Esthela Mainato por ser el pilar más importante y por demostrarme su cariño y apoyo incondicional durante todo mi trayecto estudiantil y de vida, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo, perseverancia y valentía; con mucho amor y cariño, le dedico este pequeño logro, en reconocimiento a todo el sacrificio puesto para que cumpla mis sueños, se merece esto y mucho más. A mis padrinos Judy y Michael quienes siempre han estado presentes a lo largo de mi vida y han velado por mí durante este arduo camino para convertirme en una profesional, siendo mi apoyo en todo momento, depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. A mi familia porque con sus consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas. A Ismael por haber sido un excelente compañero de tesis y por motivarme a seguir adelante en los momentos de desesperación, gracias al equipo que formamos logramos llegar hasta el final del camino y sobre todo por hacer de su familia, una familia para mí. Finalmente, a mis chicuelas, queridas amigas, por estar conmigo todo este tiempo, donde hemos vivido momentos de felicidad y tristeza, pero esos momentos son los que nos hacen crecer y forjar una amistad sincera, de verdad mil gracias hermanitas, siempre las llevo en mi corazón.*

**Paiwa Acero M.**

*A MI FAMILIA por ser la razón de mi vida y parte fundamental del alcance de este logro. A mi ejemplo a seguir, por su apoyo total, sus enseñanzas y cada día motivarme a cumplir este sueño, querido padre y amigo, FERNANDO EFRÉN. A mi ángel en el cielo, que siempre me apoyó cuando estuve presente y ahora lo hace pero espiritualmente, mi amada madre, ENMITA PIEDAD. Al mejor de los colegas, que con sus consejos y constantes palabras de aliento me impulso a ser mejor cada día, mi querido hermano, LUIS FERNANDO. A mi compañero de vida, por su confianza y apoyo total, por siempre tener las palabras precisas para ayudarme a crecer como persona y profesional, mi hermano gemelo, SEBASTIÁN ISRAEL. A mis amigos y compañeros quienes han hecho de esta etapa una de las mejores. A Paiwa, una excelente compañera a lo largo de este proyecto, por su confianza y dedicación.*

**Ismael Morocho A.**



## 1 INTRODUCCIÓN

El saneamiento es un derecho humano fundamental. Toda la humanidad requiere servicios de saneamiento que brinden privacidad, garanticen la dignidad y la seguridad, y que sean físicamente accesibles y asequibles (WHO/UNICEF JMP, 2020). Tanto el saneamiento como la higiene son fundamentales para la salud, la supervivencia y el desarrollo, por lo tanto, el desafío mundial consiste en proporcionar un saneamiento adecuado, que minimice el riesgo de contraer enfermedades (WASH, 2017). La pandemia de COVID-19 ha demostrado la importancia crítica del saneamiento, la higiene y el acceso adecuado al agua potable para prevenir y contener enfermedades (United Nations, 2020).

El mundo no se encuentra encaminado a brindar saneamiento “adecuado y equitativo” para 2030, conforme el Objetivo 6 de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. A pesar de los avances, más de la mitad de la población mundial, 4.200 millones de personas, utiliza servicios de saneamiento que dejan los desechos sin tratar, se estima que 673 millones de personas carecen de retretes y practican la defecación al aire libre. Las consecuencias de un saneamiento deficiente son devastadoras para la salud pública, el medioambiente, y el desarrollo socioeconómico (WHO/UNICEF JMP, 2020).

En el Ecuador, el porcentaje de personas con acceso a servicios de saneamiento básico alcanza el 88%. En el sector urbano alcanza el 91% (10 millones de habitantes), mientras que en el área rural las personas que cuentan con servicios de saneamiento básico son el 83% (5 millones de habitantes) (WHO/UNICEF JMP, 2019). Sin embargo, los efluentes domésticos que reciben un tratamiento adecuado en instalaciones separadas aún no alcanza el 20% (WHO/UNICEF JMP, 2019).

La ciudad de Cuenca es líder en el saneamiento ambiental urbano en el país, gracias a la gestión integral del agua y saneamiento que ha ejecutado ETAPA en las últimas décadas. Un ícono de esta gestión es la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Ucubamba, que trata, desde 1996, mediante lagunas de estabilización, alrededor de 95% de las aguas residuales producidas en la zona urbana de la ciudad (ETAPA EP, 2019). Debido a las dificultades técnicas y elevado costo que representa la expansión de la red principal hacia zonas rurales del cantón Cuenca, la empresa municipal ETAPA ha construido, en los últimos 40 años, 32 pequeños sistemas de tratamiento de aguas residuales descentralizadas, que generalmente, consisten en fosas sépticas, filtros anaerobios y humedales artificiales. En la actualidad, alrededor de 20 de estos sistemas se encuentran en funcionamiento (Yunga, 2019).

Uno de los principales problemas que suelen presentarse en las pequeñas PTAR en el área rural es su escasa o nula capacidad para la desinfección de sus efluentes; es decir, su capacidad de eliminar agentes patógenos es muy limitada, por lo que es necesario estudiar la incorporación de estas capacidades en las PTARs como un objetivo prioritario para la salud pública de las comunidades servidas.

El presente trabajo de titulación se enfoca en el desarrollo de una propuesta de tecnología natural de pulimento y desinfección del efluente de la Planta de Tratamiento de aguas Residuales Churuguzo, ubicada en la parroquia Victoria del Portete, perteneciente al Cantón Cuenca, Provincia del Azuay. Para cumplir el proyecto en mención se ha contado con el apoyo académico de estudiantes de la Universidad de Texas A&M. Esta colaboración es parte de un convenio de cooperación interuniversitaria existente entre la Universidad de Cuenca, Ecuador y la Universidad de Texas A&M, Estados Unidos de América.



## 1.1 Antecedentes

La PTAR de Churuguzo cuenta con una estructura de entrada (canal de ingreso y rejillas), tratamiento preliminar (desarenador), tratamiento primario (fosa séptica), tratamiento secundario (dos humedales artificiales de flujo horizontal sub-superficial) y una estructura en la descarga para evitar la erosión (ETAPA EP, 2019), posee un área de cobertura aproximada de 226.5 ha. Se han realizado proyectos previos en este sistema descentralizado, tal como el rediseño de los humedales de flujo horizontal sub-superficial, propuesto en el trabajo de titulación de Salazar & Sánchez (2015). En años más recientes, el afluente a la PTAR de Churuguzo fue interceptado por una nueva red de colectores que transportan el agua residual hacia la PTAR de Ucubamba. Por este motivo, la infraestructura existente en la Planta, que se encuentra en estado aceptable, no está en funcionamiento, por lo que ETAPA planea incorporar esta planta como una unidad piloto de escala real para el estudio de nuevas tecnologías de tratamiento apropiadas para la región Andina.

## 1.2 Justificación

Uno de los principales problemas de los sistemas descentralizados del cantón Cuenca radica en la generalización de los diseños, que consiste en la réplica de PTARs de zonas con distintas particularidades, lo que conlleva a un inadecuado funcionamiento de las estructuras de tratamiento, y en consecuencia de ello una baja eficiencia en la remoción de contaminantes. Por lo tanto, es de vital importancia la implementación de PTARs piloto a diferentes escalas, acopladas a las condiciones ambientales y que sean capaces de tratar el agua residual doméstica propia de la zona.

Actualmente existen varias PTARs rurales en el cantón que no se encuentran en funcionamiento, por lo que es adecuado aprovechar dichos espacios como sitios experimentales, utilizando las estructuras que se encuentran en buenas condiciones, modificando otras e incluyendo nuevas tecnologías con mejores eficiencias en la remoción de contaminantes y factibles de ser implementadas en nuestras condiciones ambientales y socio económicas.

La falta de aplicación de tratamientos para la desinfección de aguas residuales en las PTARs constituye un problema que afecta al desarrollo local sostenible ya que su efluente comúnmente es descargado en cuerpos de agua, afectando su reutilización aguas abajo. Para ello es importante el estudio de sistemas naturales de desinfección de costo razonable y con bajos requerimientos en cuanto a su operatividad y mantenimiento.

La PTAR de Churuguzo reporta bajos niveles de desinfección, por lo tanto, existe la necesidad de incrementar los porcentajes de remoción de microorganismos patógenos, readecuando esta planta a una unidad piloto que genera un efluente apto para la reutilización del agua en actividades agrícolas y ganaderas en zonas aledañas. De esta manera se busca contribuir positivamente en la salud pública y el medio ambiente, además de aportar en el estudio de nuevas tecnologías naturales implementadas dentro del cantón.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo General

- Estudiar y proponer soluciones tecnológicas que incrementen la capacidad de desinfección natural en la PTAR de Churuguzo readecuándola como una unidad piloto para un caudal de 1 l/s.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar el estado de los procesos de depuración de la PTAR Churuguzo.
- Realizar un análisis de selección de tecnología, basada en la sostenibilidad ambiental.
- Diseñar una unidad de desinfección natural y pulido del efluente final de la unidad piloto emplazada en la PTAR Churuguzo.



#### 1.4 Estructura del trabajo de Titulación

El trabajo de titulación consta de ocho capítulos, organizados con base en los objetivos de estudio planteados anteriormente, tal como se describe a continuación.

Como punto de partida del trabajo de titulación se presenta el capítulo 1, el cual contiene una breve introducción al problema planteado, describe el objeto de estudio, sus antecedentes y justificación. Además, contiene la estructura del trabajo de titulación.

El capítulo 2 contiene la revisión de literatura, abarcando los conceptos básicos y especializados sobre los cuales se fundamenta el proyecto. Este capítulo inicia con una breve descripción del saneamiento a nivel mundial, nacional y regional, posteriormente se detalla los sistemas y tecnologías de tratamiento de aguas residuales. El capítulo finaliza con los procesos de tratamiento que comúnmente están presentes en las PTARs de nuestra región, las características de agua residual, sus principales contaminantes y la normativa de descarga correspondiente.

En el capítulo 3, materiales y métodos, abarca la ubicación y descripción de la zona de estudio, que incluye las características generales de la PTAR Churuguzo. Esta sección finaliza con los parámetros para la selección de tecnologías y la metodología adoptada.

El capítulo 4 contiene el análisis y la caracterización del agua residual, empleando estudios realizados por ETAPA EP, así como también la descripción de las tecnologías seleccionadas, el análisis y propuesta de rediseño seleccionada.

El capítulo 5 comprende el desarrollo de la propuesta diseño definitiva, la misma que engloba la memoria técnica y el presupuesto.

El capítulo 6 contiene el manual de operación y mantenimiento de las estructuras de la PTAR Churuguzo.

El capítulo 7 comprende las conclusiones del trabajo de titulación.

En los capítulos 8 y 9 se incluyen la bibliografía y todos los anexos respectivamente.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Saneamiento Mundial, en América Latina y el Caribe

El Programa Conjunto de Monitoreo (JMP) de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el UNICEF para el suministro de agua, el saneamiento y la higiene, define cinco niveles de servicio: defecación al aire libre; no mejorado; limitado; básico; y gestionado de forma segura.

El saneamiento gestionado de forma segura hace referencia al uso de instalaciones mejoradas que no se comparten con otros hogares y donde las excretas se desechan de manera segura in situ o son transportadas y tratadas fuera del terreno; el nivel de servicio básico, se fundamenta en el uso de instalaciones mejoradas que no se comparten con otros hogares; mientras que el uso de instalaciones mejoradas compartidas entre dos o más hogares se define como nivel de servicio limitado; por otra parte, el uso de letrinas de fosa, letrinas colgantes o baldes, corresponde al nivel de servicio no mejorado; finalmente, la defecación al aire libre, consiste en la eliminación de heces humanas en campos, cuerpos de agua u otros espacios abiertos o junto a residuos sólidos (WHO/UNICEF JMP, 2020).

Según WHO/UNICEF JMP (2020), a nivel mundial, 2 mil millones de personas carecen de un nivel básico de servicio de saneamiento. Entre 2000 y 2017, la población mundial, que utiliza servicios de saneamiento gestionados de forma segura aumentó, del 28% al 45%, por otra parte, la población que practica la defecación al aire libre se redujo a la mitad, de 1300 millones a 673 millones (véase la Figura 1).

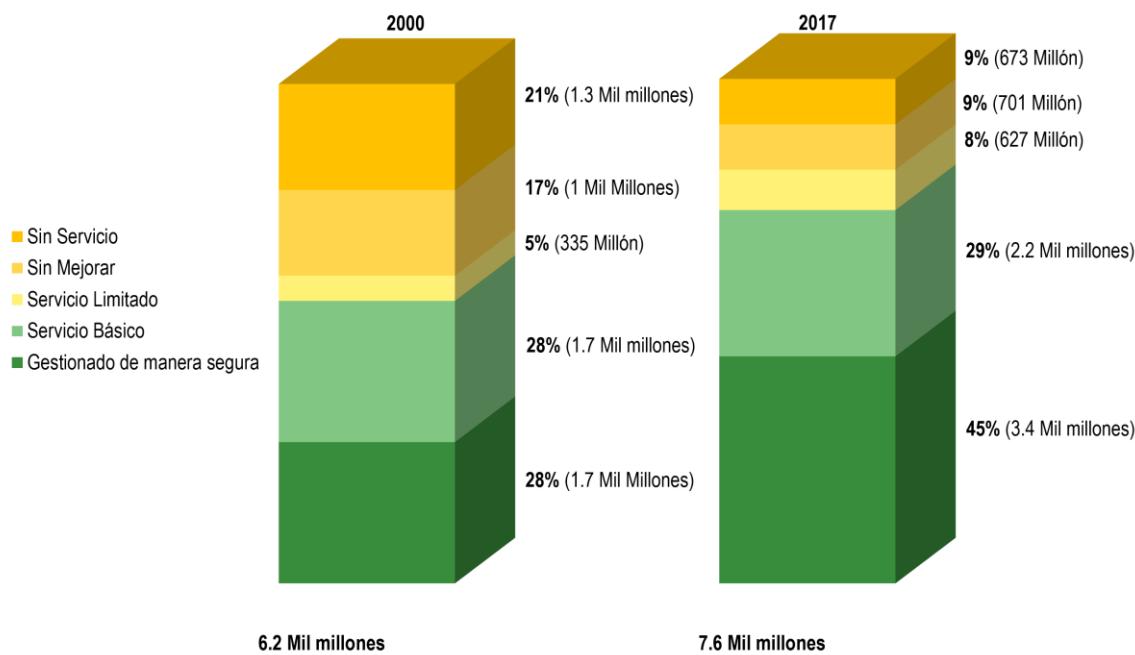


Figura 1: Porcentajes de los niveles de saneamiento mundial  
Fuente: Elaboración propia, datos tomados de (WHO/UNICEF JMP, 2019)

En la Región de América Latina y el Caribe, solo 8 países cuentan con cierto grado de servicios gestionados de forma segura, es decir no compartido, donde las excretas son tratadas y dispuestas in situ o transportadas por una red de alcantarillado y tratadas fuera de lugar en forma segura (ETRAS - OPS/OMS, 2018).

Una proporción significativa de la población de América Latina y el Caribe carece de acceso adecuado a servicios de saneamiento gestionados de manera segura, reportando un 45% a nivel mundial en comparación con un 31% a nivel de nuestra Región, en el año 2017 (WHO/UNICEF JMP, 2020).

Entre 2000 y 2017 se registró una reducción neta de 36 millones de personas que practicaban la defecación al aire libre en América latina y el Caribe, mientras que 87% de su población utilizaba instalaciones de saneamiento mejorada en el 2017 (WHO/UNICEF JMP, 2020). En la Figura 2 se presentan los porcentajes de los niveles de saneamiento en América Latina y el Caribe, además de sus proporciones en el sector urbano y rural.

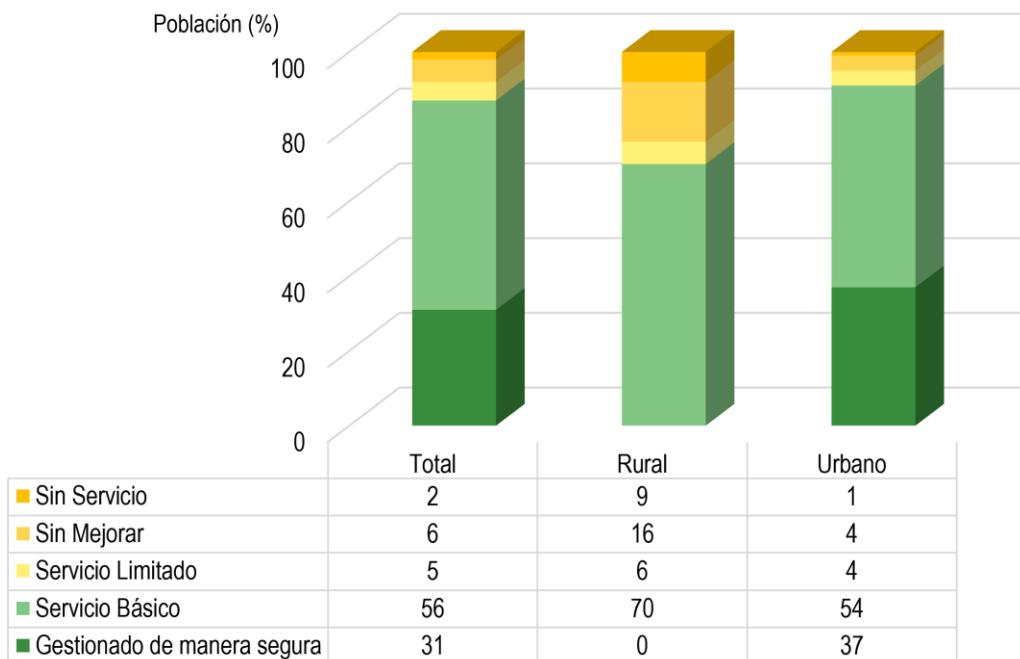


Figura 2: Porcentajes de los niveles de saneamiento en América Latina y el Caribe  
Fuente: Elaboración propia, datos tomados de (WHO/UNICEF JMP, 2020)

La Figura 3, muestra que el porcentaje de las aguas residuales tratadas varía enormemente entre los distintos países de América Latina y el Caribe, en la mayoría de estos se trataron menos del 50% de las aguas residuales (WHO/UNICEF JMP, 2019).

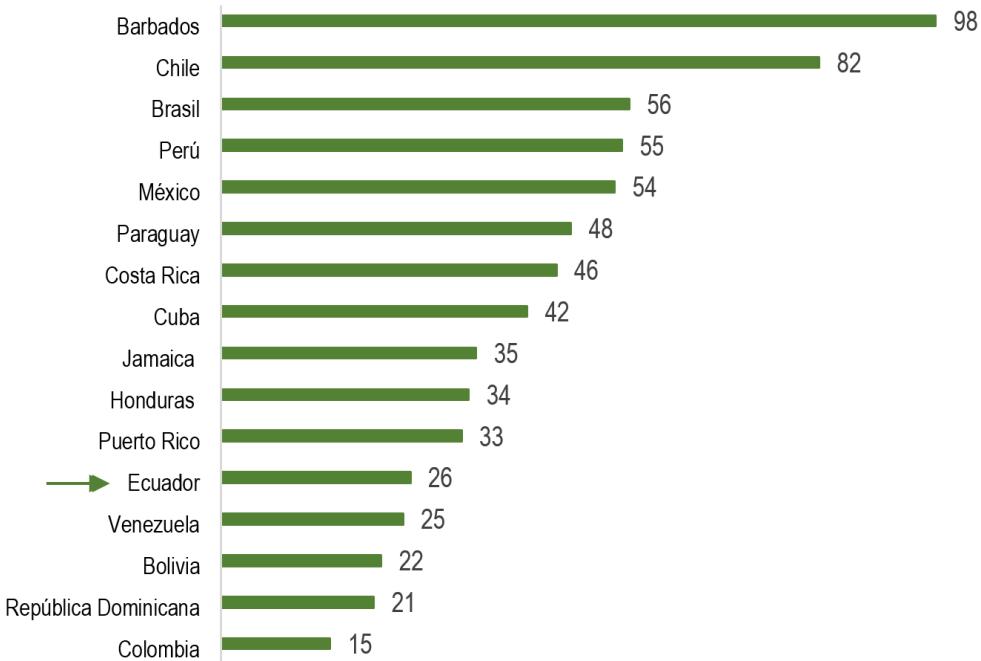


Figura 3: Porcentajes de Aguas Residuales tratadas mediante sistemas de alcantarillado en países de América Latina  
Fuente: Elaboración propia, datos tomados de (WHO/UNICEF JMP, 2019)

## 2.2 Saneamiento en el Ecuador

Según reportes del año 2017, tomados de WHO/UNICEF JMP (2019), en el Ecuador, el 88% de la población total cuenta con saneamiento a nivel básico, es decir, con instalaciones mejoradas y servicio higiénico de uso exclusivo del hogar, además, se registran porcentajes del 91% y 83% de población que posee este servicio para el sector urbano y rural respectivamente. El 6% de la población en el sector rural no cuenta con servicios de saneamiento, volviéndola una zona altamente afectada.

En la Figura 4, se puede apreciar los porcentajes descritos anteriormente, desglosados en función de parámetros de saneamiento.

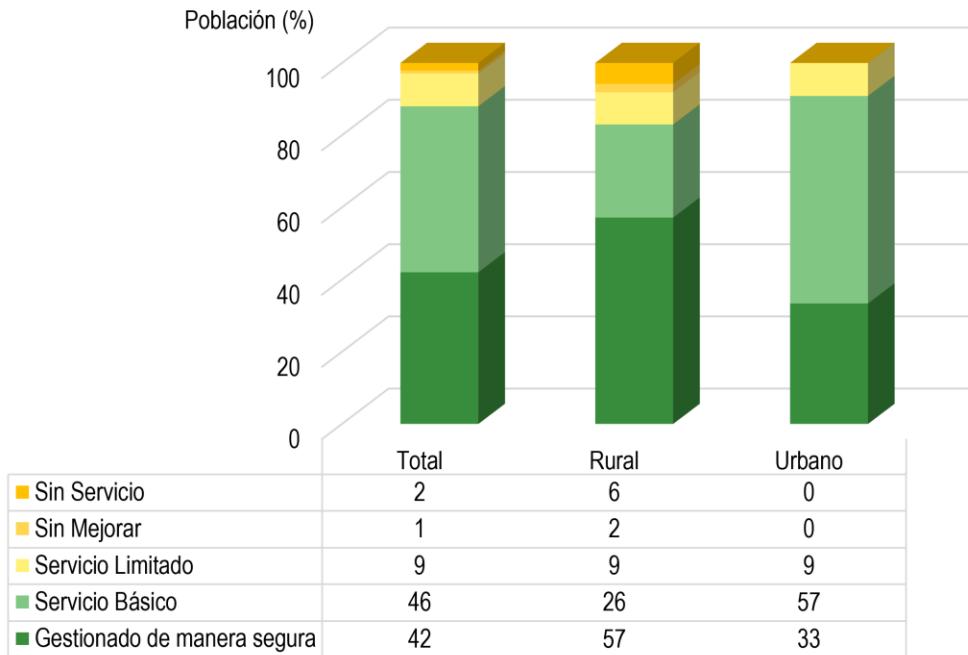


Figura 4: Porcentajes de los niveles de saneamiento en el Ecuador

Fuente: Elaboración propia, datos tomados de (WHO/UNICEF JMP, 2019)

### 2.2.1 Saneamiento en el cantón Cuenca

El sistema de alcantarillado en el cantón Cuenca es del tipo combinado, compuesto por colectores, interceptores y un emisario final. Las aguas residuales recolectadas son desembocadas en la PTAR de lagunas de estabilización Ucubamba, para su posterior tratamiento. ETAPA EP informa que el Sistema Central (PTAR Ucubamba) trata el 95% de las aguas residuales producidas en la zona urbana de la ciudad, mientras que el resto del caudal total es tratado por medio de los sistemas descentralizados.

Cuenca dispone de 32 plantas de tratamiento de aguas residuales, ubicadas en diferentes parroquias del cantón, de las cuales alrededor de 20 se encuentran en funcionamiento. En la Tabla 1, se muestra cada una de las PTARs con su respectiva ubicación, área de cobertura y tecnología de tratamiento.



Número	Nombre del Sistema	Ubicación	Área de Cobertura (ha)	Tipo del Sistema	En funcionamiento
1	Ricaурte	Flor de Camino	-	-	-
2	Molleturo	Luz y Guía	-	-	SI
3	Abdón Calderón	Molleturo	72.2	ED+FS+HA	-
4	Esterro Piedra	Molleturo	-	ED+FS+HA	-
5	Flor y Selva	Molleturo	55.8	ED+FS+HA	-
6	Jesús del Gran Poder	Molleturo	417.5	ED+FS+HA	-
7	La Suya	Molleturo	43.5	ED+FS+FA	-
8	Tamarindo	Molleturo	N/D	ED+FS+HA	-
9	San Antonio	Chaucha	N/D	FS+FA	-
10	San Gabriel - Parte Baja	Chaucha	N/D	FS+FA	SI
11	San Gabriel	Chaucha	75.2	FS+FA	SI
12	Cruz Verde	Chiquintad	75.2	ED+FS	-
13	La Isla	Chiquintad	54.3	FS+FA+HA	-
14	Churugozo	Victoria del Portete	226.5	ED+FS	-
15	Escaleras	Victoria del Portete	49.3	ED+FS+FA	SI
16	Cumbe	Victoria del Portete	40.3	FS+FA	SI
17	Quillopungo	El Valle	150.8	ED+RA+FA	SI
18	Soldados	San Joaquín	N/D	ED+FS+HA	SI
19	Acchayacu	Tarqui	129.4	FS+FA	SI
20	Tutupali	Tarqui	41.5	ED+FS+FA	SI
21	El Chorro	Santa Ana	47.9	FS+FA	SI
22	Guabo	Sidcay	25.4	ED+FS+FA	SI
23	Santa Ana Laureles	Santa Ana	24.4	ED+FS+FA	SI
24	San Pedro	Santa Ana	71	ED+FS+FA	SI
25	Santa Ana Cementerio	Santa Ana	32.9	ED+FS+FA	SI
26	Santa Bárbara	Santa Ana	8.6	FS+FA	-
27	Macas de Quingeo	Quingeo	11.1	FS+FA	SI
28	Quingeo Centro	Quingeo	103.6	FS+FA	SI
29	Octavio Cordero Palacios		38.4	FS	SI
30	Tarqui Centro	Victoria del Portete	605.1	ED+FS+FA	SI
31	Bella Unión	Santa Ana	76.5	ED+FS+FA	SI
32	Pueblo Nuevo	Molleturo	55.8	FS+FA	SI

Leyenda: ED: Estructura de Desbordamiento; FS: Fosa Séptica; FA: Filtro Anaerobio; HA: Humedal Artificial; RA: Reactor Anaerobio

Tabla 1: Plantas de tratamiento de aguas residuales rurales en el cantón Cuenca

Fuente: (Alvarado, et al., 2017; Yunga, 2019 )

### 2.3 Sistemas de tratamiento de aguas residuales

Un sistema de tratamiento de aguas residuales recolecta las aguas grises de la cocina, duchas y lavabos, además de las aguas negras provenientes de los inodoros. El objetivo principal de un sistema de tratamiento es realizar varios procesos en las aguas residuales antes de su descarga a los cuerpos receptores (Naeim Nouri, 2016):



- Debe remover el material grueso de las aguas residuales que ingresan al sistema de tratamiento, para evitar obstrucciones en las tuberías que conectan a las estructuras posteriores.
- El sistema debe reducir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) a un nivel inferior al establecido por la normativa correspondiente, lo cual permitirá el vertido al cuerpo receptor sin riesgos para el medio ambiente.
- Los sólidos suspendidos se deben reducir a niveles inferiores a los establecidos por la normativa correspondiente. La presencia de sólidos suspendidos en grandes concentraciones limita la transparencia del agua y cuando es descargada en el cuerpo receptor sin una adecuada remoción, pueden afectar su flora y fauna.

El tratamiento de aguas residuales consiste en una combinación de procesos y operaciones físicos, químicos y biológicos para eliminar sólidos, materia orgánica y en ciertos casos nutrientes de las aguas residuales. Los principales procesos de tratamiento de aguas residuales son el preliminar, primario, secundario y terciario y/o avanzado (Pescod, 1992).

### 2.3.1 Sistemas centralizados de tratamiento de aguas residuales

Los sistemas centralizados, consisten en un sistema de alcantarillado que recolecta grandes volúmenes de aguas residuales (hogares, empresas, plantas industriales, incluso la escorrentía de aguas pluviales) y transporta esta mezcla siempre cambiante a una planta de tratamiento de aguas residuales ubicada fuera de los límites de la ciudad o pueblo; haciendo uso de grandes tuberías, excavaciones importantes y pozos de acceso (Wilderer & Schreff, 2000).

En el marco de la estrategia centralizada, se pueden identificar dos enfoques principales para el tratamiento de aguas residuales: intensivo y extensivo. El tratamiento intensivo es el enfoque más común en los países industrializados con lodos activados como tecnología convencional, en el que se puede agregar un tratamiento avanzado adicional, como una unidad de desinfección (cloración, ozonización, UV) y la eliminación de nutrientes (N y P), dependiendo de los requisitos de eliminación / reutilización. El tratamiento extensivo incluye métodos como lagunas y estanques de estabilización. Son sistemas de tratamiento biológico no mecánico en los que se realizan procesos naturales de disolución (Hophmayer Tokich, 2006).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales centralizados son las opciones de tratamiento preferidas a nivel mundial, especialmente en los países desarrollados, pero no son necesariamente mejores que los sistemas de tratamiento descentralizados, con referencia a la reducción de patógenos. La principal desventaja de las PTARs centralizadas son los costes exorbitantes asociados a su construcción, operación, mantenimiento, y el costo del transporte de las aguas residuales. Según el Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo de las Naciones Unidas 2015, estos costos podrían reducirse considerablemente si se trataran las aguas residuales cerca de la fuente utilizando tecnologías simples. El tema de los costos de construcción y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales es principalmente un desafío en entornos pobres (Amoah, et al., 2018).

### 2.3.2 Sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales

Los sistemas descentralizados recolectan, tratan, reutilizan y/o eliminan las aguas residuales de hogares, subdivisiones e instalaciones comerciales aisladas, en o cerca del punto de generación de residuos (Tchobanoglous, et al., 2004).



Algunas de las tecnologías de tratamiento descentralizado de aguas residuales ampliamente utilizados involucran: humedales artificiales, reactores anaerobios con deflectores (ABR), reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA), lagunas de estabilización, lagunas aireados, y zanjas de oxidación (Amoah, et al., 2018). Estos sistemas tratan y dispersan volúmenes relativamente pequeños de aguas residuales y generalmente se encuentran en áreas rurales y suburbanas, donde se localizan poblaciones de baja densidad (U.S. EPA, 2004).

De acuerdo con lo mencionado por la U.S. EPA (2005), los sistemas de tratamiento de aguas residuales descentralizados, no solo reducen los efectos sobre el medio ambiente y la salud pública, sino que también aumentan la reutilización final de las aguas residuales según el tipo de comunidad, las opciones técnicas y los entornos locales. Además, los sistemas descentralizados pueden instalarse según sea necesario, evitando así la costosa implementación de sistemas de tratamiento centralizados.

Hoy en día, los sistemas descentralizados pueden diseñarse para un sitio específico, superando así los problemas asociados con las condiciones del sitio, tales como niveles freáticos altos, suelos impermeables, lecho rocoso poco profundo y formaciones de piedra caliza. Además, los sistemas descentralizados permiten la flexibilidad en la gestión y se pueden combinar una serie de procesos para cumplir con los objetivos del tratamiento y abordar los requisitos de protección ambiental y de salud pública (Massoud, et al., 2009).

## 2.4 Tecnologías de tratamiento de agua residual

De acuerdo con Tchobanoglous & Burton (1995), los contaminantes presentes en el agua residual pueden eliminarse con procesos químicos, físicos y/o biológicos. Los métodos individuales suelen clasificarse en operaciones físicas unitarias; procesos químicos unitarios, y procesos biológicos unitarios.

**Operaciones físicas unitarias:** En estas operaciones predomina la acción de fuerzas tales como el desbaste, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, transferencia de gases y filtración.

**Procesos químicos unitarios:** Estos procesos consisten en la adición de productos químicos o mediante el desarrollo de ciertas reacciones químicas para la eliminación o conversión de los contaminantes. Fenómenos como la precipitación, adsorción y la desinfección son ejemplos de los procesos de aplicación más común en el tratamiento de las aguas residuales.

**Procesos biológicos unitarios:** En este tipo de tratamiento la eliminación de los contaminantes se debe a la actividad biológica. Consiste en el control del medio ambiente de los microorganismos, de modo que se consigan condiciones de crecimiento óptimas. La principal aplicación de los procesos biológicos es la eliminación de las sustancias orgánicas biodegradables presentes en el agua residual en forma, tanto coloidal, como en disolución. Dentro de los procesos de tratamiento biológico existen cinco grupos: procesos aerobios, procesos anaerobios, procesos anóxicos, procesos aerobios, anaerobios y anóxicos combinados, y los procesos de lagunaje.

### 2.4.1 Proceso aerobio

Es un proceso de respiración de oxígeno en el cual el oxígeno libre es el único receptor final de electrones; el oxígeno es reducido y el carbono es oxidado, al igual que la materia orgánica o inorgánica. Usualmente, las bacterias son los organismos más importantes en el tratamiento aerobio de las aguas residuales porque son excelentes oxidadores de la materia orgánica y crecen bien en aguas residuales, siendo capaces de formar una capa floculenta gelatinosa de muy buenas características para la remoción de la materia orgánica (Romero Rojas, 2010). En el tratamiento aerobio, existe una mayor cantidad de energía del sustrato que es utilizada



para la síntesis celular, por lo que hay una mayor generación de biomasa como lodo no estabilizado (Noyola, et al., 2013).

Algunos sistemas aerobios se practican como una opción el pos tratamiento para los efluentes de los sistemas anaerobios. Los sistemas aerobios más comunes implementados en plantas de tratamiento son: lagunas aireadas, lodos activados, filtro percolador, discos biológicos rotatorios, filtro aerobio sumergido (Noyola, et al., 2013).

#### 2.4.2 Proceso anaerobio

Es la descomposición u oxidación de compuestos orgánicos, en ausencia de oxígeno libre, para obtener la energía requerida para el crecimiento y mantenimiento de los organismos anaerobios (Romero Rojas, 2010).

Los sistemas de tratamiento anaerobio son sistemas de tratamiento biológico que consumen poca energía. A pesar de la baja eliminación de nutrientes y orgánicos, los sistemas de tratamiento anaerobio son baratos y simples. Sin embargo, estos sistemas solo logran una calidad de efluente de baja a moderada y requieren tiempos de arranque prolongados (alrededor de 3 a 4 meses), mientras que los sistemas aerobios tienen un tiempo de arranque mucho más corto (alrededor de 2 a 4 semanas). Para cumplir con el estándar de descarga, la mayoría de los sistemas de tratamiento anaerobio son seguidos por sistemas aerobios. Algunos ejemplos de sistemas anaerobios implementados en plantas de tratamiento son: fosa séptica, tanque imhoff, filtro anaerobio, reactor de lecho de lodos de flujo ascendente y reactor de lecho expandido/fluidificado (Singh, et al., 2015).

El proceso anaerobio se caracteriza por tener una baja tasa de síntesis bacteriana, es decir, una baja producción de lodos de desecho (Noyola, et al., 2013).

#### 2.4.3 Sistemas naturales de tratamiento

Estos sistemas se adoptan generalmente en los países en desarrollo debido a su bajo costo operativo y de mantenimiento y se pueden utilizar como tratamiento secundario o como una combinación de tratamiento primario y secundario (Singh, et al., 2015).

Los sistemas de tratamiento natural se diseñan para aprovechar los procesos físicos, químicos y biológicos que se producen en el ecosistema suelo-agua-plantas, con objeto de proporcionar tratamiento al agua residual. Los procesos que intervienen en los sistemas de tratamiento natural incluyen muchos de los utilizados en las plantas de tratamiento (sedimentación, filtración, transferencia de gases, adsorción, precipitación química, etc.), junto con procesos propios de los sistemas de tratamiento natural tales como la fotosíntesis, la fotooxidación, y la asimilación por parte de las plantas. Los sistemas naturales son capaces de eliminar, hasta cierto punto, casi todos los contaminantes presentes en el agua residual, tales como sólidos suspendidos, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, compuestos orgánicos y microorganismos (Tchobanoglous & Burton, 1995).

Los sistemas naturales se utilizan generalmente en aquellos lugares donde hay un gran espacio disponible y los fondos son limitados. A pesar de su bajo costo y tratamiento satisfactorio de aguas residuales, requieren un gran espacio y un mayor tiempo de retención hidráulica (TRH) que otros sistemas de tratamiento (Singh, et al., 2015).



## 2.5 Procesos de tratamiento

### 2.5.1 Tratamiento preliminar

El tratamiento preliminar de las aguas residuales se define como el proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares. Es el conjunto de unidades que tiene como finalidad eliminar materiales gruesos, que podrían perjudicar el sistema de conducción de la planta (Ayala Fanola & Gonzales Marquez, 2008). El tratamiento preliminar generalmente consta de las siguientes estructuras:

#### 2.5.1.1 Canal de Ingreso

El canal de acceso a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales debe diseñarse para prevenir la acumulación de arena u otro material pesado, antes y después de la rejilla. El canal debe, preferiblemente, ser horizontal, recto y perpendicular a la rejilla, para promover una distribución uniforme de los sólidos retenidos por ella (Romero Rojas, 2010). La longitud del canal de acceso no necesariamente habrá de ser calculada, pero habrá de ser suficiente para dar cabida a la basura que se aglomere en las rejillas (Galeano & Rojas, 2016).

#### 2.5.1.2 Reja de entrada

La operación de cribado se emplea para remover el material grueso, generalmente flotante, contenido en algunas aguas residuales crudas, que puede obstruir o dañar bombas, tuberías y equipos de las plantas de tratamiento o interferir con la buena operación de los procesos de tratamiento (Ayala Fanola & Gonzales Marquez, 2008)..

En la Tabla 2, se presentan las principales características de las rejillas en una PTAR:

Características de la reja de entrada		
Característica	De Limpieza Manual	De Limpieza Mecánica
Ancho de las barras	0.5 – 1.5 cm	0.5 – 1.5 cm
Profundidad de las barras	2.5 – 7.5 cm	2.5 – 7.5 cm
Abertura o espaciamiento	2.5 – 5.0 cm	1.5 – 7.5 cm
Pendiente con la vertical	30° - 45°	0° - 30°
Velocidad de acercamiento	0.3 – 0.6 m/s	0.6 – 1.0 m/s
Pérdida de energía permisible	15 cm	15 cm

Tabla 2: Características de la Reja de entrada de la PTAR

Fuente: (Romero Rojas, 2010)

Para el dimensionamiento de la reja de entrada se deberá considerar la pérdida de carga que produce su emplazamiento la cual se calcula en proporción a la altura de la carga hidrodinámica de aproximación (Pacheco Tobar, 2019).

#### 2.5.1.3 Estructura de derivación de excesos - Bypass

Un bypass es el conjunto de elementos que sirven para desviar el flujo del agua residual de una PTAR, cuando se dan condiciones de emergencia, de mantenimiento o de operación (NORMA OS.090, 2006).



#### 2.5.1.4 Desarenador

El desarenado se refiere normalmente a la remoción de las partículas superiores a 0,2 mm (CEPIS, 2005a). Los desarenadores, en tratamiento de aguas residuales, se usan para remover arena, grava, partículas u otro material sólido pesado que tenga velocidad de asentamiento o peso específico bastante mayor que el de los sólidos orgánicos degradables de las aguas residuales. Los desarenadores protegen el equipo mecánico del desgaste anormal y reducen la formación de depósitos pesados en las tuberías, canales y conductos. Además, minimizan la frecuencia requerida de limpieza de los digestores, en aquellos casos en que se presenta una acumulación excesiva de arena en dichas unidades (Romero Rojas, 2010).

De acuerdo al CEPIS (2005a), el desarenador se compone de cuatro zonas:

- **Zona de Entrada:** Tiene como función el conseguir una distribución uniforme de las líneas de flujo dentro de la unidad, uniformizando a su vez la velocidad.
- **Zona de Desarenación:** Parte de la estructura en la cual se realiza el proceso de depósito de partículas por acción de la gravedad.
- **Zona de Salida:** Conformada por un vertedero de rebose diseñado para mantener una velocidad que no altere el reposo de la arena sedimentada.
- **Zona de depósito y eliminación de la arena sedimentada:** Constituida por una tolva con pendiente mínima de 10% que permite el deslizamiento de la arena hacia el canal de limpieza de los sedimentos.

Los criterios de diseño considerados según CEPIS (2005a), son:

- El número de unidades mínimas en paralelo es 2 para efectos de mantenimiento. En caso de caudales pequeños y turbiedades bajas se podrá contar con una sola unidad que debe contar con un canal de by-pass para efectos de mantenimiento.
- El periodo de operación es de 24 horas por día.
- Debe existir una transición en la unión del canal o tubería de llegada al desarenador para asegurar la uniformidad de la velocidad en la zona de entrada.
- La transición debe tener un ángulo de divergencia suave no mayor de  $12^{\circ} 30'$ .
- La velocidad de paso por el vertedero de salida debe ser pequeña para causar menor turbulencia y arrastre de material (Krochin,  $V=1\text{m/s}$ ).
- La llegada del flujo de agua a la zona de transición no debe proyectarse en curva pues produce velocidades altas en los lados de la cámara.
- La relación largo/ancho debe ser entre 10 y 20.
- La sedimentación de arena fina ( $d < 0.01 \text{ cm}$ ) se efectúa en forma más eficiente en régimen laminar (Valores del número de Reynolds,  $Re < 1$ ); mientras que la sedimentación de arena gruesa se efectúa en régimen de transición (con valores de Reynolds entre 1 y 1000); en tanto que la sedimentación de grava se efectúa en régimen turbulento (con valores de número de Reynolds mayores de 1000).
- La descarga del flujo puede ser controlada a través de dispositivos como vertederos (sutro) o canales Parshall (garganta).

El desarenador cuenta con un vertedero que regula el caudal, en PTARs grandes es común el uso de vertederos convencionales, mientras que, en las pequeñas, generalmente se usan vertederos sutro.

**Vertedero sotro:** Denominado también vertedero proporcional, tiene la capacidad de dejar pasar un caudal directamente proporcional a la carga. Se emplea como un dispositivo que regula el tirante en desarenadores. Estos tendrían una sección transversal rectangular proporcionando una velocidad constante, aunque el caudal de ingreso sea variable debido a su forma, lo que garantiza la sedimentación de la arena (Juárez Bonilla, 2017).

## 2.5.2 Tratamiento primario

En este nivel de tratamiento, una porción de sólidos y materia orgánica suspendida es removida del agua residual utilizando la fuerza de gravedad como principio. Las cifras de remoción comúnmente alcanzadas en aguas residuales municipales son del 60% en sólidos suspendidos y de 30% en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>). Esta remoción generalmente se lleva a cabo por sedimentación y es considerada como la antesala para el tratamiento secundario (Noyola, et al., 2013). En la siguiente sección, se describe la estructura implementada como tratamiento primario en la PTAR Churuguzo.

### 2.5.2.1 Fosa séptica

Un tanque séptico es un depósito (que puede ser de uno o más compartimentos), impermeable, de escurrimiento continuo y forma rectangular o cilíndrica que recibe, además de la excreta y agua residual proveniente de los inodoros, aguas grises de origen doméstico. Su construcción es generalmente subterránea y puede hacerse de piedra, ladrillo, hormigón u otro material resistente a la corrosión. En algunos diseños el depósito está equipado con pantallas o deflectores colgantes tanto en la entrada, para conseguir una distribución eficaz del agua y evitar altas velocidades, como en la salida, para evitar que escape la capa de espuma y nata que se forman durante su funcionamiento (Ayala Fanola & Gonzales Marquez, 2008). Remueve la mayor parte de sólidos sedimentables, y, además, funciona como un biorreactor anaerobio que promueve la digestión parcial de la materia orgánica (Massoud, et al., 2008)

En la Figura 5, se observa la configuración detallada de la fosa séptica, con sus respectivos límites para el dimensionamiento.

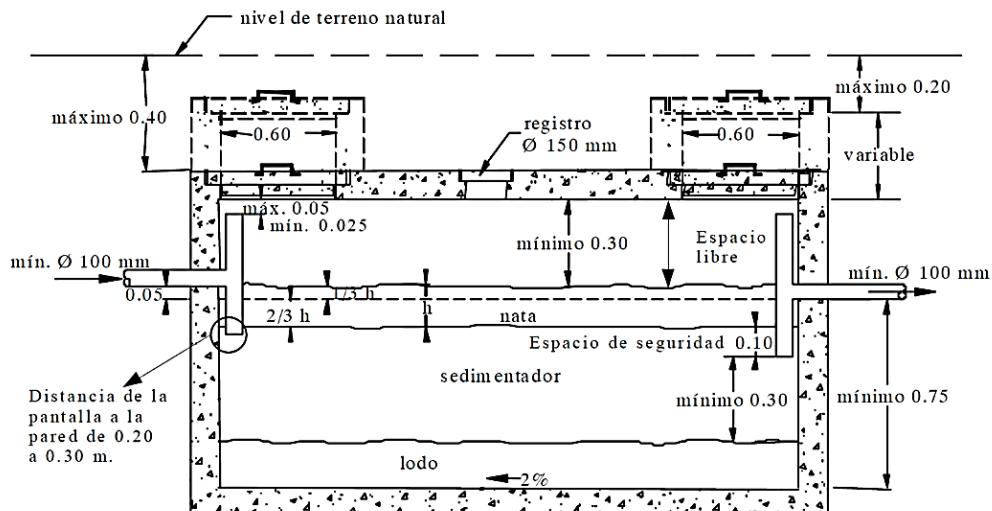


Figura 5: Configuración de un tanque séptico.  
Fuente:(CEPIS, 2005b)



Se presentan los criterios de diseño considerados en base a lo establecido en la "Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización" (CEPIS, 2005b):

- Se requiere un periodo de retención suficiente para la separación de los sólidos y la estabilización de los líquidos. La guía recomienda un periodo mínimo de 6 horas.
- Entre el nivel superior de natas y la superficie inferior de la losa de cubierta deberá quedar un espacio libre de 30 cm, como mínimo.
- La profundidad neta no deberá ser menor a 0,75 m.
- La relación entre el largo y ancho deberá ser como mínimo de 2:1 y como máximo de 5:1.
- El diámetro mínimo de las tuberías de entrada y salida del tanque séptico será de 100 mm (4").
- El nivel de la tubería de salida del tanque séptico deberá estar situado a 5 cm por debajo de la tubería de entrada.
- Los dispositivos de entrada y salida de agua residual al tanque séptico estarán constituidos por Tees o pantallas. Cuando se usen pantallas, éstas deberán estar distanciadas de las paredes del tanque a no menos de 20 cm ni mayor a 30 cm.
- La prolongación de los ramales del fondo de las Tees o pantallas de entrada o salida, serán calculadas por la fórmula  $(0,47/A+0,10)$  ( $A$ : Área superficial del tanque séptico).
- La parte superior de los dispositivos de entrada y salida deberán dejar una luz libre para ventilación de no más de 5 cm por debajo de la losa de techo del tanque séptico.
- Cuando el tanque tenga más de un compartimiento, las interconexiones entre compartimiento consecutivos se proyectarán de tal manera que evite el paso de natas y lodos.
- Si el tanque séptico tiene un ancho  $W$ , la longitud del primer compartimiento debe ser  $2W$  y la del segundo  $W$ .
- El fondo de los tanques tendrá una pendiente de 2% orientada al punto de ingreso de los líquidos.
- En la losa de techo deben colocarse tapas sobre los dispositivos de entrada, salida y conexión entre cámaras. La dimensión de las tapas debe ser mayor a 0.6 m x 0.60 m.

### 2.5.3 Tratamiento secundario

La finalidad es de remover material orgánico y en suspensión remanente del tratamiento primario. Se utiliza procesos biológicos, aprovechando la acción de microorganismos, que en su proceso de alimentación degradan la materia orgánica. La presencia o ausencia de oxígeno disuelto en el agua residual, define dos grandes grupos o procesos de actividad biológica, los aerobios (en presencia de oxígeno) y los anaerobios (en ausencia de oxígeno) (Ayala Fanola & Gonzales Marquez, 2008).

Las unidades de tratamiento secundario más utilizadas en plantas de aguas residuales municipales son: Reactor UASB1, Lagunas de estabilización, Lodo activado convencional, Filtro percolador, Humedales, Filtro anaerobio, Zanja de oxidación, Biodisco. A continuación, y considerando la configuración del sistema de tratamiento en Churuguzo, se describe brevemente la tecnología de tratamiento secundario utilizada.

#### 2.5.3.1 Humedales

Los humedales artificiales consisten en procesos depuración en los que se reproducen los métodos de eliminación de contaminantes que tienen lugar en las zonas húmedas naturales (García Serrano & Corzo Hernández, 2008).

## Humedal de flujo horizontal Sub Superficial

En estos humedales el agua discurre a través del sustrato de forma subterránea por los espacios intersticiales del lecho filtrante y en contacto con los rizomas y raíces de la vegetación del humedal (Huertas, et al., 2013).

De acuerdo con García & Corzo (2008), la profundidad del agua es de entre 0,3 y 0,9 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (el agua se encuentra entre 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie).

Según la dirección en que circulan las aguas estos humedales se clasifican a su vez en dos tipos (Huertas, et al., 2013):

- **Horizontales (HAFSsH):** el agua circula en sentido horizontal a través del lecho. La entrada de agua puede ser continua o intermitente.
- **Verticales (HAFSsV):** el agua circula en sentido vertical a través del lecho. La entrada de agua se realiza de forma intermitente mediante bombeo o sifones de descarga controlada.

Los humedales se emplean fundamentalmente como tratamiento secundario, estando precedidos por un tratamiento primario que elimine la mayor cantidad de sólidos sedimentables y otras sustancias que puedan provocar problemas de atasques o colmatación del lecho o la muerte de especies vegetales.

Los humedales horizontales están compuestos por los elementos descritos a continuación y que se observan en la Figura 6 (García Serrano & Corzo Hernández, 2008):

1. Estructuras de entrada del afluente,
2. Impermeabilización del fondo y laterales ya sea con láminas sintéticas o arcilla compactada,
3. Medio granular,
4. Vegetación emergente típica de zonas húmedas,
5. Estructuras de salida regulables para controlar el nivel del agua.

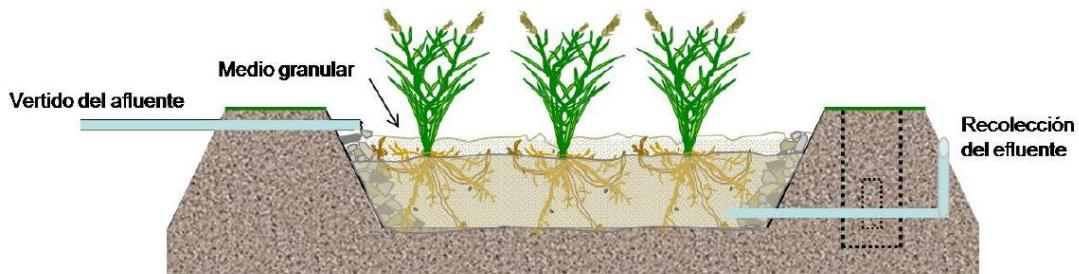


Figura 6: Configuración del Humedal de flujo horizontal sub superficial  
Fuente: (García Serrano & Corzo Hernández, 2008)

De acuerdo con Huertas, et al., (2013), en el sustrato filtrante el agua circula a través del sustrato filtrante y/o de la vegetación. El sustrato sirve como soporte de la vegetación y permite la fijación de la población microbiana (en forma de biopelícula) encargada de la mayoría de los procesos de eliminación de contaminantes.

En los humedales las plantas emergentes acuáticas (macrófitos) proporcionan superficie también para la formación de películas bacterianas, facilitan los procesos de filtración y adsorción (fijación de partículas) de constituyentes del agua residual y contribuyen fundamentalmente a la oxigenación del sustrato. También favorecen la eliminación de nutrientes y controlan el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar (Huertas, et al., 2013).



## Flujo en el Humedal (Flujo Pistón)

El flujo Pistón se da en estos tipos de humedales, implica la circulación del flujo por un tubo con perfil radial plano de velocidad, temperatura y composición. El flujo Pistón, alcanza valores muy bajos de número de Reynolds, esto sucede cuando se excede el esfuerzo de cedencia. En este tipo de flujo, la velocidad es la misma a través del diámetro de la tubería o del espacio anular, excepto para la capa de fluido que está en contra la pared del conducto; es decir, cualquier corte transversal de la sección presenta las mismas propiedades (Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014).

### 2.5.4 Tratamiento terciario

Este tipo de tratamiento se refiere a todo tratamiento que se realiza después del tratamiento secundario con el fin de eliminar compuestos tales como sólidos suspendidos, nutrientes y la materia orgánica remanente no biodegradable. Por lo general, el tratamiento terciario es necesario cuando deben cumplirse condiciones de descarga estrictas (remoción de nutrientes) o cuando el agua tratada está destinada a un uso en específico (Noyola, et al., 2013).

## 2.6 Tecnologías seleccionadas para el tratamiento terciario

### 2.6.1 Filtros Percoladores (*Trickling Filter*)

Según lo especificado en “Wastewater Engineering Treatment and Reuse” (Tchobanoglous, et al., 2003), el filtro percolador es un reactor biológico de película fija no sumergido, que utiliza un medio de roca o plástico, sobre el cual las aguas residuales se distribuyen continuamente. El tratamiento se produce cuando el líquido fluye sobre la biopelícula adherida. La profundidad del empaque de roca varía de 0,9 a 2,5 m. Los lechos de filtración de roca suelen ser circulares y el agua residual líquida se distribuye sobre la parte superior del lecho mediante un distribuidor rotatorio

Además del medio de filtración, otros componentes del filtro percolador incluyen, un drenaje inferior y una estructura para contener el medio. El sistema de drenaje inferior es importante, tanto para recoger el líquido efluente del filtro percolador, como una estructura porosa a través de la cual puede circular el aire (Tchobanoglous, et al., 2003).

En la Figura 7, se presenta el Trickling Filter y cada una de sus partes.

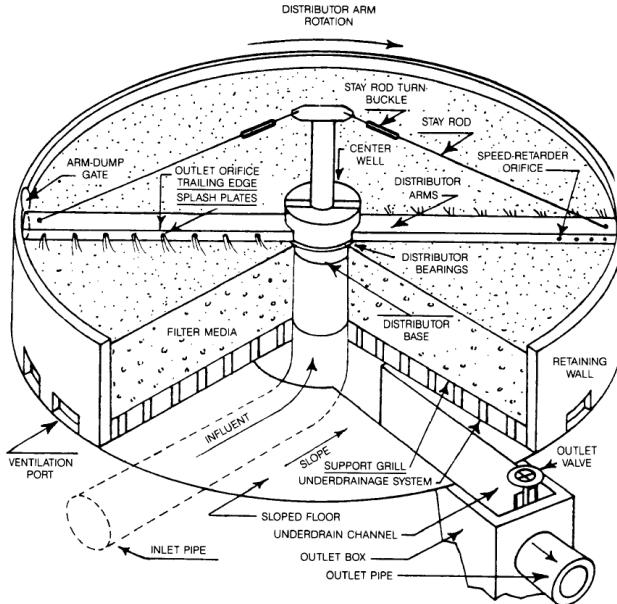


Figura 7: Configuración del Trickling Filter - Filtro Percolador  
Fuente: (U.S. EPA, 2000a)

Los biofiltros producen efluentes de alta calidad (por ejemplo, <20 mg DBO/l y <30 mg SST/l) sin requerir grandes extensiones de tierra ni consumir grandes cantidades de electricidad. En muchas situaciones en los países en desarrollo son mucho más apropiados que los lodos activados (Mara, 2003). De acuerdo con Tchobanoglous, et al., (2003), un tratamiento primario adecuado es necesario antes de los filtros percoladores.

#### 2.6.1.1 Funcionamiento

Las aguas residuales influentes se aplican normalmente en la parte superior a través de brazos distribuidores que se extienden a través del diámetro interno del filtro y tienen aberturas variables para proporcionar una tasa de aplicación uniforme por unidad de área. Los brazos distribuidores giran por un mecanismo de accionamiento eléctrico (Tchobanoglous, et al., 2003).

Se desarrolla una película microbiana en la superficie de la roca y las bacterias de esta "biopelícula" oxidan las sustancias orgánicas de las aguas residuales (es decir, eliminan la DBO) a medida que las aguas residuales sedimentadas fluyen a través del lecho. La biopelícula se vuelve espesa a medida que las bacterias crecen en las aguas residuales sedimentadas. Con el tiempo se vuelve demasiado espesa y parte se corta (a menudo descrito como "desprendido") por el flujo de aguas residuales (Mara, 2003).

La comunidad biológica en el filtro incluye bacterias aerobias y facultativas, hongos, algas y protozoos. También están presentes animales superiores, como gusanos, larvas de insectos y caracoles. Las bacterias facultativas son los organismos predominantes en los filtros percoladores y descomponen el material orgánico en las aguas residuales junto con las bacterias aerobias y anaerobias (Tchobanoglous, et al., 2003).

#### 2.6.1.2 Ventajas y Desventajas

De acuerdo a "Wastewater Technology Fact Sheet - Trickling Filters" (U.S. EPA, 2000a), el Trickling Filter presenta las siguientes ventajas y desventajas:



## Ventajas

- Proceso biológico simple y confiable.
- Adecuado en áreas donde grandes extensiones de tierra no están disponibles para sistemas de tratamiento intensivo.
- Puede calificar para estándares equivalentes de descarga secundaria.
- Eficaz en el tratamiento de altas concentraciones de orgánicos en función del tipo de medio utilizado.
- Apropiado para comunidades pequeñas y medianas.
- Reduce rápidamente la DBO<sub>5</sub> soluble en las aguas residuales aplicadas.
- Requisitos de baja potencia.
- Nivel moderado de habilidad y experiencia técnica necesarios para administrar y operar el sistema.

## Desventajas

- Es posible que se necesite un tratamiento adicional para cumplir con los estándares de descarga más estrictos.
- Posible acumulación de exceso de biomasa que no puede retener una condición aerobia y puede afectar el rendimiento del Filtro Percolador (el espesor máximo de biomasa se controla mediante la tasa de dosificación hidráulica, el tipo de medio, el tipo de materia orgánica, la temperatura y la naturaleza del crecimiento biológico).
- Requiere atención regular del operador.
- La incidencia de obstrucciones es relativamente alta.
- Requiere cargas bajas dependiendo del medio.
- La flexibilidad y el control son limitados en comparación con los procesos de lodos activados.
- Problemas de olores.

### 2.6.1.3 Criterios de Diseño

De acuerdo a "Wastewater Technology Fact Sheet - Trickling Filters" (U.S. EPA, 2000a), existen ciertos criterios de diseño, mismos que se presentan a continuación:

- Los lechos de roca o escoria pueden tener hasta 60,96 metros (200 pies) de diámetro y 0,9 -2,4 metros (3 a 8 pies) de profundidad, con un tamaño de roca que varía de 2,5 a 10,2 cm (1 a 4 pulgadas).
- El diseño de un sistema de filtro para aguas residuales también incluye un sistema de distribución. La distribución hidráulica rotativa suele ser estándar para este proceso.
- Un Filtro Percolador tiene un sistema de drenaje que recolecta el filtrado y los sólidos, y también sirve como fuente de aire para los microorganismos en el filtro. Las aguas residuales tratadas y los sólidos se canalizan a un tanque de sedimentación donde se separan los sólidos.
- Por lo general, parte del líquido de la cámara de sedimentación se recircula para mejorar la humectación y el lavado del medio filtrante, optimizando el proceso y aumentando la tasa de eliminación.
- Para suministrar aire al sistema, la corriente de aire natural y las fuerzas del viento suelen ser suficientes si se proporcionan puertos de ventilación suficientemente grandes en la parte inferior del filtro y el medio tiene suficiente área vacía.

Para el dimensionamiento de esta tecnología, se sigue el proceso descrito en "Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries" (Mara, 2003), en el apartado de Diseño, sección 19 Biofiltros.



Los biofiltros son reactores de flujo pistón, en los que la eliminación de DBO está razonablemente bien representado por la cinética de primer orden. La DBO del efluente (después de la sedimentación) viene dada por la ecuación (1).

$$Le = Li * e^{(-\frac{K_T \cdot V \cdot S}{Q})} \quad (1)$$

Donde:

- $Le$  = Carga del efluente en mg/l;
- $Li$  = Carga del afluente en mg/l;
- $V$  = Volumen del biofiltro, m<sup>3</sup>;
- $S$  = Área de superficie específica, m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>;
- $Q$  = Caudal, m<sup>3</sup>/d
- $K$  = Constante de tasa modificada, m/d;

La ecuación (1) representa el volumen requerido para el Trickling Filter, misma que se deduce de la ecuación (2).

$$V = \ln\left(\frac{Le}{Li}\right) * \left(-\frac{Q}{K_T \cdot S}\right) \quad (2)$$

Dado que K varía con respecto a la temperatura, se realizaron estudios a escala piloto en Inglaterra (Mara, 2003), los cuales mostraron que:

$$K_T = 0.037 * (1.08)^{(T-15)} \quad (3)$$

## 2.6.2 Filtro de medios Horizontal (*Horizontal Roughing Filter - HRF*)

Los filtros de medios horizontales (HRF) se han utilizado ampliamente como un sistema natural, ecológico y rentable para mejorar la calidad del agua (Daee, et al., 2019). Los filtros se pueden considerar como un proceso de pretratamiento importante para las aguas residuales, ya que el proceso separa de manera eficiente las partículas sólidas finas durante períodos prolongados, sin la adición de productos químicos (Nkwonta, 2010).

Los filtros de medios actúan principalmente como filtros físicos y reducen la masa sólida (Daee, et al., 2019). El diseño y la configuración de los HRF se asemejan a los sistemas verdes de los humedales construidos (CW); prácticamente, los HRF pueden considerarse lechos CW no plantados (Nkwonta, 2010).

Los HRF se utilizan ampliamente como etapa de pretratamiento, especialmente cuando las concentraciones de Sólidos Suspensos Totales (SST) y Turbidez son altas, así como para reducir la carga orgánica de entrada en procesos de oxidación o lodos activados (Nkwonta, 2010).

### 2.6.2.1 Funcionamiento

El tipo de agregados en los HRF son principalmente arenas y gravas que pueden ser sustituidas por cualquier material insoluble y limpio de alta resistencia mecánica. Normalmente, en HRF se utilizan medios de grava simples con diferentes tamaños. El primer compartimento del HRF suele tener el material más grueso, el compartimento final aguas abajo el más fino y un compartimento intermedio un tamaño de grava intermedio (Nkwonta, 2010).



Hay muchos estudios que prueban que el uso de arena, arcilla y grava ha demostrado reducir en gran medida los patógenos; la arena de cuarzo puede reducir E. coli en un 54% y la arcilla de pirofilita puede reducir E. coli en un 94% (Kang, et al., 2013)

La Figura 8, presenta el diseño de un filtro de medios horizontal típico, además muestra cómo cambia el tamaño de partícula con el flujo del efluente.

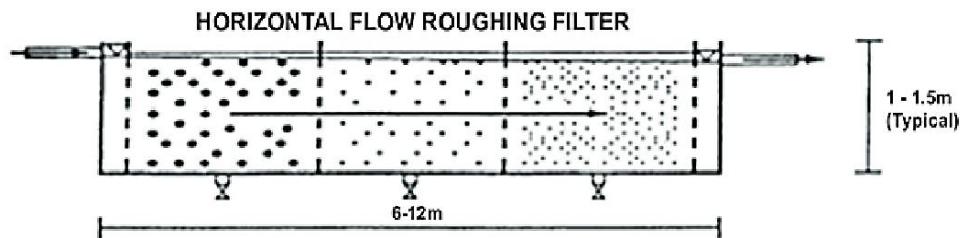


Figura 8: Diagrama de un filtro de medios horizontal  
Fuente: (Nkwonta, 2010)

Como se muestra en la Figura 8, la longitud ilimitada del filtro y el diseño simple son las principales ventajas de los filtros de medios horizontales. Normalmente, la longitud del filtro es de 5 a 9 m, el ancho de 2 a 5 m y la profundidad de alrededor de 1,5 m. Sin embargo, no existen pautas ampliamente aplicadas para la longitud del filtro. Se considera que cuanto mayor es la longitud del filtro, mayor es la eficiencia. (Nkwonta, 2010)

Los filtros de medios horizontales tienen una gran capacidad de almacenamiento de sedimentos. Los sólidos se depositan en la parte superior de la superficie del medio filtrante y se convierten en pequeños montones de agregados sueltos con un tiempo de filtración progresivo. Parte de los pequeños montones se desplazarán hacia el fondo del filtro tan pronto como se vuelvan inestables. (Nkwonta, 2010)

### 2.6.2.2 Ventajas y Desventajas

Patil, et al., (2012), establecen las ventajas y desventajas de este filtro, las mismas que se describen a continuación:

#### Ventajas

- El sistema convencional es bastante exigente en el uso de productos químicos, entrada de energía y piezas mecánicas, así como mano de obra calificada que a menudo no está disponible. Pero los filtros de medios no requieren el uso de productos químicos y piezas mecánicas.
- El HRF es una tecnología más barata a comparación con el costo operativo de las tecnologías de tratamiento convencional.
- Elimina la materia sólida del agua de forma más eficaz al reducir la profundidad de sedimentación.
- El filtro de medios tiene una eficiencia de reducción del 90% en el contenido de sólidos, y del 90-99% en el contenido de coliformes.
- Es una tecnología adecuada para entornos rurales
- El HRF puede hacer frente a una turbidez relativamente alta del agua cruda, mientras que al mismo tiempo ofrece un tiempo de funcionamiento prolongado del filtro.



## Desventajas

- La eliminación de color es de regular a pobre.
- En algunos casos, requiere una gran superficie de tierra para un tratamiento eficaz.
- Solo puede manejar concentraciones relativamente bajas de desechos en comparación con los métodos convencionales.
- También puede manejar cargas orgánicas muy bajas en comparación con los métodos de tratamiento convencionales, como el proceso de lodos activados.
- No puede tratar la suspensión coloidal, ya que necesitaría un coagulante y limpieza del filtro.

### 2.6.2.3 Criterios de Diseño

El diseño de HRF sigue siendo más o menos empírico y hasta ahora se ha prestado poca atención al modelado numérico del rendimiento de HRF (Nkwonta, 2010). Los parámetros para el diseño del filtro de medios horizontal incluye lo siguiente:

1. Tamaños de partículas en los medios filtrantes
2. Tasa de filtración
3. Longitud del filtro
4. Alto y ancho

#### Tamaños de partículas en los medios filtrantes

El tamaño de las partículas del medio filtrante disminuye sucesivamente en la dirección del flujo de agua e idealmente la uniformidad de las fracciones del medio filtrante se maximiza para aumentar el espacio poroso del filtro (capacidad de almacenamiento) y ayudar en la limpieza del filtro (Daee, et al., 2019).

Wegelin (1996) proporciona los grados comunes de los medios utilizados en los filtros, los cuales se muestran en la Tabla 3.

Descripción del medio	Primer compartimento (mm)	Segundo compartimento (mm)	Tercer compartimento (mm)
Grueso	24 - 16	18 - 12	12 - 8
Normal	18 - 12	12 - 8	8 - 4
Fino	12 - 8	8 - 4	4 - 2

Tabla 3: Tamaños de los medios filtrantes para el TRH

Fuente: (Wegelin, 1996)

#### Tasa de filtración

Se logra una mejor eficiencia en la eliminación de contaminantes con tasas de filtración bajas, ya que las tasas de filtración bajas son críticas para retener las partículas que se depositan gravitacionalmente en la superficie del medio (Daee, et al., 2019).

Wegelin, et al., (1987), encontraron que a velocidades de filtración aumentadas (2 m/h), las partículas gruesas penetran más profundamente en el lecho y causarán una disminución en la eficiencia del filtro. Mientras que a 1 m/h hubo una buena distribución de la carga de sólidos en todo el lecho. Barrett, et al., (1991) también sugirieron que la tasa de filtración normal de los filtros de medios horizontales está entre 0.3 y 1.5 m/h.



### Longitud del filtro

La eficiencia del filtro se relaciona típicamente con longitudes de filtro más largas; sin embargo, la eficiencia tiende a disminuir con el aumento de la longitud del filtro, debido a la eliminación de partículas más grandes al principio del filtro (Wegelin, 1996).

Lee (2003), indicó que las eficiencias de remoción están típicamente correlacionadas con longitudes de filtro más largas, a expensas de la caída de presión. Sin afectar la eficiencia de eliminación, la longitud del filtro y por lo tanto la caída de presión se pueden reducir con el uso de varios tamaños de agregados.

### Altura y ancho

La altura H (m) y la anchura W (m) dependen de los aspectos estructurales y operativos. La profundidad del lecho del filtro también afecta la eficiencia de los filtros de medios, aumentar la profundidad del lecho del filtro mejorará el rendimiento general y la eliminación de coliformes (Nkwonta, 2010).

Wegelin (1996), recomienda estructuras poco profundas de aproximadamente 1 - 2 m para evitar problemas con respecto a la estanqueidad. En vista de una posible limpieza manual del filtro, incluso se recomiendan estructuras de 1 m de profundidad para una fácil eliminación del material del filtro. Por el contrario, (Reed & Kapranis, 1998) describieron que no hubo diferencia significativa entre dos profundidades de lecho de 0,75 y 1,0 m. Aunque no discutieron en detalle, la razón podría ser que usaron medios filtrantes de gran tamaño en el experimento.

El ancho de los filtros también debe limitarse para permitir una limpieza hidráulica eficiente y evitar problemas de eliminación del agua de lavado. Por lo tanto, el ancho del filtro generalmente no debe exceder de 4 a 5 m y el área de sección transversal del filtro de 4 a 6 m<sup>2</sup> (Wegelin, 1996).

Se concluye que el rendimiento del filtro de medios depende de la concentración de sólidos afluente, el tamaño de las partículas, el tamaño del medio filtrante, la profundidad del lecho y la tasa de filtración (Nkwonta, 2010). El diseño de filtros se convierte más en un arte, que en una ciencia cuando se intenta determinar la combinación óptima de tamaño del medio y profundidad del lecho para una fuente de agua en particular (Wegelin, 1996).

### 2.6.3 Peat Filter

El tratamiento de las aguas residuales urbanas, mediante la tecnología de filtro de turba, se basa en la filtración de las aguas a través de lechos que emplean turba como material filtrante. La turba es un tipo de humus, que se forma en las condiciones anaerobias propias de los medios saturados con agua. Este sustrato presenta un conjunto de propiedades físico químicas que le hacen especialmente apto para su aplicación en el campo de la depuración de los vertidos líquidos urbanos. Las aguas residuales a su paso por la capa de turba, experimentan una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, que dan como resultado efluentes depurados (Alianza por el Agua, 2018). En la Figura 9, se presenta el Peat Filter y cada una de sus partes.

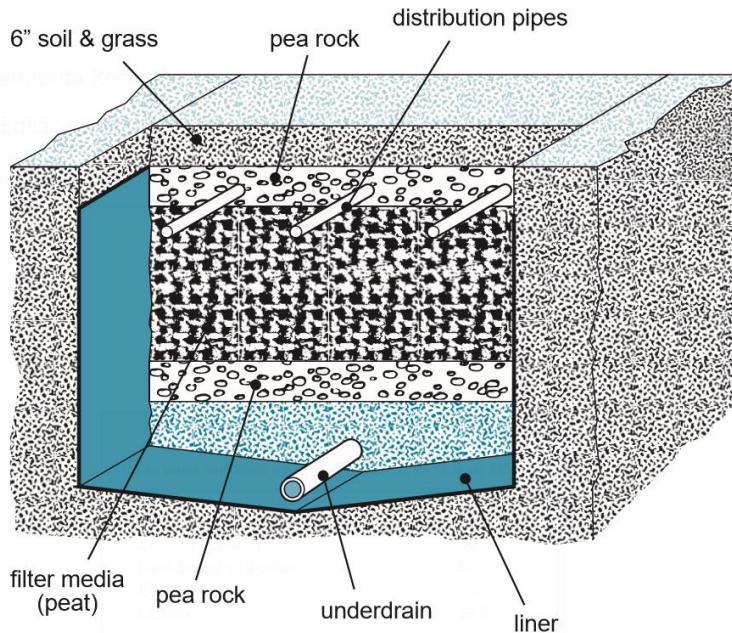


Figura 9: Configuración del Peat Filter  
Fuente: (Gustafson, et al., 2001).

#### 2.6.3.1 Funcionamiento

De acuerdo a lo mencionado en Gustafson, et al., (2001), el Peat Filter tiene tres componentes, que son: la turba, un sistema de distribución de presión y un sistema de drenaje. Con un sistema de distribución por gravedad, las aguas residuales pueden acumularse sobre la turba y comprimirla, reduciendo el flujo de aguas residuales a través del filtro. Con un sistema de distribución de presión, las aguas residuales se aplican uniformemente sobre la superficie de la turba, lo que permite una rápida infiltración. El drenaje es un revestimiento o módulo que contiene el efluente dentro del filtro. Las aguas residuales deben moverse a través de la turba en condiciones insaturadas. La capa de turba debe tener entre 0.6m y 0.8m de profundidad.

Los requisitos que deben cumplir las turbas según el “Manual de depuración de aguas residuales urbanas” (Alianza por el Agua, 2018), son los presentados en la Tabla 4.

Descripción	Valor	Unidades
pH	6-8	-
Humedad	50 - 60	%
Cenizas	40 - 50	%
Materia Orgánica por Calcinación	50 - 60	%
Extracto Húmico total	20 - 30	%
Ácidos Húmicos	10 - 20	%
Relación C/N	20 - 25	-
Nitrógeno Kjeldhal	1.2 - 1.5	%
Hierro	< 9000	mg/kg
Conductividad Hidráulica	25	l/m <sup>2</sup> *h

Tabla 4: Requisitos de las turbas para su empleo en la depuración de Aguas Residuales  
Fuente: (Alianza por el Agua, 2018)



### 2.6.3.2 Ventajas y Desventajas

A continuación, se presentan las ventajas y desventajas que posee el Peat Filter de acuerdo al “Manual de depuración de aguas residuales urbanas”:

#### Ventajas

- Desde el momento de su puesta en marcha se logra un elevado grado de depuración de los vertidos mediante procesos fisicoquímicos, por lo que son muy adecuados para el tratamiento de las aguas residuales generadas en aglomeraciones con fuertes oscilaciones de población.
- Presentan una elevada capacidad para absorber sobrecargas hidráulicas y orgánicas.
- Buen comportamiento a bajas temperaturas.
- Requieren poca superficie para su implantación, la menor de todas las tecnologías no convencionales.
- Sencillez de operación, tan sólo hay que proceder al cambio de los filtros en operación conforme van acabando sus ciclos operativos.
- Bajos costes de mantenimiento.
- Las labores de mantenimiento son típicamente agrícolas (rastrillado, escarificado), por lo que no se requiere personal cualificado.
- El sistema puede operar sin ningún consumo energético si las aguas a tratar llegan por gravedad hasta la estación depuradora
- Inexistencia de averías al carecer de equipos mecánicos.
- No se producen lodos sino una costra seca fácilmente manipulable.
- Escasos impactos ambientales:
  - Ausencia de ruido, al no contar con equipos electromecánicos.
  - Ausencia de olores, gracias a las propiedades de adsorción de la turba.
  - Escaso impacto visual al construirse excavados en el terreno.

#### Desventajas

- Dependencia de las condiciones pluviométricas que inciden sobre los tiempos necesarios para el secado de la costra superficial y, en consecuencia, afectan a la superficie necesaria de los lechos. Una pluviometría muy elevada invalida la implantación de esta tecnología.
- Mayor necesidad de mano de obra que otras Tecnologías no Convencionales al tener que procederse al final de cada ciclo de filtración a la regeneración de los filtros agotados.
- Necesidad de proceder a cambiar la turba cada 6-8 años de operación.
- Los efluentes suelen presentar una ligera coloración amarilla consecuencia del arrastre de componentes de las propias turbas.
- El DQO y pH en el efluente presentan valores bajos de remoción debido a la degradación de la turba.

### 2.6.3.3 Criterios de diseño

De acuerdo a Gendarillas (2016), el diseño de los lechos de turba se establece mediante el caudal de percolación del agua residual a través de la turba, en litros hora por metro cuadrado de superficie del lecho. Los parámetros para dimensionar un lecho de turba se resumen en los siguientes puntos:

- Percolación turba clara, 50 – 80 l/h m<sup>2</sup>
- Percolación turba parda, 20 – 50 l/h m<sup>2</sup>
- Carga hidráulica < 2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día

- Carga orgánica < 0,5 kg DBO5/m<sup>2</sup>/día
- Carga de sólidos < 0,5 kg SS/m<sup>2</sup>/día
- Reserva para labores limpieza y mantenimiento: 50% de la superficie calculada
- Funcionamiento varios lechos: Paralelo
- Rendimiento DBO5: 85% - 90%
- Rendimiento SS: 90% - 95%

#### 2.6.4 Vermifiltro

El Vermifiltro se utiliza como una tecnología ecológica para tratar efluentes domésticos e industriales. Ofrecen un sistema de tratamiento natural alternativo sobre el tratamiento convencional, de bajo consumo energético, especialmente para comunidades pequeñas y ubicaciones remotas (Singh, et al., 2017). Es un filtro biológico que combina los conocimientos del proceso de filtración convencional y las técnicas de vermicompostaje, contiene lombrices y microorganismos asociados que degradan la materia orgánica presente en el agua residual y diferentes capas de empaque que actúan como un filtro percolador, ofreciendo valores añadidos frente a tecnologías biológicas convencionales (Manyuchi, et al., 2013a).

La tecnología de Vermifiltración abarca todas las formas de tratamiento en una sola unidad, en el primario se da la eliminación de limo, arena, etc., en cuanto al secundario produce la eliminación de materia orgánica y en el terciario se da la eliminación de patógenos/desinfección. No obstante, esta tecnología se puede utilizar de forma independiente o en combinación con otras tecnologías (Arora, 2020). En la Figura 10, se muestra la configuración típica de un Vermifiltro.

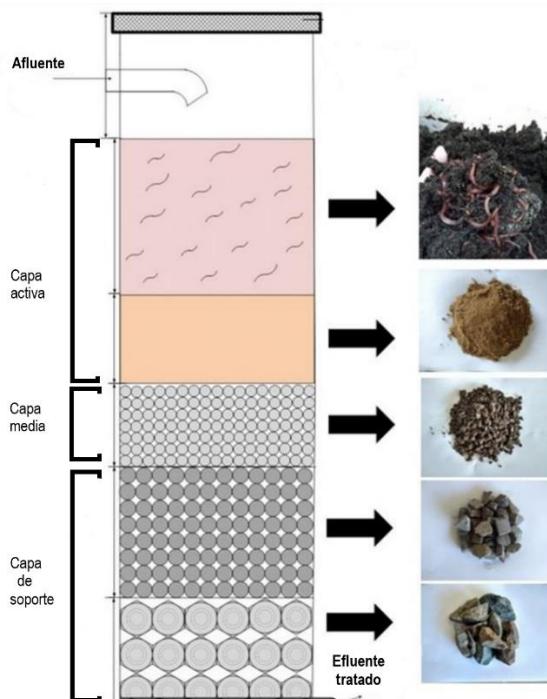


Figura 10: Configuración típica del Vermifiltro  
Fuente: (Rothmund & Becker, 2018)



#### 2.6.4.1 Funcionamiento

La Vermifiltración es el proceso de tratamiento de aguas residuales mediante la acción conjunta de lombrices y microbios, minimizando considerablemente la contaminación del agua, centrándose en la reutilización de aguas residuales tratadas. Las lombrices de tierra ingieren y digieren las partículas del suelo junto con los contaminantes provenientes de las aguas residuales o los lodos, modificando sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Posteriormente, estas propiedades ayudan a mejorar la actividad microbiana dentro del Vermifiltro (Singh, et al., 2017).

De acuerdo con Singh, et al., (2017), el sistema de Vermifiltración tiene dos componentes principales, la capa de soporte y la capa con las lombrices de tierra. Ambos componentes juegan un papel importante en la eliminación de los contaminantes.

#### 2.6.4.2 Especies y densidad de lombrices de tierra

Puede ser necesario operar el Vermifiltro en presencia de mucha humedad y, a veces, en condiciones de anegamiento. A partir de varios estudios se observa que las lombrices de tierra, que son capaces de tratar aguas residuales con mayores niveles de humedad son: Eisenia fétida (*Eisenia fétida*), *Perionyx sansibaricus*, *Lumbricus rubellus*, *Eudrilus Eugeniae*, *Eisenia Hortensis*.

En la Tabla 5, se muestra la eficiencia de tratamiento de varias especies de lombrices de tierra, con diferentes tipos de aguas residuales.

Tipo de agua residual	Especies de lombrices de tierra	Eliminación de Materia Orgánica (%)	Eliminación de Nutrientes (%)	Material y tamaño del sustrato	HLR (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *día)	TRH (h)
Agua residual	<i>Eisenia fétida</i>	DBO 98, DQO 45, SST 90	-	Suelo puro, arena (10-12mm), grava (7.5, de 3.5-4.5mm)	-	1-2
Efluente de industria láctea	Lombrices de tierra	DBO 98, DQO 80-90, SST 90-95	-	Suelo puro, arena (10-12mm), grava (7.5, de 3.5-4.5mm)	-	6-10
Agua residual sintética	<i>Eisenia fétida</i>	DQO 83.6	NTK 63, TP 86.7	Adoquines (6-10cm), suelo, aserrín	0.2	48, 72, 96
Agua residual urbana	<i>Perionyx sansibaricus</i>	DQO 80-90, SST 88.6	Nitrato 92.7, Fosfato 98.3	Vegetación superficial, hojas secas, aserrín, piedras pequeñas (5-7cm), piedras (10-15cm)	-	1
Agua residual sintética	<i>Eisenia fétida</i>	DBO 96, DQO 90	-	Vermicompost, material de lecho de río (6-8mm), arena (1-2mm), grava (10-12.5mm)	1.5,2,2.5,3	-
Agua residual urbana	<i>Eisenia fétida</i>	DBO 98.5, DQO 74.3, SST 96.6	Amonio 99.1	Vermicompost, arena de cuarzo, grava 40mm	2.6, 1.3, 0.8, 0.6	2, 4, 6, 8
Agua residual sintética	<i>Eisenia fétida</i>	DBO 70-81, DQO 59-72, SST 55-75	-	Vermicompost, arena (2-4mm), material de lecho de río, carbón de madera, bolas de cristal, bolas de barro, grava (10-12.5mm)	1.5	-

Tabla 5: Eficiencia de tratamiento de varias especies de lombrices de tierra, con diferentes tipos de aguas residuales  
Fuente: (Patel, 2018)

La *Eisenia fétida* es la especie más versátil, esto debido a su alta tasa de crecimiento, alta eficiencia productiva, tolerancia a factores ambientales y su fácil manejo (Sinha, et al., 2014).

Siempre es necesario mantener una concentración óptima de lombrices de tierra, ya que la baja densidad puede no estimular a las mismas y las actividades microbianas no se desarrollan de manera eficaz (Li, et al., 2013). Se ha sugerido que los sistemas de Vermifiltración deben iniciarse con una gran población de lombrices de tierra; al menos de 15000 a 20000 lombrices/m<sup>3</sup>. La población de gusanos debería aumentar después de la puesta en servicio y fluctuar con la carga de los sistemas. Una disminución significativa en la población de gusanos puede indicar que las condiciones ambientales dentro del sistema de tratamiento no son ideales (Baumgartner, 2013).



#### 2.6.4.3 Condiciones ambientales óptimas para las lombrices

Las lombrices de tierra requieren ciertas condiciones para sobrevivir y optimizar su potencial de procesamiento de desechos. Las condiciones ambientales deben cumplirse para garantizar que las poblaciones de gusanos prosperen y las aguas residuales se traten con un estándar suficiente (Solis, et al., 2012). De acuerdo con Baumgartner (2013), los factores ambientales clave que afectan los sistemas de Vermifiltración son:

**pH:** puede oscilar entre 4.5 y 9, en el cual las lombrices de tierra pueden sobrevivir, siendo el pH óptimo 7.

**Temperatura:** los estudios han encontrado que el rango de temperatura óptimo para la degradación de los desechos es de 15 a 25°C. No obstante, son capaces de soportar un rango de temperaturas de 10 a 30°C.

**Humedad:** Su contenido óptimo en un sistema de Vermifiltración es del 60 al 75% de la capacidad de retención de agua del suelo, es decir, que las lombrices necesitan un ambiente húmedo para sobrevivir.

**Ambiente aerobio:** los gusanos son organismos aerobios que requieren ambientes oxigenados para sobrevivir y prosperar, por lo tanto, es de vital importancia que el filtro no tenga áreas que se vuelvan anaerobias, ya que los gusanos morirán en estas áreas y cesará el tratamiento aerobio.

#### 2.6.4.4 Ventajas y desventajas

##### Ventajas

- La Vermifiltración posee la capacidad de estimular y mejorar la flora bacteriana para reducir los patógenos enormemente presentes en el sistema (Li, et al., 2008).
- El efluente obtenido de la Vermifiltración es de naturaleza altamente nutritiva y se puede aplicar a cultivos agrícolas, jardinería y otros propósitos de reutilización (Singh, et al., 2017).
- Este sistema ofrece una eficacia de reducción efectiva del carbono (C) y la fijación de la concentración de nitrógeno (N) y fósforo (P) en las aguas residuales o su incorporación a la matriz sólida por el mecanismo de adsorción (Li et al., 2015; Xu et al., 2013).
- A pesar de ser un sistema de tratamiento aerobio, no se producen lodos por Vermifiltración, mientras que en el tratamiento aerobio convencional se genera una gran cantidad de lodos (Singh, et al., 2017).

Patel (2008), establece ciertas ventajas del Vermifiltro tales como:

- El tratamiento de Vermifiltración es poco dependiente de la energía y tiene una clara ventaja sobre todos los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales convencionales: el proceso de lodos activados, los filtros percoladores y los contactores biológicos rotativos, que requieren mucha energía, son costosos de instalar y operar, y no generan ningún ingreso.
- En el proceso de Vermifiltro hay captura del 100% de materiales orgánicos, los costos de capital y operativos son menores, y hay un producto final de alto valor agregado (Vermicompost).
- El humus que se descarga del Vermifiltro (vermicompost), es un aditivo de suelo útil para agricultura y horticultura.
- No hay mal olor, ya que las lombrices de tierra detienen la descomposición de todas las materias putrescibles en las aguas residuales.
- Se dispondrá de grandes cantidades de biomasa de gusanos como alimento para el ganado, las aves de corral y la piscicultura, después el primer año de tratamiento.
- Puede utilizar desechos orgánicos que de otra manera no podrían ser utilizados por otras tecnologías.
- Logra una mayor utilización de los materiales de desecho que no se puede lograr con otras tecnologías.



### Desventajas

- No existe información confiable o bibliografía bien documentada disponible para explicar el mecanismo de eliminación de fósforo (Singh, et al., 2017).
- En climas extremadamente fríos puede afectar en la proliferación de las lombrices en el lecho (Salazar Miranda , 2005).

El Gobierno de Chile CONAMA menciona las siguientes desventajas:

- Requiere de un proceso de adaptación.
- No soporta variaciones grandes de carga ni caudal.
- No es recomendable para tratar grandes volúmenes de efluente.

De acuerdo con (Gallegos Valqui, 2019) el Vermifiltro presenta las siguientes desventajas:

- Necesita de bombeo constante: El lombrifiltro debe ser permanentemente regado con las aguas residuales debido a que el material orgánico que contiene es el alimento para las lombrices y en periodos largos sin riego, sería perjudicial.
- Sensible a sustancias tóxicas y a variaciones bruscas de pH: Debido a que en el sistema habitan organismos vivos, estos son muy sensibles y resultan perjudicados tanto al ingerir o estar en contacto con estos compuestos.
- Reposición del sustrato orgánico: Aproximadamente cada año el material orgánico de la capa activa, debe ser reemplazado por uno nuevo para reponer el anterior que ha sido transformado en humus.

#### 2.6.4.5 Criterios de diseño del sistema

##### Carga hidráulica

La tasa de carga hidráulica del Vermifiltro (HLR) es el volumen de aguas residuales aplicadas por unidad de área del lecho de suelo por unidad de tiempo (Manyuchi, et al., 2013a).

De acuerdo con la investigación de Kumar et al. (2014), en la cual se realizaron estudios con diferentes cargas hidráulicas: de 1.5, 2, 2.5 y 3  $m^3/(m^2*día)$ , el autor sostiene que  $2.5\ m^3/(m^2*día)$ , es la carga hidráulica más eficiente en la remoción de DBO. La Figura 11, muestra los resultados de su estudio, que analiza diferentes valores de HLR y el impacto en la DBO. Si bien la DBO no es una medida directa de coliformes fecales, esta reducción indica que es probable que las bacterias se hayan reducido debido a la menor demanda de oxígeno.

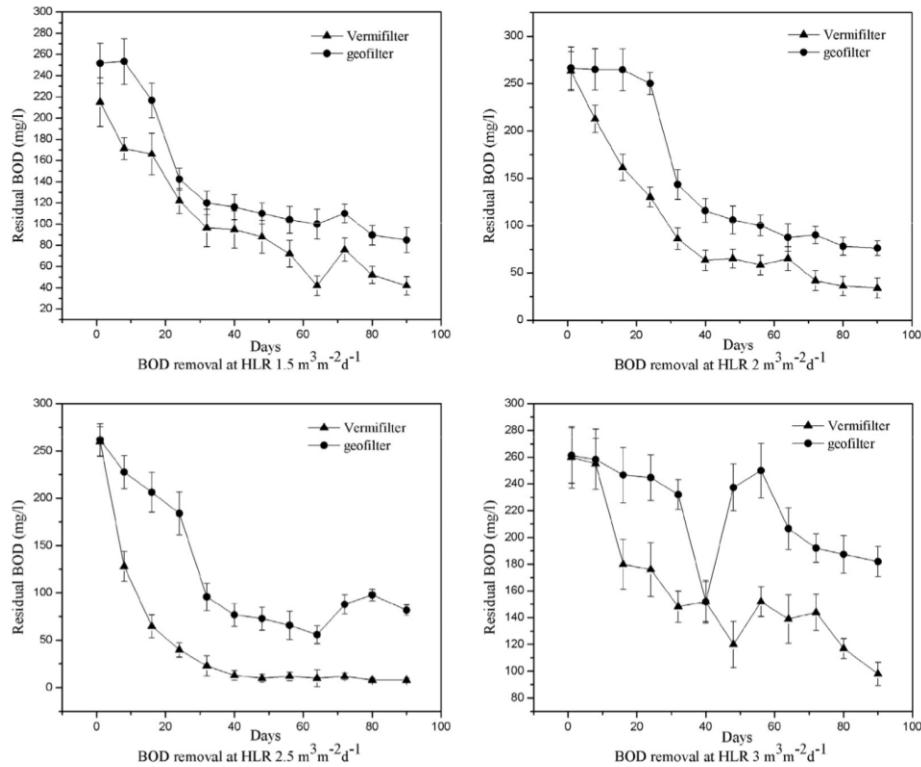


Figura 11: Remoción de DBO con diferentes cargas hidráulicas

Fuente: (Kumar, et al., 2014)

Una alta tasa de carga hidráulica conduce a una reducción de la TRH en el Vermifiltro, lo que reduce la eficiencia del tratamiento del Vermifiltro (Manyuchi, et al., 2013a). En la ecuación (4), se muestra la expresión usada para determinar la carga hidráulica.

$$\text{HLR} = \frac{\text{Vw}}{(\text{A} \times \text{t})} \quad (4)$$

Donde:

- HLR = Tasa de carga hidráulica (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día)
- Vw = Caudal volumétrico de aguas residuales (m<sup>3</sup>)
- A = Área del lecho de suelo expuesta (m<sup>2</sup>)
- t = Tiempo que tardan las aguas residuales en fluir a través del lecho del suelo (h)

La carga hidráulica también se puede expresar con la ecuación (5):

$$\text{HLR} = \frac{\text{Qw}}{\text{A}} \quad (5)$$

Donde:

- Qw = Caudal de aguas residuales a través del lecho de suelo (m<sup>3</sup>/h)

#### Tiempo de retención hidráulico (TRH)

El tiempo de retención hidráulica del Vermifiltro (TRH) es el tiempo que tardan las aguas residuales en fluir a través del lecho de suelo en el que habitan las lombrices de tierra, las mismas que utilizan la materia orgánica como fuente de alimento (Sinha, et al., 2008; Sinha, et al., 2007).



Durante este período, se genera una reducción de la DBO, DQO, SST y la turbidez de las aguas residuales, por medio de la actividad de las lombrices de tierra que implica procesos físicos y bioquímicos para remover nutrientes, (Xing, et al., 2012; Kharwade & Khedikar, 2011; Ghatnekar, et al., 2010). Cuanto más tiempo permanezcan las aguas residuales en el lecho del suelo, mayor será la eficiencia del proceso de Vermifiltración (Manyuchi, et al., 2013a).

El aumento del espesor de la capa donde se encuentran las lombrices y el número de ellas, influyen en el incremento del TRH (Manyuchi, et al., 2013a).

La TRH en un proceso de Vermifiltración se puede calcular por medio de la ecuación (6).

$$\text{TRH} = \frac{(\rho \times V_s)}{Q_w} \quad (6)$$

Donde

- TRH = Tiempo de retención hidráulica (h)
- Vs = Volumen de la capa de sólidos ( $m^3$ )
- $\rho$  = Porosidad del lecho Vermifiltro
- Qw = Tasa de flujo de aguas residuales a través del lecho del suelo ( $m^3/h$ )

#### 2.6.4.6 Criterios de diseño en la configuración de las capas

El Vermifiltro está formado por una capa que contiene a las lombrices, denominada capa activa, un estrato subsecuente que sirve de alimento para las mismas, y finalmente consta del medio filtrante, que se utiliza como soporte y está conformado por capas de agregados de distintos tamaños. Este conjunto de capas conforma la altura útil del Vermifiltro, la cual no incluye el espacio libre que se encuentra sobre la superficie del lecho. En la Figura 12, se aprecia la configuración general de un Vermifiltro.

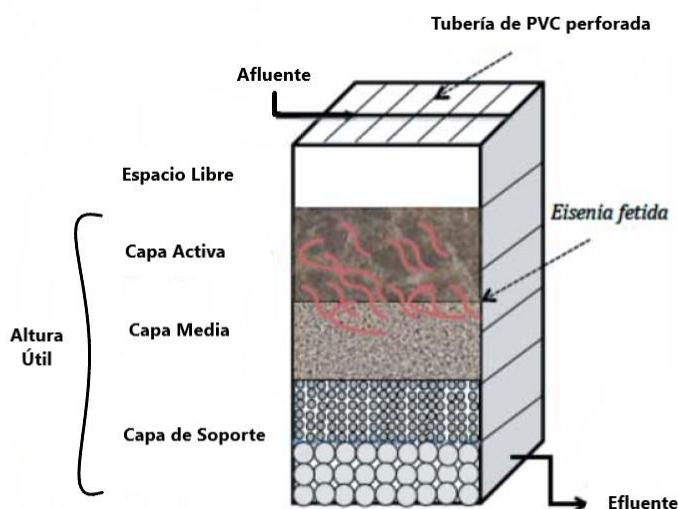


Figura 12: Configuración típica de las capas de un Vermifiltro  
Fuente: (Arora & Kazmi, 2015)



El agua residual es distribuida en la superficie de la capa con lombrices y percola por el medio filtrante. La materia orgánica es consumida por las lombrices y transformada en humus, el medio filtrante contribuye a la filtración y tratamiento del agua residual debido a que absorbe las impurezas orgánicas en su superficie (Bhise & Anaokar, 2015).

### **Capa activa**

Los materiales que brindan un hábitat para las lombrices deben cumplir con ciertas características, tales como: gran capacidad de absorción y retención de agua, bajo contenido de nitrógeno y proteínas. Esta capa tiene como objetivo proteger a las lombrices de temperaturas extremas y regular los niveles de oxígeno y humedad (Munroe, 2007). Por ende, el material de esta capa debe tener una capacidad de retención de humedad entre 50 al 90 % y conservar temperaturas entre 10 a 32°C (Cardoso, et al., 2011; Zhao, et al., 2012).

La capa activa del Vermifiltro consiste en una capa de tierra con lombrices, la cual está conformada por partículas con diámetros entre 0.6 a 20 mm (Xing, et al., 2012; Arora, et al., 2014a) y una capa de soporte orgánico, en la que los principales materiales que la conforman son el aserrín y la fibra de coco. La capa activa está en un rango del 13 a 100 % de la altura útil del Vermifiltro (Mendieta, 2012; Xing, et al., 2012; Velasco, 2015).

### **Capa media y capa de soporte**

La arena (capa media) y los agregados de roca de distintas granulometrias (capa de soporte), contribuyen en la filtración del agua residual y proveen un lecho para microorganismos que favorecen la disminución del DQO, DBO5, sólidos disueltos y turbidez. A medida que el agua residual percola por el medio filtrante, se forma una capa de biofilm la cual es directamente proporcional al volumen tratado; ésta junto con los agregados constituye el sistema microbiológico de filtración (Manyuchi, et al., 2013b).

La capa media tiene como función mejorar el rendimiento de la vermicompostación, en esta capa la arena es el material más usado con diámetros de partículas entre 1 a 4 mm (Arora, et al., 2014a; Arora, et al., 2014b; Kumar, et al., 2015). El porcentaje de altura más usada de esta capa representa el 25% de la altura útil del Vermifiltro (Sinha, et al., 2008; Velasco Andrade, 2015), pero puede oscilar entre el 18 al 60% de la altura útil (Arora, et al., 2014a; Kumar, et al., 2014).

La capa de soporte está compuesta por grava de distintos diámetros, los mismos que pueden variar entre 6 a 75 mm (Sinha, et al., 2008; Arora, et al., 2014b). En algunas configuraciones de Vermifiltros se colocan dos subcapas de grava, con diámetros de 6 a 50 mm para la primera subcapa (Manyuchi, et al., 2013a; Arora, et al., 2014b) y con diámetros de entre 10 a 75 mm para la segunda (Sinha, et al., 2008; Kumar, et al., 2015). Esta capa debe estar conformada por materiales que permitan la colonización de los microorganismos, al mismo tiempo deben ser capaces de resistir la degradación biológica y soportar el peso de las capas superiores (Sagrario Castillo, 2016). Además, sirve de drenaje del agua y junto con la capa media contribuye a la eliminación de turbiedad (Arango Laws, 2003; Manyuchi, et al., 2013a). La altura de la capa de soporte oscila entre el 6 al 63 % de la altura útil del Vermifiltro (Zhao, et al., 2012; Velasco Andrade, 2015).

## **2.7 Características del agua residual**

El conocimiento de la naturaleza del agua residual es fundamental de cara al proyecto y exploración de las infraestructuras tanto de recogida como de tratamiento y evacuación de las aguas residuales, así como para la gestión de la calidad medioambiental (Tchobanoglous & Burton, 1995).



En general, las aguas residuales están compuestas por un 99.9% de agua y un 0.1% de materiales en suspensión y solución que le imparten características que limitan usos posteriores (Nuñez, 2013). Las sustancias que se han agregado al agua durante su uso, se resumen en la Tabla 6:

Contaminantes	Importancia de tratamiento
Sólidos en suspensión	Dan lugar al desarrollo de depósitos de lodo y de condiciones anaerobias cuando se vierte al entorno sin tratamiento previo.
Materia Orgánica Biodegradable	Se mide en función de la DBO y de la DQO, y está compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas animales; si se vierte al cuerpo receptor sin tratar, se genera el agotamiento de oxígeno disuelto y desarrolla condiciones sépticas en el cuerpo receptor.
Patógenos	Son los organismos presentes en el agua residual que transmiten enfermedades contagiosas
Nutrientes	Incluyen principalmente el nitrógeno y fósforo. Cuando se vierten al entorno acuático, pueden favorecer al crecimiento de vida acuática no deseada y cuando se vierten en el terreno en cantidades excesivas provocan contaminación del agua subterránea.

Tabla 6: Contaminantes presentes en las Aguas residuales y su importancia de tratamiento

Fuente: (Tchobanoglous & Burton, 1995)

Tchobanoglous & Burton (1995), describen los constituyentes físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales:

### 2.7.1 Características físicas

#### Sólidos totales

Esta característica engloba la materia en suspensión, sedimentable, coloidal y disuelta. La materia residual que se obtiene luego de someter al agua a un proceso de evaporación a una temperatura entre 103 y 105 °C se define como el contenido de sólidos totales. Pueden clasificarse en filtrables o no filtrables (sólidos en suspensión). La determinación de sólidos totales en suspensión es importante para evaluar la concentración de aguas residuales y para determinar la eficiencia de las unidades de tratamiento.

#### Olores

Los olores se deben a los gases liberados cuando se descompone la materia orgánica en condiciones anaerobias. Cuando las concentraciones de olor son bajas, su influencia sobre el normal desarrollo de la vida humana tiene más importancia por la tensión psicológica que generan, que por el daño que puedan producir al organismo. La problemática de los olores está considerada como la principal causa de rechazo a la implantación de instalaciones de tratamiento de aguas residuales.

En aguas residuales recientes, el olor es tolerable, pero conforme va pasando el tiempo y se va agotando el oxígeno, entran en juego los microorganismos anaerobios, que reducen los sulfatos y sulfitos a sulfuros. Estos, si hay hierro presente, reaccionan dando sulfuro de hierro, que confiere un olor desagradable, característico de las aguas sépticas. También se producen gases de olor desagradable en las fermentaciones anaerobias



## Temperatura

La temperatura del agua residual es más elevada que el agua de suministro, debido a que en las aguas residuales existe agua caliente procedente de las casas y los diferentes usos industriales. Dependiendo de la situación geográfica las temperaturas del agua residual varía entre 10 y 21 °C, pudiéndose tomar 15.6°C como valor representativo. Este parámetro es importante dada su influencia tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como sobre la aptitud del agua para ciertos usos útiles. Las temperaturas elevadas pueden dar lugar a una indeseada proliferación de plantas acuáticas y hongos. La temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana se sitúa entre los 25 y 35 °C.

## Densidad

La densidad del agua residual se define como masa por unidad de volumen y es expresada en kg/m<sup>3</sup>. La formación de corrientes de densidad en fangos de sedimentación y otras instalaciones de tratamiento dependen de la densidad del agua residual. La densidad de las aguas domésticas que no contengan grandes cantidades de residuos industriales es prácticamente la misma que la del agua a la misma temperatura. Tanto la densidad como el peso específico dependen de la temperatura y varían en función de la concentración total de sólidos

## Color

El agua residual reciente suele tener un color grisáceo. Sin embargo, al aumentar el tiempo de transporte en las redes de alcantarillado y al desarrollarse condiciones más próximas a las anaerobias, el color del agua residual cambia gradualmente de gris a gris oscuro, para finalmente adquirir color negro (séptica).

## Turbiedad

Es la medida de las propiedades de transmisión de la luz en el agua. Es un parámetro que se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión. Se mide mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersada en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones.

### 2.7.2 Características químicas

#### Materia orgánica

Los compuestos orgánicos están formados especialmente por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno, con la presencia, en determinados casos, de nitrógeno. Los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua residual son las proteínas (40-60 %), hidratos de carbono (25-50 %), y grasas y aceites (10%).

Existen diferentes ensayos para la determinación del contenido orgánico de las aguas residuales, que incluye: DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno), DQO (Demanda Química de Oxígeno), COT (carbono orgánico total).

- DBO5 es la cantidad de oxígeno que los microorganismos presentes en las aguas residuales consumen para descomponer la materia orgánica. Se mide durante un lapso de 5 días en un ambiente oscuro para una temperatura del agua de 20 °C (Naeim Nouri, 2016). Su determinación se usa para determinar la cantidad de oxígeno requerida para estabilizar la materia orgánica, dimensionar las



estaciones de tratamiento, medir la eficacia de algunos procesos de tratamiento y controlar el cumplimiento de normativas.

- El ensayo de la DQO se emplea para medir el contenido de materia orgánica. La DQO de un agua residual suele ser mayor que su correspondiente DBO, debido al mayor número de compuestos cuya oxidación tiene lugar por vía química frente a los que se oxidan por vía biológica.

## Materia inorgánica

Las concentraciones de las sustancias inorgánicas en el agua aumentan tanto por el contacto del agua con las diferentes formaciones geológicas, como por las aguas residuales, tratadas o sin tratar, que a ella se descargan. Son varios los componentes inorgánicos de las aguas residuales que tienen importancia para la determinación y control de la calidad del agua, entre los que se puede mencionar están: pH, cloruros, alcalinidad, nitrógeno, azufre y metales pesados.

## Gases

Los gases que con mayor frecuencia se encuentran en aguas residuales brutas son el nitrógeno, el oxígeno, el dióxido de carbono, el sulfuro de hidrógeno, el amoniaco y el metano. Los tres primeros son gases de común presencia en la atmósfera, por lo que también se encuentran en contacto con el agua. Los tres últimos proceden de la descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales.

### 2.7.3 Características biológicas

#### Microorganismos

Los principales grupos de microorganismos encontrados en el agua residual son:

- Bacterias: Desempeñan un papel importante en la descomposición de materia orgánica, por ello es necesario conocer sus características, funciones, metabolismos y procesos de síntesis.
- Hongos: Pueden crecer en zonas de baja humedad y con un pH bajo, sin la presencia de estos no sería posible la descomposición de la materia orgánica.
- Algas: El crecimiento puede llegar a ser un problema en ríos, lagos y embalses por su rápida reproducción.
- Protozoos: Estos se alimentan de bacterias y microorganismos microscópicos, y son de gran importancia ya que son capaces de mantener el equilibrio natural entre los diferentes microorganismos.
- Virus: Los virus excretados por los seres humanos son un peligro para la salud pública, ya que, al sobrevivir en las aguas residuales durante varios días puede ocasionar enfermedades a quienes entren en contacto con estas aguas contaminadas.

#### Organismos Patógenos

Están presentes en aguas residuales y pueden proceder de desechos humanos con enfermedades típicas como la tifoidea, diarrea y cólera. Se encuentran en pequeñas cantidades y resultan difíciles de identificar, razón por la cual se emplea el organismo coliforme como indicador, ya que su presencia es mayor y de fácil comprobación. Para determinar la calidad de agua se utilizan dos tipos de indicadores:



- Coliformes Totales: Aparecen también en el medio natural, para tener un indicador exclusivamente entérico, se estableció un indicador biológico denominado coliformes fecales (CF). Si no hay coliformes, se tiene la seguridad de que no existen gérmenes o contaminación de origen fecal.
- Coliformes Termotolerantes: Son bacterias que forman parte del grupo coliforme. La mayor especie en el grupo de coliformes termotolerantes es la Escherichia Coli.

## 2.8 Normativa de descarga para efluentes de una PTAR

El agua residual que será descargada en un cuerpo receptor deberá tener concentraciones mínimas, las cuales están reguladas por la norma técnica ecuatoriana (Anexo 1 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de calidad ambiental y descarga a un cuerpo de agua dulce) que establece los criterios de calidad de las aguas para los distintos usos y los límites permisibles de contaminantes presentes en el efluente de una PTAR. La Tabla 7, presenta los parámetros más importantes que se busca reducir en los efluentes de las PTAR con los límites máximos de cada parámetro.

Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce			
Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100 ml	2000
Demandas Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO5	mg/l	100
Demandas Química de Oxígeno	DQO	mg/l	200
Fósforo Total	P	mg/l	10,0
Nitrógeno amoniacal	NH4-N	mg/l	30,0
Nitrógeno Total Kjedahl	NTK	mg/l	50,0
Sólidos Suspensos Totales	SST	mg/l	130
Sólidos totales	ST	mg/l	1 600

Tabla 7: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2017)

### 3 MATERIALES Y MÉTODOS

### **3.1 Ubicación y descripción general de la zona de estudio**

La PTAR Churuguzo está ubicada en la parroquia Victoria de Portete en el sector Churuguzo, a 22 km al Sur Oeste de la ciudad de Cuenca, Panamericana Sur en las coordenadas latitud: 3°3'8.85"S, longitud: 79°3'37.94"O, altura: 2643 m.s.n.m (véase la Figura 13). Cuando la planta se encontraba en funcionamiento, esta se alimentaba del sistema de alcantarillado que abastece a la parroquia de Victoria del Portete que comprende una red sanitaria de una longitud aproximada de 3.5 km (Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014).

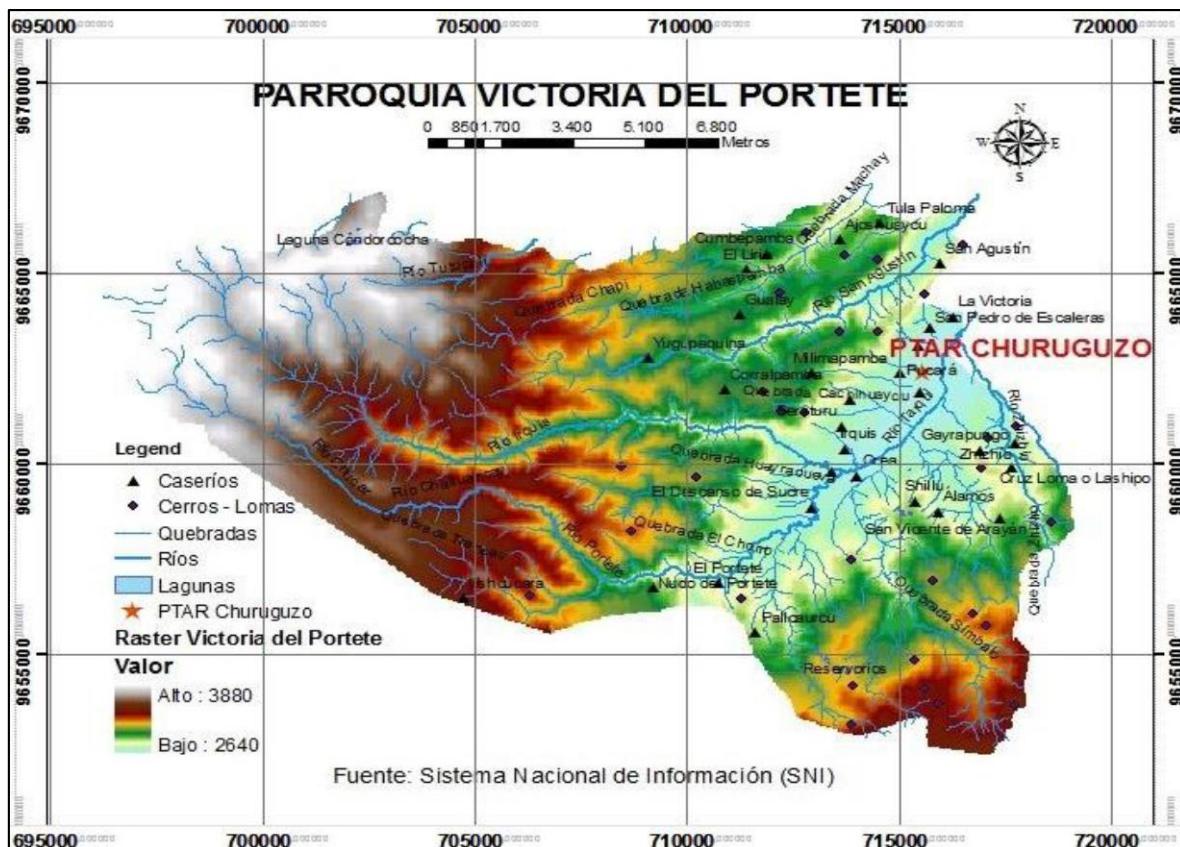


Figura 13: Mapa Topográfico de la parroquia Victoria del Portete – Ubicación PTAR Churugozo  
Fuente: (Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014)

La planta de tratamiento Churuguzo tiene un área de cobertura de 226.5 ha (Etapa EP, 2020) que comprende los sectores de Churuquzo, el centro parroquial de Victoria de Portete y Mataquillcana (véase la Figura 14).

La región de estudio posee un clima muy húmedo, las precipitaciones se encuentran entre 1500 y 2000mm/año, con temperaturas que varían entre los 12 y 18°C (Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014).

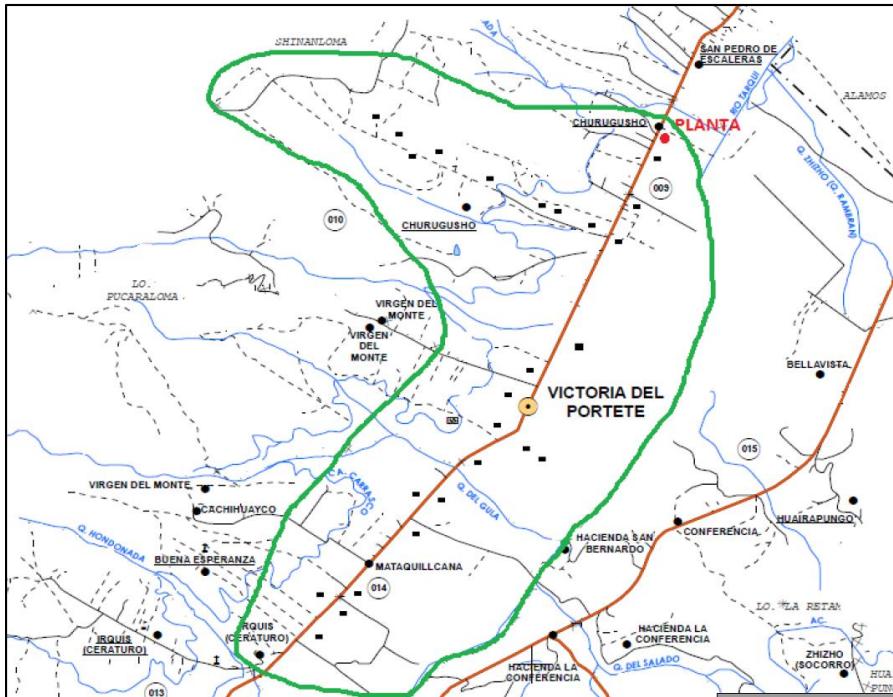


Figura 14: Delimitación del área de cobertura de la PTAR Churuguzo  
Fuente: (Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014)

### 3.1.1 Características generales de la PTAR

La planta de tratamiento de aguas residuales Churuguzo, comprende un área de 4181.6 m<sup>2</sup>. Existen dos ingresos del agua hacia el sistema mediante un pozo de derivación, el caudal que pasa por debajo de éste, llega a un canal con rejillas que posteriormente dirige el flujo hacia un desarenador, y luego lo conduce hacia la fosa séptica, mientras que caudal que pasa sobre el pozo de derivación, transporta el agua directamente hacia la fosa séptica. El efluente de la fosa séptica se dirige hacia humedales artificiales como parte del tratamiento secundario. Además, dispone de un lecho de secado de lodos para llevar a cabo la deshidratación a cielo abierto y cuenta con cestas que sirven de bodegas (Salazar Serrano & Sánchez Merchán, 2015).

### 3.2 Metodología de selección de tecnología

A continuación, se describe cada uno de los factores que intervienen en la matriz de decisión final propuesta por Noyola, et al., (2013) y además se incluye la respectiva ponderación:

- **Aplicabilidad del proceso**

Este rubro implica el grado de adecuación del proceso con respecto a las características particulares del agua residual a tratar, así como de la calidad requerida para el agua tratada, involucra:

**Eficiencia de remoción:** La integración de un proceso de tratamiento se define en función de la calidad deseada del efluente, la cual se establece con los requerimientos de descarga fijados en la legislación vigente o bien de especificaciones para su reuso.



Se consideran los porcentajes de remoción para los Coliformes Fecales (CF), DBO y sólidos suspendidos (SST); la ponderación de cada uno de estos contaminantes se realiza con base en los porcentajes de remoción establecidos por la literatura. Las puntuaciones correspondientes se presentan en la Tabla 8.

Aplicabilidad del proceso /35					
Eficiencia					
CF /15		DBO /10		SST /10	
>99%	15	>90%	10	>90%	10
95-99%	10	80-90%	7	70-90%	7
<95%	5	<80%	3	<70%	3

Tabla 8: Ponderación de las tecnologías respecto a la aplicabilidad del proceso

Fuente: Elaboración propia.

- **Generación de residuos**

Los tipos y cantidades de residuos sólidos, líquidos o gaseosos generados por un proceso de tratamiento deben ser conocidos o estimados. Algunos aspectos que deben considerarse en el procesamiento de los residuos son el sitio de disposición final y el costo de tratamiento.

La generación de residuos es un parámetro importante ya que generalmente el gran problema de las plantas de tratamiento es la generación de lodos, lo cual es indeseable ya que antes de disponer los lodos, estos deben ser estabilizados para reducir las afecciones a la salud. Por lo tanto, si la generación de residuos es alta tendrá una puntuación de 1, si es baja el puntaje será 3, mientras que si no existe producción de residuos la puntuación será de 5, esta ponderación se presenta en la Tabla 9.

Generación de residuos /5	
No se produce	5
baja	3
alta	1

Tabla 9: Ponderación de las tecnologías respecto a la generación de residuos (lodos)

Fuente: Elaboración propia.

- **Generación de subproductos con valor económico o de uso**

En algunas plantas de tratamiento de aguas residuales es posible generar subproductos con valor económico (cierto tipo de lodos para inóculo de otras plantas de tratamiento, lodo como mejorador de suelos o fertilizante, biogás con valor energético) los cuales pueden representar ventajas adicionales al tratamiento del agua, pues significan ingresos económicos y/o un aprovechamiento de recursos que contribuye a la sostenibilidad del sistema.

Para que una tecnología sea conveniente de implementar en una comunidad rural, esta debe tener el potencial de generar subproductos con valor para la misma, ya que incrementa la economía circular de la comunidad. Por ende, si la tecnología genera subproductos con valor económico o de uso la puntuación será de 5, de lo contrario la puntuación será de 1 (Tabla 10)

Generación de subproductos /5	
Genera	5
No genera	1

Tabla 10: Ponderación de las tecnologías respecto a la generación de subproductos

Fuente: Elaboración propia.



- **Requerimientos de área**

El área requerida para la construcción de una planta de tratamiento puede ser un factor fundamental en la toma de decisiones, dependiendo de la zona en la cual se prevé su construcción. La poca disponibilidad de terreno puede influir de manera decisiva en la factibilidad de ciertos procesos, tales como los sistemas lagunares o sistemas naturales construidos. Para ello se considera con una puntuación de 1 si requiere grandes extensiones de terreno y de 5 si el área de terreno requerido es pequeña, tal y como se muestra en la Tabla 11.

Requerimiento de área /5	
Grandes	1
Pequeñas	5

Tabla 11: Ponderación de las tecnologías respecto al requerimiento de área

Fuente: Elaboración propia.

- **Costo**

El considerar todos los costos en el análisis financiero del proyecto es indudablemente la práctica adecuada para apoyar la selección del proceso, ya que se determina el costo real por metro cúbico tratado. En ello se deben involucrar no solo los montos de inversión requeridos, sino también los costos de operación y mantenimiento que son decisivos para la sostenibilidad de la opción tecnológica seleccionada, especialmente en el sector rural. Para una tecnología con bajos costos de operación y mantenimiento la puntuación es de 10, mientras que para una tecnología con moderados costos tiene un puntaje de 7 y si la tecnología requiere elevados costos de operación y mantenimiento su puntuación es 3, esta ponderación se aprecia en la Tabla 12.

Costos de operación y mantenimiento /10	
Alto	3
Moderado	7
Bajo	10

Tabla 12: Ponderación de las tecnologías respecto a los costos de operación y mantenimiento

Fuente: Elaboración propia.

- **Complejidad de Operación y Personal requerido**

Bajo este rubro se agrupan conceptos que están relacionados con el funcionamiento de la planta de tratamiento para garantizar la producción del agua tratada deseada, como son la flexibilidad o complejidad de operación y requerimientos de personal. La flexibilidad de operación o la complejidad de la misma es un factor determinante para saber el tipo de personal requerido.

En cuanto a la operación, si es compleja recibe una puntuación de 3, en caso de ser moderada el valor será 7 y si existe flexibilidad en la operación tendrá 10 puntos. Por otro lado, si el personal necesario para el manejo y el mantenimiento de la tecnología no requiere ser experto, la puntuación que recibe este rubro es de 10, de lo contrario la puntuación es de 3, mientras que si se requiere personal con capacitación moderada la puntuación es de 7. La ponderación de este rubro se presenta en la Tabla 13.



Complejidad de Operación y Personal requerido /20			
Operación /10		Personal /10	
Compleja	3	Experto	3
Moderada	7	Moderado	7
Flexible	10	No calificado	10

Tabla 13: Ponderación de las tecnologías respecto a la operación y personal requerido  
Fuente: Elaboración propia.

- **Entorno e impacto al medio ambiente**

Este criterio engloba los efectos relacionados con la operación de la planta sobre el ambiente y viceversa. Incluye la influencia de la temperatura sobre el proceso, la producción de ruido, contaminación visual, producción de malos olores y la reproducción de insectos o animales potencialmente dañinos a la salud. Con estas consideraciones las puntuaciones que recibe este rubro es de uno, siete o quince, si la tecnología produce un alto, moderado o no genera impacto en el ambiente, respectivamente (Tabla 14).

Entorno e impacto ambiental /15	
Alto	1
Moderado	7
No genera	15

Tabla 14: Ponderación de las tecnologías respecto al impacto ambiental.  
Fuente: Elaboración propia.

- **Implementación de las tecnologías dentro del país**

Un rubro extra que se considera para la matriz de decisión, es la implementación de estas tecnologías en el Ecuador, ya sea de manera experimental o que se encuentren en funcionamiento, para tener una aproximación de su comportamiento frente a distintas circunstancias a las que se encuentren expuestas. En cuanto a la puntuación de este parámetro, su valor será de 5, si la tecnología se ha implementado en más de dos sitios en el país, 3 puntos, si se ha realizado en dos o menos sitios, y 1 si no se ha implementado dentro del país (Tabla 15).

Implementación dentro del País /5	
Implementación en más de 2 lugares	5
Implementación en 2 o menos lugares	3
No existe implementación	1

Tabla 15: Ponderación de las tecnologías respecto a su implementación dentro del país.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Caracterización

Para la caracterización de agua residual que fluye a la PTAR Churuguzo se utilizó la información brindada por ETAPA EP, la misma que ha realizado 26 ensayos de laboratorio desde junio del año 2015, hasta agosto del año 2019. Los parámetros analizados en laboratorio fueron: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Fósforo Total (P), Nitrógeno Amoniacal (NH4-N), Nitrógeno Orgánico (N), Oxígeno Disuelto (OD), Potencial Hidrógeno (pH), Sólidos Suspensidos Totales (SST), Sólidos Totales (ST), Coliformes Totales (CT) y Coliformes Termotolerantes (CTE).



### 3.4 Parámetros de Selección de tecnología

En la toma de decisión final para la selección de la tecnología se consideró lo siguiente:

- La experiencia de profesionales afines al tema.

Se realiza el análisis de las alternativas tecnológicas a implementarse en la PTAR, mediante talleres de trabajo con las estudiantes de la Universidad de Texas (A&M), del aporte del Ing. Andrés Alvarado (Director del trabajo de titulación) especialista en ingeniería sanitaria, y de personal técnico de la empresa pública ETAPA con experiencia en el ámbito del saneamiento y construcción de PTARs en comunidades rurales.

- Compatibilidad de la tecnología con las instalaciones existentes.
- Análisis de pros y contras de cada una de las tecnologías investigadas.
- Calidad del efluente requerido por la normativa.
- Factores que intervienen en la matriz de decisión, del libro “Selección de tecnologías para el tratamiento de Aguas Residuales Municipales” de Noyola, et al., (2013).

La matriz de decisión propuesta considera y pondera en la toma de decisión los siguientes rubros: aplicabilidad del proceso, la generación de residuos, la generación de subproductos con valor económico o de uso, requerimiento de área, costos, operación, la influencia sobre el entorno e impacto al medio ambiente y la implementación de la tecnología dentro del país.

### 3.5 Propuesta de Diseño de la Tecnología Seleccionada

Luego de la selección de la tecnología apropiada para la desinfección y pulimento del efluente de la PTAR, se establecen los parámetros de diseño, el dimensionamiento de cada una de las unidades estructurales y mecánicas, con sus correspondientes accesorios y conexiones, además del emplazamiento de cada unidad en la topografía.



## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Evaluación de la PTAR

#### 4.1.1 Caracterización de afluentes y efluentes de la PTAR

##### Caracterización física, química y microbiológica

Cabe mencionar que no se pudo realizar una caracterización personal del agua residual de la PTAR Churuguzo, debido a la pandemia por el COVID-19, por lo que se optó por solicitar a la empresa pública ETAPA, datos de las caracterizaciones de la planta.

Los datos brindados por ETAPA representan un registro de valores crudos, sin una descripción de las características del agua residual y condiciones ambientales a la hora de la toma de muestras, por lo que no se pudo hacer una interpretación completa de los resultados.

ETAPA ha realizado 26 caracterizaciones entre los años 2015 y 2019. Los valores de concentración del afluente y efluente que se presentan para cada una de las caracterizaciones representan a la mediana de los datos brindados, debido a que se presenta una dispersión considerable de las medidas. La mediana, a diferencia de la media, no es influenciada de manera tan marcada por los valores pico de caracterizaciones específicas.

##### 4.1.1.1 Características físicas

###### Sólidos Suspensidos Totales (SST)

La concentración de SST a la entrada y salida de la PTAR es de 388mg/l y 18mg/l respectivamente. El valor del efluente se encuentra dentro del límite permisible de acuerdo con lo establecido en el Ministerio del Ambiente (2017), sin embargo, como se puede observar en la Figura 15, existen dos mediciones que son superiores al límite de 130mg/l.

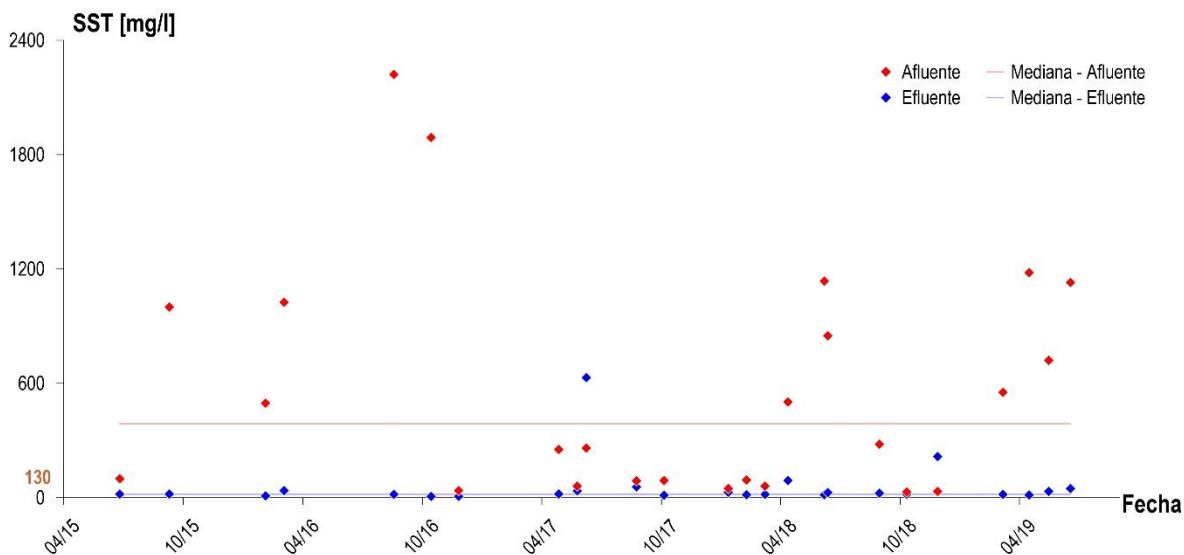


Figura 15: Análisis de Sólidos Suspensivos Totales  
Fuente: Elaboración propia

## Sólidos Totales (ST)

El valor de concentración de ST en el afluente es de 722mg/l y en el efluente es de 297.5mg/l, por lo que este último valor está dentro del rango establecido en la normativa (1600mg/l). En la Figura 16, se puede apreciar que existe una gran variabilidad en los registros del afluente.

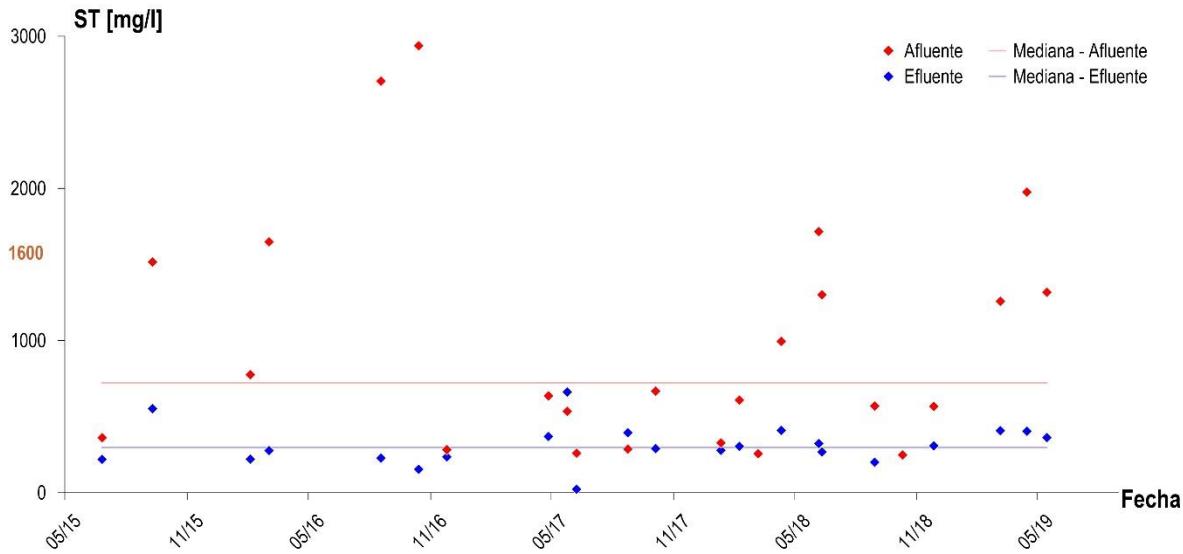


Figura 16: Análisis de Sólidos Totales  
Fuente: Elaboración propia

### 4.1.1.2 Características químicas

#### Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $\text{DBO}_5$ )

En cuanto a los datos proporcionados de  $\text{DBO}_5$ , se tiene un valor en la concentración del afluente de 258mg/l, presentándose una remoción de 80% en la PTAR, resultando una concentración en el efluente de 50 mg/l. El valor de efluente presentado cumple los límites establecidos en la normativa, no obstante, en ciertos muestreos existen concentración de  $\text{DBO}_5$  superiores al límite (100mg/l), como se observa en la Figura 17.

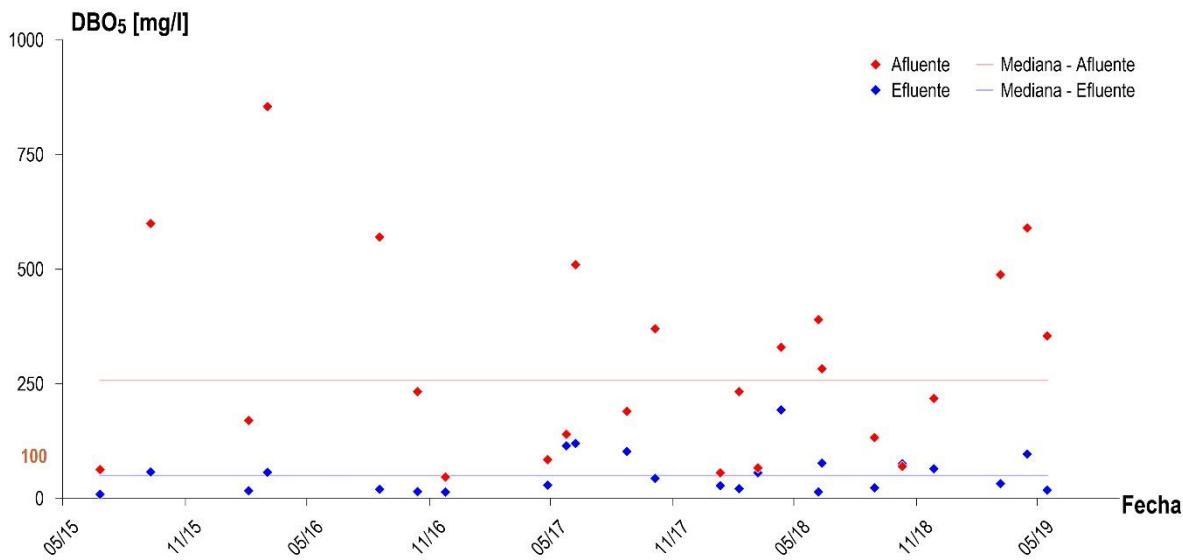


Figura 17: Análisis de la Demanda Bioquímica de Oxígeno  
Fuente: Elaboración propia

### Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En la Figura 18 se observa las concentraciones de DQO en las caracterizaciones realizadas en el afluente y efluente de la PTAR. La mediana de los valores obtenidos en el efluente es 169mg/l, que se encuentra dentro de los límites para descarga en cuerpos de agua dulce (TULSMA, 2017). Sin embargo, se observa varios valores fuera del límite (200mg/l), que guardan correspondencia con los valores pico registrados en la concentración de sólidos.

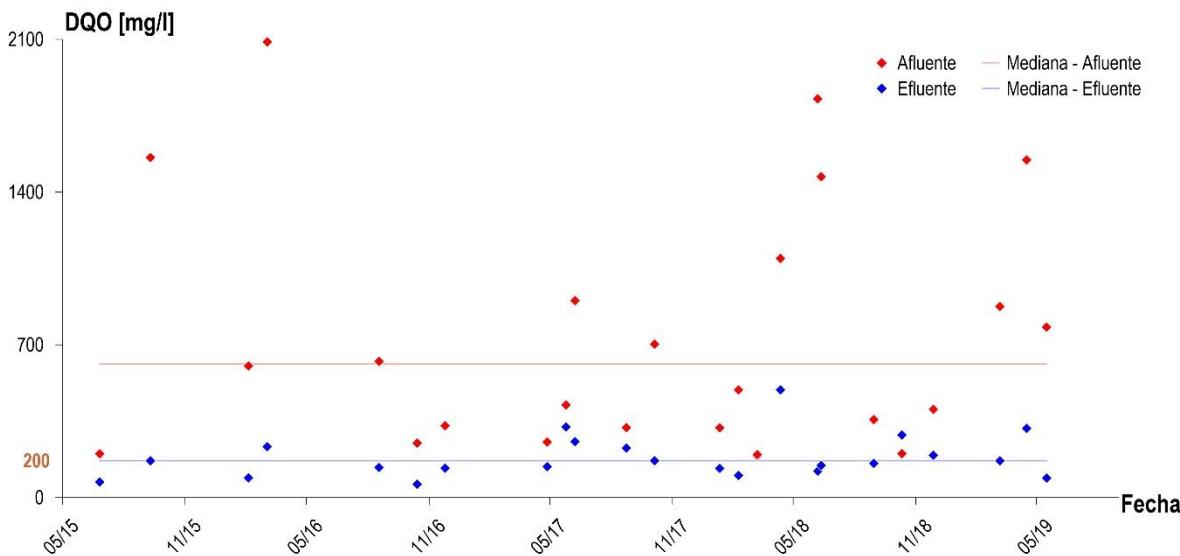


Figura 18: Análisis de la Demanda Química de Oxígeno  
Fuente: Elaboración propia

### DQO/DBO<sub>5</sub>

En la Figura 19, se puede apreciar valores de la relación DQO/DBO<sub>5</sub>, que es un indicador de la fracción biodegradable en el agua residual cruda. En varios muestreos se observa valores inferiores a 2 en el afluente, lo cual sugiere una fracción biodegradable alta, que es un buen indicativo para la implementación de un tratamiento biológico. Existe, sin embargo, algunas caracterizaciones donde la fracción DQO/DBO<sub>5</sub> es mayor en el afluente que en el efluente, lo cual no es normal para una planta de tratamiento donde operan mayoritariamente procesos naturales para la estabilización de la materia orgánica.

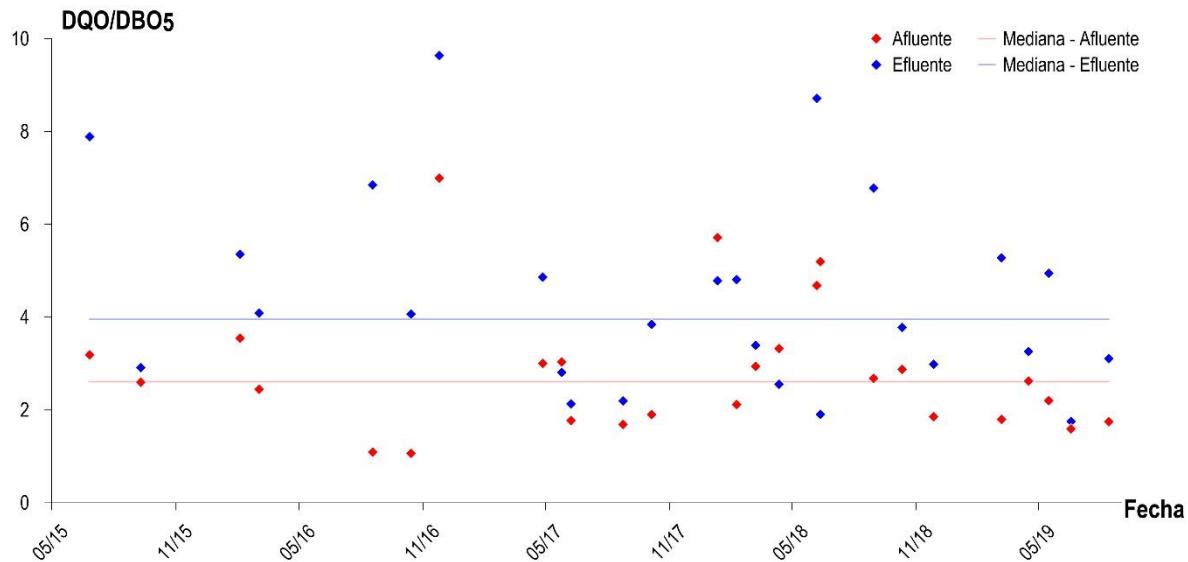


Figura 19: Análisis de la Relación DQO/DBO<sub>5</sub>

Fuente: Elaboración propia

### Fósforo Total (P)

En la Figura 20, se puede apreciar que los valores de las concentraciones fósforo. La mediana de los valores obtenidos en el efluente es de 2.60mg/l, mismo que se encuentra dentro del límite permisible en la normativa (10mg/l), mientras que el afluente posee una concentración de 4.44mg/l.

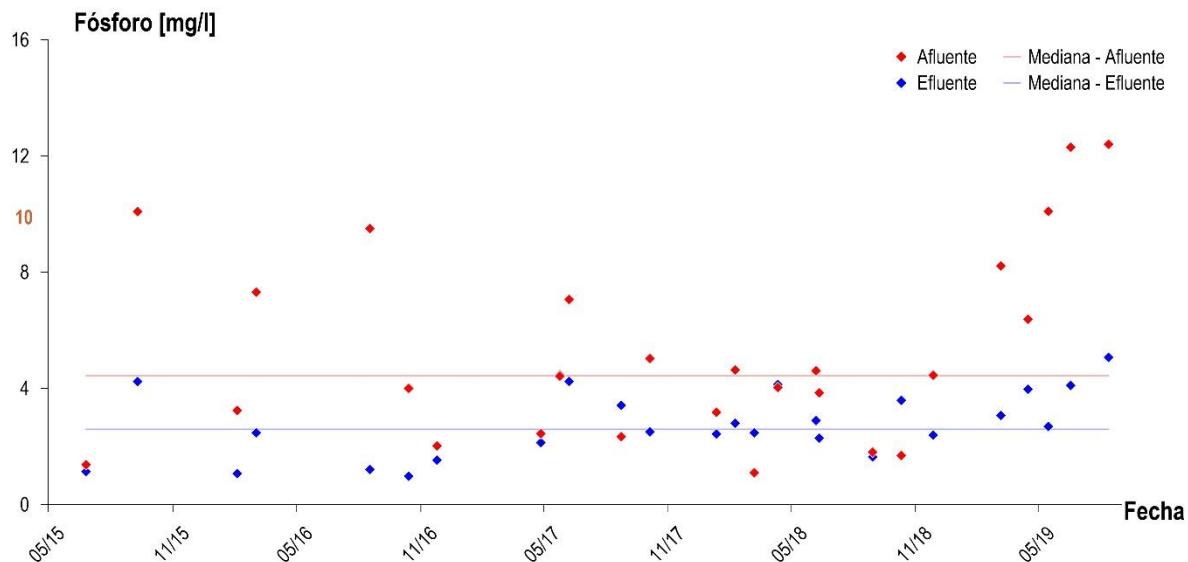


Figura 20: Análisis del Fósforo Total

Fuente: Elaboración propia

### Nitrógeno Ammoniacal (N)

Este compuesto posee un valor de concentración en el afluente y efluente de 16.29mg/l, y 14.01mg/l, respectivamente, como se aprecia en la Figura 21. Además, se puede mencionar que el límite permisible establecido por el TULSMA (2017) de este nutriente es de 30 mg/l.

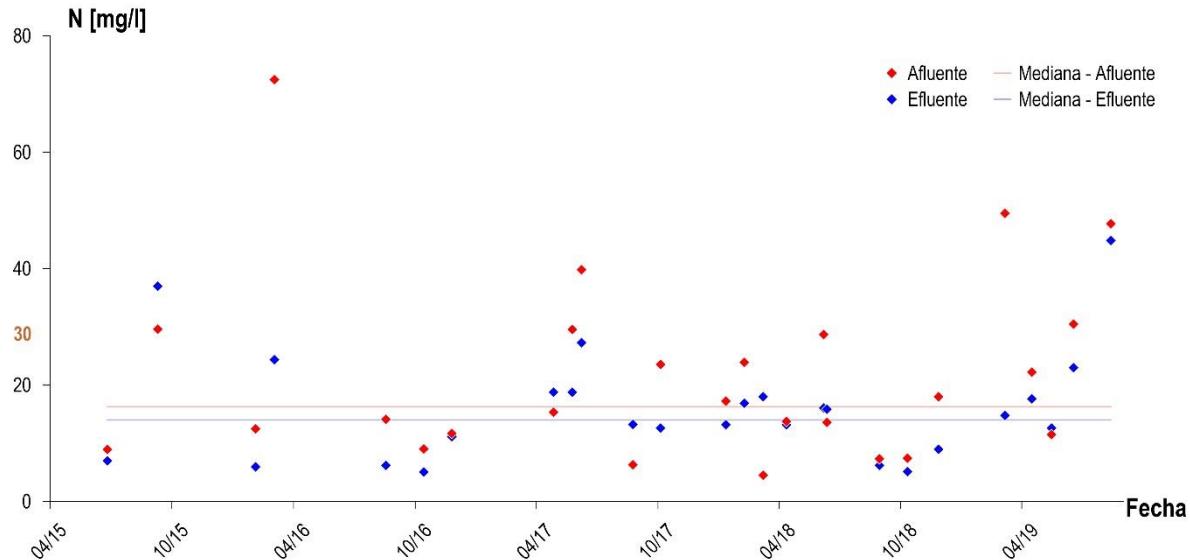


Figura 21: Análisis del Nitrógeno Amoniacal  
Fuente: Elaboración propia

### Nitrógeno Total Kjedahl (NTK)

Representa la suma de las concentraciones del Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Orgánico, y posee una concentración en el efluente de 20.52mg/l, siendo su límite máximo 50mg/l, como se observa la Figura 22.

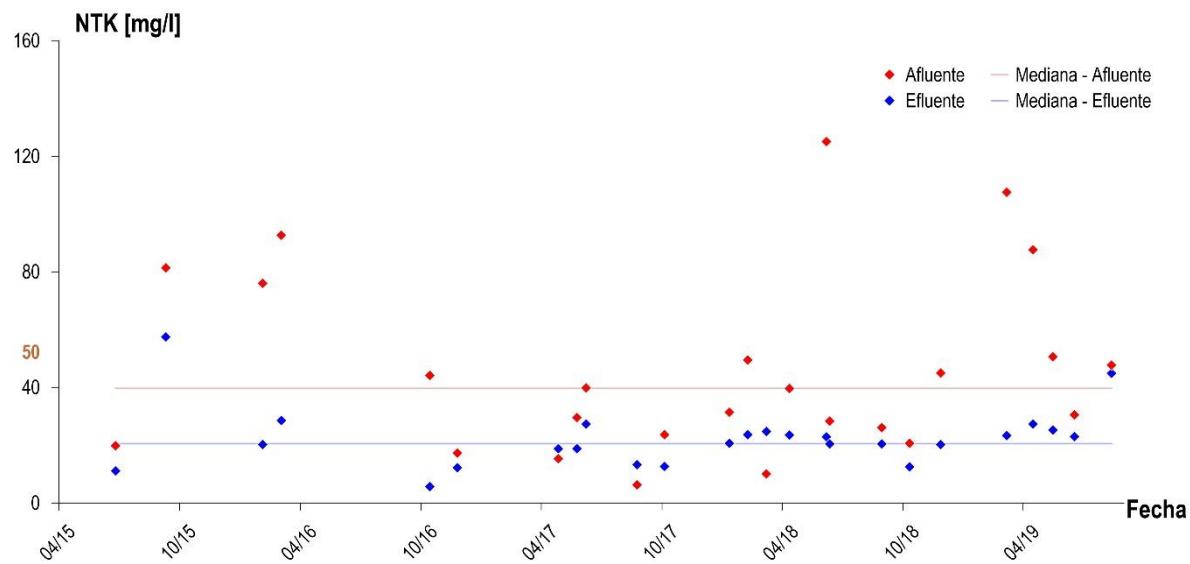


Figura 22: Análisis del Nitrógeno Total de Kjedahl  
Fuente: Elaboración propia

### Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH está en el rango de entre 6.5 y 8.5 con un valor de la mediana de 6.68, el cual es adecuado para que se efectúen diferentes procesos biológicos.

#### 4.1.1.3 Características microbiológicas

##### Coliformes Termotolerantes (CTE) / Coliformes Fecales (CF)

El afluente cuenta con un valor de  $7.9 \times 10^6$  NMP/100ml, y a pesar de que existe una remoción de 1.3 unidades logarítmicas respecto a la mediana, resultando una concentración en el efluente de  $3.3 \times 10^5$  NMP/100ml, este valor está fuera del límite (2000 NMP/100ml) establecido por el TULSMA (2017).

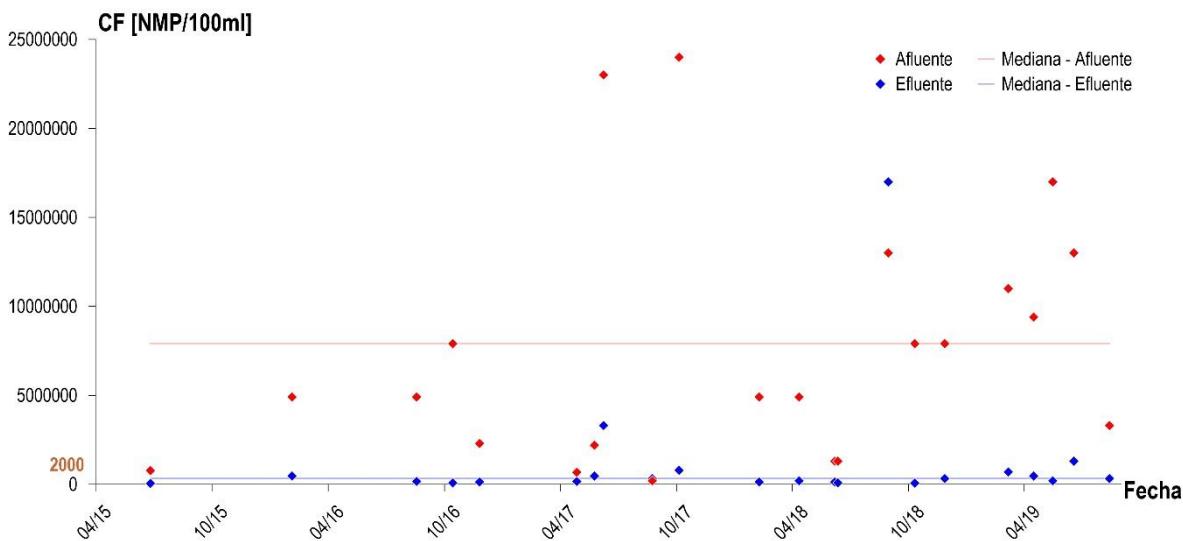


Figura 23: Análisis de Coliformes Termotolerantes  
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 16, se presentan los valores de la mediana de los datos brindados por la empresa pública ETAPA de cada uno de los contaminantes anteriormente descritos.

Contaminante	Características					
	Físicas		Químicas			Microbiológicas
	SST (mg/l)	DBO5 (mg/l)	DQO (mg/l)	P (mg/l)	NTK (mg/l)	CTE (NMP/100 ml)
Mediana del Afluente	388	258	613	4.4	39.7	$7.9 \times 10^6$
Mediana del Efluente	18	50	169	2.6	21	$3.3 \times 10^5$
Porcentajes de Remoción	95 %	81%	72%	41%	49%	95%
Límites de descarga - TULSMA	130	100	200	10	50	2000

Tabla 16: Mediana de los contaminantes en el afluente y efluente de la PTAR  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.2 Configuración actual y funcionamiento de la PTAR

Actualmente la planta de tratamiento de aguas residuales Churuguzo no se encuentra en funcionamiento y las aguas residuales receptoras en la misma, están siendo llevadas a la PTAR Ucubamba por medio de una extensión de la red interceptores de la ciudad de Cuenca. A continuación, se describe la configuración y funcionamiento de la PTAR cuando ésta se encontraba activa.

La PTAR recepta el afluente mediante 3 pozos (conectados por tuberías de 160mm), un canal de ingreso y un desarenador. Estas estructuras conducen el agua residual hacia la fosa séptica, donde se realiza el tratamiento primario, para luego dar paso al tratamiento secundario mediante 2 humedales sub superficiales de flujo horizontal. El efluente que sale de los humedales es captado mediante una estructura de salida que lo dirige hacia una acequia la cual se conecta al río Tarqui aguas abajo. Los caudales en exceso son desviados mediante un bypass que conduce el efluente en exceso proveniente de la fose séptica.

La PTAR además cuenta con un lecho de secado de lodos a cielo abierto y una caseta que sirve de bodega. La Figura 24, muestra la configuración del sistema de tratamiento presente en la PTAR.

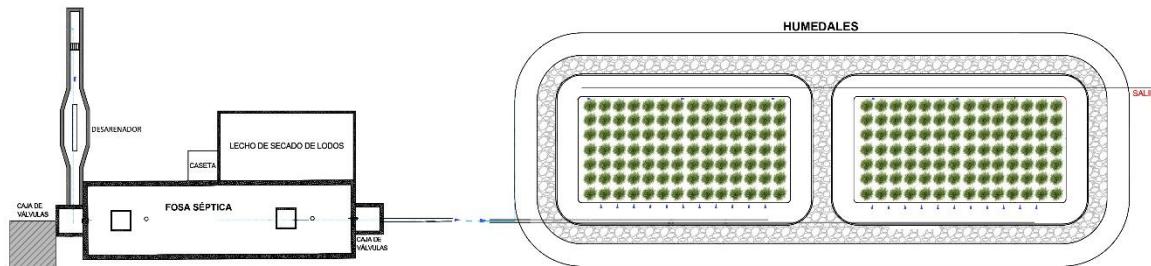


Figura 24: Configuración de los sistemas de tratamiento presentes en la PTAR Churuguzo  
Fuente: (Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014)

El sistema de alcantarillado que transporta el agua residual a la PTAR Churuguzo finaliza en el pozo P1, el mismo que redirige el flujo de agua hacia la PTAR, donde éste toma diferentes sentidos, para comprender de mejor manera dicho proceso es necesario observar la Figura 25.

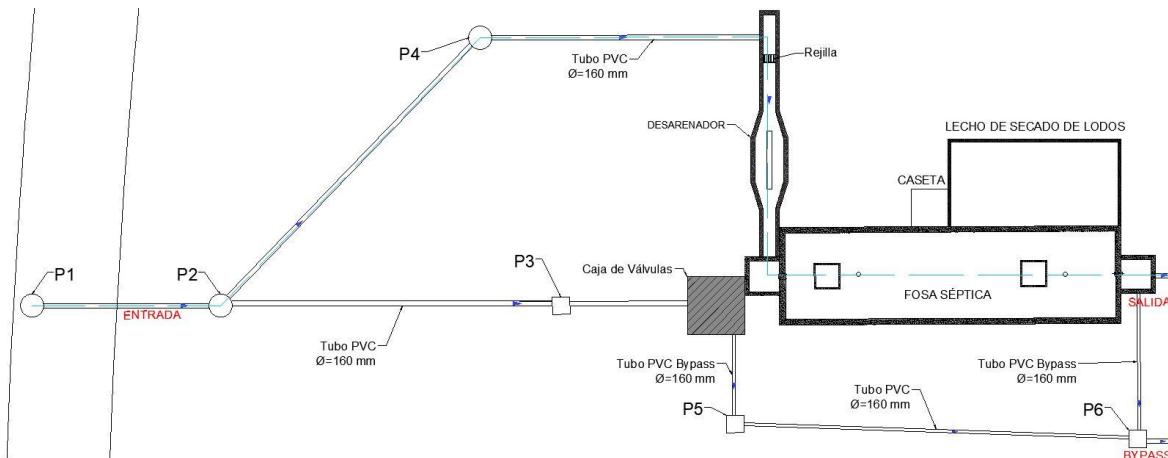


Figura 25: Esquema de los pozos de ingreso a la PTAR Churuguzo  
Fuente: (Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014)

#### 4.1.3 Estado de las estructuras actuales

Cuando las estructuras actuales de la PTAR Churugozo se encontraban en funcionamiento, recepcionaban un caudal medio de aguas residuales aproximado de 4.61 l/s, con una dotación de 80 l/hab/día para una población a servir de alrededor de 700 habitantes (Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014).

##### 4.1.3.1 Unidades de pretratamiento

###### Canal de ingreso

Esta estructura recibe el agua residual proveniente de una tubería de ingreso de 160 mm de diámetro y dirige el flujo hacia las rejillas y el desarenador. El canal de ingreso tiene 0.41m de ancho, una longitud de 3.5 m y con una pendiente del 1.15%.

###### Reja de entrada

La reja de entrada está ubicada en medio del canal de ingreso, es de limpieza manual con un ancho de 0.4m y 0.6m de longitud, consta de 11 varillas de 10 mm espaciadas cada 4 cm. En la Figura 26, se puede apreciar la configuración y dimensiones de la rejilla.

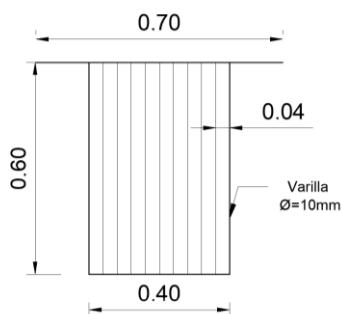


Figura 26: Vista en planta de la configuración actual de las Rejas de entrada  
Fuente: (Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014)

###### Desarenador

El desarenador está ubicado a continuación del canal de ingreso, tiene un ancho de 0.71 m, 8.5 m de longitud y una profundidad de 1 m. Esta estructura tiene 1.15% de pendiente y consta de dos cámaras separadas por una pared intermedia. En la Figura 27, se aprecia el desarenador, así como sus estructuras complementarias.

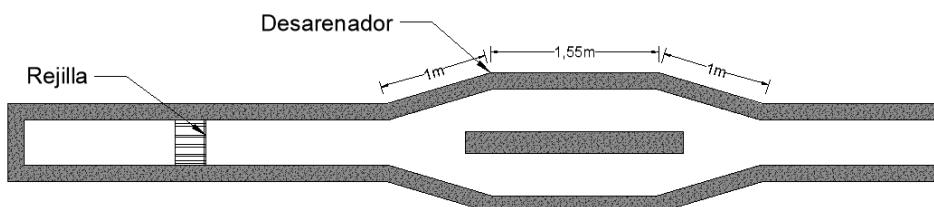


Figura 27: Vista en planta de la configuración actual del Desarenador  
Fuente: (Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014)

Esta estructura no cuenta con estructuras de control de caudal, ni compuertas para el correcto mantenimiento del desarenador.



#### 4.1.3.2 Unidades de tratamiento primario

##### Fosa Séptica

Consiste en una estructura de hormigón de forma rectangular, siendo sus dimensiones: 3.4m de ancho, 11.9m de largo y 2.7m de profundidad, esta última medida es mayor a lo normalmente usado en PTARs descentralizadas. En su interior, contiene una pantalla de hormigón que divide dicha estructura en dos cámaras, en la primera el agua permanece en reposo y se produce el tratamiento anaerobio, creando espumas y lodo residual por la acción de los microorganismos; posterior a ello el agua pasa a la siguiente cámara por medio de dos tuberías de PVC de  $\varnothing$  110mm ubicadas a 2m, medido desde el fondo; en la segunda cámara, aumenta el tiempo de retención del agua residual, lo que provoca una disminución de contaminantes y material orgánico (véase la Figura 28). En la losa de hormigón armado de espesor de 0.15m, se sitúan dos tapas de inspección (0.9x0.9m) y dos ductos que sirven para la liberación de gases que se genera al interior del tanque.

Actualmente, la fosa séptica se encuentra en buenas condiciones estructurales para ser utilizada como tratamiento primario. Por otro lado, las tuberías de ingreso, salida e interconexiones, presentan deficiencias en su configuración.

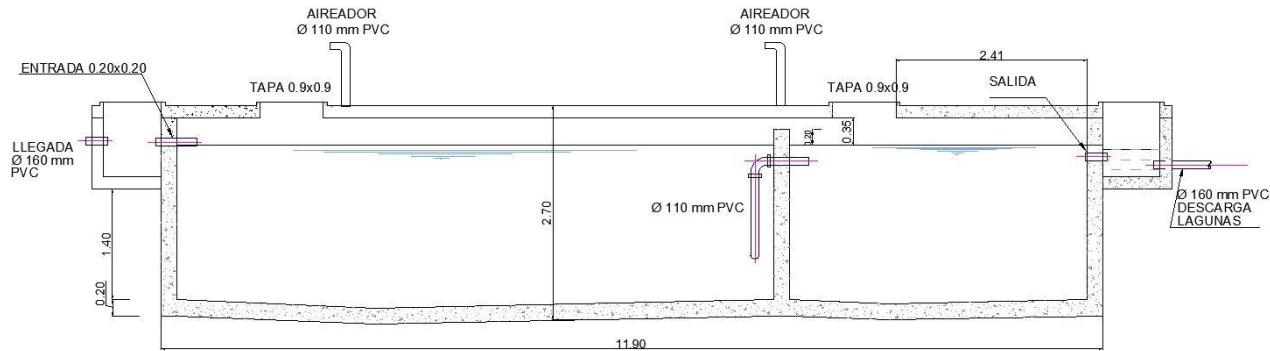


Figura 28: Vista en perfil de la configuración actual de la Fosa Séptica  
Fuente: (Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014)

Junto a la Fosa séptica se encuentra el lecho de secado de lodos como se puede observar en la Figura 29, tiene forma rectangular con un ancho de 3m y 6m de largo. Actualmente esta estructura no se encuentra deteriorada.

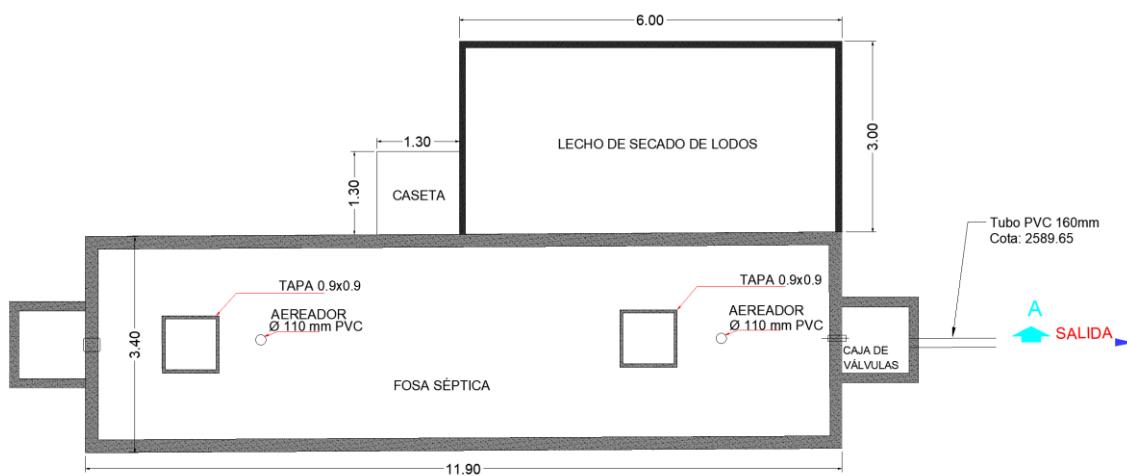


Figura 29: Vista en planta de la configuración actual de la fosa séptica y del Lecho de Secado de Lodos  
Fuente: (Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014)

#### 4.1.3.3 Unidades de tratamiento secundario

##### Humedales sub superficiales de flujo horizontal

La PTAR cuenta con dos humedales artificiales de flujo horizontal sub superficial, que actúa en paralelo y poseen iguales dimensiones: 25m de ancho y 34.5m largo. El agua ingresa perpendicular a la longitud más larga del humedal, por medio de una tubería de  $\varphi 160\text{mm}$  perforada y es recolectada por una tubería de las mismas características, posteriormente es llevada hacia un pozo para su evacuación final hacia la quebrada (véase la Figura 30)

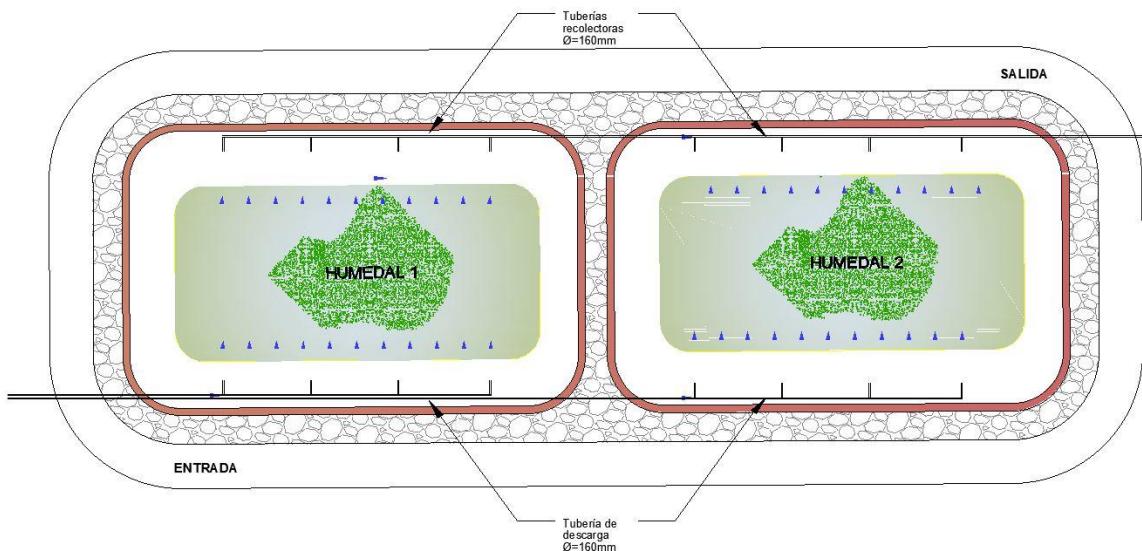


Figura 30: Vista en planta de la configuración actual de los Humedales

Fuente: (Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014)

La configuración de la tubería de ingreso, no permite que el agua se distribuya de manera uniforme a lo largo del humedal, además esta unidad no cuenta con dispositivos reguladores del nivel de agua a la salida del humedal. Por otro lado, la dirección del flujo de agua en el humedal no es la apropiada ya que implica menor probabilidad de generación de un flujo pistón (recomendado en humedales), lo que significa una disminución en la eficiencia de remoción de contaminantes de esta estructura.

#### 4.2 Análisis de selección de tecnología

Para la selección de la tecnología se utiliza una matriz de decisión donde, para cada tecnología se hace una descripción cualitativa en función de cada uno de los parámetros considerados en la matriz de Noyola, et al., (2013), tal y como se observa en la Tabla 17. Esta primera matriz es usada para la posterior ponderación de cada uno de los rubros y la calificación final que tiene cada tecnología.

Matriz de Rubros Evaluados para la toma de decisión de la tecnología				
RUBROS EVALUADOS	TECNOLOGÍAS			
	Filtro Percolador	Filtro de medios horizontal	Peat Filter	Vermifiltro
<b>Aplicabilidad del proceso: en función de las eficiencias de remoción</b>	Porcentajes de remoción aproximados: DBO <sub>5</sub> : 69 - 77% [4] SST: 38 - 56% [4] CF: No se reporta resultados	Porcentajes de remoción aproximados: DBO <sub>5</sub> : 84.7% [5] SST: 90% [4] CF: 54 – 94 % [3]	Porcentajes de remoción aproximados: DBO <sub>5</sub> : 95% [3] SST: 98% [3] CF: 98% [3]	Porcentajes de remoción aproximados: DBO <sub>5</sub> : 95% [3] SST: 93% [3] CF: 99% [3]
<b>Generación de residuos</b>	Baja producción de lodos [3].	Baja producción de lodos [1].	No se producen lodos sino una costra seca fácilmente manipulable [1].	No se producen lodos por el proceso Vermifiltración [2].
<b>Generación de subproductos con valor económico o de uso</b>	No genera subproductos con valor económico o reutilizables.	No genera subproductos con valor económico o reutilizables.	No genera subproductos con valor económico o reutilizables.	El humus que se descarga (vermicompost), es un aditivo de suelo útil para agricultura y horticultura. Se produce biomasa de gusanos como alimento para el ganado, las aves de corral y la piscicultura [1]. El efluente se puede aplicar a cultivos agrícolas, jardinería y otros propósitos de reutilización [2].
<b>Requerimiento de área</b>	Emplazable en áreas pequeñas [1].	Requiere una gran superficie de tierra para un tratamiento eficaz [2].	Requieran poca superficie para su implantación [1].	No se requieren grandes extensiones de área [4].
<b>Costo</b>	Alto costo de capital y moderado costo de operación y mantenimiento [2].	Los costos iniciales pueden ser más altos que los de los sistemas de tratamiento de agua convencionales, sin embargo, los costos de operación y mantenimiento son moderados [1].	Gastos en la compra de turba por necesidad de reposición, debido a las operaciones de limpieza; por lo tanto sus costos de operación y mantenimiento no son tan elevados [2].	Sus costos de inversión y operación son moderados con respecto a otros tratamientos tradicionales de aguas residuales [3].
<b>Complejidad de Operación / Personal requerido</b>	Nivel moderado de habilidad técnica necesarios para operar el sistema. Requiere experiencia moderada del operador [1].	Flexibilidad en la operación del sistema. No es necesario que exista un personal experto para realizar la operación y limpieza del sistema[1].	En cuanto a la turba hay sencillez de operación, hay que proceder al cambio de los filtros cuando acaban sus ciclos operativos. Las labores de mantenimiento son típicamente agrícolas (rastrillado, escarificado), por lo que no se requiere personal cualificado [1].	Simplicidad de operación con respecto a la sustitución del sustrato de la capa activa. No requiere personal experto para su mantenimiento y limpieza [1].
<b>Influencia sobre el entorno e impacto al medio ambiente</b>	A menudo las moscas y los olores son problemáticos debido a que la carga orgánica es excesiva y causa la descomposición anaerobia en el filtro [2].	No genera malos olores, además de no generar ruido ya que no cuenta con equipos mecánicos [1].	Ausencia de ruido, al no contar con equipos electromecánicos; Ausencia de olores, gracias a las propiedades de adsorción de la turba; Escaso impacto visual al construirse excavados en el terreno [1].	No hay mal olor, ya que las lombrices de tierra detienen la descomposición de todas las materias putrescibles en las aguas residuales [1].
<b>Implementación dentro del País</b>	Se han implementado unidades de este filtro en Guayaquil y Quito.	No se ha implementado en el Ecuador	Unidades experimentales se han realizado en las provincias de Cotopaxi y Tungurahua.	Unidades de Vermifiltración han sido implementadas en Quito, Cuenca, Ibarra, Riobamba, Zamora Chinchipe y Guayaquil.
<b>Referencias</b>	[1] (U.S. EPA, 2000a) [2] (U.S. EPA, 2000b) [3] (Hurtos Toro, 2018) [4] (Ahson, et al., 2017)	[1] (Wegelin, 1996) [2] (Patil, et al., 2012) [3] (Kang, et al., 2013) [4] (Jafari, et al., 2007) [5] (Kimwaga, et al., 2004)	[1] (Alianza por el Agua, 2018) [2] (Gandarillas, 2016) [3] (Couillard, 1994)	[1] (Patel, 2018) [2] (Singh, et al., 2017) [3] (Mitma Jara, 2017) [4] (Pérez Alarco & Pérez Yahuara, 2016)

Tabla 17: Matriz cualitativa de decisión.

Fuente: Elaboración propia.



En la Tabla 18, se presentan los resultados de los puntajes obtenidos de cada tecnología en función de los rubros evaluados, siendo la tecnología de Vermifiltración la que alcanza la mayor puntuación.

Matriz de Rubros Evaluados para la toma de decisión de la tecnología					
RUBROS EVALUADOS		TECNOLOGÍAS			
		Filtro Percolador	Filtro de medios horizontal	Peat Filter	Vermifiltro
Aplicabilidad del proceso	Eficiencia CF /15	5	5	10	15
	Eficiencia DBO /10	3	7	10	10
	Eficiencia TSS /10	3	7	10	10
Generación de residuos /5		3	3	3	5
Generación de subproductos con valor económico /5		1	1	1	5
Requerimiento de área /5		5	1	5	5
Costo de operación y mantenimiento /10		7	7	7	7
Complejidad de Operación /10		7	10	10	10
Personal requerido /10		7	10	10	10
Influencia sobre el entorno e impacto al medio ambiente /15		7	15	15	15
Implementación dentro del País /5		3	1	3	5
Ponderación total/100		51	67	84	97

Tabla 18: Matriz cuantitativa de decisión.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3 Propuesta de rediseño seleccionada

Estudiando cada una de las alternativas de tecnología propuestas, se puede discernir que la tecnología que tendría un funcionamiento óptimo y una adecuada compatibilidad con las estructuras existentes, sería la de Vermifiltros, ya que, de acuerdo a la matriz de decisión obtuvo la mejor puntuación en función de los rubros evaluados, además, los materiales necesarios para su construcción están disponibles localmente. En cuanto a lo funcional, esta tecnología ofrece excelentes porcentajes de remoción, tanto para materia orgánica, como para microorganismos patógenos, siendo este último un factor fundamental en la toma de decisión, generando un efluente con las condiciones aptas para una descarga segura en el cuerpo receptor, mejorando las condiciones ambientales y la salud pública de la comunidad servida.



## 5 DESARROLLO DE PROPUESTA DE DISEÑO DEFINITIVA

Se propone el diseño de las estructuras de entrada y la estructura de tratamiento preliminar (desarenador), además la reutilización de la fosa séptica (tratamiento primario). Por otro lado, en el tratamiento secundario, se plantea la conservación del primer humedal, mientras que en lugar del segundo humedal se pretendeemplazar el sistema de Vermifiltración, seleccionada como tecnología de tratamiento terciario. Además, se propone la colocación de cámaras de inspección para la toma de muestras, entre cada estructura de la PTAR, así como al ingreso y salida de la misma.

### 5.1 Memoria Técnica

#### 5.1.1 Cálculo de la población aproximada

La estimación de una población se realiza con el fin de tener un valor referencial de caudal máximo que puede llegar a soportar la planta piloto, con el cual se puede verificar el diseño de las estructuras preliminares en la planta. Por otro lado, con dicha población se estima el tiempo de limpieza de lodos en la fosa séptica.

La población aproximada se calcula para un caudal de proyecto impuesto de 1 l/s. La imposición de este caudal corresponde a un acuerdo con la Unidad de Plantas de Tratamiento Rurales de ETAPA en vista que esta planta en un futuro tendrá un carácter demostrativo. En la actualidad existe un colector que traslada los efluentes de la comunidad a la red principal de la ciudad de Cuenca que trata estos caudales en la PTAR de Ucubamba.

A continuación, se presentan las consideraciones para determinar la población aproximada a servir:

- ETAPA EP establece una dotación aproximada para cabeceras parroquiales rurales de 160 l/hab/día.
- De acuerdo a la Norma Brasileña 9649 de la ABNT, el coeficiente de retorno de aguas residuales es de 0.8.
- Se utiliza un coeficiente para determinar el caudal de infiltración de 0.05 m<sup>3</sup>/día\*mm\*km (Tchobanoglous, 1995).
- El caudal de aguas ilícitas representa del 5 al 10% del caudal máximo horario, por lo cual se asume un porcentaje del 10% que corresponde a la realidad de las zonas rurales del cantón según lo reportado por ETAPA.

Al imponerse un caudal medio diario de aguas residuales (1 l/s), se sigue un proceso inverso para determinar la población, para lo cual, la ecuación de Qmed. AR se coloca en función de la población, como se muestra en el proceso descrito a continuación:

La ecuación de caudal medio diario de aguas residuales (Qmed. AR) se expresa mediante la suma de los caudales de aguas domésticas (Qdom), de infiltración (Qinf) e ilícitas (Qilic), como se presenta en la ecuación (7):

$$\text{Qmed. AR.} = \text{Qdom} + \text{Qinf} + \text{Qilic} \quad (7)$$

El caudal doméstico (Qdom) se rige por la ecuación (8):

$$\text{Qdom} = \text{Dot} * \text{P} * \text{C} \quad (8)$$

Donde:

- Dot = Dotación, en l/hab/día;
- P = Habitantes a servir



- $C$  = Coeficiente de retorno

El caudal de infiltración ( $Q_{inf}$ ) se determina mediante un coeficiente de infiltración:

$$Q_{inf} = 0.05 \frac{m^3}{d\aa * mm * km} * L * \Phi \quad (9)$$

Donde:

- $L$  = Longitud del colector, en m
- $\Phi$  = Diámetro del colector, en mm

El caudal de aguas ilícitas ( $Q_{ilic}$ ) representa el 10% del caudal máximo horario (QMh). Se sabe que el QMh sigue la ecuación (10):

$$QMh = Q_{dom} * M \quad (10)$$

Donde:

- $M$  = Factor de mayoración

El factor de mayoración es calculado mediante la ecuación de Babbit, mismo que es recomendado para pequeñas poblaciones y generalmente se utiliza para sectores rurales, debido a que en poblaciones pequeñas la curva de consumo tiende a tener muchos picos, por lo cual se opta por seleccionar un mayor factor  $M$ . En la Figura 31, se presenta el comportamiento de las principales ecuaciones para la determinación de  $M$ , en función de la población.

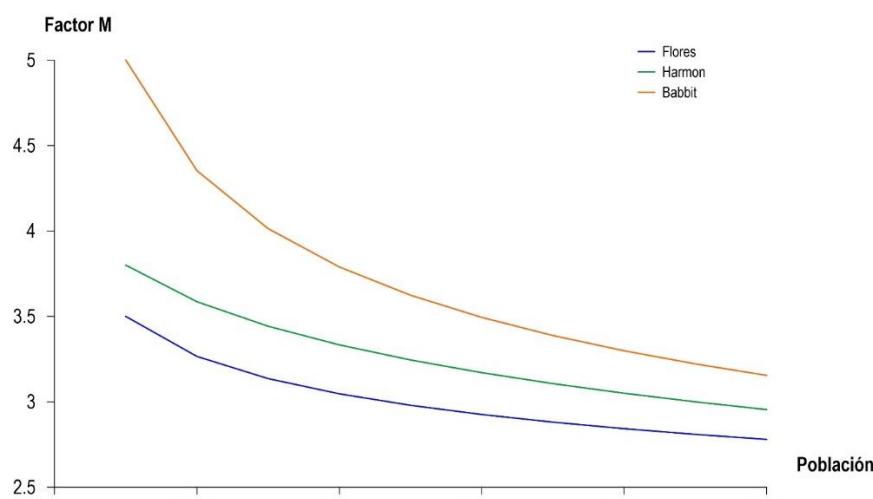


Figura 31: Coeficiente de Mayoración vs Población  
Fuente: Elaboración propia.

Victoria de Portete al ser una comunidad rural, posee una curva de consumo con muchos picos (Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014), por lo tanto, se elige el mayor factor  $M$ , correspondiente a la ecuación de Babbit, la misma que se presenta en la ecuación (11):

$$M = \frac{5}{P^{0.2}} \quad (11)$$

Donde:

- $P$  = Población en miles de habitantes



Se tiene que el caudal de agua ilícitas es:

$$Q_{ilic} = 10\% * Q_{dom} * M \quad (12)$$

Finalmente se determina la población mediante las ecuaciones presentadas. En la ecuación (13), se presenta el caudal medio de aguas residuales en función de la población:

$$Q_{med. AR} = 1 \frac{l}{s} = Dot * P * C + 0.05 * L * \varphi + 10\% * Dot * P * C * \frac{5}{P^{0.2}} \quad (13)$$

Los parámetros utilizados se presentan en la Tabla 19, así como la población aproximada.

Población aproximada			
Descripción	Valor	Unidades	Referencias
Longitud del colector	3.50	km	(Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014)
Diámetro colector	200	mm	(Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014)
Dotación	160	l/hab/día	ETAPA EP
Caudal medio A. Residuales	1	l/s	Establecido para el proyecto
Coeficiente de retorno	0.80	-	(NBR 9649 - ABNT, 1986)
Coeficiente Q_infiltración	0.05	m³/día*mm*km	(Tchobanoglous, 1995)
	0.0006	l/s*mm*km	
Coeficiente Q_ilícitas	10%	% QMH	(Cepis, 2005a)
Población	241.30	Hab	-
Población aproximada	242	Hab	-

Tabla 19: Población aproximada  
Fuente: Elaboración propia.

La población aproximada es de 242 habitantes, estimada para el caudal de diseño (1 l/s).

En la Tabla 20, se observan los valores de los caudales de aguas residuales tales como el caudal doméstico, de infiltración, de aguas ilícitas que conforman el caudal medio de aguas residuales, usado como caudal de diseño, además, se presenta el caudal máximo horario y el caudal máximo de aguas residuales, este último calculado para la verificación del dimensionamiento de las estructuras preliminares.

Caudales calculados			
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades
Caudal Doméstico	Q <sub>dom</sub>	0.36	l/s
Caudal Infiltración	Q <sub>inf</sub>	0.41	l/s
Caudal de Aguas Ilícitas	Q <sub>ilic</sub>	0.24	l/s
Caudal Medio Diario de AR (Caudal de diseño)	Q <sub>med. AR.</sub>	1.00	l/s
Coeficiente de Mayoración (Ecuación de Babit)	M	6.64	-
Caudal máximo Horario	Q <sub>MH</sub>	2.38	l/s
Caudal Máximo de AR	Q <sub>máx. AR.</sub>	3.03	l/s
		261.40	m³/día

Tabla 20: Caudales calculados  
Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.2 Estructuras preliminares

Para el desarrollo del tratamiento preliminar se plantea la construcción de un canal de hormigón, en el cual se coloca un conjunto de rejillas de sección circular para la retención de sólidos gruesos, seguido de un vertedero lateral para desviar el caudal de excesos. Posterior a ello, se encuentra una transición, misma que llega a un desarenador compuesto por dos cámaras cada una con sus respectivas compuertas, al final de ellas se presenta un vertedero sotro, el cual, es utilizado para el control del caudal (Figura 32).

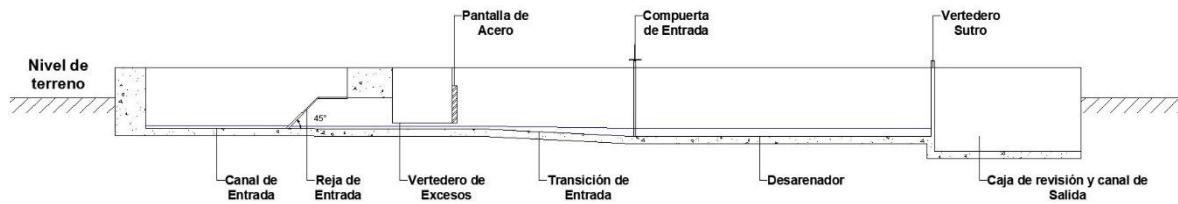


Figura 32: Esquema de estructuras preliminares

Fuente: Elaboración propia

#### Diseño del canal de ingreso

El canal de entrada es la estructura en la cual descarga la tubería del colector de conducción en la planta. Se propone un canal de conducción a cielo abierto, con sección rectangular con un ancho de 20 cm y pendiente del 0.5%. A pesar que las secciones del canal son angostas, estas tendrían un mejor funcionamiento (mayor calado para mejores condiciones hidráulicas). El ancho de canal propuesto brinda facilidades constructivas y de limpieza del canal con herramientas manuales.

Para el diseño se utiliza la ecuación de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} A (R_h)^{2/3} \sqrt{S} \quad (14)$$

Donde:

- Rh = radio hidráulico, en m;
- n= coeficiente que depende de la rugosidad de la pared;
- S= la pendiente de la línea de agua, en m/m;
- A= área de la sección del flujo de agua, en m<sup>2</sup>;
- Q= caudal del agua en, m<sup>3</sup>/s.

Se determina el calado de agua (y) en el canal, haciendo cumplir que la velocidad de aproximación (V) esté entre 0.3 y 0.6 m/s (Tchobanoglous & Burton, 1995); el diseño se realiza en base al caudal medio diario y se comprueba para el caudal máximo de aguas residuales. Por lo tanto, en la Tabla 21, se tienen los siguientes resultados:



Diseño del Canal				
Descripción	Nomenclatura	Valores - Qmed. AR.	Valores - Qmáx. AR.	Unidades
Calado de agua	y	0.017	0.036	m
Ancho del canal	b	0.200	0.200	m
Área del canal	A	0.003	0.007	m <sup>2</sup>
Perímetro mojado	P	0.234	0.271	m
Pendiente del canal	So	0.005	0.005	m/m
Rugosidad	n	0.014	0.014	-
Velocidad	V	0.300	0.450	m/s
Número de Froude	Fr	0.737	0.755	-
Rango velocidades	0.3 < V < 0.6 m/s	OK	OK	-

Tabla 21: Diseño del canal de Ingreso a la PTAR

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 22, se presentan las dimensiones constructivas del canal.

Dimensiones del canal			
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades
Largo	L	2.25	m
Ancho	b	0.20	m
Altura	h	0.40	m
Pendiente	So	0.5	%

Tabla 22: Dimensiones del Canal de Ingreso a la PTAR

Fuente: Elaboración propia.

### Diseño de la Reja de entrada

Para el dimensionamiento de las rejas de entrada se considera el calado del agua, correspondiente al caudal medio de aguas residuales. Para la determinación del número de barrotes se aplica la ecuación (15):

$$N = \frac{B_{\text{Total}}}{e} - 1 \quad (15)$$

Donde

- $B_{\text{Total}}$  = Ancho del canal, en m;
- $e$  = espaciamiento entre barrotes, en m.

La ecuación (16), sirve para determinar el ancho neto de la rejilla:

$$B_{\text{Neto}} = B_{\text{Total}} - N * d \quad (16)$$

De acuerdo con Kirschmer, la pérdida en las rejillas está dada por la ecuación (17):

$$h_R = \beta * \left(\frac{d}{e}\right)^{\frac{4}{3}} * \sin \delta * \frac{V^2}{2g} \quad (17)$$

El coeficiente  $\beta$ , depende del tipo de reja, que en este caso se utilizan rejas circulares, por lo tanto el valor de  $\beta$  es de 1.79, de acuerdo a la Figura 33.

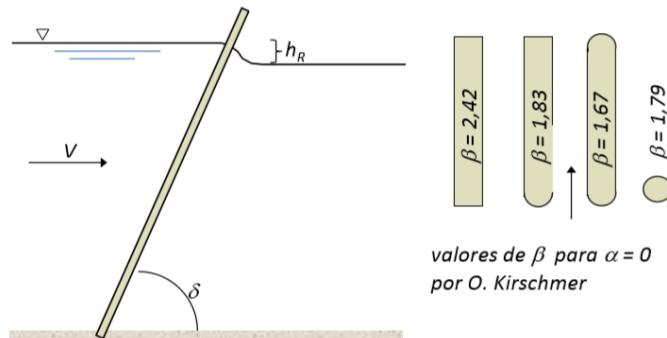


Figura 33: Coeficiente para las rejillas de paso  
Fuente: (Pacheco Tobar, 2019)

En la Tabla 23, se presentan los valores correspondientes al cálculo del ancho neto, la pérdida en las rejillas y el calado final de agua.

Reja de entrada				
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades	
Diámetro de varillas	$\Phi$	10	mm	
Espaciamiento	$e$	25	mm	
Ángulo con la vertical	$c$	45	$^{\circ}$	
Factor de forma	$\beta$	1.79	-	
Número de varillas	# varillas	7	-	
Ancho total	B total	0.20	m	
Ancho neto	B neto	0.13	m	
Pérdida	hr	0.002 1.721	m mm	
Calado de agua final	yf	1.53	cm	

Tabla 23: Dimensiones de la Reja de Entrada  
Fuente: Elaboración propia.

El dimensionamiento de las rejillas de entrada se comprueba mediante el caudal máximo de aguas residuales, por lo tanto, la pérdida cuando ingrese el caudal máximo horario será de 3.78 mm produciendo un calado de agua final de 0.032 m.

### Estructura de derivación de excesos

La estructura de derivación de excesos consistirá en un vertedero lateral. Para el dimensionamiento del vertedero se utilizan las ecuaciones que obedecen a un perfil de flujo con régimen subcrítico en el canal de aproximación. Se ha decidido colocar una pantalla contigua al vertedero, misma que se encuentre sobre el canal, la cual, ayudará a desviar con mayor facilidad el caudal de excesos.

Además, el vertedero lateral se colocará posterior a las cribas, como una medida para evitar que los materiales que se presentan en las crecidas (arenas, gravas y otros residuos) terminen en el cuerpo receptor causando efectos negativos en el mismo. Los materiales recolectados en las cribas pueden ser llevados en forma programada hacia su disposición final. En la Tabla 24, se presentan los parámetros de entrada para el dimensionamiento de la estructura.



Parámetros de entrada				
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades	
Rugosidad	n	0.014	-	
Pendiente del canal	So	0.005	m/m	
Ancho del canal	B	0.20	m	
Constante para canal rectangular (Gentilini)	a	1	-	

Tabla 24: Parámetros de entrada para el diseño del Vertedero Lateral

Fuente: Elaboración propia.

En común acuerdo con el director del trabajo de titulación y al no contar con valores precisos de caudales de crecidas, se iteró los mismos hasta obtener dimensiones construibles del vertedero, resultando un caudal de crecida y un caudal mayorado del proyecto, de 75 y 25% mayores al Qmáx. AR, respectivamente (Tabla 25).

Caudales para el diseño del vertedero				
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades	
Caudal de crecida	Q1	0.0053	m <sup>3</sup> /s	
Caudal mayorado del proyecto	Q2	0.00333	m <sup>3</sup> /s	

Tabla 25: Caudales para el diseño del vertedero lateral de excesos

Fuente: Elaboración propia.

Dichos caudales se presentarán en eventos aislados pocas veces al año, pero de todas maneras son importantes de considerar cuando se realiza el diseño de una PTAR, para prevenir posibles daños en las estructuras.

El procedimiento para el diseño del vertedero lateral se indica en el Anexo 1 y los resultados se presenta en la Tabla 26.

Longitud del vertedero lateral				
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades	
Carga de agua sobre el vertedero	H	0.012	m	
Altura del vertedero: z	p	0.04	m	
Coeficiente para perfil de cresta afilada	Cw	0.711	-	
Coeficiente	μ	0.474	-	
Longitud del vertedero lateral	L	0.4	m	

Tabla 26: Longitud del Vertedero Lateral

Fuente: Elaboración propia.

### Estructura de tratamiento preliminar: Desarenador

Para el dimensionamiento del desarenador se considera el caudal medio de diseño repartido entre las dos cámaras que posee el mismo, por lo que, cada una de ellas debe transportar 0.5 l/s. Del Anexo 2, tomado de la "Guía para el diseño de sedimentadores y desarenadores" (CEPIS, 2005a) se determina la Viscosidad Cinemática, misma que se obtiene a una temperatura de 14.6 °C.

El diseño, inicialmente se fundamenta en la ley de Stokes, por medio de la ecuación de la velocidad de sedimentación, misma que es dada para partículas en régimen laminar, ecuación (18):

$$V_s = \frac{1}{18} g \left( \frac{\rho_s - 1}{\eta} \right) d^2 \quad (18)$$



Donde:

- $V_s$  = Velocidad de sedimentación, en cm/s;
- $g$  = aceleración de la gravedad, en cm/s<sup>2</sup>;
- $\rho_s$  = peso específico de la partícula de arena;
- $\eta$  = viscosidad cinemática del fluido, en cm<sup>2</sup>/s;
- $d$  = diámetro de la partícula, en cm.

Posterior a ello se procede al cálculo del Número de Reynolds, mediante la ecuación (19):

$$Re = \frac{V_s * d}{\eta} \quad (19)$$

Se obtiene los resultados presentados en la Tabla 27:

Parámetros iniciales				
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades	Observaciones
Caudal de diseño	Qmd	0.50	l/s	Qmd = Qmed AR/2
Densidad relativa de la arena:	$\rho_s$	2.66	-	(Romero, 1999)
Diámetro de la partícula:	$d$	0.02	cm	(Salazar & Sánchez, 2015)
Temperatura del agua:	Temp.	14.6	°C	(Salazar & Sánchez, 2015)
Viscosidad Cinemática ( $\eta$ )	( $\eta$ )	0.0116	cm <sup>2</sup> /s	Anexo 2
Gravedad	$g$	980	cm/s <sup>2</sup>	-
Velocidad de sedimentación	$V_s$	3.11	cm/s	Ecuación (20)
Número de Reynolds:	Re	5.379	-	si > 0,5: no se encuentra en la zona de la ley de Stokes.

Tabla 27: Parámetros iniciales para el diseño del Desarenador

Fuente: Elaboración propia.

Por medio del Número de Reynolds se comprueba si se cumplen las condiciones necesarias para la aplicación de la ley de Stokes, ya que si es mayor a 0.5 no cumple las mismas, por lo tanto, es preciso realizar un reajuste al valor de la velocidad de sedimentación, variando el régimen de flujo de la partícula, a uno de transición, fundamentada en la ecuación de Allen:

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3} * \frac{g}{C_D} * (\rho_s - 1) * d} \quad (20)$$

Para realizar el reajuste de la  $V_s$  es necesario utilizar el gráfico 1 del Anexo N° 2, establecido en la "Guía para el diseño de sedimentadores y desarenadores" (CEPIS, 2005a).

Las fórmulas a usar en el reajuste son:

- Término del diámetro:

$$\left( g \frac{\rho_s - 1}{\eta^2} \right)^{1/3} d \quad (21)$$



- Término de la velocidad de sedimentación:

$$\frac{V_s}{(g\eta(\rho_s - 1))^{1/3}} \quad (22)$$

Posterior a ello, se determina el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ), por medio de la ecuación (23):

$$C_D = \frac{24}{R} + \frac{3}{R^2} + 0.34 \quad (23)$$

En la Tabla 28, se presentan los resultados luego del reajuste:

Reajuste de la velocidad de sedimentación			
Descripción	Valor	Unidades	
Término del diámetro:	4.59	-	
Término de la velocidad de sedimentación:	0.80	-	
V <sub>s</sub> nuevo	2.13	cm/s	
Re nuevo	3.67	-	
Coeficiente de arrastre, CD	8.44	-	
Velocidad de sedimentación de la partícula en la zona de transición, V <sub>s</sub> ZT	2.26	cm/s	

Tabla 28: Reajuste para la velocidad de sedimentación en el Desarenador

Fuente: Elaboración propia.

Nuevamente es necesario comprobar el valor del Número de Reynolds, mismo que debe estar en el rango  $2 < Re < 1000$ . Ya que, Re es de 3.67, entonces se encuentra en la zona de transición (ley de Allen), de acuerdo al cuadro 2, que establece la relación entre el diámetro de las partículas y velocidad de sedimentación (CEPIS, 2005a).

A continuación, se determina el área superficial en el desarenador. Si se asume una eficiencia del 75%, de acuerdo con el gráfico N° 3 del Anexo 2, establecida en la "Guía para el diseño de sedimentadores y desarenadores" (CEPIS, 2005a), se adopta un coeficiente de seguridad igual a 1,75. Para la determinación de dicha área se utiliza la ecuación (24):

$$V_s = \frac{Q_{md} * Cs}{A_s} \quad (24)$$

De la ecuación (24) se despeja A<sub>s</sub>, obteniéndose lo presentado en la Tabla 29:

Área superficial del desarenador			
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades
Coeficiente de seguridad	Cs	1.75	-
Área superficial	As	412	cm <sup>2</sup>
		0.04	m <sup>2</sup>

Tabla 29: Área superficial del Desarenador

Fuente: Elaboración propia.

Se debe cumplir con el área superficial calculada anteriormente, sin embargo, las dimensiones no son realizables en términos prácticos para su construcción ni operación, por lo que se procede a realizar el dimensionamiento cumpliendo la relación largo/altura del desarenador, valor que debe estar entre 10 y 20,



según lo establecido en la CEPIS (2005a). Por lo tanto, el desarenador tendrá las dimensiones presentadas en la Tabla 30:

Dimensiones del Desarenador			
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades/Condiciones
Largo	L	3.00	m
Ancho de c/u	B	0.25	m
Profundidad: Calado de agua	h	0.059	m
Área superficial a construir	As'	0.75	m <sup>2</sup>
Largo / Ancho	L/B	12.00	[10-20]
			CUMPLE

Tabla 30: Dimensiones propuestas para el Desarenador

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se determina el tiempo de retención en el desarenador, el cual debe estar entre 0.8 a 1.5 minutos. En la Tabla 31, se presentan los resultados:

Tiempo de retención			
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades/Referencias
Volumen	Vol	0.044	m <sup>3</sup>
Periodo de retención:	PR	88	s
		1.47	min
	[0.8-1.5 min]	CUMPLE	(Tchobanoglou & Burton, 1991)

Tabla 31: Tiempo de retención hidráulico medio en el Desarenador

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se determina la longitud de transición por medio de la ecuación (25), y su resultado se presenta en la Tabla 32:

$$L_t = \frac{B - b}{2 * \tan \theta} \quad (25)$$

Longitud del tramo de transición.				
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades	
Ancho del canal de entrada	b	0.2	m	
Ancho Pared entre canales	b*	0.1	m	
Inclinación recomendada (CEPIS, 2005)	θ	12.5	°	
Longitud del tramo de transición	Lt	0.902	m	
	Lt constructivo	1.0	m	
θ constructivo < 12.5 (CEPIS, 2005)	θ constructivo	11.3	°	

Tabla 32: Longitud calculada de la Transición

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la comprobación del diseño de cada compartimento de esta estructura, en función de la mitad del Caudal Máximo de Aguas Residuales (0.0015 m<sup>3</sup>/s), se obtiene un calado de agua de 0.07m y un período de retención de 0.6 minutos, siendo este último un valor cercano al límite, pero aceptable tomando en cuenta que este caudal se puede presentar en forma esporádica y por períodos muy cortos durante el día.

### Transición

Para el diseño de la transición de entrada al desarenador, se establecen los siguientes parámetros de entrada que se presentan en la Tabla 33.



Datos de entrada				
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades	
Caudal medio diario	qmd	0.001	m <sup>3</sup> /s	
Velocidad de salida	V <sub>o</sub>	0.03	m/s	
Velocidad de entrada	V <sub>i</sub>	0.33	m/s	
Ancho del canal	b <sub>i</sub>	0.20	m	
ancho del desarenador	b <sub>o</sub>	0.60	m	
Calado de agua en el canal	y <sub>n_i</sub>	0.015	m	
Calado de agua en el desarenador	y <sub>n_o</sub>	0.059	m	
Cota piso inicial	C <sub>pi</sub>	0.00	m	
Cota piso final	C <sub>pf</sub>	-0.05	m	
Coeficiente por conversión (Transición recta de salida)	c	0.5	-	
Longitud de transición	L <sub>t</sub>	1	m	

Tabla 33: Datos de entrada para el diseño de la Transición

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se calculan las pérdidas totales generadas por la transición, mediante la ecuación (26).

$$\Delta y = (1 - c) * \frac{V_i^2 - V_o^2}{2g} \quad (26)$$

Donde:

- $\Delta y$  = Pérdidas totales, en m;
- $c$  = Coeficiente por conversión para una transición recta de salida
- $V_i$  = Velocidad de entrada, en m/s;
- $V_o$  = Velocidad de salida, en m/s.

En el diseño de la transición se consideran 5 puntos a lo largo de la misma, para los cuales se determinan las pérdidas parciales en cada punto, mediante la ecuación (27).

$$\Delta y p_i = \frac{\Delta y * \# abscisa_i}{\# abscisa final} \quad (27)$$

Donde:

- $\Delta y p_i$  = Pérdidas parciales correspondientes a cada abscisa, en m;
- $\# abscisa_i$  = Punto correspondiente a cada abscisa;
- $\# abscisa final$  = Punto correspondiente a la abscisa final.

La velocidad en cada uno de los puntos de abscisado, para una transición recta de salida, está definida por la ecuación (28):

$$v_1 = \sqrt{-\frac{(\Delta y p_i - \Delta y p_{i-1}) * 2g}{1 - c} + v_{1i-1}^2} \quad (28)$$

Donde:

- $v_1$  = Velocidad para una transición recta de salida, en m/s.

Se determina además la sección transversal en la transición de acuerdo con la ecuación (29).



$$A = \frac{Q_{med. AR.}}{v_1} \quad (29)$$

Para determinar la cota de piso se utiliza la ecuación (30).

$$C_p = C_{pf} * \frac{\# abscisa_i}{\# abscisa final} \quad (30)$$

Donde:

- $C_p$ : cota del fondo en la transición, en m;
- $C_{pf}$ : Cota de piso al final de la transición, en m.

El calado de agua en la transición es calculado con la ecuación (31).

$$yt = (C_{pi-1} - C_p) - (\Delta y_{pi} - \Delta y_{pi-1}) + yt_{i-1} \quad (31)$$

La variación del ancho b, en la transición se determina mediante la ecuación (32).

$$B = b_i + \frac{b_o - b_i}{l_t} * Abscisa \quad (32)$$

Donde:

- $B$  = Ancho de la transición, en m;
- $b_i$  = Ancho del canal, en m;
- $l_t$  = Longitud de la transición, en m.

La cota del calado de agua a lo largo de la transición, varía con respecto a la pendiente de la misma y es calculada con la ecuación (33).

$$\text{Cota de agua} = C_p + yt_i \quad (33)$$

Luego de definir las ecuaciones que precisan el diseño de la transición, en la Tabla 34 se presentan los resultados.

Punto	Abscisa	$\Delta y_p$	$v_0$	$v_1$	$A_1$	Cota - piso	$yt$	$b$	Cota de agua	Variación de $b/2$ - Transición	
0	0	0.0000		0.473	0.006	0.000	0.032	0.200	0.032	0.100	-0.100
1	0.2	0.0011	0.473	0.424	0.007	-0.009	0.039	0.280	0.031	0.140	-0.140
2	0.4	0.0022	0.424	0.369	0.008	-0.018	0.047	0.360	0.029	0.180	-0.180
3	0.6	0.0033	0.369	0.304	0.010	-0.026	0.055	0.440	0.028	0.220	-0.220
4	0.8	0.0045	0.304	0.221	0.014	-0.035	0.062	0.520	0.027	0.260	-0.260
5	1	0.0056	0.221	0.071	0.042	-0.044	0.070	0.600	0.026	0.300	-0.300

Tabla 34: Diseño de la Transición  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 34, se puede observar la vista en planta de la transición previa al desarenador.

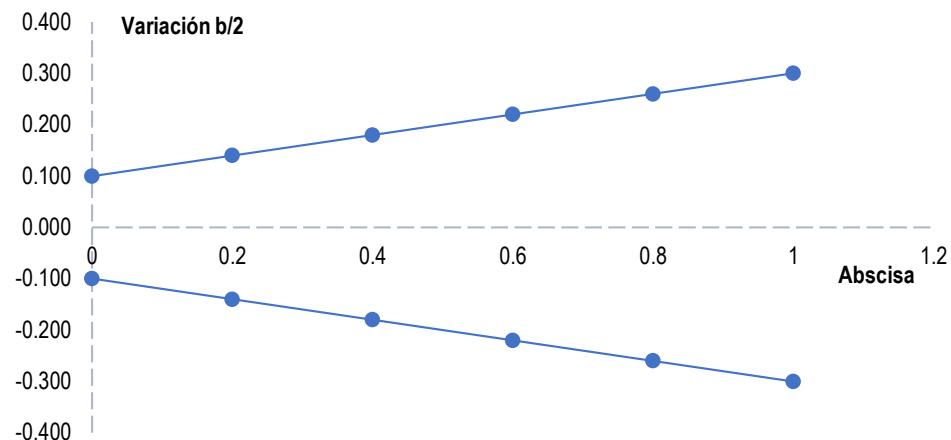


Figura 34: Vista en Planta de la Transición  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 35, se presenta la vista de perfil de la transición recta de salida, con una pendiente en el fondo del 4%.

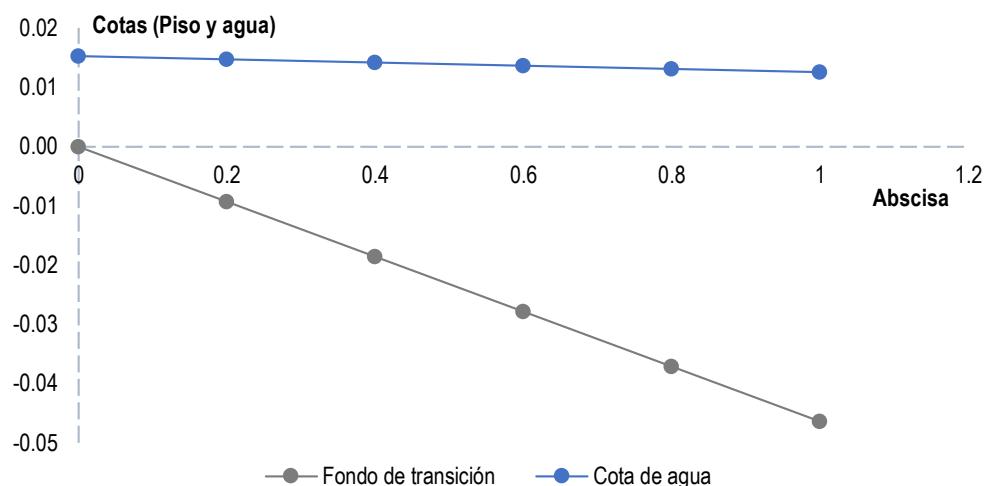


Figura 35: Vista en perfil de la Transición  
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados para el caudal máximo de aguas residuales (3 l/s) se encuentran en el Anexo 3.

### Vertedero Sutro

Para el diseño del vertedero sutro se tomó como base la “Guía para el diseño de sedimentadores y desarenadores” (CEPIS, 2005a), misma que nos presenta la ecuación (34), que es utilizada para la obtención de sus dimensiones.

$$Q = 2.74\sqrt{ab} \left( H - \frac{a}{3} \right) \quad (34)$$



Donde:

- $Q$  = Caudal medio de aguas residuales, en  $\text{m}^3/\text{s}$ ;
- $a$  = Altura mínima, en m;
- $b$  = Ancho de la base, en m;
- $H$  = Altura del agua, en m.

En la Figura 36, se presenta la configuración del vertedero Sutro.

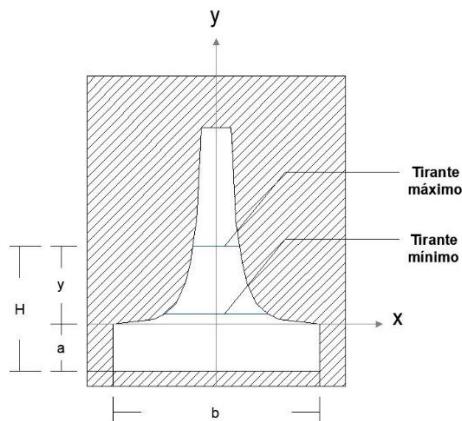


Figura 36: Configuración de un Vertedero Tipo Sutro

Fuente: (CEPIS, 2005a)

Los resultados son presentados en la Tabla 35:

Vertedero Proporcional Tipo Sutro			
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades
Caudal por el desarenador	$q_{md}/2$	0.0005	$\text{m}^3/\text{s}$
Altura de la base	$a$	0.01	m
Ancho del vertedero Sutro	$b$	0.2	m
Calado de agua sobre la cresta	$H$	0.0091	m
Altura del vertedero	$h$	0.05	m
Calado de agua final	$Y_n$	0.0591	m

Tabla 35: Diseño del Vertedero tipo Sutro

Fuente: Elaboración propia.

Mientras que, la forma de las paredes del vertedero viene dada por la ecuación (35):

$$\frac{x}{b} = 1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{y}{a} \quad (35)$$

Los valores resultantes de la sección del vertedero Sutro, se pueden observar en la Tabla 36, y Figura 37.



Cálculo de la sección del Sutro		
X (m)	y (m)	Ancho (m)
0.100	0.00	0.20
0.061	0.005	0.122
0.050	0.01	0.100
0.039	0.02	0.078
0.030	0.04	0.059
0.025	0.06	0.049
0.022	0.08	0.043
0.019	0.10	0.039
0.018	0.12	0.036
0.017	0.14	0.033
0.016	0.16	0.031
0.014	0.19	0.029

Tabla 36: Diseño de la sección del Vertedero tipo Sutro

Fuente: Elaboración propia.

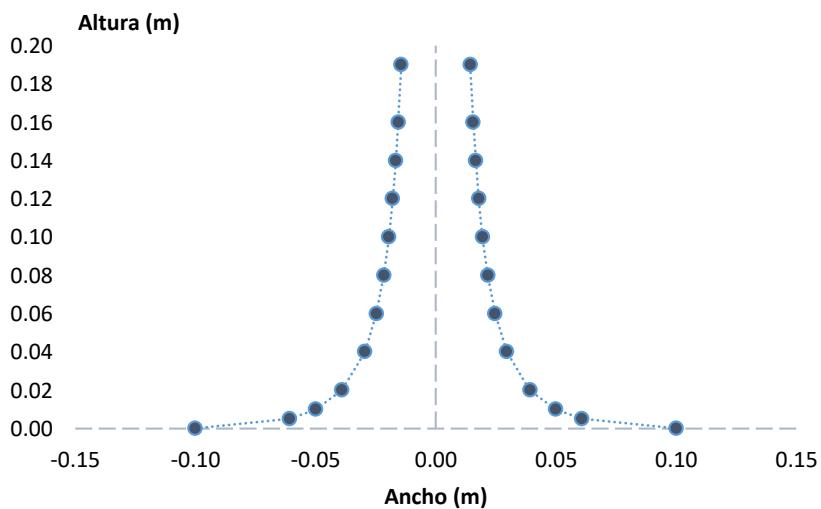


Figura 37: Configuración del Vertedero Tipo Sutro propuesto

Fuente: Elaboración propia.

Para la comprobación del funcionamiento del vertedero Sutro, en relación al Caudal Máximo de Aguas Residuales ( $0.0015 \text{ m}^3/\text{s}$ ), el calado de agua sobre la cresta resulta un valor de  $0.02\text{m}$ , mientras que el calado de agua final sería de  $0.07\text{ m}$ .

#### 5.1.2.1 Remoción de contaminantes en las estructuras preliminares

Para las estructuras preliminares se considera un porcentaje de remoción de contaminantes dentro de los rangos de eficiencia establecidos en el Ministerio de Desarrollo Económico (2000), en la Tabla 37, se presenta la carga de contaminantes en el afluente, el porcentaje de remoción usado y la carga de contaminantes en el efluente.



Nivel de tratamiento	Contaminantes removidos	Eficiencias de remoción utilizadas (%)	Rangos	Mediana de ingreso (mg/l)	Remoción (mg/l)	Efluente Estructura (mg/l, NPM/100 ml*)
Preliminar	SST	5	[0-10]%	388.00	19.40	368.60
	DQO	5	[0-5]%	613.00	30.65	582.35
	DBO	5	[0-5]%	258.00	12.90	245.10
	Coliformes*	0	Despreciable	$7.9 \times 10^6$	0.00	$7.9 \times 10^6$
	Nutrientes	NTK P	Despreciable Despreciable	39.69 4.44	0.00 0.00	39.69 4.44

Tabla 37: Concentraciones de contaminantes en el afluente y efluente del tratamiento preliminar

Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.3 Tratamiento primario

#### Fosa Séptica

Para este proyecto se plantea utilizar el tanque séptico existente, al recibir un caudal de 1 l/s estará sobredimensionado, ya que recibirá menos caudal que para el que fue diseñado; por lo tanto, se busca determinar el tiempo de limpieza (N) que requiere el tanque, considerando los parámetros de diseño indicados a continuación.

Se establece los parámetros iniciales, presentados en la Tabla 38.

Datos para la Fosa Séptica				
Descripción	Nomenclatura	Fórmula	Valor	Unidades
Dotación aproximada	D	-	160	l/hab*día
Coeficiente de retorno	C	-	0.8	-
Población aproximada	P	-	242	hab
Caudal de aporte unitario de aguas residuales	q	$q = D \times C$	128	l/hab*día

Tabla 38: Datos iniciales de la Fosa Séptica

Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de retención hidráulica requerido está en función de la población servida y se calcula mediante la ecuación (36), y el resultado se presenta en la Tabla 39:

$$Pr = 1.5 - 0.3 * \log(P * q) \quad (36)$$

Donde:

- $Pr$  = tiempo promedio de retención hidráulica, en días;
- $P$  = población servida
- $q$  = caudal de aporte unitario de aguas residuales, en l/hab/día.

Periodo de retención			
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades
Periodo de retención	Pr	0.153	día
		3.66	h
Periodo de retención mínimo	Pr mín	6	h

Tabla 39: Período de Retención hidráulico medio en la Fosa Séptica

Fuente: Elaboración propia.



En el cálculo del volumen de sedimentación se usa la ecuación (37):

$$Vs = 10^{-3} * (P * q) * Pr \quad (37)$$

Donde:

- $V_s$  = volumen de sedimentación, en  $m^3$ .

Finalmente, el volumen de almacenamiento de lodos es calculado mediante la ecuación (38):

$$Vd = G * P * N * 10^{-3} \quad (38)$$

Donde:

- $V_d$  = volumen de almacenamiento de lodos, en  $m^3$ .
- $G$  = volumen de lodos producidos por persona y por año, en l;
- $N$  = intervalo de limpieza o retiro de lodos, en años.

El tanque séptico actual posee las dimensiones descritas en la Tabla 40.

Medidas originales		
Descripción	Valor	Unidades
Ancho	3	m
Largo	11.5	m
Profundidad útil	1.95	m

Tabla 40: Medidas Originales de la Fosa Séptica

Fuente: Elaboración propia.

La altura útil del tanque séptico es la suma de la altura de digestión y almacenamiento de lodos ( $H_d$ ), de la altura de la nata ( $H_e$ ) y la altura de sedimentación ( $H_l$ ), tal y como se puede apreciar en la Figura 38.

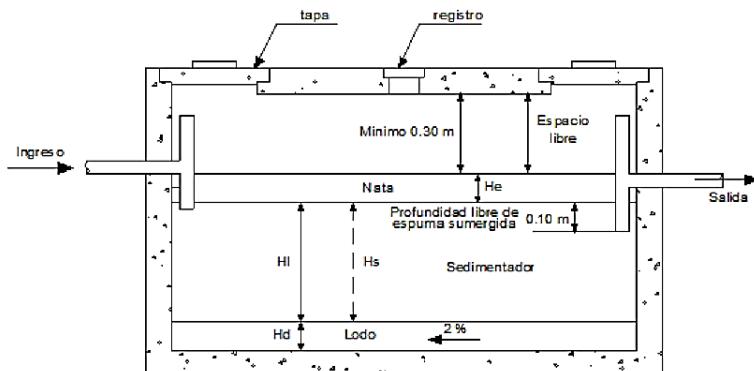


Figura 38: Configuración del Tanque Séptico

Fuente: (CEPIS, 2005b)

Se itera el periodo de limpieza ( $N$ ) hasta alcanzar una altura útil de 1.95 m, obteniéndose los resultados expuestos en la Tabla 41:



Dimensionamiento de la Fosa Séptica				
Descripción	Nomenclatura	Fórmula	Valor	Unidades
Volumen requerido para la sedimentación	<b>Vs</b>	$Vs = 0,001 (P \times q) \times Pr/24$	7.74	$m^3$
Área del tanque séptico	<b>A</b>	Impuesta	34.50	$m^2$
Profundidad requerida para sedimentación	<b>Hs</b>	$(Hs = Vs/A) > 0.3 m$	0.22	m
Volumen de digestión y almacenamiento de lodos, Vd	<b>Vd</b>	$Vd = 70 \times 0,001 \times P \times N$	52.78	$m^3$
Profundidad requerida para la digestión y almacenamiento de lodos (Hd)	<b>Hd</b>	$Hd = Vd/A$	1.53	m
Profundidad máxima de espuma sumergida (He)	<b>He</b>	$He = 0,7/A$	0.02	m
Profundidad del dispositivo de salida respecto al nivel superior de espuma (Htee)	<b>Htee</b>	$Htee = He + 0.1$ (CEPIS, 2005b: 6.6)	0.12	m
Profundidad libre entre la capa de lodo y el nivel inferior del dispositivo de salida (Ho)	<b>Ho</b>	$Ho = 0,82 - 0,26A$	-6.08	m
Ho adoptado (sujeto a un valor mínimo de 0,3 m)	<b>Ho mín</b>	-	0.30	m
Profundidad de sedimentación útil (Hi)	<b>Hi</b>	mayor valor entre : (0,1 + Ho) y Hs	0.40	m
Profundidad útil total del tanque séptico (Ht)	<b>Ht</b>	$Ht = He + Hi + Hd$	1.95	m
Relación largo : ancho	<b>L/a</b>	Impuesta [2-5]	4	
Ancho del tanque séptico (a)	<b>a</b>	$a = A/(L/a)$	3.00	m
Longitud del tanque séptico (L)	<b>L</b>	$L = A/a$	11.50	m
Volumen total útil del tanque séptico (Vu)	<b>Vu</b>	$Vu = Ht \times A$	67.28	$m^3$

Tabla 41: Dimensionamiento de la Fosa Séptica

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 41, el periodo de limpieza de lodos (N) será de aproximadamente 3 años.

En esta estructura se propone la modificación de las tuberías de ingreso, salida e interconexiones por tuberías con accesorios tipo Tee como lo establece la CEPIS (2005b).

#### 5.1.3.1 Remoción de contaminantes en el tratamiento primario

En el tratamiento primario se considera un porcentaje de remoción de contaminantes dentro de los rangos de eficiencia establecidos por Sperling (2007), en la Tabla 42 se presenta la carga de contaminantes en el afluente, efluente y el porcentaje de remoción usado, en el que se consideró el mayor valor del rango establecido debido a que el tanque séptico se encuentra sobredimensionado por lo que la remoción de contaminantes es mayor.



Nivel de tratamiento	Contaminantes removidos	Eficiencias de remoción utilizadas (%)	Rangos	Ingreso (mg/l)	Remoción (mg/l)	Efluente Estructura (mg/l, NPM/100 ml*)
Primario (Tanque Séptico)	SST	65	[55-65]%	368.60	239.59	129.01
	DQO	40	[30-40]%	582.35	232.94	349.41
	DBO	35	[30-35]%	245.10	85.79	159.32
	Coliformes*	75	<90%	$7.9 \times 10^6$	$59.25 \times 10^5$	$19.75 \times 10^5$
	Nutrientes	NTK P	20 <30% 25 <35%	39.69 4.44	7.94 1.11	31.75 3.33

Tabla 42: Concentraciones de contaminantes en el afluente y efluente del tratamiento primario

Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.4 Tratamiento secundario

#### Humedal de flujo horizontal Sub Superficial

Para el tratamiento secundario, se propone conservar un humedal, de los dos existentes en la PTAR, ya que únicamente ingresará un caudal de 1 l/s. Además, se adoptan las especificaciones de diseño propuestas por Salazar & Sánchez (2015), expuestas en su tesis “Evaluación y propuesta de rediseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Comunidad de Churuguzo, Parroquia Tarqui, Catón Cuenca, Provincia del Azuay”, tales como la dirección de flujo y la configuración del humedal (Tabla 43). Por último, se plantea colocar una estructura similar a un sifón a la salida del humedal para el control del nivel del agua dentro del mismo (véase la capítulo 8 - Planos).

Descripción		Valor	Unidad
Distribución y recolección	Diámetro de la tubería de entrada	160	mm
	Diámetro de la tubería de salida	160	mm
	Diámetro de perforaciones	20	mm
	Separación entre perforaciones	1.2	m
<b>Tamaño</b>			
Sustrato (Medio)	Zonas de entrada y salida	60	mm
	Zona de plantación de la vegetación	20	mm
<b>Profundidad</b>			
	Zonas de entrada	0.6	m
	Zona de plantación de la vegetación	0.6	m
<b>Pendiente</b>			
	Pendiente en la longitud más larga del humedal	0.5	%
Nota: La dirección de flujo es perpendicular a la longitud más corta del humedal			

Tabla 43: Configuración de los humedales artificiales de flujo horizontal sub superficial

Fuente: (Sánchez &amp; Salazar, 2015)

El flujo de agua residual a través de los humedales de acuerdo con Sánchez & Salazar (2015) ha sido dispuesto para asemejarse en lo más posible a flujo pistón, por lo tanto, el líquido debe circular por la dimensión más larga del humedal. Cabe recalcar que la tubería que sale de la cámara de inspección, ubicada junto a la fosa séptica, es de 110mm, para el ingreso de esta a los humedales se usa un accesorio de ampliación, que conecta a una tubería de 160mm para la distribución del agua dentro del humedal. Los datos generales del humedal que se mantiene, se presentan en la Tabla 44.



Datos Generales del Humedal				
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades	Referencia
Largo efectivo	L	28.50	m	(Once Sarmiento & Ruiz Herrera, 2014) Método: Kadlec & Knight
Ancho efectivo	A	14	m	
Área efectiva	S	399	m <sup>2</sup>	
Caudal medio diario de aguas residuales	Qmed AR	1	l/s	Impuesta para el diseño
		31536	m <sup>3</sup> /año	
		86.40	m <sup>3</sup> /día	
Porosidad del medio	e	0.431	-	(Ahmed, et al., 2015)
Profundidad media del humedal	h	0.60	m	(Salazar Serrano & Sánchez Merchán, 2015)
Temperatura	T	14.60	°C	
Carga Hidráulica	HLR	0.217	m/día	(Kumar, et al., 2014)

Tabla 44: Datos generales del Humedal de flujo horizontal sub superficial existente

Fuente: Elaboración propia.

Mediante la ecuación (39), se determina el tiempo de retención hidráulico medio teórico.

$$t = \frac{L * A * h * e}{Qmed AR} \quad (39)$$

Donde:

- t = Tiempo de retención hidráulica, en días;
- L = Largo efectivo del Humedal, en m;
- A = Ancho efectivo del Humedal, en m;
- h = Profundidad media del humedal, en m;
- e = Porosidad del medio;
- Qmed AR = Caudal medio diario de aguas residuales a través del humedal, en m<sup>3</sup>/día.

Resultando, el tiempo de retención hidráulica, un valor de 1.19 días.

#### 5.1.4.1 Remoción de contaminantes en tratamiento secundario

El modelado de humedales de tratamiento, consiste en ecuaciones de primer orden, ecuación (40), que en caso de condiciones constantes (por ejemplo, afluente, flujo y concentraciones) y un comportamiento ideal de flujo pistón, predicen un perfil exponencial entre entrada y salida (Rousseau, et al., 2004).

$$\frac{Ce}{Ci} = \exp(-k_v * t) \quad (40)$$

Donde:

- Ce = Concentración del efluente, en mg/l;
- Ci = Concentración del afluente, en mg/l;
- k<sub>v</sub> = Constante cinética de primer orden, en m/día;
- t = Tiempo de retención hidráulica, en días.

Para el cálculo de las concentraciones aproximadas del efluente de cada uno de los contaminantes a tomar en cuenta, se utilizan las ecuaciones (41), (42), (43), (44) y (45), mismas que fueron desarrolladas por Jan Vymazal y tomadas de Rousseau, et al., (2004), fundamentadas en la ecuación (40).



Para la concentración de la DBO

$$Ce = (0.099 * Ci) + 3.24 \quad (41)$$

Para la concentración de los SST

$$Ce = (0.021 * Ci) + 9.17 \quad (42)$$

Para la concentración del NTK

$$Ce = (0.42 * Ci) + 7.68 \quad (43)$$

Para la concentración del P

$$Ce = (0.26 * Ci) + 1.52 \quad (44)$$

Para la concentración de la DQO

$$Ce = \frac{(0.17 * HLR * Ci * 10) + 5.78}{HLR * 10} \quad (45)$$

Los resultados de la concentración final de cada contaminante en el Humedal, se presentan en la Tabla 45.

Parámetros		Concentración de contaminantes en el efluente del humedal					
Descripción	Nomenclatura	DBO	SST	NTK	P	DQO	Unidades
Concentración inicial o del Afluente	Ci	159.32	129.01	31.75	3.33	349.41	mg/l
Concentración final o del Efluente	Ce	19.01	11.88	21.02	2.38	62.07	mg/l

Tabla 45: Porcentaje de remoción de contaminantes en el Humedal

Fuente: Elaboración propia.

Para la determinación de la concentración del efluente con respecto a los Coliformes fecales se utiliza la ecuación (46) del método de Kadlec & Knight tomado de (Salazar & Sánchez, 2015).

$$S = \frac{Q_{med} AR}{k_A} * \ln \left( \frac{Ci}{Ce} \right) \quad (46)$$

Donde:

- Ce = Carga del efluente, en kg DQO/ha\*día;
- Ci = Carga del afluente, en kg DQO/ha\*día;
- k<sub>A</sub> = Constante cinética de primer orden, en m/día;
- Qmed AR = Caudal medio diario de aguas residuales a través del humedal, en m<sup>3</sup>/día;
- S = Área efectiva del humedal, en m<sup>2</sup>.

En la Tabla 46 se presenta la concentración de Coliformes Fecales a la salida de esta estructura.

Parámetros		Concentración de coliformes fecales en el efluente del humedal		
Descripción	Símbolo	Valor	Unidades	Referencia
Constante Cinética de primer orden	Ka	95	m/año	(Kayombo, et al., 2004)
Concentración inicial o del Afluente	Ci	19.75x10 <sup>5</sup>	NMP/100ml	-
Concentración final o del Efluente	Ce	59.37x10 <sup>4</sup>	NMP/100ml	-

Tabla 46: Concentraciones de CF en el afluente y efluente del tratamiento secundario

Fuente: Elaboración propia.



### 5.1.5 Tratamiento Terciario

#### Vermifiltros

##### Datos Preliminares

Como punto de partida se determina el área total necesaria para soportar la carga hidráulica de  $2.5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$  (establecida como la más eficiente para la remoción de contaminantes en la sección 2.6.4.5) y el caudal medio de aguas residuales impuesto en la PTAR (1 l/s), por lo que, el resultado del mismo se calcula mediante la ecuación (47) tomada de Manyuchi, et al., (2013a) y se presenta en la Tabla 47.

$$\text{HLR} = \frac{\text{Qmed. AR}}{A} \quad (47)$$

Datos Preliminares				
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades	
Carga Hidráulica	HLR	2.50	$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$	
Caudal medio diario de Aguas Residuales	Qmed AR	86.40	$\text{m}^3/\text{día}$	
		1	l/s	
Área Total de Vermifiltros	A	34.56	$\text{m}^2$	

Tabla 47: Datos preliminares para el diseño del Vermifiltro

Fuente: Elaboración propia.

Se pretende cubrir el área total de los Vermifiltros por medio de tanques prefabricados que son normalmente utilizados para el almacenamiento de agua potable o riego; por lo que, se realiza la selección de la opción más adecuada, en función de las dimensiones comerciales disponibles. En la Figura 39 y la Tabla 48, se presentan las dimensiones y capacidad de cada uno de los tanques propuestos, que presentó la mejor opción de variedad y costo entre las disponibles en el mercado nacional.

Medidas comerciales - Tanque PVC		
Descripción	Valor	Unidades
Capacidad	5000	10000
	5	$\text{m}^3$
A	55	cm
B	250	cm
H	158	cm

Tabla 48: Medidas Comerciales de Tanques de PVC

Fuente: (Plastigama, 2019)



Figura 39: Tanque PVC

Fuente: (Plastigama, 2019)

El tanque seleccionado según las dimensiones y capacidad es el de  $5 \text{ m}^3$ ; a continuación, se divide el área total para el área de cada tanque, y así, se obtiene el número de tanques necesarios para que exista una correcta distribución del agua residual, siendo el resultado 7 tanques, tal como se presenta en la Tabla 49

Número de tanques requeridos (Capacidad 5 $\text{m}^3$ )		
Descripción	Valor	Unidades
Diámetro de cada Tanque	250	cm
Área del lecho c/tanque	4.90	$\text{m}^2$
Área Total requerida	34.60	$\text{m}^2$
Nº tanques requeridos	7.04	Tanques
	7	

Tabla 49: Número de Tanques requeridos para la Desinfección

Fuente: Elaboración propia.



## Configuración de las capas

La configuración de las capas que conforman el Vermifiltro de acuerdo con Arora & Kazmi (2016), presentan una mayor eficiencia si se tiene en cuenta la siguiente distribución: la capa de base o soporte conformada por grava de entre 4 a 14 mm, la capa subsecuente de arena con partículas de diámetro de entre 1 a 2 mm, posterior a ella, un sustrato que sirva de alimento para las lombrices (fibra de coco) y, por último, una capa de tierra que sirva de hábitat para las lombrices.

Se ha seleccionado la fibra de coco como sustrato de alimento para las lombrices, debido a que presenta buenas eficiencias en la remoción de contaminantes de acuerdo con experimentos presentados en el artículo de Reyes (2016). Los espesores de cada uno de los estratos han sido definidos por medio de la literatura expuesta en la Tabla 50, la misma que establece rangos de referencia recomendados, para la capa de tierra con lombrices, que incluye además la fibra de coco, se tiene un rango adecuado que oscila entre el 13 al 100 %, para la capa de arena se tiene del 18 al 60 %, finalmente para la capa de grava del 6 al 63 %. Los porcentajes de altura utilizados para cada una de las capas, se presentan en la Tabla 50.

CONFIGURACIÓN DE CAPAS							
Capas	Altura	Unidad	Porcentaje de altura útil usado	Rango recomendado	Referencias		
Borde libre	0.48	m	-	-	-		
Capa de tierra (con lombrices)	0.20	m	64%	13% - 100%	(Mendieta, 2012; Xing et al., 2012; Velasco, 2015)		
Fibra de coco	0.50	m					
Arena (1-2 mm)	0.20	m	18%	18% - 60%	(Arora et al., 2014; Kumar et al., 2014)		
Grava (4-6 mm)	0.10	m	18%	6% - 63%	(Zhao et al., 2012; Velasco, 2015)		
Grava (12-14 mm)	0.10	m					
<b>Altura total útil</b>	<b>1.10</b>	<b>m</b>	Referencia de la configuración de capas: (Arora & Kazmi, 2016)				
<b>Altura Total</b>	<b>1.58</b>	<b>m</b>	Observación: Entre cada capa se coloca una geomalla				

Tabla 50: Configuración de las capas que conforman el Vermifiltro

Fuente: Elaboración propia.

## Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)

Una vez definidas las alturas de cada una de las capas que conforman el Vermifiltro, se procede a determinar el tiempo de retención hidráulico medio de las mismas, por medio de la ecuación (48) tomada de Manyuchi, et al. (2013a).

$$\text{TRH} = \frac{(\rho \times V_s)}{\text{Qmed AR}} \quad (48)$$

Donde

- TRH = Tiempo de retención hidráulica, en h;
- Vs = Volumen de la capa de sólidos, en m<sup>3</sup>;
- ρ = Porosidad del lecho Vermifiltro;
- Qmed AR = Caudal medio diario de aguas residuales a través del lecho del suelo, en m<sup>3</sup>/h.

El caudal medio diario de aguas residuales ha sido dividido para las 7 unidades de Vermifiltración como se presenta en la Tabla 51.



Caudal medio diario de ingreso en cada Vermifiltro		
qmd	0.14	l/s
	0.51	m <sup>3</sup> /h

Tabla 51: Caudal de ingreso para las unidades de Vermifiltración

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de porosidad han sido tomados de diferentes autores (mismos que han realizado varios ensayos con cargas hidráulicas similares), y por medio de éste, se obtiene los tiempos de retención hidráulica, que se presentan en la Tabla 52.

Tiempo de Retención Hidráulico en el Vermifiltro (TRH)					
Capas útiles del Vermifiltro	Porosidad		Altura	volumen	TRH
	ρ (%)	Referencia	m	m <sup>3</sup>	h
Capa de tierra (con lombrices)	60%	(Arora & Kazmi, 2016)	0.20	0.98	1.15
Fibra de Coco	88%	(Fernandez Brenis & Sánchez Zapata, 2016)	0.50	2.45	4.20
Arena (1-2 mm)	35%	(Arora & Kazmi, 2016)	0.20	0.98	0.67
Grava (4-6 mm)	40%	(Arora & Kazmi, 2016)	0.10	0.49	0.38
Grava (12-14 mm)	43%	(Arora & Kazmi, 2016)	0.10	0.49	0.41
TRH total					6.81 h

**Observaciones:** Se recomienda valores de HLR entre 2,0-3,0 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día durante un TRH de 6-8 horas (Manyuchi, et al., 2013a)

El TRH típico varía entre 6 y 9 horas y la HLR entre 2,0 y 3,0 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día (Xing et al. 2005) tomado de (Lourenço, N. & Nunes, L. M. , 2017).

Tabla 52: Tiempo de retención hidráulico medio en el Vermifiltro

Fuente: Elaboración propia.

Para cargas hidráulicas entre 2.0 y 3.0 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día se precisa de un TRH de 6 a 8 horas (Manyuchi, et al., 2013a), por lo tanto, el tiempo de retención hidráulico en el Vermifiltro es un valor adecuado ya que se encuentra dentro del rango, siendo este de 6.81 h.

### 5.1.5.1 Remoción de contaminantes en el tratamiento terciario

Se procede al cálculo de la concentración del efluente de cada uno de los contaminantes (DBO, DQO, SST, CF)

Para la concentración de la DQO, se utilizó la ecuación (49) del modelo de Eckenfelder tomado de Manrique & Piñeros (2016).

$$\frac{Ce}{Ci} = \exp[-k_{20} * D * (HLR)^{-n}] \quad (49)$$

Donde

- $C_e$  = DQO total del efluente del filtro decantado, en mg/l;
- $C_i$  = DQO total del agua residual afluente al filtro, en mg/l;
- $k_{20}$  = Constante de tratabilidad
- $D$  = Profundidad del Vermifiltro, en m;
- $HLR$  = Carga hidráulica del lombrifiltro, en m<sup>3</sup>/h\*m<sup>2</sup>;
- $n$  = Constante empírica.

El resultado de la concentración de DQO del efluente, se pueden apreciar en la Tabla 53.



DQO				
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades	Observaciones / Referencias
Constante de tratabilidad	K20	1	(m/día) <sup>-0.5</sup>	(Manrique Delgado & Piñeros Castañeda, 2016)
Profundidad del Vermifiltro	D	1.10	m	Se considera únicamente la profundidad útil
Carga hidráulica	HLR	0.10	m <sup>3</sup> /h*m <sup>2</sup>	-
Constante empírica	n	0.50	-	(Hernández, et al., 2004) Pág. 273
Concentración inicial o del Afluentes	C <sub>i</sub>	62.07	mg/l	-
Concentración final o del Efluente	C <sub>e</sub>	2.05	mg/l	Modelo de Eckenfelder

Tabla 53: Concentración de DQO del efluente del Vermifiltro

Fuente: Elaboración propia.

Para la concentración de la DBO, SST y CF, se utilizó la ecuación (50) tomada de Arora & Kazmi (2015).

$$k = HLR * \ln\left(\frac{C_i}{C_e}\right) \quad (50)$$

Donde

- $k$  = Constante cinética de primer orden, en m/día
- $C_i$  = Concentración de contaminantes del afluente, en mg/l; en CF están en NMP/100ml;
- $C_e$  = Concentración de contaminantes del efluente, en mg/l; en CF están en NMP/100ml;
- $HLR$  = Carga hidráulica, en m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día.

Los valores de K fueron desarrollados en base a experimentos, presentados en el artículo de Reyes (2016), los cuales poseen condiciones similares, tales como carga hidráulica cercana al valor utilizado y con una configuración de capas iguales al Vermifiltro propuesto, considerando que dichos ensayos involucran la fibra de coco como una de sus principales capas.

El resultado de la concentración final del DBO se presenta en la Tabla 54.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)				
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades	
Constante de tasa de remoción basada en el área	K	7.14	m/día	
Concentración inicial o del Afluente	C <sub>i</sub>	19.01	mg/l	
Concentración final o del Efluente	C <sub>e</sub>	1.09	mg/l	

Tabla 54: Concentración de DQO del efluente del Vermifiltro

Fuente: Elaboración propia.

El resultado de la concentración final de SST se presenta en la Tabla 55.

Sólidos Suspensos Totales (SST)				
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades	
Constante de tasa de remoción basada en el área	K	5.67	m/día	
Concentración inicial o del Afluente	C <sub>i</sub>	11.88	mg/l	
Concentración final o del Efluente	C <sub>e</sub>	1.23	mg/l	

Tabla 55: Concentración de SST del efluente del Vermifiltro

Fuente: Elaboración propia.



El resultado de la concentración final de CF se presenta en la Tabla 56.

Coliformes Fecales (CF)			
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades
Constantes de desintegración bacteriana de primer orden basada en el área	K	14.88	m/día
Concentración inicial o del Afluente	C <sub>i</sub>	59.37x10 <sup>4</sup>	NMP/100ml
Concentración final o del Efluente	C <sub>e</sub>	1542	NMP/100ml

Tabla 56: Concentración de CF del efluente del Vermifiltro

Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.6 Eficiencias de remoción de contaminantes en la PTAR de Churuguzo

Para determinar el porcentaje de remoción (% R) de cada contaminante, se utiliza la ecuación (51) tomada de Sperling (2007).

$$\% R = \frac{(C_i - C_e)}{C_i} * 100 \quad (51)$$

Las unidades logarítmicas de remoción (ULR) se establecen por medio de la ecuación (52) tomada de Sperling (2007).

$$ULR = - \text{LOG}_{10} \left( 1 - \frac{\% R}{100} \right) \quad (52)$$

En la Tabla 57, se presenta los porcentajes de remoción y las unidades logarítmicas removidas en cada una de las estructuras de la PTAR.



Nivel de tratamiento	Contaminantes removidos		Ingreso Promedio (mg/l)	Remoción (mg/l)	Efluente Estructura (mg/l, NPM/100 ml*)	Porcentaje de Remoción	Unidades Logarítmicas de remoción	
							Parcial	Acumulada
Preliminar	SST		388.00	19.40	368.60	5	0.022	
	DQO		613.00	30.65	582.35	5	0.022	
	DBO		258.00	12.90	245.10	5	0.022	
	Coliformes*		7.9x10 <sup>6</sup>	0.00	7.9x10 <sup>6</sup>	0	0.000	
	Nutrientes	NTK P	39.70 4.40	0.00 0.00	39.69 4.44	0 0	0.000 0.000	
Primario (Tanque Séptico)	SST		368.60	239.59	129.01	65	0.456	0.5
	DQO		582.35	232.94	349.41	40	0.222	0.2
	DBO		245.10	85.79	159.32	35	0.187	0.2
	Coliformes*		7.9x10 <sup>6</sup>	59.25x10 <sup>5</sup>	19.75x10 <sup>5</sup>	75	0.602	0.6
	Nutrientes	NTK P	39.69 4.44	7.94 1.11	31.75 3.33	20 25	0.097 0.125	0.1 0.1
Secundario - Humedal de Flujo Sub-Superficial	SST		129.01	117.13	11.88	90.79	1.036	1.5
	DQO		349.41	287.34	62.07	82.24	0.750	1.0
	DBO		159.32	140.30	19.01	88.07	0.923	1.1
	Coliformes*		19.75x10 <sup>5</sup>	13.81x10 <sup>5</sup>	59.37x10 <sup>4</sup>	69.94	0.522	1.1
	Nutrientes	NTK P	31.75 3.33	10.74 0.941	21.02 2.38	33.81 28.30	0.179 0.144	0.3 0.3
Terciario - Vermifiltros	SST		11.88	10.650	1.23	89.65	0.985	2.5
	DQO		62.07	60.014	2.05	96.69	1.480	2.5
	DBO		19.01	17.918	1.09	94.24	1.240	2.4
	Coliformes*		59.37x10 <sup>4</sup>	59.22x10 <sup>4</sup>	1542	99	2.585	3.7
	Nutrientes	NTK P	21.02 2.38	0.000 0.000	21.02 2.38		0.000 0.000	0.3 0.3

Tabla 57: Porcentaje de remoción y Unidades Logarítmicas de remoción

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 58, se presenta la comparación de las concentraciones finales de los contaminantes, frente a los valores máximos establecidos por el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (2017), comprobándose que el efluente de la PTAR puede ser descargado en un cuerpo de agua dulce.

Contaminante		Efluente Vermifiltros	Efluente Máximo (TULSMA, 2017)	Unidades	Comprobación
SST		1.23	130	mg/l	CUMPLE
DQO		2.80	200	mg/l	CUMPLE
DBO		1.09	100	mg/l	CUMPLE
Coliformes		1542	2000	NPM/100 ml	CUMPLE
Nutrientes	NTK	21.02	50	mg/l	CUMPLE
	P	2.38	10	mg/l	CUMPLE

Tabla 58: Comprobación de los contaminantes del efluente vs TULSMA (2017)

Fuente: Elaboración propia



### 5.1.7 Sistema de Bombeo para los Vermifiltros

Para impulsar las aguas residuales, desde los humedales hacia los Vermifiltros se requiere un sistema de bombeo. Para el diseño del mismo se considera los criterios para una bomba sumergible establecidos en el Reglamento técnico de diseño de estaciones de bombeo NB 688 (Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, 2007).

#### Cámara de bombeo

Para el diseño de la cámara de bombeo, que consiste en la determinación del volumen y por tanto de sus dimensiones, se utiliza la expresión de Tchobanoglous (1995) (ecuación (53)); siendo el caudal de bombeo igual al caudal de diseño de la PTAR, que corresponde a 1 l/s.

$$V = \frac{Qb * t}{4} \quad (53)$$

Donde:

- V = Volumen de la cámara de bombeo, en m<sup>3</sup>;
- Qb = Caudal de bombeo, en m<sup>3</sup>/s;
- t = Tiempo o período de interrupción del bombeo, en s.

El tiempo de interrupción de bombeo se establece de acuerdo a la Tabla 59.

Tiempos de retención		
Potencia	Tiempo de retención	Referencia
Menor a 20 HP	10 min	(Tchobanoglous, 1995)
20 a 100 HP	15 min	
100 a 150 HP	20 a 30 min	
Mayor a 250 HP	Consultar con el fabricante	

Tabla 59: Potencias vs tiempos de retención de la bomba

Fuente: Elaboración propia

Como se prevé una potencia de la bomba menor a 20 HP, se toma un tiempo de retención de 10 min. Finalmente, el volumen para la cámara de bombeo se presenta en la Tabla 60.

Cámara de bombeo			
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades
Caudal a bombear	Qb	0.001	m <sup>3</sup> /s
Tiempo o período de interrupción del bombeo	t	600	s
Volumen	V	0.2	m <sup>3</sup>
Volumen constructivo	Vc	1.80	m <sup>3</sup>

Tabla 60: Volumen de la cámara de bombeo

Fuente: Elaboración propia

#### Tubería de impulsión

Para determinar el diámetro de la tubería de impulsión se utiliza la ecuación de Bresse (ecuación (54)), para instalaciones no operadas de manera continua, establecida en el libro “Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados” de López Cualla (1995).



$$D = k X^{\frac{1}{4}} \sqrt{Qb} \quad (54)$$

Donde:

- D = Diámetro de la tubería de impulsión, en m;
- k = Constante;
- X = Número de horas de bombeo;
- Qb = Caudal de bombeo, en m<sup>3</sup>/s.

La constante k, para instalaciones no operadas de manera continua es de 1.3. El número de horas de bombeo (X), se calcula con la ecuación (55).

$$X = \frac{\text{No. horas de bombeo por día}}{24} \quad (55)$$

En la Tabla 61, se presenta los parámetros considerados y el diámetro requerido para la tubería de impulsión.

Tubería de Impulsión				
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades	Referencia
Constante	k	1.30	-	(López Cualla, 1995)
Número de horas de bombeo por día	N°	12	h	
Número de horas de bombeo	X	0.50	-	
Caudal de bombeo	Qb	0.001	m <sup>3</sup> /s	
Diámetro de la tubería de impulsión	D	0.0346 34.57	m mm	

Tabla 61: Diámetro de la tubería de impulsión para sistema de bombeo

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 62, se establece una tubería con un diámetro comercial próximo al calculado como diámetro requerido, así como también, se especifican sus propiedades.

Característica de la tubería comercial				
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades	Referencia
Resistencia	R	0.80	MPa	Catálogo Plastigama Anexo 4
Espesor	e	1.60	mm	
Diámetro externo	φe	50	mm	
Diámetro interno	φi	46.80	mm	
Área interior de la tubería	At	0.002	m <sup>2</sup>	

Tabla 62: Tubería comercial seleccionada para el sistema de bombeo

Fuente: Elaboración propia

Con el diámetro comercial seleccionado, la velocidad del agua residual debe cumplir con las velocidades límite que se establecen en la Tabla 63. En dicha tabla se presenta además, los parámetros utilizados para la determinación de la velocidad en la tubería.

Verificación de la velocidad en la tubería de impulsión					
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades	Límites	Referencia
Área de la tubería	At	0.002	m <sup>2</sup>	Vmín= 0,6 m/s Vmáx= 2,5 m/s Vrecom= 1,5 m/s	(Tchobanoglous, 1995)
Caudal de bombeo	Qb	0.001	m <sup>3</sup> /s		
Velocidad de impulsión	Vi	0.61	m/s		

Tabla 63: Velocidad en la tubería de impulsión para el sistema de bombeo

Fuente: Elaboración propia



Como se aprecia en la Tabla 63, la velocidad de impulsión es de 0.61 m/s, que se encuentra dentro de los límites de velocidad recomendados.

### Pérdidas en la tubería de impulsión

Con el diámetro y tubería propuestos, se calculan las pérdidas en la tubería a través de las ecuaciones (56) y (57).

- Pérdidas locales

$$hv = K * \frac{Vi^2}{2g} \quad (56)$$

Donde:

- $hv$  = Pérdidas locales, en m;
- $K$  = Constante de pérdida por accesorios (Anexo 5);
- $Vi$  = Velocidad de impulsión, en  $m^3/s$ ;
- $g$  = Aceleración de la gravedad en  $m/s^2$ ;

- Pérdidas por fricción

$$hf = \frac{10.679 * L * Qb^{1.852}}{C^{1.852} * \phi_i^{4.87}} \quad (57)$$

Donde:

- $hf$  = Pérdidas por fricción, en m;
- $L$  = Longitud más larga de la tubería de impulsión, en m;
- $Qb$  = Caudal de bombeo, en  $m^3/s$ ;
- $C$  = Coeficiente de pérdidas de Hazen-Williams
- $\phi_i$  = Diámetro interno de la tubería de impulsión, en m.

Las pérdidas locales en la tubería de impulsión se presentan en la Tabla 64.

Pérdidas locales en tubería de impulsión			
	$\frac{Vi^2}{2g}$		0.019
Accesorio	Nº	k	$hvi$ (m)
Ampliación concéntrica	1	0.3	0.006
Junta desmontable	1	2	0.038
Válvula Compuerta	18	10	3.406
Válvula Retención	1	2.5	0.047
Tee	13	0.6	0.148
Codo 90°	33	0.9	0.562
Pérdidas locales		$hv$	4.206 m

Tabla 64: Pérdidas locales en la tubería de impulsión del sistema de bombeo

Fuente: Elaboración propia



Las pérdidas por fricción se presentan en la Tabla 65.

<b>Pérdidas por fricción en tubería de impulsión</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>	
Longitud más larga en tubería de impulsión	L	35	m	
Coeficiente de pérdidas de Hazen-Williams para tuberías PVC (Anexo 6)	C	140	-	
Diámetro interno de la tubería de impulsión	$\phi_i$	46.8	mm	
Caudal de bombeo	Q <sub>b</sub>	0.001	m <sup>3</sup> /s	
Pérdida por fricción	h <sub>f</sub>	0.36	m	

Tabla 65: Pérdidas por fricción en la tubería de impulsión del sistema de bombeo

Fuente: Elaboración propia

Para determinar las pérdidas totales se aplica la ecuación (58).

$$H_t = h_v + h_f \quad (58)$$

Donde:

- H<sub>t</sub> = Pérdidas totales, en m;
- h<sub>v</sub> = Pérdidas locales, en m;
- h<sub>f</sub> = Pérdidas por fricción, en m.

Por lo tanto, la perdida total resulta ser de 4.57 m.

### Potencia de la bomba

Para determinar la potencia de la bomba, se aplica la ecuación (59).

$$P = \frac{SG * Q_b * H_m}{75 * n} \quad (59)$$

Donde:

- P = Potencia, en HP;
- SG = Gravedad específica del agua, 1;
- Q<sub>b</sub> = Caudal de bombeo, en l/s;
- H<sub>m</sub> = Altura manométrica total, en m;
- n = Eficiencia, 75 %.

La altura manométrica total es determinada con la ecuación (60).

$$H_m = H_t + H_g \quad (60)$$

Donde:

- H<sub>t</sub> = Pérdidas totales, en m;
- H<sub>g</sub> = Altura geométrica, en m;
- H<sub>m</sub> = Altura manométrica, en m.



En la Tabla 66, se muestra la altura manométrica calculada.

Altura manométrica			
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades
Pérdidas totales	Ht	4.57	m
Altura geométrica	Hg	3	m
Altura manométrica	Hm	7.57	m

Tabla 66: Altura manométrica total en el sistema de bombeo

Fuente: Elaboración propia

La potencia requerida para impulsar el agua residual desde la cámara de succión hacia los Vermifiltros, se presenta en la Tabla 67, en dicha tabla también se muestra la potencia seleccionada, la cual servirá para buscar un modelo comercial.

Potencia			
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades
Potencia de la bomba	P	0.076	HP
		0.057	kW
Potencia seleccionada	Ps	1	HP

Tabla 67: Potencia de la bomba

Fuente: Elaboración propia

La bomba seleccionada es una bomba sumergible TRUPER BOS-1SP 12603 de 1 HP. Además, se requiere una bomba adicional de iguales características, para que estas dos operen en secuencia y no se suspenda la operación cuando se tenga que dar mantenimiento.

## 5.2 Presupuesto

El costo referencial de las obras planteadas se presenta en la Tabla 68 con sus respectivos rubros, los mismos que son calculados de acuerdo a los precios unitarios establecidos por ETAPA EP en 2019.

Código	Descripción	Unidad	Precio Unitario (USD)	Cantidad	Total (USD)
<b>Obras Preliminares</b>					
520002	Desbroce y limpieza	m2	1.33	1120.00	1489.60
530016	Demolición de estructuras de hormigón	m3	60.48	3.68	222.76
520014	Replanteo y nivelación de áreas	m2	1.29	1115.80	1439.38
513002	Transporte de material hasta 5km	m3	2.05	3.68	7.55
<b>Obras Civiles y Suministros</b>					
<b>EXCAVACIÓN Y RELLENO</b>					
502002	Excavación a mano en suelo sin clasificar, profundidad entre 0 y 2m	m3	9.94	8.30	82.50
514004	Relleno compactado con equipo liviano	m3	3.80	172.50	655.50
535200	Material de reposición (incluye esponjamiento)	m3	10.11	172.50	1743.98
<b>ESTRUCTURAS PARA EL TRATAMIENTO PRELIMINAR</b>					



<b>Canal de ingreso y vertedero lateral</b>					
506050	Hormigón Simple 240 Kg/cm2	m3	131.60	0.89	117.64
501010	Encofrado Recto para estructuras de hormigón visto	m2	12.43	7.74	96.21
506004	Curado de superficie de hormigón con aditivo químico	m2	0.53	9.38	4.97
517001	Preparado y pintado de superficie	m2	3.56	9.38	33.39
540570	Pintura acrílica impermeabilizante	m2	5.18	9.38	48.59
	Pantalla de acero de 3 mm de espesor, cortada a medida para colocar con fijaciones mecánicas.	kg	2.60	1.47	3.83
<b>Rejilla de entrada</b>					
540065	Sum-Ins, Rejilla Hierro (Seg. Especificación)	m2	129.77	0.15	18.89
506024	Revestimiento epóxico	m2	20.51	0.20	4.10
<b>Desarenador</b>					
506050	Hormigón Simple 240 Kg/cm2	m3	131.60	1.38	180.95
501010	Encofrado Recto para estructuras de hormigón visto	m2	12.43	17.24	214.29
506004	Curado de superficie de hormigón con aditivo químico	m2	0.53	22.74	12.05
517001	Preparado y pintado de superficie	m2	3.56	22.74	80.95
540570	Pintura acrílica impermeabilizante	m2	5.18	22.74	117.79
540160	Sum,-Ins, Vertedero (tool galvanizado)	u	102.92	2.00	205.84
540096	Sum,-Ins, Compuerta 0,4 x 0,3 m	u	161.10	2.00	322.20
540420	Sum,-Ins, Castillo para operación de válvula de compuerta	u	67.48	2.00	134.96
535628	Sum, Vástago de HG para compuerta	u	5.00	2.00	10.00
<b>ESTRUCTURAS DE TRATAMIENTO PRIMARIO</b>					
<b>Fosa séptica</b>					
509244	Sum, Tubería PVC U/E 0,80 MPA D= 110 mm	m	4.95	5.00	24.75
540013	Colocación Tubería PVC Alcant. D=110 mm	m	0.37	5.00	1.85
535135	Sum, Tee PVC Desagüe Pegable D=110 mm	u	3.87	6.00	23.22
509022	Colocación Acc PVC U/E sin anclajes, D=110 mm	u	5.56	8.00	44.48
535047	Sum, Codo PVC U/E R/C D=110 mm 90 grad,	u	24.45	2.00	48.90
<b>ESTRUCTURAS DE TRATAMIENTO SECUNDARIO</b>					
<b>Humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial</b>					
509251	Sum, Tubería PVC U/E 0,80 MPA D= 160 mm	m	9.67	42.00	406.14
509004	Colocación Tubería PVC U/E D=160 mm	m	0.61	42.00	25.62
535501	Sum, Codo PVC U/E R/L D=160 mm 90 grad,	u	35.85	5.00	179.25
509023	Colocación Acc PVC U/E sin anclajes, D=160 mm	u	9.62	9.00	86.58
535946	Sum, Tee PVC Desagüe Pegable D=160 mm	u	10.79	4.00	43.16
<b>ESTRUCTURAS DE TRATAMIENTO TERCIARIO</b>					
<b>Vermifiltros</b>					
509209	Sum, Tubería PVC E/C 0,80 MPA D= 50 mm	m	1.36	150.85	205.16
509001	Colocación Tubería PVC E/C D= 25 a 50 mm	m	0.23	150.85	34.70
535645	Sum, Codo PVC E/C Desagüe D=50 mm 90 grad,	u	0.91	35.00	31.85
535646	Sum, Tee PVC Desagüe Pegable D=50 mm	u	1.13	13.00	14.69
528143	Sum, Reducción Inox. roscada D= 2" a 1" (Norma AISI 304)	u	4.80	35.00	168.00
535130	Sum, Adaptador PVC/HG D=50 mm	u	1.92	70.00	134.40
509029	Colocación Acc PVC E/C sin anclajes, D=0 a 50 mm	u	1.86	171.00	318.06
509244	Sum, Tubería PVC U/E 0,80 MPA D= 110 mm	m	4.95	50.40	249.48



509003	Colocación Tubería PVC U/E D=110 mm	m	0.51	50.40	25.70
535124	Sum, Tapón PVC U/E D=110 mm	u	32.87	28.00	920.36
535134	Sum, Codo PVC E/C Desagüe D=110 mm 90 grad,	u	3.09	28.00	86.52
535135	Sum, Tee PVC Desagüe Pegable D=110 mm	u	3.87	28.00	108.36
509055	Colocación Acc PVC E/C sin anclajes, D=110 mm	u	5.18	84.00	435.12
540094	Sum, y colocación Arena para filtro	m3	140.06	6.87	962.53
540264	Sum, y colocación Grava graduada de 6 a 38 mm,	m3	79.06	3.44	271.66
540265	Sum, y colocación Grava graduada de 3 a 6 mm,	m3	84.06	3.44	288.84
550015	Lecho para lombricultura	m3	5.32	6.87	36.56
540922	Sum,-Ins, Geotextil tejida e=1 mm	m2	3.30	34.36	113.39
	Sum, Válvula Globo PVC D=50 mm	u	8	18.00	144.00
	Sum, Fibra De Coco Sustrato Hidropónico Jardinería Huertos 4 litros - 1kg	kg	1.25	4295.15	5368.93
	Sum, Lombriz Roja Californiana	u	0.02	103084	2061.67
	Sum, Tanque cilíndrico vertical PVC de 5000 litros	u	985.00	7.00	6895.00
	Disco metálico, 3cm de espesor	u	10.00	7.00	70.00

**Sistema de bombeo**

535273	Sum, Válvula Check D=3"	u	280.00	2.00	560.00
506050	Hormigón Simple 240 Kg/cm2	m3	131.60	1.12	147.92
501010	Encofrado Recto para estructuras de hormigón visto	m2	12.43	13.44	167.06
506004	Curado de superficie de hormigón con aditivo químico	m2	0.53	14.14	7.49
517001	Preparado y pintado de superficie	m2	3.56	14.14	50.34
540570	Pintura acrílica impermeabilizante	m2	5.18	14.14	73.25
509244	Sum, Tubería PVC U/E 0,80 MPA D= 110 mm	m	4.95	38.00	188.10
509003	Colocación Tubería PVC U/E D=110 mm	m	0.51	38.00	19.38
	Sum,-Ins, Bomba Sumergible TRUPER BOS-1SP 12603 de 1HP	u	1495.00	2.00	2990.00

**ESTRUTURAS DE SALIDA****Caja de revisión**

506050	Hormigón Simple 240 Kg/cm2	m3	131.60	1.11	146.08
501010	Encofrado Recto para estructuras de hormigón visto	m2	12.43	11.81	146.80
506004	Curado de superficie de hormigón con aditivo químico	m2	0.53	12.38	6.56
517001	Preparado y pintado de superficie	m2	3.56	12.38	44.07
540570	Pintura acrílica impermeabilizante	m2	5.18	12.38	64.13

**Estructura de descarga (Cabezal de descarga)**

506050	Hormigón Simple 240 Kg/cm2	m3	131.60	0.15	19.74
501010	Encofrado Recto para estructuras de hormigón visto	m2	12.43	1.61	19.98
506004	Curado de superficie de hormigón con aditivo químico	m2	0.53	1.91	1.01
517001	Preparado y pintado de superficie	m2	3.56	1.91	6.80
540570	Pintura acrílica impermeabilizante	m2	5.18	1.91	9.89
	Tubería de Hormigón Simple Desagüe, D=100mm	m	9.07	0.65	5.90

**TOTAL****31751.34**

Tabla 68: Presupuesto referencial

Fuente: Elaboración propia



## 6 MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Operar se define como el funcionamiento correcto del sistema de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, por medio de un trabajo constante y responsable en cada una de las estructuras que lo conforman, de tal manera que se llegue a tener un servicio continuo, además de evitar la contaminación ambiental y principalmente, asegurar la satisfacción de los beneficiarios (Ministerio del Agua, 2007).

El manual que se desarrolla a continuación presenta los procedimientos esenciales para operar y mantener cada una de las estructuras que constituyen la PTAR Churuguzo, de modo que garantice un trabajo apropiado y que las características del efluente sean las óptimas para su descarga al cuerpo receptor.

Se espera que este apartado constituya un instrumento útil en el desafío de mantener servicios de saneamiento que satisfagan las expectativas y exigencias de sus usuarios, así como también, servirá de guía a los responsables y operadores de la PTAR.

### 6.1 Personal a cargo de la operación y mantenimiento

La operación y mantenimiento de la PTAR Churuguzo se encontrará a cargo de la empresa pública ETAPA, la misma que debe llevar un registro del funcionamiento y mantenimiento de cada una de las estructuras.

Como responsable de la operación y mantenimiento de la PTAR se recomienda un Ingeniero Civil con experiencia en el ámbito del tratamiento de aguas residuales. Para actividades que comprometan el funcionamiento de cada estructura, se requiere personal calificado, mientras que las actividades complementarias podrán ser desarrolladas por personas del sector.

### 6.2 Tratamiento preliminar

#### Reja de entrada

Las principales consideraciones para una adecuada operación de esta estructura son:

- El material o residuos que son retenidos por las rejillas y que se acumulan en ella, deberán ser removidos tantas veces al día como sea necesario, permitiendo el flujo libre de las aguas residuales hacia el desarenador. Se requiere como mínimo 2 limpiezas al día, la primera en la mañana y la segunda en la tarde al finalizar la jornada de trabajo.
- No se permite un porcentaje mayor al 60% de obstrucción en la superficie útil de la reja (SICA, 2017).
- El material retenido será removido mediante rastillos de mango largo. El rastillado se debe realizar cuidadosamente para evitar el paso de residuos hacia el desarenador.
- Si se encuentra materiales plásticos se debe colocar en botes de basura, para luego entregar al personal de EMAC EP.

En cuanto a la protección del personal se debe considerar los siguientes puntos:

- Usar equipo de protección personal para prevenir accidentes y enfermedades. El equipo de protección incluye como mínimo: un par de botas, guantes, máscara y un casco (Ministerio del Agua, 2007).
- Usar productos germicidas para el aseo del personal.
- Desinfectar las herramientas de trabajo con soluciones de cal (por cada 5 l, agregar  $\frac{1}{4}$  de libra de cal), cloro (2%) o lejía (1 cucharada de lejía por 20 cucharadas de agua).



De acuerdo a Velasco (2017), para el mantenimiento de las rejas de entrada es necesario llevar a cabo los siguientes pasos:

- Limpiar con un rastillo el material retenido.
- Colocar el material recogido sobre la plataforma de la reja para que escurra.
- Disponer los desechos en un relleno sanitario o en lugares donde no representen un riesgo para la salud de las personas, ni para el medio ambiente.
- Los desechos deben ser rociados con cal antes de ser enterrados, para evitar presencia de insectos, roedores y malos olores.
- Mensualmente se debe revisar la existencia de corrosión en los barrotes de la rejilla, si existen puntos de corrosión estos deben ser limpiados y pintados con líquido y pintura anticorrosiva.
- En el canal de ingreso, el agua residual presenta velocidades bajas generando la sedimentación de material, el mismo que debe ser removido manualmente con la ayuda de una pala.

### **Desarenador**

En cuanto al desarenador, su limpieza es fundamental, debido a que esta estructura evita el ingreso de arena a las siguientes estructuras, lo cual podría provocar una colmatación prematura de las mismas. El espacio con el que se cuenta en esta estructura es limitado, por lo tanto, el mantenimiento debe realizarse de forma manual y su proceso es el siguiente:

- Se recomiendan inspecciones periódicas para revisar su estado y correcto funcionamiento.
- Al momento de la limpieza se debe cerrar la compuerta que abastece a una cámara del desarenador y proceder a la extracción del material, mientras que la otra cámara sigue en funcionamiento, este proceso se repite para la siguiente cámara. Además, se debe tomar registro de la cantidad de material extraído.
- La extracción del material debe ser realizado cuando el operador considere oportuno, en función de la cantidad de arena decantada o cuando el efluente presente un aumento no habitual de sólidos en suspensión.

## **6.3 Tratamiento primario**

### **Tanque séptico**

#### **Funcionamiento inicial**

Para dar inicio al funcionamiento del tanque séptico es imprescindible valorar la estructura, es decir, observar que no presente filtraciones, lo cual se realiza por medio de una prueba hidráulica de estanqueidad, que consiste en llenar el tanque por un periodo de 24 horas y posterior a ello verificar que el nivel del agua no haya disminuido. Si presenta filtraciones se deberá corregirlas.

#### **Operación y mantenimiento**

Se recomienda la inspección de esta estructura cada 3 meses, la cual incluye abrir las tapas y dejar ventilar por lo menos 30 minutos para la evacuación de los gases producidos en el tanque, antes de realizar cualquier actividad. Además, se deberá verificar la profundidad de las natas, del lodo acumulado, las tuberías de entrada y salida de cada compartimento, tanto en su funcionamiento como su estado estructural, así como también la inspección de las tapas, las cuales no deben permitir el ingreso de agua superficial dentro del sistema (Ministerio del Agua, 2007).



Para el mantenimiento del tanque séptico, el personal deberá contar con equipo de protección ya que están expuestos a contaminantes, especialmente gases anaerobios tóxicos.

En cuanto a la extracción de natas y lodos del tanque séptico, el Ministerio del Agua (2007) establece los siguientes parámetros a considerar:

#### **Extracción de natas o espuma**

- Se deberá verificar la profundidad de las natas y en el caso que este supere lo admisible se procederá con la extracción haciendo uso de un cernidor de malla milimétrica fina de plástico.
- La nata se deberá depositar en un contenedor apropiado junto con el material extraído del desarenador y cubrirlo con cal apagada.
- Cada 90 días se recomienda la limpieza de las paredes del tanque séptico del material adherido por medio de un cepillo de goma.

#### **Extracción de lodos**

- Para medir la altura de lodos se recomienda realizar la prueba de la toalla blanca (Mara, 2003). Será necesario evaluar la altura de lodos, cuando se hayan acumulado de tal forma que la distancia entre el fondo de la cámara y la parte inferior del tubo de salida se haya reducido entre un 40 o 50%.
- La extracción se puede realizar por medio de una bomba de succión de lodos, se recomienda que esta actividad se realice en época de verano, cuando el ingreso de agua residual sea mínimo. Además, no se debe extraer completamente los lodos, para que los procesos de estabilización que se desarrollan en el tanque séptico no se vean interrumpidos. Por otro lado, se debe tomar registro de la cantidad de lodo extraído.
- Los lodos deben ser ubicados en lechos de secado, dispuestos por la entidad encargada.
- El tanque séptico no deberá ser lavado ni desinfectado después de realizar el mantenimiento.

#### **6.4 Tratamiento secundario**

##### **Humedal artificial de flujo horizontal sub superficial**

En esta estructura los elementos que necesitan mantenimiento de manera continua son los sistemas de distribución y recolección, ya que el humedal asemeja un proceso natural de depuración, por lo cual no requiere mayor mantenimiento. No obstante, es importante la inspección de estos después de incrementos de caudal y verificar que no exista daños en el sustrato. Las obstrucciones, o cualquier tipo de daños deben ser reparadas inmediatamente, evitando de esta forma fallos y reparaciones costosas.

Previo al funcionamiento del humedal se debe realizar las siguientes inspecciones:

- Revisar que el contenedor del humedal no presente filtraciones en su estructura.
- La tubería de recolección debe contar con los orificios necesarios para la correcta evacuación de las aguas residuales.

Se recomienda una revisión periódica del humedal, en la cual se verifique que:

- El flujo de agua se distribuya por todas las partes del humedal.
- No exista un incremento excesivo de residuos que bloquen caminos de flujo.
- No se desarrollen zonas de estancamiento, y evitar la proliferación de mosquitos.
- Remover mensualmente el material que se sedimenta en las tuberías de distribución.



Para la operación de esta estructura se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Dar mantenimiento de las bermas (muros).
- Mantener la uniformidad en el caudal.
- Manejo y cuidado de la vegetación, apuntando hacia un crecimiento vigoroso de la misma.

De acuerdo con Salazar & Sánchez (2015), para el cuidado eficiente de la vegetación es necesario considerar:

- Controlar los niveles de agua, estos no deben exceder los límites tolerables durante periodos largos de tiempo.
- Retirar especies invasoras periódicamente.
- Evitar el uso de herbicidas, cuando su uso sea inevitable, estos se deben manejar con sumo cuidado, dado que pueden dañar gravemente la vegetación existente y emergente.
- Cada 3 meses las totoras deben ser podadas, de lo contrario pueden dañar a la vegetación emergente.
- 50 m<sup>2</sup> de vegetación puede ser podado y limpiado por una persona, por ende, se requiere al menos 8 personas para esta actividad.

Los mosquitos son un problema frecuente en los humedales naturales, por lo tanto, se debe tener en cuenta:

- Mantener el agua en el humedal fluyendo constantemente, evitando estancamientos de agua, es lo ideal para evitar la proliferación de mosquitos y larvas (Parra Piérart & Chiang Rojas, 2013).
- La aplicación de insecticidas, aceites o agentes bacterianos es complicada en sistemas como los humedales.
- Los insecticidas en contacto con la materia orgánica presente en el humedal son ineficaces ya que son absorbidos y diluidos por la misma.
- Se debe evitar en lo posible tratamientos químicos, ya que pueden contaminar el humedal y a su vez el efluente.

## 6.5 Tratamiento terciario

### Vermifiltros

Entre cada capa se debe colocar geomalla, para que no exista la mezcla de materiales de diferente granulometría. Además, las lombrices deben ser inoculadas en su edad adulta para que puedan consumir la materia orgánica rápidamente, debido a que estas consumen diariamente el volumen igual a su peso.

En cuanto a la mano de obra, se requiere una persona por cada 500 a 800 m<sup>2</sup> (Castro Castellanos, 2019) para las actividades de:

- Rastrillado: que ayuda a mantener un esponjamiento adecuado y permite que los sólidos retenidos en la superficie se incorporen al lecho.
- Retirar el humus, además, se debe tomar registro de la cantidad de humus retirado.

Las principales consideraciones para el mantenimiento son:

- Realizar el control mecánico cada 4 días, que consiste en voltear el sustrato en el que se encuentran las lombrices, para evitar la compactación del mismo, ya que puede provocar la muerte de las lombrices por la falta de oxigenación (Orozco Villalba & Sánchez Cherrez, 2020).
- Se debe rastrillar la superficie del Vermifiltro una o dos veces al mes durante su operación, en caso de ser necesario debe incrementarse la frecuencia.



- De 4 a 6 meses, se requiere adicionar aproximadamente 10cm de fibra de coco, ante la disminución de este estrato debido al fraccionamiento alcanzado.
- El humus (vermicompost) debe ser retirado cada 3 meses aproximadamente.
- La capa activa debe encontrarse en estado de saturación, sin tener encharcamientos superficiales, mismos que no son recomendados ya que las lombrices se alejan de estas zonas ocasionando una pérdida de homogeneidad del sistema.
- Deshierbar el lecho al detectarse el crecimiento de algún tipo de plantas.

En cuanto a la operación del Vermifiltro se debe considerar lo siguiente:

- Se recomienda un periodo de aclimatación de las lombrices en el reactor, de aproximadamente 20 días, previo a su puesta en marcha.
- Es de vital importancia evitar el ingreso de luz solar al interior de los contenedores, ya que las lombrices de tierra rehuyen a ésta y la alimentación se produciría únicamente en la parte central del recipiente.
- En caso de que los flujos se detengan por varios días, no genera mayores daños al sistema, pues este gracias a su estructura se recupera rápidamente, siempre y cuando la fibra de coco permanezca húmeda.
- Se recomienda la inclusión de aireación por medio de tuberías a los costados del Vermifiltro, para la mejora del proceso, teniendo en cuenta que los microorganismos son seres aerobios.
- El pH debe ser controlado con un pre-tratamiento con un agente de estabilización de pH, garantizando las condiciones necesarias de supervivencia de las lombrices. Rango óptimo de pH entre los valores de 4.5 y 9.

Las condiciones medioambientales para el adecuado desarrollo de las lombrices, son de gran importancia para su adecuada supervivencia, por lo tanto, se recomienda:

- En caso de existir temperaturas bajas inferiores a 14°C, es recomendable controlar la misma, cubriendo la superficie del Vermifiltro con telas de materiales que dejen pasar el aire, ya que de lo contrario la actividad y la reproducción de las lombrices disminuye.
- La humedad del lecho donde se encuentran las lombrices debe ser del 70 – 80%, ya que, a humedades menores a esta, su alimentación se dificulta, mientras que a humedades mayores produce la desoxigenación, en ambas circunstancias la lombriz no logra sobrevivir. Una prueba rápida para determinar el porcentaje de humedad es la prueba del puño, la cual consiste en tomar una muestra con la mano, cerrar el puño y aplicar un poco de fuerza, si salen de 7 a 8 gotas y además la muestra toma forma de puño, es que la humedad es de aproximadamente 80% y se puede considerar como aceptable. Si la muestra no toma dicha forma, significa que está muy seca, por otro lado, si salen demasiadas gotas entonces existe demasiada humedad (Garavito, et al., 2017).

### Bomba

Para el correcto funcionamiento de la bomba, que impulsará el agua residual desde la cámara de impulsión hacia la superficie de cada Vermifiltro, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Realizar inspecciones del estado general del equipo y las conexiones eléctricas, al menos una vez al mes.
- Informar cualquier tipo de singularidad que se observe en el sistema de distribución en los Vermifiltros.
- Cabe mencionar que la operación y mantenimiento de la bomba dependerá del tipo que se utilice y por ende del fabricante.



## 7 CONCLUSIONES

Las estructuras preliminares existentes están sobredimensionadas para el caudal impuesto. Presentan además deterioro por el paso del tiempo. El tanque séptico se encuentra en buenas condiciones estructurales y funciona adecuadamente. En lo referente a los humedales artificiales, la dirección del flujo de agua no es la adecuada ya que implica menor posibilidad de generación de un flujo pistón y por ende menor eficiencia de remoción de contaminantes, además, para el caudal impuesto se requiere la utilización de un solo humedal.

A partir de la evaluación de la PTAR, de la revisión literaria y en función del valor impuesto de caudal medio, se realizó el rediseño de las estructuras de entrada y de tratamiento preliminar, la reutilización de la estructura de tratamiento primario con un mejoramiento en el sistema de tuberías, la modificación de la tecnología implementada como tratamiento secundario (redistribución de la tubería con la variación en la dirección de flujo) y la inclusión de una unidad de pulido y desinfección que incremente la capacidad de eliminación de microorganismos patógenos en la PTAR.

Las alternativas tecnológicas (Trickling Filter, Horizontal Roughing Filter, Peat Filter y Vermifiltro) fueron consideradas en base a la revisión literaria, la calidad del efluente, la compatibilidad con las estructuras existentes y la evaluación de la PTAR; y su selección se fundamentó en parámetros de análisis, que engloban la sostenibilidad medioambiental, económica, social y el aprovechamiento de recursos. La selección se llevó a cabo por un proceso sistemático que se ha utilizado ampliamente en América Latina.

El proceso de selección arrojó que, la tecnología apropiada para realizar el tratamiento terciario en el sistema, es la Vermifiltración. En lo que se refiere a remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos y organismos patógenos, la tecnología seleccionada brinda resultados favorables de acuerdo con abundante información científica presente en la literatura en estaciones experimentales y plantas de escala real.

En el presente trabajo se utilizó la carga hidráulica como principal parámetro de diseño del Vermifiltro la cual tiene, de acuerdo con varios experimentos expuestos en la literatura, un rango óptimo entre 1.5 a 3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día.

Los principales beneficios de la implementación de un sistema de Vermifiltración en una comunidad rural incluyen: la generación de humus (que es un aditivo de suelo útil para la agricultura y horticultura), la producción de biomasa de gusanos como alimento para el ganado, las aves de corral y la piscicultura, el efluente se puede aplicar a cultivos agrícolas, jardinería y otros propósitos de reutilización, por otro lado, la alternativa seleccionada es una tecnología económica, ofrece facilidades de emplazamiento, además de ser técnicamente viable. Finalmente, al no producir lodo residual, la tecnología no genera necesidades de evacuación de residuos hacia sitios distantes de disposición final.

Es importante considerar el manual de operación y mantenimiento presente en este documento para garantizar un funcionamiento óptimo y la sostenibilidad de los Vermifiltros y todos los procesos unitarios que conforman el sistema.

La implementación de estos sistemas naturales implica el desarrollo de la educación medioambiental, pues generaciones actuales y futuras forman parte de un proceso de reinserción de los residuos a los ciclos naturales. La combinación de los procesos naturales, tanto de factores bióticos como antrópicos interactuando entre sí, permite vislumbrar un futuro optimista de sustentabilidad y conciencia medioambiental de la sociedad.



## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Abdullah, A., Jamaludin, S. B., Anwar, M. I., Noor, M. M., & Hussin, K. (2011). Assessment of Physical and Mechanical Properties of Cement Panel Influenced by Treated and Untreated Coconut Fiber Addition . *Elsevier*, 263-269.
- Ahmed Zidan, A. R., El-Gamal, M., Ali Rashed, A., & Abd El-Hady Eid, M. A. (2015). Wastewater treatment in horizontal subsurface flow constructed wetlands using different media (setup stage). *National Water Research Center*, 26-35. doi:10.1016/j.wsj.2015.02.003
- Ahson Aslam, M. M., Khan, Z. M., Sultan, M., Niaz, Y., Mahmood, M. H., Shoaib, M., . . . Ahmad, M. (2017). Performance Evaluation of Trickling Filter-Based Wastewater Treatment System Utilizing Cotton Sticks as Filter Media. *Polish Journal of Environmental Studies*, 1955-1962. doi: 10.15244/pjoes/69443
- Alianza por el Agua. (2018). *Manual de Depuración de Aguas Residuales Urbanas*. Monográficos Agua en Centroamérica. Obtenido de <http://idiaqua.eu/web/wp-content/uploads/2018/07/monografico3.pdf>
- Alvarado, A., Larriva, J., Sánchez, E., Idrovo, D., & Cisneros, J. (2017). Assessment of decentralized wastewater treatment systems in the rural area of Cuenca, Ecuador. *IWA Publishing*, 240 - 249. doi:10.2166/wpt.2017.027
- Amoah, I. D., Reddy, P., Seidu, R., & Stenstrom, T. A. (2018). Removal of helminth eggs by centralized and decentralized wastewater treatment plants in South Africa and Lesotho: health implications for direct and indirect exposure to the effluents. *Springer*, 12883-12895. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-018-1503-7>
- Arango Laws, J. E. (2003). *Evaluación ambiental del sistema TOHÁ en la remoción de salmonella en aguas servidas domésticas*. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Obtenido de <https://docplayer.es/13903774-Evaluacion-ambiental-del-sistema-toha-en-la-remocion-de-salmonella-en-aguas-servidas-domesticas.html>
- Arora, S. (2020). *Design, Performance Evaluation, and Investigations of the dynamic mechanisms of Earthworms- Microorganisms interactions for wastewater treatment by Vermifiltration technology*. Jaipur: Prakrit. Obtenido de [https://innoqua-project.eu/wp-content/uploads/2020/11/conf-doc-Dr\\_Sudipti\\_Arora\\_Dynamic\\_Mechanisms\\_of\\_Earthworms.pdf](https://innoqua-project.eu/wp-content/uploads/2020/11/conf-doc-Dr_Sudipti_Arora_Dynamic_Mechanisms_of_Earthworms.pdf)
- Arora, S., & Kazmi. (2016). Reactor performance and pathogen removal during wastewater treatment by vermicfiltration. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 65-73. doi:10.2166/washdev.2016.036
- Arora, S., & Kazmi, A. A. (2015). The effect of seasonal temperature on pathogen removal efficacy of vermicfilter for wastewater treatment. *Elsevier*, 88-99. doi:10.1016/j.watres.2015.02.001
- Arora, S., Rajpal, A., Bhargava, R., Pruthi, V., Bhatia, A., & Kazmi, A. A. (2014b). Antibacterial and enzymatic of microbial community during wastewater treatment by pilot scale vermicfiltration system. *Elsevier*, 132 - 141. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.041>
- Arora, S., Rajpal, A., Kumar, T., Bhargava, R., & Kazmi, A. (2014a). Pathogen removal during wastewater treatment by vermicfiltration. *Environmental Technology*, 2493-2499. doi:10.1080/09593330.2014.911358



- Ayala Fanola, R. M., & Gonzales Marquez, G. (2008). *Apoyo didáctico en la enseñanza - aprendizaje de la asignatura de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón. Obtenido de [https://www.academia.edu/8042546/UNIVERSIDAD\\_MAYOR\\_DE\\_SAN\\_SIM%C3%93N\\_APOYO\\_DIDACTICO\\_EN\\_LA\\_ENSE%C3%91ANZA\\_APRENDIZAJE\\_Presentado\\_por](https://www.academia.edu/8042546/UNIVERSIDAD_MAYOR_DE_SAN_SIM%C3%93N_APOYO_DIDACTICO_EN_LA_ENSE%C3%91ANZA_APRENDIZAJE_Presentado_por)
- Barrett, J., Bryck, J., Collins, R., Janonis, B., & Logsdon, G. (1991). *Manual of desing for Slow Sand Filtration*. Denver: American Water Works Association Research Foundation. Obtenido de [http://protosh2o.act.be/VIRTUELE\\_BIB/Watertechniek/350\\_Waterbehandeling/353.1\\_HEN\\_E5\\_Manual\\_Design.pdf.pdf](http://protosh2o.act.be/VIRTUELE_BIB/Watertechniek/350_Waterbehandeling/353.1_HEN_E5_Manual_Design.pdf.pdf)
- Baumgartner, R. (2013). *Developing a Testing Protocol for Vermifiltration - based Onsite Wastewater Treatment Systems (VOWTS)*. Murdoch University. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/16464393.pdf>
- Bhise, H. S., & Anaokar, G. S. (2015). Design and Suitability of Modular Vermifilter for Domestic Sewage Treatment. *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, 3, 44 - 51. Obtenido de <http://www.ijeert.org/pdf/v3-i4/7.pdf>
- Cardoso, L., Ramirez, E., & Garzón , M. (2011). *Vermifiltración para el tratamiento de aguas residuales industriales y municipales*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Obtenido de <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1448/TC-1107.1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castro Castellanos, E. (2019). *Estudio de viabilidad técnica y económica de la implementación del sistema tohá (lombrifiltro) para el tratamiento de las aguas residuales en el municipio de Tinjacá - Boyacá*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/22771/CastroCastellanosElizabeth2019.PDF..pdf;jsessionid=B75E929E9B5E832E9FD27637580F0E67?sequence=1>
- CEPIS. (2005a). *Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores*. Lima. Obtenido de [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/OPS%202005b.%20Gu%C3%A3da%20de%20sarenadores%20y%20sedimentadores.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OPS%202005b.%20Gu%C3%A3da%20de%20sarenadores%20y%20sedimentadores.pdf)
- CEPIS. (2005b). *Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques imhoff y lagunas de estabilización*. Lima. Obtenido de [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/OPS%202005.%20Gu%C3%A3da%20para%20el%20dise%C3%B1o%20de%20tanques%20s%C3%A3pticos.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OPS%202005.%20Gu%C3%A3da%20para%20el%20dise%C3%B1o%20de%20tanques%20s%C3%A3pticos.pdf)
- Couillard, D. (1994). The Use of Peat in Wastewater Treatment. *Elsevier*, 1261-1274.  
doi:[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90291-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90291-7)
- Daee, M., Gholipour, A., & Stefanakis, A. (2019). Performance of pilot Horizontal Roughing Filter as polishing stage of waste stabilization ponds in developing regions and modelling verification. *ELSEVIER*, 8-18.  
doi:[10.1016/j.ecoleng.2019.07.007](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.007)
- Etapa EP. (2020). estapa. Obtenido de [estapa.net.ec](http://estapa.net.ec):  
<https://www.estapa.net.ec/informacion/saneamiento/plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales>
- ETRAS - OPS/OMS. (28 de Noviembre de 2018). *Situación actual del ODS-6 en la región América Latina. Planes y Acciones*. (T. Monteiro, Ed.) Obtenido de paho.org: <https://www.paho.org/blogs/etras/wp-content/uploads/2018/11/Sesion-S01-c-ODS6-en-ALC-.pdf>



Fernandez Brenis, E. J., & Sánchez Zapata, K. L. (Septiembre de 2016). Evaluación de un lecho filtrante, utilizando mesocarpo de coco (*Cocos nucifera*), para el tratamiento de aguas residuales de la empacadora de banano Algarrobo 1, Sullana 2015. Pimentel. Obtenido de <http://repositorio.uss.edu.pe/handle/uss/839>

Galeano, L. J., & Rojas, V. D. (2016). *Propuesta de diseño de una planta de tratamiento de agua residual por zanjón de oxidación para el casco urbano del municipio de velez -santander*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13930/4/PROPUESTA%20DE%20DISE%C3%91O%20DE%20UNA%20PTAR%20PARA%20EL%20%20MUNICIPIO%20DE%20VELEZ%20-SANTANDER..pdf>

Gallegos Valqui, D. G. (2019). *Evaluación del lombrifiltro como tratamiento primario del sistema de tratamiento de aguas residuales del proyecto Manchay Verde*. Villa el Salvador: Universidad Nacional Tecnológica de Lima. Obtenido de <http://repositorio.unts.edu.pe/handle/UNTELS/414>

Gandarillas, J. (2016). *Lechos de Turba. Módulo Gestión de Aguas Residuales y Reutilización*. (EOI Escuela de Organización Industrial, Ed.) Obtenido de <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/25063/lechos-de-turba-modulo-gestion-de-aguas-residuales-y-reutilizacion>

Garavito Naja, J. Z., Morales Posada , N., & Chávez Porras, Á. (2017). *Descripción de metodologías del sistema de lombricultura para gestión de residuos sólidos orgánicos*. Obtenido de Academia.edu: [https://www.academia.edu/3307700/DESCRIPCION\\_DE\\_METODOLOGIAS\\_DEL\\_SISTEMA\\_DE\\_LOMBRICULTURA\\_PARA\\_GESTION\\_DE\\_RESIDUOS\\_SOLIDOS\\_ORGANICOS](https://www.academia.edu/3307700/DESCRIPCION_DE_METODOLOGIAS_DEL_SISTEMA_DE_LOMBRICULTURA_PARA_GESTION_DE_RESIDUOS_SOLIDOS_ORGANICOS)

García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). *Depuración con Humedales construidos - Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*. Catalunya: Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/2474>

Ghatnekar, S. D., Kavian, M. F., Sharma, S. M., Ghatnekar, S. S., Ghatnekar, G. S., & Ghatnekar, A. V. (2010). Application of vermi-filter-based effluent treatments from the gelatine industry. *Dynamic Soil, Dynamic Plant, Global Science Books*, 83 - 88. Obtenido de [http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOonline/images/2010/DSDP\\_4\(SI1\)/DSDP\\_4\(SI1\)83-88o.pdf](http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOonline/images/2010/DSDP_4(SI1)/DSDP_4(SI1)83-88o.pdf)

Gobierno de Chile CONAMA. (s.f.). *Tecnología de Lombrifiltros*. Santiago de Chile: Fundación de Chile. Obtenido de [http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990\\_09.pdf](http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990_09.pdf)

Gustafson, D. M., Anderson, J. L., & Cristopherson, S. H. (2001). *Peat Filters*. Minnesota: University of Minnesota. Obtenido de [https://septic.umn.edu/sites/septic.umn.edu/files/peat\\_filters.pdf](https://septic.umn.edu/sites/septic.umn.edu/files/peat_filters.pdf)

Hernández Muñoz, A., Hernández Lehmann , A., & Galán Martínez, P. (2004). *Manual de Depuración Uralita*. Madrid: International Thomson Editores Spain Paraninfo, S.A. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/224114921/Manual-de-Depuracion-Uralita>

Hophmayer Tokich, S. (2006). Wastewater management strategy: centralized v. decentralized technologies for small communities. *The Center for Clean Technology and Environmental Policy, University of Twente*. Obtenido de <https://www.semanticscholar.org/paper/Wastewater-management-strategy%3A-centralized-v.-for-Hophmayer-Tokich/842b2304fa39045dafa56b8674f913b6748775ed>



- Huertos Toro, J. A. (2018). *Análisis comparativo de tecnologías aerobias para el tratamiento de aguas residuales urbanas*. Manizales: Universidad Católica de Manizales. Obtenido de <http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/2127/Juli%C3%A1n%20andr%C3%A9s%20Huertos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Huertas, R., Marcos, C., Ibarguren, N., & Ordás , S. (2013). *Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Valladolid: Confederación Hidrográfica del Duero. Obtenido de <http://idiaqua.eu/web/wp-content/uploads/2018/07/guiapractica-depuracionaguas-chd.pdf>
- Instituto Boliviano de Normalización y Calidad. (2007). *Reglamento técnico de diseño de estaciones de bombeo, NB 688*. Ministerio del Agua Viceministerio de Servicios Básicos. Obtenido de [https://www.academia.edu/13258881/REGLAMENTO\\_T%C3%89CNICO\\_DE\\_DISE%C3%91O\\_DE\\_ESTACIONES\\_DE\\_BOMBEO\\_Reglamento\\_t%C3%A9cnico\\_de\\_dise%C3%B1o\\_de\\_estaciones\\_de\\_bombeo\\_Reglamento\\_Nacional\\_NB\\_688\\_Instituto\\_Boliviano\\_de\\_Normalizaci%C3%B3n\\_y\\_Calidad](https://www.academia.edu/13258881/REGLAMENTO_T%C3%89CNICO_DE_DISE%C3%91O_DE_ESTACIONES_DE_BOMBEO_Reglamento_t%C3%A9cnico_de_dise%C3%B1o_de_estaciones_de_bombeo_Reglamento_Nacional_NB_688_Instituto_Boliviano_de_Normalizaci%C3%B3n_y_Calidad)
- Jafari Dastanaie, J., Nabi Bidhendi, G. R., Nasrabadi, T., Habibi, R., & Hoveydi, H. (2007). Use of horizontal flow roughing filtration in drinking water treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology (IJEST)*, 379-382. Obtenido de <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=77176>
- Juárez Bonilla, M. I. (2017). *Calibración de vertedero proporcional o sutro*. Guatemala: Universeide de San Carlos de Guatemala. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/6535/1/Mayra%20Isabel%20Ju%20A1rez%20Bonilla.pdf>
- Kang, J. K., Lee, C. G., Park, J. A., Kim, S. B., Choi, N. C., & Park, S. J. (2013). Adhesion of bacteria to pyrophyllite clay in aqueous solution. *Environmental Technology*, 703-710. doi:10.1080/09593330.2012.715677
- Kayombo, S., Mbwette, T. S., & Katima, J. H. (2004). *Waste Stabilization Ponds and Constructed Wetlands Design Manual*. Dar es Salam, Tanzania: University of Dar es Salaam. Obtenido de [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/KAYOMBO%20et%20al%202004%20Waste%20Stabilization%20Ponds%20and%20Constructed%20Wetlands%20Design%20Manual\\_0.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KAYOMBO%20et%20al%202004%20Waste%20Stabilization%20Ponds%20and%20Constructed%20Wetlands%20Design%20Manual_0.pdf)
- Kharwade, A. M., & Khedikar, I. P. (2011). Laboratory scale studies on domestic grey water through vermicfilter and non-vermicfilter. *Journal of Engineering Research and Studies*, 35 - 39. Obtenido de <https://www.technicaljournalsonline.com/jers/VOL%20II/JERS%20VOL%20II%20ISSUE%20IV%20OCTOBER%20DECEMBER%202011/ARTICLE%208%20JERS%20VOLII%20ISSUE%20IV%20OCT%20DEC%202011.pdf>
- Kimwaga, R., Mashauri, D. A., Mbwette, T. S., Katima, J., & Jørgensen, S. (2004). Use of coupled dynamic roughing filters and subsurface horizontal flow constructed wetland system as appropriate technology for upgrading waste stabilisation ponds effluents in Tanzania. *Elsevier*, 1243-1251. doi:doi:10.1016/j.pce.2004.09.021
- Kumar, T., Bhargava, R., Hari Prasad, K. S., & Pruthi, V. (2015). Evaluation of vermicfiltration process using natural ingredients for effective wastewater treatment. *Elsevier*, 370 - 377. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.044>
- Kumar, T., Rajpal, A., Bhargava, R., & Hari Prasad, K. S. (2014). Performance evaluation of vermicfilter at different hydraulic loading rate using river bed material. *Elsevier*, 77 - 82. doi:10.1016/j.ecoleng.2013.10.028



- Lee, C. H. (2003). Assessment of contamination load on water, soil and sediment affected by the Kongjujeil mine drainage, Republic of Korea. *Environmental Geology*, 501-515. doi:10.1007/s00254-003-0786-1
- Li, X., Xing, M., Zhao, L., & Dai, X. (2013). Organic matter humification in vermicfiltration process for domestic sewage sludge treatment by excitation–emission matrix fluorescence and Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of Hazardous Materials*, 491-499. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.07.074>
- Li, Y. S., Robin, P., Cluzeau, D., Bouché, M., Qiu, J. P., Laplanche, A., . . . Callarec, J. (2008). Vermifiltration as a stage in reuse of swine wastewater: Monitoring methodology on an experimental farm. *Elsevier*, 301-309. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.11.010>
- López Cualla, R. A. (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería. Obtenido de [https://www.academia.edu/35920755/Este\\_89822446\\_Alcantarillados\\_Lopez\\_Cualla\\_OCR](https://www.academia.edu/35920755/Este_89822446_Alcantarillados_Lopez_Cualla_OCR)
- Lourenço, N., & Nunes, L. (2017). Is filter packing important in a small-scale vermicfiltration process of urban wastewater? *CrossMark*. doi:10.1007/s13762-017-1323-1
- Manaf, L. A., Jusoh, M., Yusoff, M., Ismail, T., Harun, R., Juahir, H., & Jusoff, K. (2009). Influences of Bedding Material in Vermicomposting Process. *International Journal of Biology*, 81 - 91. doi:10.5539/ijb.v1n1p81
- Manrique Delgado, E. P., & Piñeros Castañeda, J. (2016). *Evaluación del sistema de depuración biológica a partir de lombrices de tierra (Eisenia foetida) en aguas residuales procedentes de industrias lácteas a nivel laboratorio*. Bogotá: Fundación Universidad de América. Obtenido de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/578/1/6111676-2016-2-IQ.pdf>
- Manyuchi, M. M., Kadzungura, L., & Boka, S. (2013). Pilot Scale Studies for Vermifiltration of 1000m3/day of Sewage Wastewater. *Asian Journal of Engineering and Technology*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/285757309>
- Manyuchi, M. M., Kadzungura, L., & Boka, S. (2013a). Pilot Scale Studies for Vermifiltration of 1000m3/day of Sewage Wastewater. *Asian Journal of Engineering and Technology*, 13-19. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/285757309>
- Manyuchi, M. M., Kudzangura, L., & Boka, S. (2013b). Vermifiltration of Sewage Wastewater using Eisenia Fetida Earthworms for Potential use in Irrigation Purposes. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 538 - 542. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/256452259\\_Vermifiltration\\_of\\_Sewage\\_Wastewater\\_using\\_Eisenia\\_Fetida\\_Earthworms\\_for\\_Potential\\_use\\_in\\_Irrigation\\_Purposes](https://www.researchgate.net/publication/256452259_Vermifiltration_of_Sewage_Wastewater_using_Eisenia_Fetida_Earthworms_for_Potential_use_in_Irrigation_Purposes)
- Mara, D. (2003). *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. London: Earthscan. Obtenido de [https://www.pseau.org/outils/ouvrages/earthscan\\_ltd\\_domestic\\_wastewater\\_treatment\\_in\\_developing\\_countries\\_2003.pdf](https://www.pseau.org/outils/ouvrages/earthscan_ltd_domestic_wastewater_treatment_in_developing_countries_2003.pdf)
- Massoud, M. A., Tarhini, A., & Nasr, J. A. (2009). Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Journal of Environmental Management*, 652-659. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.001>



- Massoud, M., Tarhini , A., & Nasr, J. (2008). Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Elsevier*, 652-659.  
doi:10.1016/j.jenvman.2008.07.001
- Mendieta Bravo, J. S. (2012). *Tratabilidad de las aguas residuales industriales de una empacadora de camarón en la degradación de la materia orgánica mediante la adaptación y aplicación de lombrices acuáticas*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Ambiental. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/1630>
- Ministerio de Desarrollo Económico. (17 de Noviembre de 2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. Bogotá, Colombia. Obtenido de <http://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC170777/>
- Ministerio del Agua. (2007). *Manual de operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento de aguas residuales en pobleaciones rurales*. La Paz: ABBASE LTDA. Obtenido de <http://www.anesapa.org/wp-content/uploads/2014/07/02MANOpeManSTARrural.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2017). Anexo 1 del libro VI del Testo Unificado de Legislación Secundaria. Quito.
- Mitma Jara, Y. I. (2017). *Efecto del sistema de lombrifiltro en la depuración de DBO5 y DQO de las aguas residuales domésticas del distrito de Moche*. Trujillo: Universidad César Vallejo. Obtenido de <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/23238>
- Munroe, G. (2007). Manual of On-Farm Vermicomposting and Vermiculture. *Organic Agriculture Centre of Canada*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/268254767\\_Manual\\_of\\_On-Farm\\_Vermicomposting\\_and\\_Vermiculture](https://www.researchgate.net/publication/268254767_Manual_of_On-Farm_Vermicomposting_and_Vermiculture)
- Naeim Nouri, S. (2016). *Practical Engineering Management of Offshore Oil and Gas Platforms*. Gulf Professional Publishing. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809331-3.16001-6>
- NBR 9649 - ABNT, A. (Noviembre de 1986). Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, Brasil. Obtenido de <http://licenciadorambiental.com.br/wp-content/uploads/2015/01/NBR-9.649-Projeto-de-Redes-de-Esgoto.pdf>
- Nkwonta, O. (2010). A comparison of horizontal roughing filters and vertical roughing filters in wastewater treatment using gravel as a filter media. *International Journal of the Physical Sciences*, 1240-1247. Obtenido de [https://pdfs.semanticscholar.org/7305/cb61d91c75564fc9734ef9e72bea39a11969.pdf?\\_ga=2.78953684.1738711391.1603810645-837540995.1599084685](https://pdfs.semanticscholar.org/7305/cb61d91c75564fc9734ef9e72bea39a11969.pdf?_ga=2.78953684.1738711391.1603810645-837540995.1599084685)
- NORMA OS.090. (2006). *Plantas de tratamiento de aguas residuales*. El Peruano. Obtenido de [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/AA381897B934542205257DC7005EC0C3/\\$FILE/OS.090.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/AA381897B934542205257DC7005EC0C3/$FILE/OS.090.pdf)
- Noyola, A., Morgan Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*. México DF: Instituto de Ingeniería de la UNAM. Obtenido de [http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia\\_Aguas\\_Residuales.pdf](http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia_Aguas_Residuales.pdf)
- Nuñez, J. (2013). *Aqua y Saneamiento a nivel Nacional Alternativas de innovación*. Buenos Aires : Cámara Argentina de la Construcción. Obtenido de [http://biblio.ing.unlp.edu.ar/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?bib=INGC-MON-018872&newreserve=1&by\\_biblio=1](http://biblio.ing.unlp.edu.ar/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?bib=INGC-MON-018872&newreserve=1&by_biblio=1)



- Once Sarmiento, D. J., & Ruiz Herrera, J. F. (2014). *Evaluación de las Plantas de depuración de Agua Residual de las Comunidades de Soldados y Churuguzo, Cantón Cuenca, Azuay*. Cuenca: Universidad de Cuenca. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/20923>
- Orozco Villalba, P. A., & Sánchez Cherrez, W. R. (2020). *Biorremediación de las aguas residuales provenientes de la industria láctea a escala de laboratorio mediante el sistema tohá*. Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo. Obtenido de <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/6363/1/BIORREMEDIACI%C3%93N%20DE%20LAS%20AGUAS%20RESIDUALES%20PROVENIENTES%20DE%20LA%20INDUSTRIA%20L%C3%A1CTE%20.pdf>
- Ortiz Méndez, O. (2018). *Diseño de una transición hidráulica con paredes rectas y arcos de circunferencia*. Cuenca: Universidad de Cuenca. Obtenido de [https://www.academia.edu/32691339/Dise%C3%B1o\\_de\\_una\\_transici%C3%B3n\\_hidr%C3%A1ulica\\_con\\_paredes\\_rectas\\_y\\_arcos\\_de\\_circunferencia](https://www.academia.edu/32691339/Dise%C3%B1o_de_una_transici%C3%B3n_hidr%C3%A1ulica_con_paredes_rectas_y_arcos_de_circunferencia)
- Pacheco Tobar, E. A. (2019). Elementos de diseño para una captación convencional. *Universidad de Cuenca*. Obtenido de [https://www.academia.edu/18092141/MANUAL\\_DE\\_DISENO\\_E\\_Pacheco](https://www.academia.edu/18092141/MANUAL_DE_DISENO_E_Pacheco)
- Pacheco Tobar, E. A., & Carrillo Serrano, V. M. (2020). Estudio del flujo a través de un vertedero lateral. *Universidad de Cuenca*.
- Parra Piérart, I., & Chiang Rojas, G. (2013). Integrated model of biopurification system for home sewage. A proposal for peri-urban communities from south center of Chile. *Gestión y Ambiente*, 39-51. doi:169429726004
- Patel, J. B. (2018). Treatment of Sewage by Vermifiltration: A Review. *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science*, 186 - 190. Obtenido de <https://www.ijtemas.in/DigitalLibrary/Vol.7Issue1/186-190.pdf>
- Patil, V. B., Kulkarni, G. S., & Kore, V. S. (2012). Performance of Horizontal Roughing Filters for Wastewater: A review. *International Research Journal of Environment Sciences*, 53-55. Obtenido de <http://www.isca.in/IJENS/Archive/v1/i2/10.ISCA-IRJEvsS-2012-030.pdf>
- Pérez Alarco, M. B., & Pérez Yahuara, S. A. (2016). *Proyecto de instalación de una planta de procesamiento de las aguas residuales domésticas del Distrito de Motupe usando el sistema TOHA*. Lambayeque: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Obtenido de <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/UNPRG/8606>
- Pescod, M. B. (1992). Wastewater treatment and use in agriculture - FAO irrigation and drainage paper 47. *Food and Agriculture Organization of The United Nations*(47). Obtenido de <https://citeserx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.470.8910&rep=rep1&type=pdf>
- Reed, B., & Kapranis, Y. (1998). Roughing filtration with polystyrene beads. *24th WEDC International Conference*, 361-364. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/0100/6e0be24c5367b03b11fa4ec83bc59e808d3a.pdf>
- Reyes, J. V. (2016). Determinación de la eficiencia del aserrín y la fibra de coco utilizados como empaques para la remoción de contaminantes en Biofiltros para el tratamiento de aguas residuales. *Scielo*, 41-56. Obtenido de [scielo.senescyt.gob.ec/pdf/enfoqueute/v7n3/1390-6542-enfoqueute-7-03-00041.pdf](http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/enfoqueute/v7n3/1390-6542-enfoqueute-7-03-00041.pdf)



- Romero Rojas, J. A. (2010). *Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y principios de diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/391309831/Tratamiento-de-Aguas-Residuales-Teoria-y-Principios-de-Diseno-Jairo-Alberto-Romero-Rojas-pdf>
- Rousseau, D., Vanrolleghem, P., & De Pauw, N. (2004). Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: a review. *Elsevier*, 1484-1493. doi:10.1016/j.watres.2003.12.013
- Sagrario Castillo, G. A. (2016). *Eliminación de nutrientes mediante tratamientos biopelícula: corrientes actuales y necesidades de investigación*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de [http://oa.upm.es/39458/1/Gustavo\\_Sagrario\\_Castillo.pdf](http://oa.upm.es/39458/1/Gustavo_Sagrario_Castillo.pdf)
- Salazar Miranda , P. I. (2005). *Sistema TOHÁ; una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas residuales en sectores rurales*. Valdivia : Universidad Austral de Chile. Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmfcis161s/doc/bmfcis161s.pdf>
- Salazar Serrano, D. S., & Sánchez Merchán, E. A. (2015). *Evaluación y propuesta de rediseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Comunidad de Churuguzo, Parroquia Tarqui, Catón Cuenca, Provincia del Azuay*. Cuenca: Universidad de Cuenca. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21634>
- SICA. (2017). *Manual de operación y mantenimiento de una PTAR*. Obtenido de [minos.vivienda.gob.pe:8081/Documentos\\_Sica/Modulos/FTA/SECCION%20IV/4.14/138077450\\_6\\_1.%20Manual%20de%20O&M-PTAR\\_opt.pdf](http://minos.vivienda.gob.pe:8081/Documentos_Sica/Modulos/FTA/SECCION%20IV/4.14/138077450_6_1.%20Manual%20de%20O&M-PTAR_opt.pdf)
- Singh, N. K., Kazmi, A. A., & Starkl, M. (2015). A review on full-scale decentralized wastewater treatment systems: techno-economical approach. *Water Science & Technology*, 468-478. doi:10.2166/wst.2014.413
- Singh, R., Bhunia, P., & Dash, R. (2017). A mechanistic review on vermicfiltration of wastewater: Design, operation and performance. *Journal of Environmental Management*, 656-672. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.042>
- Sinha, R. K., Bharambe, G., & Bapat, P. (2007). Removal of high BOD and COD loadings of primary liquid waste products from dairy industry by vermicfiltration technology using earthworms. *Indian Journal of Environmental Protection*, 486 - 501. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/45812932\\_Removal\\_of\\_high\\_BOD\\_and\\_COD\\_loadings\\_of\\_primary\\_liquid\\_waste\\_products\\_from\\_dairy\\_industry\\_by\\_vermicfiltration\\_technology\\_using\\_earthworms](https://www.researchgate.net/publication/45812932_Removal_of_high_BOD_and_COD_loadings_of_primary_liquid_waste_products_from_dairy_industry_by_vermicfiltration_technology_using_earthworms)
- Sinha, R. K., Bharambe, G., & Chaudhari, U. (2008). Sewage treatment by vermicfiltration with synchronous treatment of sludge by earthworms: a low-cost sustainable technology over conventional systems with potential for decentralization. *Springer Science+Business Media*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/143894495.pdf>
- Sinha, R., Patel, U., Soni, B., & Li, Z. (2014). Earthworms for safe and useful management of solid wastes and wastewaters, remediation of contaminated soils and restoration of soil fertility, promotion of organic farming and mitigation of global warming: A review. *Journal of Environment and Waste Management*, 011 - 025. Obtenido de <https://www.slideshare.net/pd81xz/a-dq24>
- Solis Mejia, L., Islas Espinoza, M., & Esteller, M. V. (2012). Vermicomposting of Sewage Sludge: Earthworm Population and Agronomic Advantages. *Compost Science & Utilization*, 20(1), 11 - 17. Obtenido de



- [https://www.researchgate.net/publication/233728251\\_Vermicomposting\\_of\\_Sewage\\_Sludge\\_Earthworm\\_Population\\_and\\_Agronomic\\_Advantages](https://www.researchgate.net/publication/233728251_Vermicomposting_of_Sewage_Sludge_Earthworm_Population_and_Agronomic_Advantages)
- Sperling, M. v. (2007). *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal* (Vol. Uno). Minas Gerais, Brasil: IWA Publishing. Obtenido de <https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781780402086.pdf>
- Subsecretaría de Agua Potable y Saneamiento. (2015). *Estrategia nacional de agua y saneamiento del Ecuador*. Quito. Obtenido de <https://docplayer.es/87672329-Estrategia-nacional-de-agua-y-saneamiento-del-ecuador.html>
- Tchobanoglous, G. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales Redes de Alcantarillado y Bombeo*. (Metcalf & Eddy, Ed.) Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/350261135/INGENIERIA-de-AGUAS-RESIDUALES-Redes-de-Alcantarillado-y-Bombeo-Metcalf>
- Tchobanoglous, G., & Burton, F. L. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales tratamiento, vertido y reutilización*. (Metcalf & Eddy, Ed.) Madrid: McGraw-Hill. Obtenido de [https://www.academia.edu/35963101/Ingenier%C3%ADA\\_de\\_aguas\\_residuales\\_Volumen\\_1\\_3ra\\_Edici%C3%B3n\\_METCALF\\_and\\_EDDY\\_FREELIBROS\\_ORG\\_pdf](https://www.academia.edu/35963101/Ingenier%C3%ADA_de_aguas_residuales_Volumen_1_3ra_Edici%C3%B3n_METCALF_and_EDDY_FREELIBROS_ORG_pdf)
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (Cuarta ed.). (Metcalf & Eddy, Ed.) McGraw-Hill Companies. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/307988728/Wastewater-Engineering-Treatment-and-Reuse-4th-Edition>
- Tchobanoglous, G., Ruppe, L., Leverenz, H., & Darby, J. (2004). Decentralized wastewater management: challenges and opportunities for the twenty-first century. *Water Science and Technology Water Supply*, 4(1), 95-102. doi:10.2166/ws.2004.0011
- U.S. EPA. (2000a). Wastewater Technology Fact Sheet Trickling Filters. *United States Environmental Protection Agency*. Obtenido de [https://www3.epa.gov/npdes/pubs/trickling\\_filter.pdf](https://www3.epa.gov/npdes/pubs/trickling_filter.pdf)
- U.S. EPA. (2000b). Wastewater Technology Fact Sheet Trickling Filter Nitrification. *United States Environmental Protection Agency*. Obtenido de [https://www3.epa.gov/npdes/pubs/trickling\\_filt\\_nitrification.pdf](https://www3.epa.gov/npdes/pubs/trickling_filt_nitrification.pdf)
- U.S. EPA. (2004). *Primer for Municipal Wastewater Treatment Systems*. Washington DC. Obtenido de <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/primer.pdf>
- U.S. EPA. (2005). *Handbook for Managing Onsite and Clustered (Decentralized) Wastewater Treatment Systems*. Washington DC. Obtenido de [http://observatoriaagua.uib.es/repositori/sa\\_manualeu2.pdf](http://observatoriaagua.uib.es/repositori/sa_manualeu2.pdf)
- United Nations. (2020). *Clean Water and Sanitation*. Obtenido de Sustainable Development Goals: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/>
- Velasco Andrade, V. G. (2015). *Vermifiltro para el tratamiento de Aguas Residuales*. Quito: Universidad de las Américas. Obtenido de <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1448/TC-1107.1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Velasco Salazar, J. (2017). *Manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales Ubillus*. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18963/1/CD-8360.pdf>



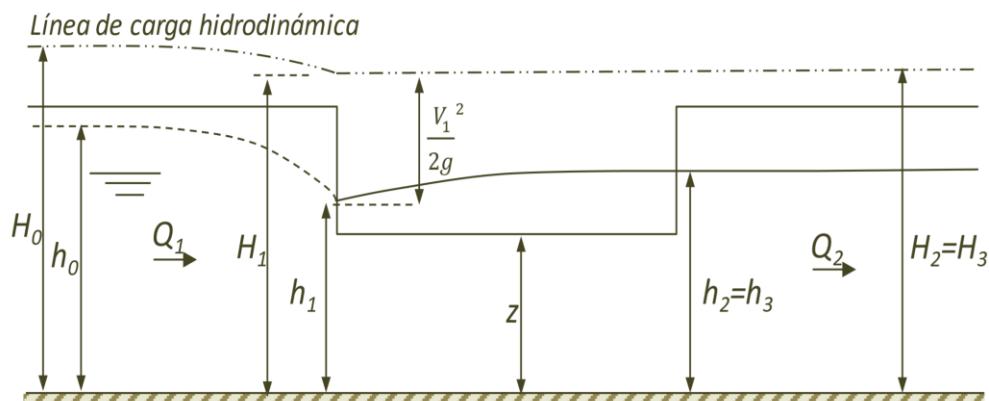
- Vizcaino Mendoza, L. (2020). *Efectos de Eisenia foetida y Eichhornia crassipes en la remoción de materia orgánica, nutrientes y coliformes en efluentes residuales domésticos*. Riohacha: Universidad de la Guajira. Obtenido de [https://innoqua-project.eu/wp-content/uploads/2020/11/conf-doc-Lissette\\_Vizcaino\\_PRESENTACION\\_LOMBRIFILTRO\\_INNOQUA.pdf](https://innoqua-project.eu/wp-content/uploads/2020/11/conf-doc-Lissette_Vizcaino_PRESENTACION_LOMBRIFILTRO_INNOQUA.pdf)
- WASH. (22 de Junio de 2017). *Sanitation & Hygiene*. Obtenido de Centers for Disease Control and Prevention (CDC): <https://www.cdc.gov/healthywater/global/sanitation/index.html>
- Wegelin, M. (1996). *Surface water treatment by roughing filters. A Desing, Construction and Operation Manual*. Dübendorf, Suiza: Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG) and Department Water and Sanitation in Developing Countries (SANDEC). Obtenido de <https://www.ircwash.org/sites/default/files/Wegelin-1996-Surface.pdf>
- Wegelin, M., Boller, M., & Schertenleib, R. (1987). Particle removal by horizontal-flow roughing filtration. *Aqua*, 80-90. Obtenido de <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A2548>
- WHO/UNICEF JMP. (2019). *Progresos en materia de agua para consumo, saneamiento e higiene en los hogares: 2000-2017. Las desigualdades en el punto de mira*. Nueva York. Obtenido de <https://washdata.org/sites/default/files/documents/reports/2019-07/jmp-2019-wash-households.pdf>
- WHO/UNICEF JMP. (2020). *State of the World's Sanitation: An urgent call to transform sanitation for better health, environments, economies and societies*. New York. Obtenido de <https://washdata.org/sites/default/files/2020-11/UNICEF-WHO-state-of-the-worlds-sanitation-2020.pdf>
- Wilderer, P. A., & Schreff, D. (2000). Decentralized and centralized wastewater management: a challenge for technology developers. *Water Science and Technology*. doi:10.2166/wst.2000.0001
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2015). *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. Paris: UNESCO. Obtenido de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000231823>
- Xing, M., Li, X., Yang, J., Lv, B., & Lu, Y. (2012). Performance and mechanism of vermicfiltration system for liquid-state sewage sludge treatment using molecular and stable isotopic techniques. *Chemical Engineering Journal*, 143-150. doi:10.1016/j.cej.2012.05.003
- Xing, M., Li, X., Yang, J., Lv, B., & Lu, Y. (2012). Performance and mechanism of vermicfiltration system for liquid-state sewage sludge treatment using molecular and stable isotopic techniques. *Chemical Engineering Journal*, 143-150. Obtenido de <https://www.tib.eu/en/search/id/BLSE%3ARN315005412/Performance-and-mechanism-of-vermicfiltration-system/>
- Yunga Cuntada, A. R. (2019). *Análisis de la sostenibilidad operacional de las plantas de tratamiento de aguas residuales del área rural de la ciudad de Cuenca*. Cuenca: Universidad de Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/31841/1/Proyecto%20de%20titulaci%C3%B3n.pdf>
- Zhao, Y. J., Yan, C., Li, Y. L., Li, J. H., Yang, M., Nie, E., . . . Luo, X. Z. (2012). Effect of C/N ratios on the performance of earthworm eco-filter for treatment of synthetics domestic sewage. *Environmental Science and Pollution Research*, 4049-4059. doi:10.1007/s11356-012-0871-7



## 9 ANEXOS Y PLANOS

### Anexo 1: Procedimiento para el diseño del vertedero lateral

En la siguiente figura se muestra la configuración de los calados de agua que definen al régimen subcrítico, las mismas que son necesarias determinar para establecer la longitud y altura del vertedero lateral.



Fuente: (Pacheco Tobar & Carrillo Serrano, 2020)

A continuación, se determinan los calados de agua para lo cual se utilizan las siguientes ecuaciones:

#### Caudal de excesos (Qv)

$$Q_v = Q_1 - Q_2$$

Los calados aguas arriba y abajo del vertedero se determina mediante la ecuación de Manning, para el calado aguas arriba  $h_0$ , se utiliza el caudal de crecida  $Q_1$ , mientras que para el calado aguas abajo  $h_2$ , se utiliza el caudal mayorado del proyecto  $Q_2$ .

$$Q = \frac{1}{n} * \frac{A^{5/2}}{P^{5/3}} * S^{1/2}$$

Los calados resultantes se presentan en la siguiente tabla.

Calados de agua			
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades
Caudal de exceso	$Q_v$	0.00197	$m^3/s$
Calado aguas arriba	$h_0$	0.070	m
Calado aguas abajo	$h_2$	0.055	m

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la velocidad aguas abajo y aguas arriba,  $V_2$  y  $V_1$  respectivamente, se aplican las ecuaciones:

$$V_2 = \frac{Q_2}{B \cdot h_2} \quad V_1 = \frac{Q_1}{B \cdot h_0}$$

Para determinar la altura de la línea de energía  $H_2$  (aguas abajo del vertedero) y  $H_1$  (aguas arriba del vertedero), se utilizan las siguientes ecuaciones:



$$H_2 = h_2 + \alpha \frac{v_2^2}{2g} \quad H_1 = h_1 + \alpha \frac{v_1^2}{2g}$$

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos.

Determinación H2 y h1			
Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades
Velocidad aguas abajo	V2	0.303	m/s
Altura de la línea de energía	H2	0.06	m
Velocidad aguas arriba	V1	0.379	m/s
Calado al ingreso del vertedero	h1	0.052	m

Fuente: Elaboración propia.

Este calado al ingreso del vertedero será la máxima altura de la cresta del vertedero (p máximo). En función de esta altura se propone una altura de la cresta del vertedero de 4 cm (p). Para determinar la longitud del vertedero lateral se requiere determinar las funciones  $\phi_1$  y  $\phi_2$ , por ende, se utiliza la ecuación:

$$\phi\left(\frac{y}{H}\right) = \frac{2H - 3z}{H - z} \sqrt{\frac{H - y}{y - z}} - 3 \sin^{-1} \sqrt{\frac{H - y}{y - z}}$$

La longitud del vertedero lateral se determina con la ecuación:

$$L = \frac{B}{\mu} \left[ \phi\left(\frac{h_2}{H}\right) - \phi\left(\frac{h_1}{H}\right) \right]$$

Donde:

- B = Ancho del canal, en m;
- $\mu$  = Coeficiente;
- H = Carga de agua sobre el vertedero, en m.

La carga de agua sobre el vertedero H, se determina restando el calado al ingreso del vertedero, menos la altura de la cresta del vertedero.

Coeficiente  $\mu$

$$\mu = \frac{2}{3} C_w$$

Donde:

- $C_w$  = Coeficiente para perfil de cresta afilada

$$C_w = 0.605 + \frac{0.08H}{p} + \frac{1}{1000H}$$

**Anexo 2: Densidad y viscosidad del agua**

**DENSIDAD Y VISCOSIDAD DEL AGUA**  
Calculadas de las tablas "International Critical"

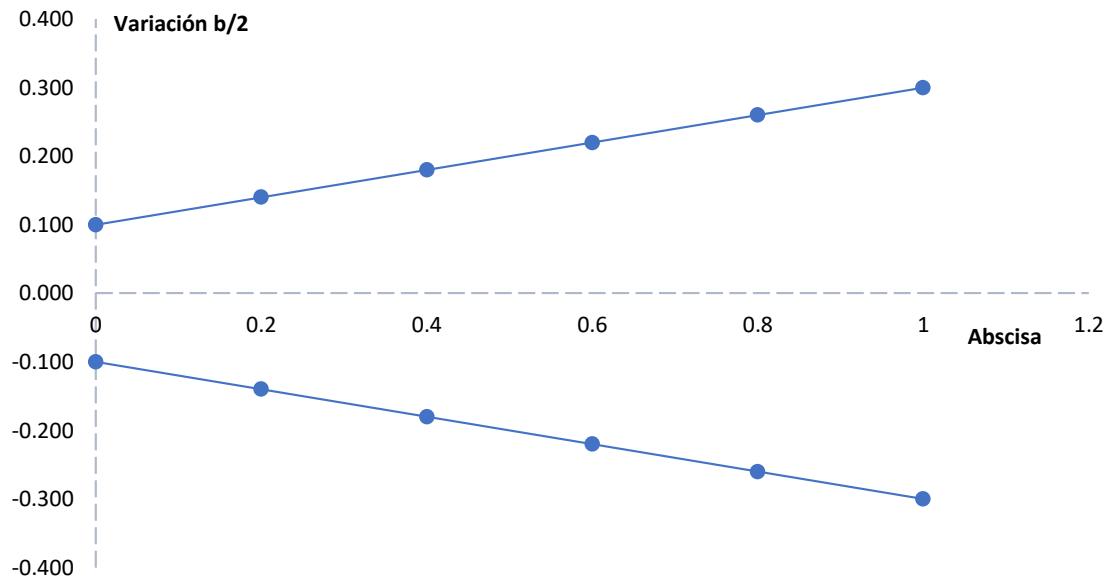
Temperatura °C	Densidad (gr/cm3)	Viscosidad Cinemática
0	0.99987	1.7923
1	0.99993	1.7321
2	0.99997	1.6741
3	0.99999	1.6193
4	1.00000	1.5676
5	0.99999	1.5188
6	0.99997	1.4726
7	0.99993	1.4288
8	0.99988	1.3874
9	0.99981	1.3479
10	0.99973	1.3101
11	0.99963	1.2740
12	0.99952	1.2396
13	0.99940	1.2068
14	0.99927	1.1756
15	0.99913	1.1457
16	0.99897	1.1168
17	0.99880	1.0888
18	0.99862	1.0618
19	0.99843	1.0356
20	0.99823	1.0105
21	0.99802	0.9863
22	0.99780	0.9629
23	0.99757	0.9403
24	0.99733	0.9186
25	0.99707	0.8975
26	0.99681	0.8774
27	0.99654	0.8581
28	0.99626	0.8394
29	0.99597	0.8214
30	0.99568	0.8039
31	0.99537	0.7870
32	0.99505	0.7708
33	0.99473	0.7551
34	0.99440	0.7398
35	0.99406	0.7251
36	0.99371	0.7109
37	0.99336	0.6971
38	0.99299	0.6839
39	0.99262	0.6711

Fuente: (CEPIS, 2005a)

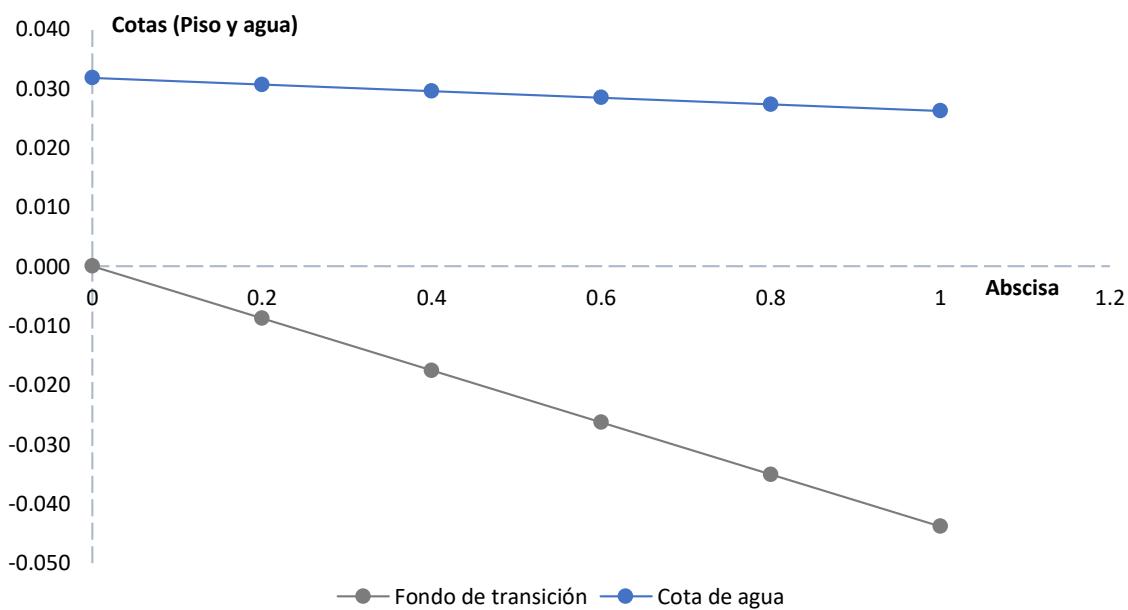
**Anexo 3: Transición con el caudal máximo de aguas residuales**

El diseño de la transición se ha comprobado con el caudal máximo de aguas residuales (3 l/s), obteniéndose:

- La vista en planta de transición recta de salida



- La vista en perfil de la transición, con pendiente del 4% en el fondo.



**Anexo 4: Especificaciones para tuberías PVC con Unión por sellado elastomérico (UZ) y Unión por cementado solvente (EC) PVC - Plastigama**

Diámetro Nominal (mm)		Diámetro Interior	Espesor Nominal	Presión de Trabajo		
UNIÓN U/Z	UNION E/C	mm	mm	MPa	PSI (lb/pulg <sup>2</sup> )	Kgf/cm <sup>2</sup>
	20	17.8	1.1	1.25	181	12.75
		16.8	1.6	2.00	290	20.40
	25	22.8	1.1	1.00	145	10.20
		21.8	1.6	1.60	232	16.32
	32	29.8	1.1	0.80	116	8.16
		28.8	1.6	1.25	181	12.75
	40	37.8	1.1	0.63	91	6.43
		36.8	1.6	1.00	145	10.20
	50	36.0	2.0	1.25	181	12.75
		47.4	1.3	0.63	91	6.43
	63	46.8	1.6	0.80	116	8.16
		46.0	2.0	1.00	145	10.20
	75	45.0	2.5	1.25	181	12.75
		59.8	1.6	0.63	91	6.43
	90	58.8	2.1	0.80	116	8.16
		58.0	2.5	1.00	145	10.20
	110	56.8	3.1	1.25	181	12.75
		72.0	1.5	0.50	73	5.10
	140	71.2	1.9	0.63	91	6.43
		70.2	2.4	0.80	116	8.16
		69.0	3.0	1.00	145	10.20
		67.6	3.7	1.25	181	12.75
		86.4	1.8	0.50	73	5.10
		85.4	2.3	0.63	91	6.43
		84.2	2.9	0.80	116	8.16
		82.8	3.6	1.00	145	10.20
		81.2	4.4	1.25	181	12.75
		105.6	2.2	0.50	73	5.10
		104.6	2.7	0.63	91	6.43
		103.2	3.4	0.80	116	8.16
		101.6	4.2	1.00	145	10.20
		99.6	5.2	1.25	181	12.75
		134.4	2.8	0.50	73	5.10
		133.2	3.4	0.63	91	6.43
		131.4	4.3	0.80	116	8.16

**Anexo 5: Constante de pérdidas por accesorios**

Valores aproximados K	
Pieza	K
Ampliación gradual	0.3*
Boquilla	2.7
Compuerta abierta	1
Controlador de caudal	2.5
Codo de 90°	0.9
Codo de 45°	0.4
Rejilla	0.75
Curva 90°	0.4
Curva 45°	0.2
Curva de 22.5°	0.1
Entrada normal (Tubo)	0.5
Entrada de borde	1
Pequeña derivación	0.03
Unión	0.4
Medidor Venturi	2.5**
Reducción gradual	0.15*



Salida de tubo	1
Tee, pasaje directo	0.6
Tee, salida de lado	1.3
Tee, salida bilateral	1.8
Válvula de ángulo abierta	5
Válvula de compuerta abierta	0.2
Válvula mariposa abierta	0.3
Válvula de pie	1.75
Válvula de retención (Check)	2.5
Válvula de globo abierta	10

\*Con base en la velocidad mayor (sección más pequeña)

\*\*Relativa a la velocidad de la tubería

Fuente: (Azevedo Netto, 1998)

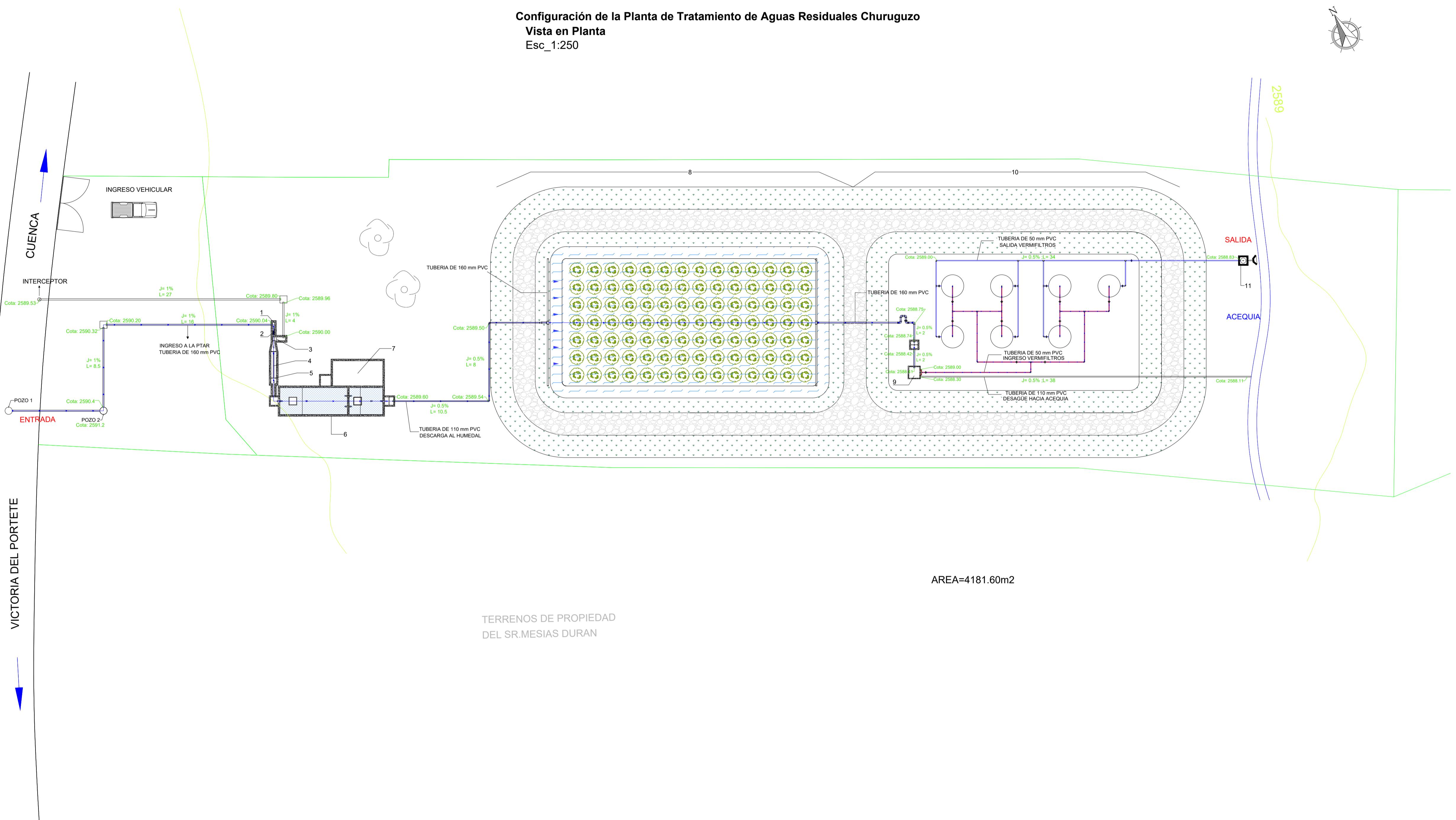
#### Anexo 6: Coeficiente de Hazen-Williams para diferentes materiales

Material	C	Material	C
Asbesto cemento	140	Hierro galvanizado	120
Latón	130-140	Vidrio	140
Ladrillo de saneamiento	100	Plomo	130-140
Hierro fundido nuevo	130	Plástico (PE, PVC)	140-150
Hierro fundido, 10 años de edad	107-113	Tubería lisa nueva	140
Hierro fundido, 20 años de edad	89-100	Acero nuevo	140-150
Hierro fundido, 30 años de edad	75-90	Acero	130
Hierro fundido, 40 años de edad	64-83	Acero rolado	110
Concreto	120-140	Lata	130
Cobre	130-140	Madera	120
Hierro dúctil	120	Hormigón	120-140

Fuente: (Alegret Breña & Martínez Valdés, 2019)

#### Anexo 7: Planos

**Configuración de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Churuguzo**  
**Vista en Planta**  
 Esc\_1:250

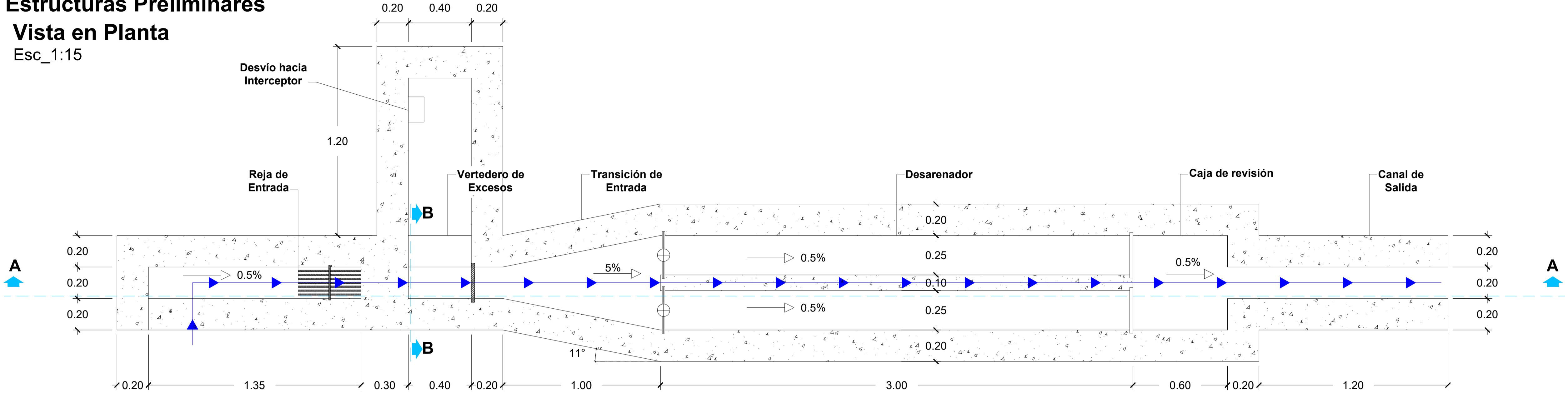


UBICACIÓN	
	Mapa que muestra la ubicación de la planta en Churuguzo, Victoria del Portete, Ecuador. Los ejes UTM están marcados con valores de N (Norte) y E (Este).
LEYENDA	
1. Canal de Ingreso 2. Reja de Entrada 3. Vertedero de Excesos 4. Desarenador 5. Vertedero Sutro (Medidor de Caudal) 6. Fosa Séptica 7. Lecho de Secado de Lodos 8. Humedal Artificial de Flujo Horizontal Sub Superficial 9. Cámara de Bombeo 10. Sistema de Vermifiltración 11. Estructura de Salida	
NOTAS	
Las dimensiones de longitud se encuentran en metros. L= Longitud de la Tubería, en metros; J= Pendiente de la Tubería. Todas las tuberías son de PVC con presión nominal de trabajo de 0.8 MPa. Abreviaturas: • PVC= Polícloruro de Vinilo	
PROYECTO:	
ESTUDIO Y PROPUESTA DE DESINFECCIÓN NATURAL DEL EFLUENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CHURUGUZO, CANTÓN CUENCA, ECUADOR	
CONTIENE:	
VISTA EN PLANTA DE LA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA	
ESCALA:	
LAS INDICADAS	
REVISADO POR:	
Ing. Andres Alvarado M. DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	
DISEÑADOR/ES:	
Paiwa Paccha Acero Mainato Sebastián Ismael Morocho Arenillas	
SISTEMA DE REFERENCIACIÓN ESPACIAL:	
UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur.	
LÁMINA N°:	
1 de 7	

# Estructuras Preliminares

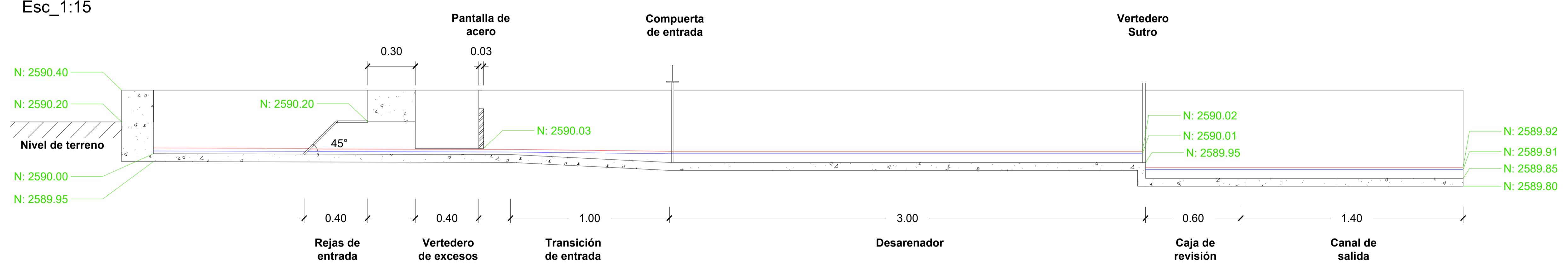
## Vista en Planta

Esc 1:15



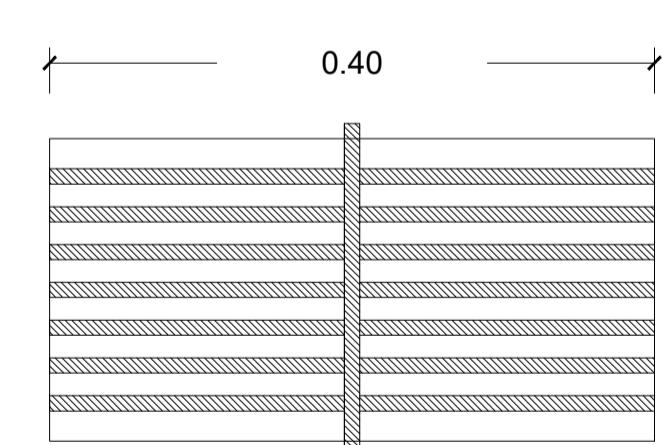
# Corte A - A

Esc\_1:15



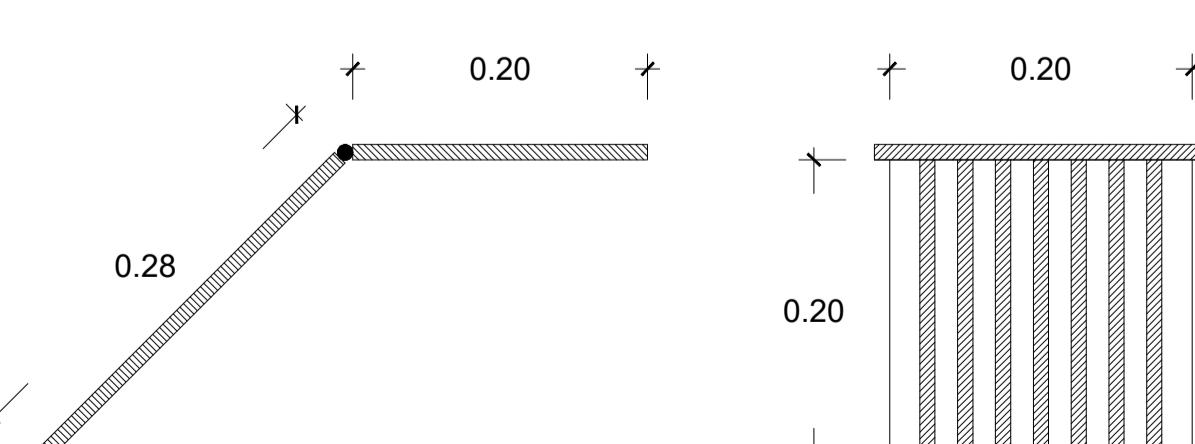
## **Detalle de la Reja de Entrada**

Ø10mm c/25cm



# Planta

Esc\_1:

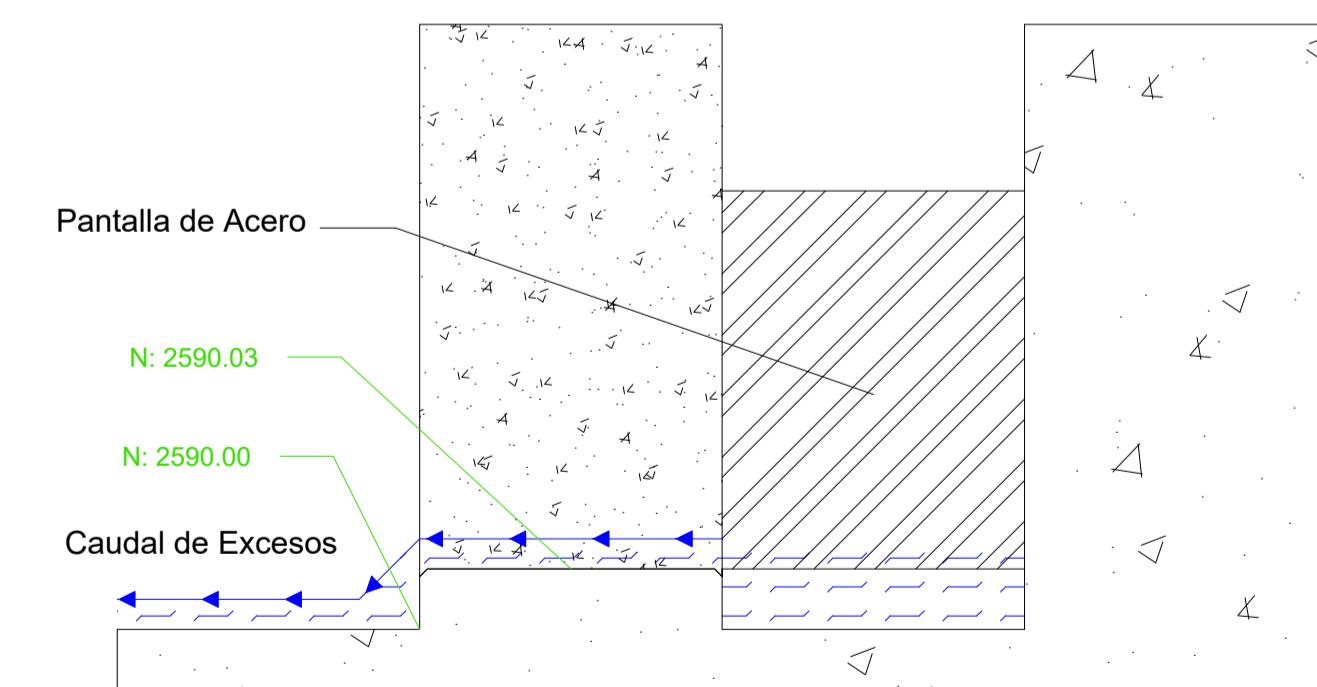


# Vista Lateral

Esc\_1:5

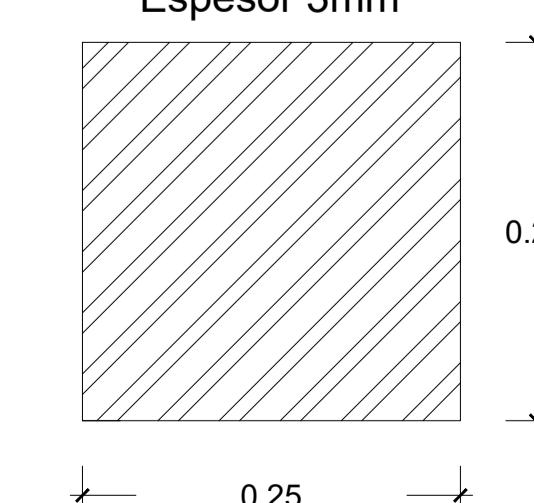
Corte B - B

Esc\_1:5



## Pantalla de acero

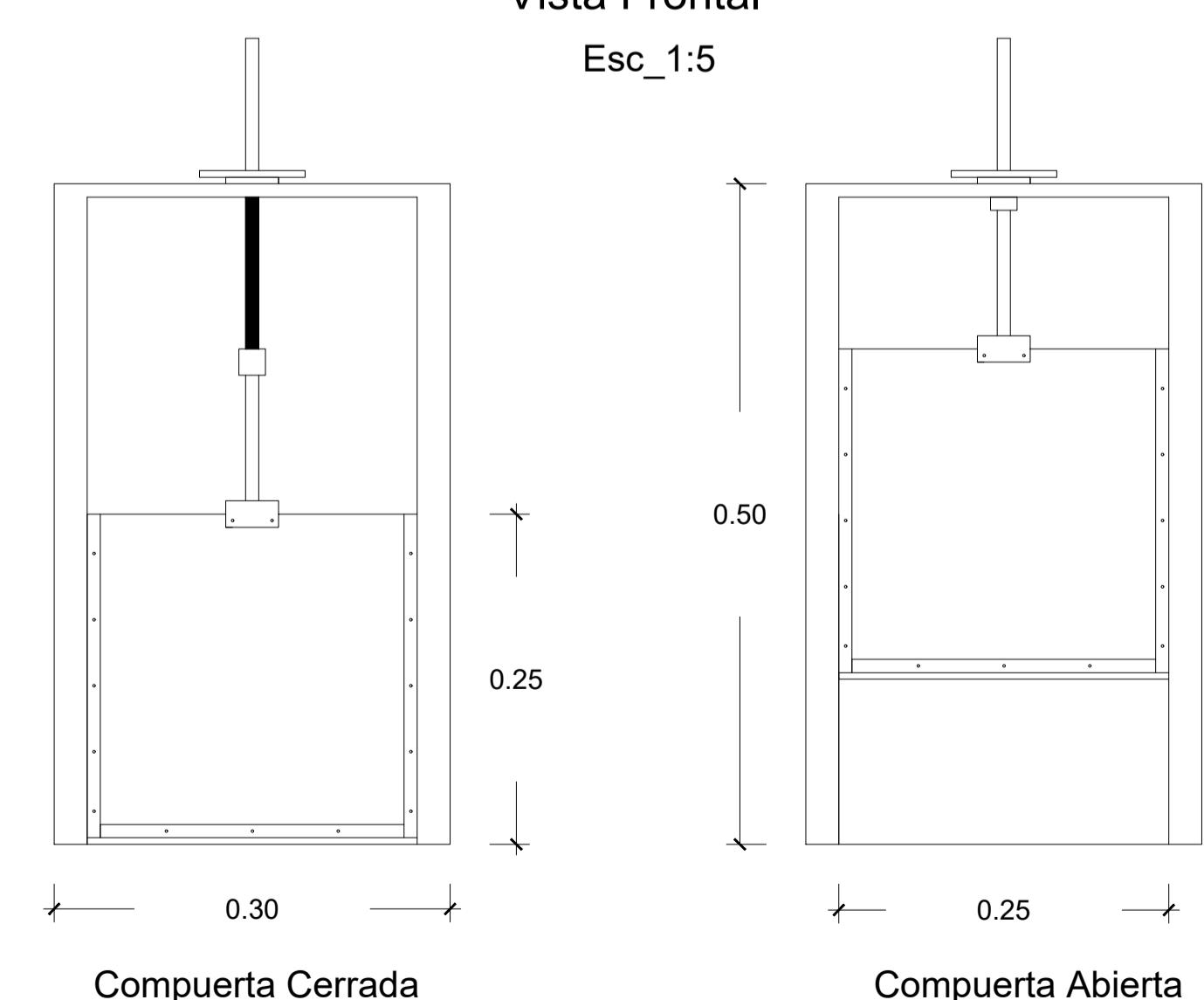
Esc\_1:5  
Espesor 3mm



# **Compuerta de Entrada Acero Inoxidable AISI 316L**

Vista Frontal

Esc\_1:5

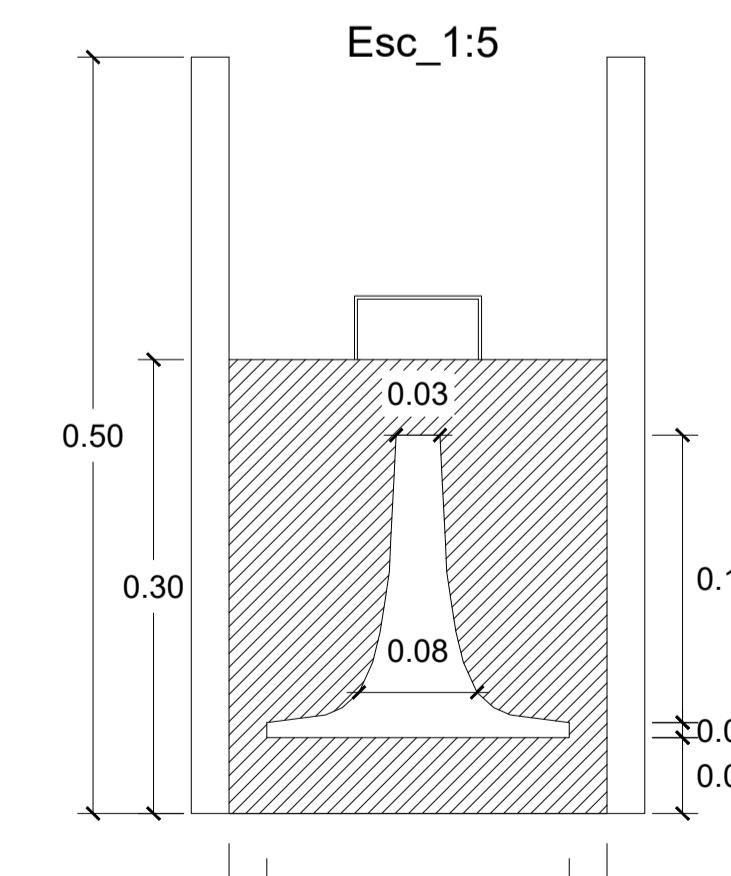


## Compuerta Cerrada

## Compuerta Abierta

# **Detalle Vertedero Sutro**

Esc 1:5



Espesor 3mm

**UBICACIÓN**

**SIMBOLOGÍA**

	Dirección del Flujo de Agua
	Caudal Máximo de Aguas Residuales
	Caudal Medio Diario
	Hormigón

**NOTAS**

Las dimensiones de longitud se encuentran en metros.  
N= Nivel, en msnm (metros sobre el nivel del mar)  
Todas las tuberías son de PVC con presión nominal de trabajo de 0.8 MPa.  
Abreviaturas:  
• PVC= Polícloruro de Vinilo

**PROYECTO:**

ESTUDIO Y PROPUESTA DE DESINFECCIÓN NATURAL DEL EFLUENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CHURUGUZO, CANTÓN CUENCA, ECUADOR

**CONTIENE:**

ESTRUCTURAS PRELIMINARES  
Canal y Reja de Entrada, Vertedero de Excesos, Desarenador: Vista en Planta y Lateral  
Detalle: Reja de Entrada, Vertedero de Excesos, Compuerta, Vertedero Sutro

**ESCALA:**

LAS INDICADAS

**REVISADO POR:**

Ing. Andres Alvarado M.  
DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

**DISEÑADOR/ES:**

Paiwa Paccha Acero Mainato  
Sebastián Ismael Morocho Arenillas

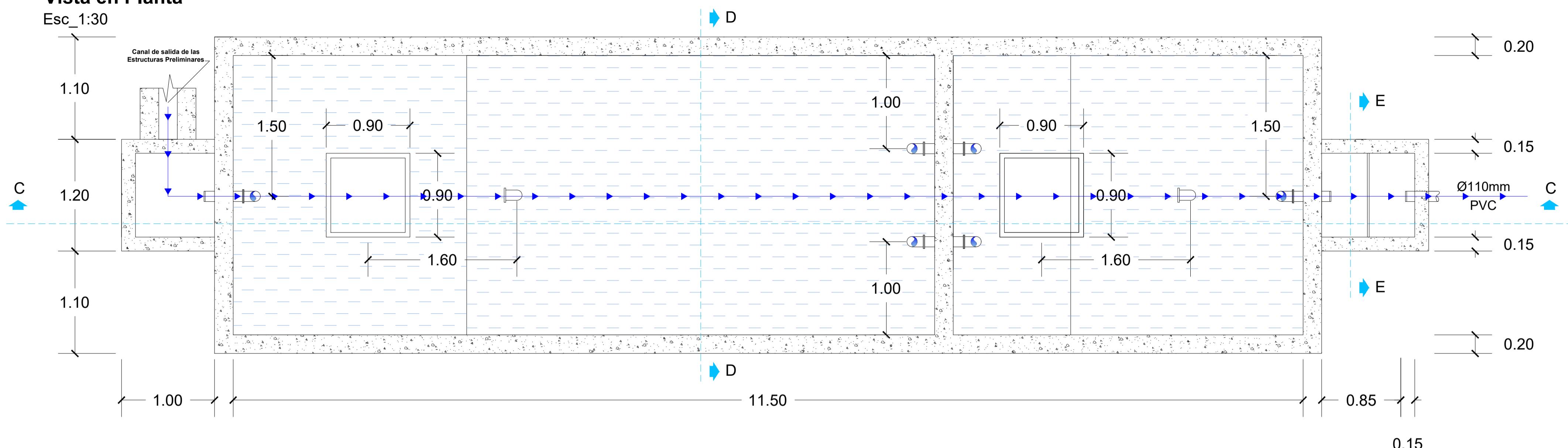
**SISTEMA DE REFERENCIACIÓN ESPACIAL:**  
UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur.

**LÁMINA N°:**  
2 de 7

## Fosa Séptica

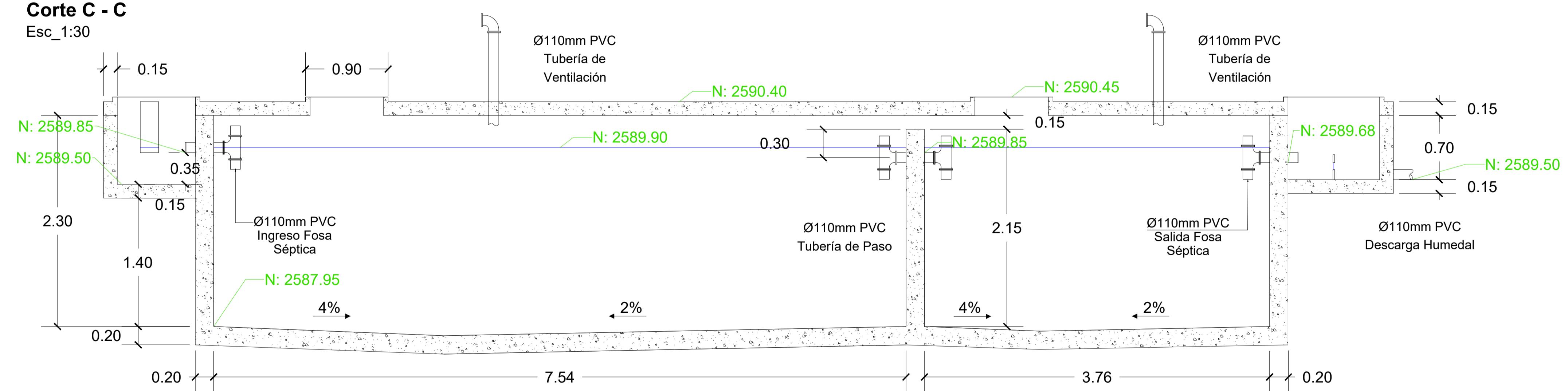
### Vista en Planta

Esc. 1:30



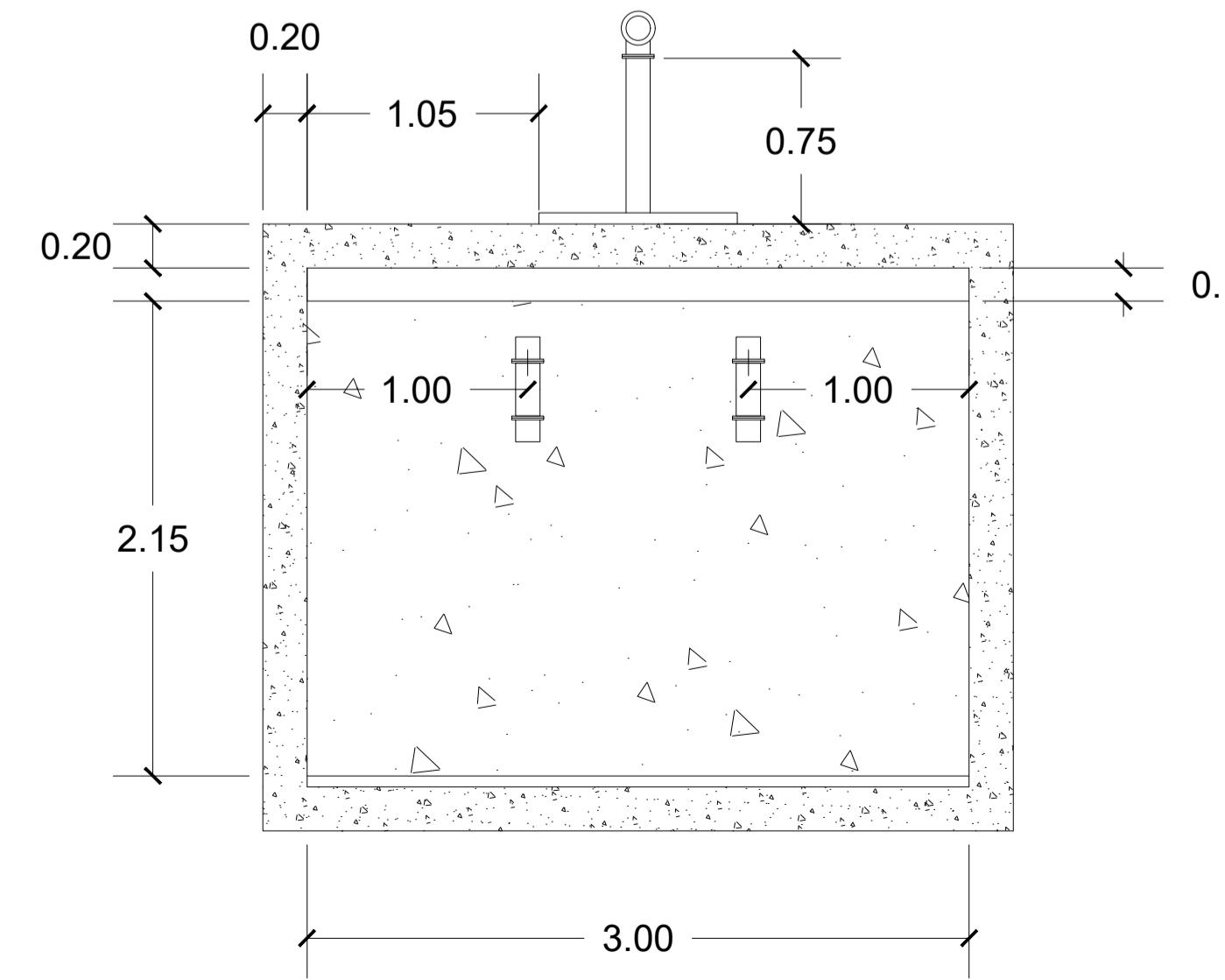
### Corte C - C

Esc. 1:30



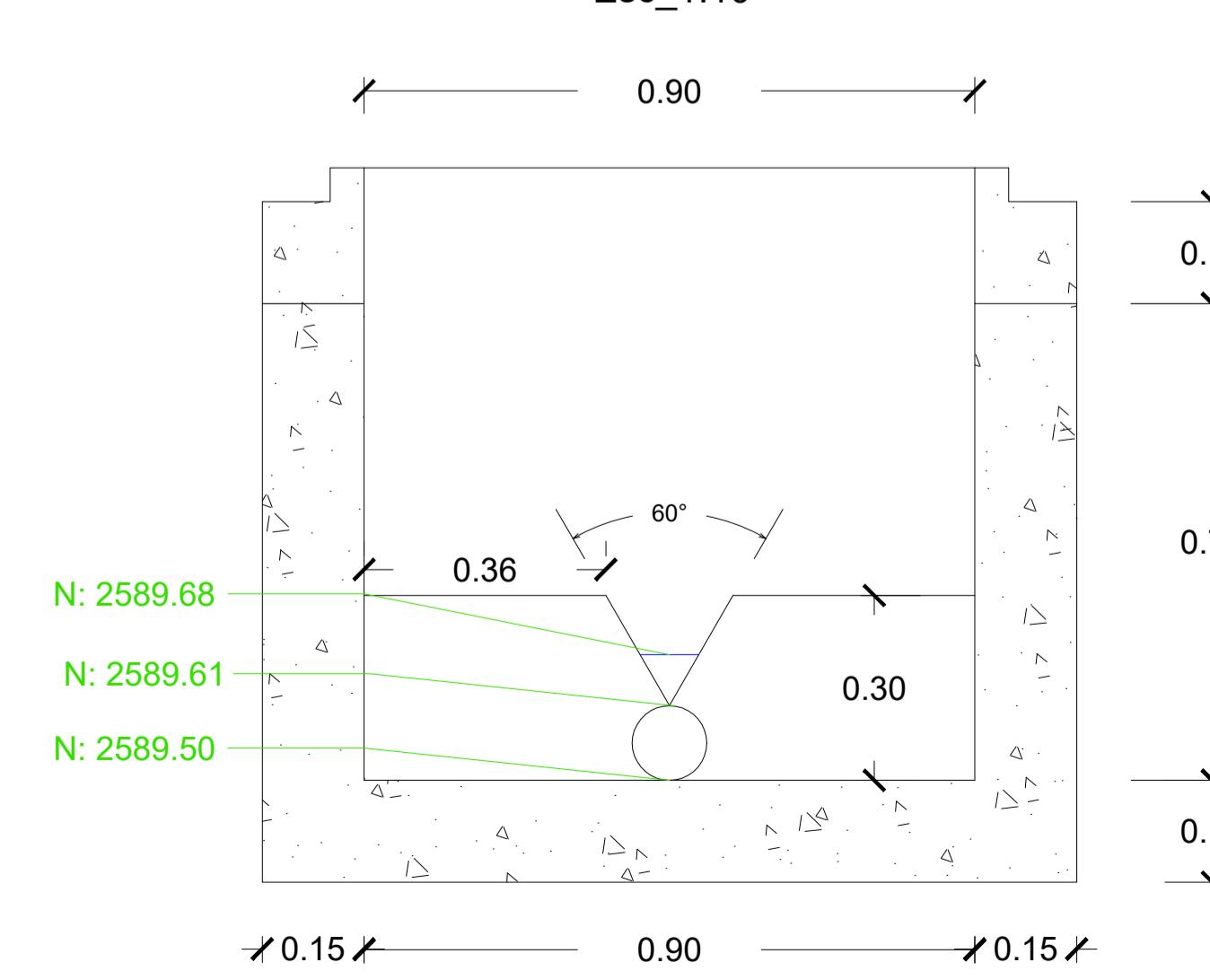
### Corte D - D

Esc. 1:30



### CORTE E - E

Esc. 1:10

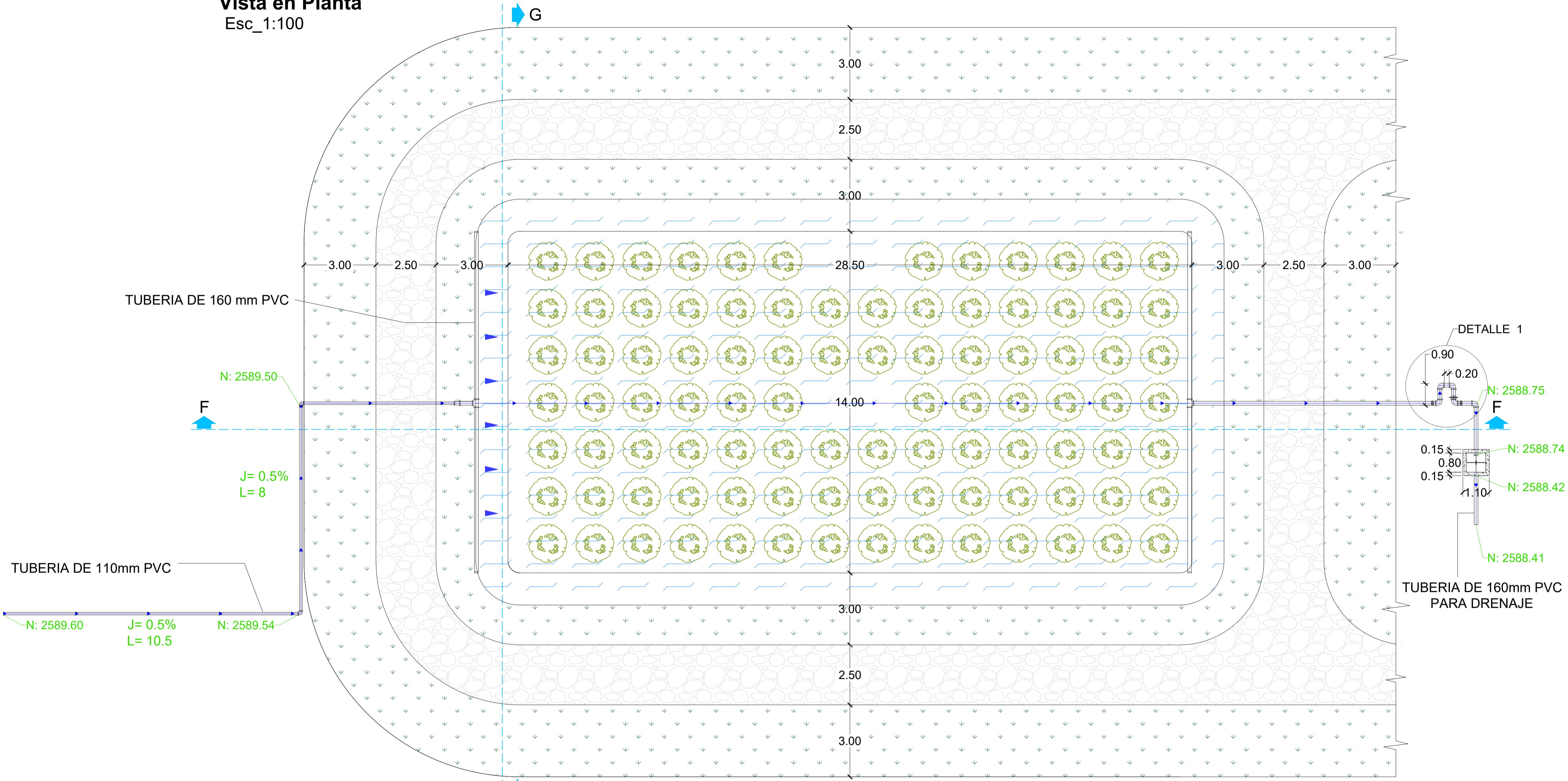


UBICACIÓN	
9.665.000 N 9.660.000 N 9.655.000 N 9.650.000 N 9.645.000 N	200.000 E 205.000 E 210.000 E 215.000 E 220.000 E
VICTORIA DEL PORTETE CHURUGUZO PTAR	
SIMBOLOGÍA	Dirección del Flujo de Agua Nivel máximo útil del Tanque Séptico Hormigón
NOTAS	
Las dimensiones de longitud se encuentran en metros. N= Nivel, en msnm (metros sobre el nivel del mar)	
Todas las tuberías son de PVC con presión nominal de trabajo de 0.8 MPa. Abreviaturas: • PVC= Polícloruro de Vinilo	
PROYECTO: ESTUDIO Y PROPUESTA DE DESINFECCIÓN NATURAL DEL EFLUENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CHURUGUZO, CANTÓN CUENCA, ECUADOR	
 	
CONTIENE:	
ESTRUCTURA DE TRATAMIENTO PRIMARIO Fosa Séptica: Vista en Planta y Lateral Detalle: Corte transversal en la Fosa Séptica (Corte B - B)	
ESCALA:	
LAS INDICADAS	
REVISADO POR:	
Ing. Andres Alvarado M. DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	
DISEÑADOR/ES:	
Paiwa Paccha Acero Mainato Sebastián Ismael Morochó Arenillas	
SISTEMA DE REFERENCIACIÓN ESPACIAL:	UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur.
LÁMINA N°:	3 de 7

# HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL SUB SUPERFICIAL

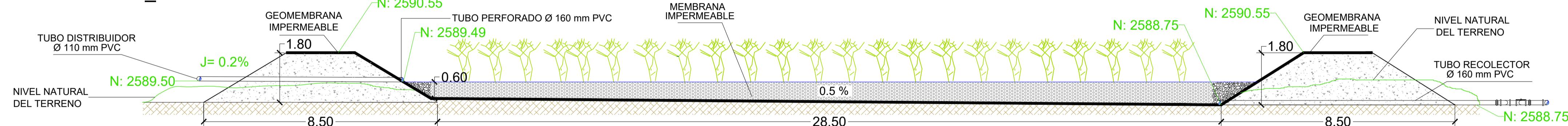
## Vista en Planta

Esc\_1:100



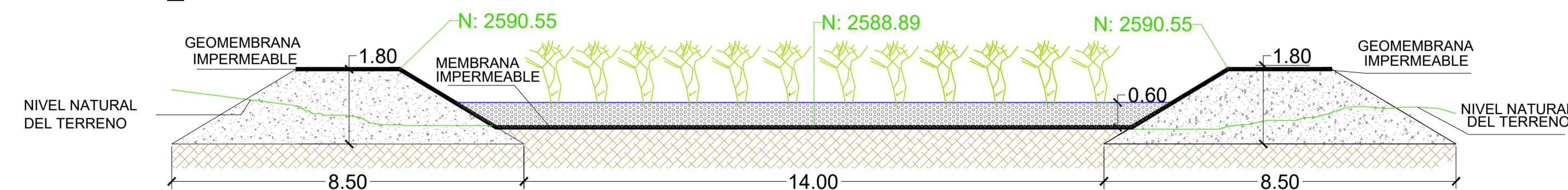
## CORTE F - F

Esc\_1:100



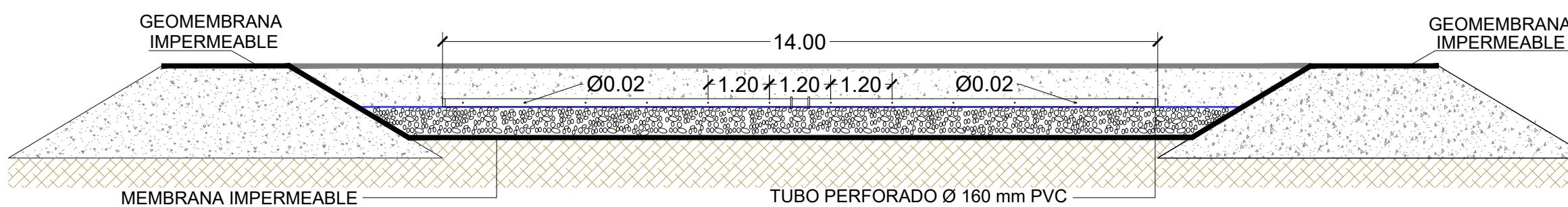
## CORTE G - G

Esc\_1:100



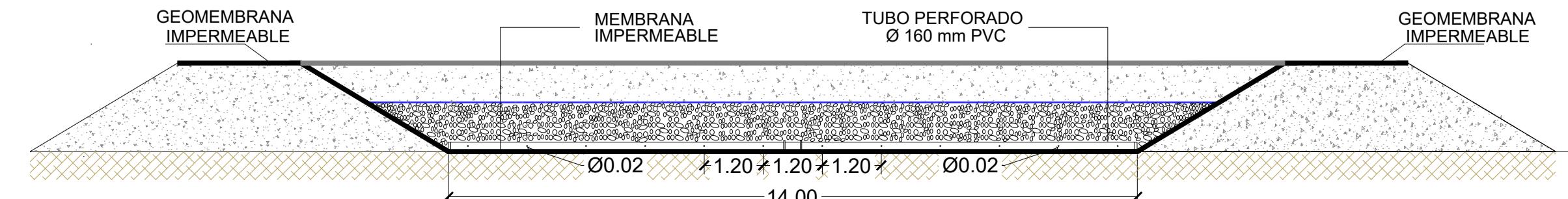
## DETALLE TUBERÍA DISTRIBUIDORA

Esc\_1:100



## DETALLE TUBERÍA RECOLECTORA

Esc\_1:100

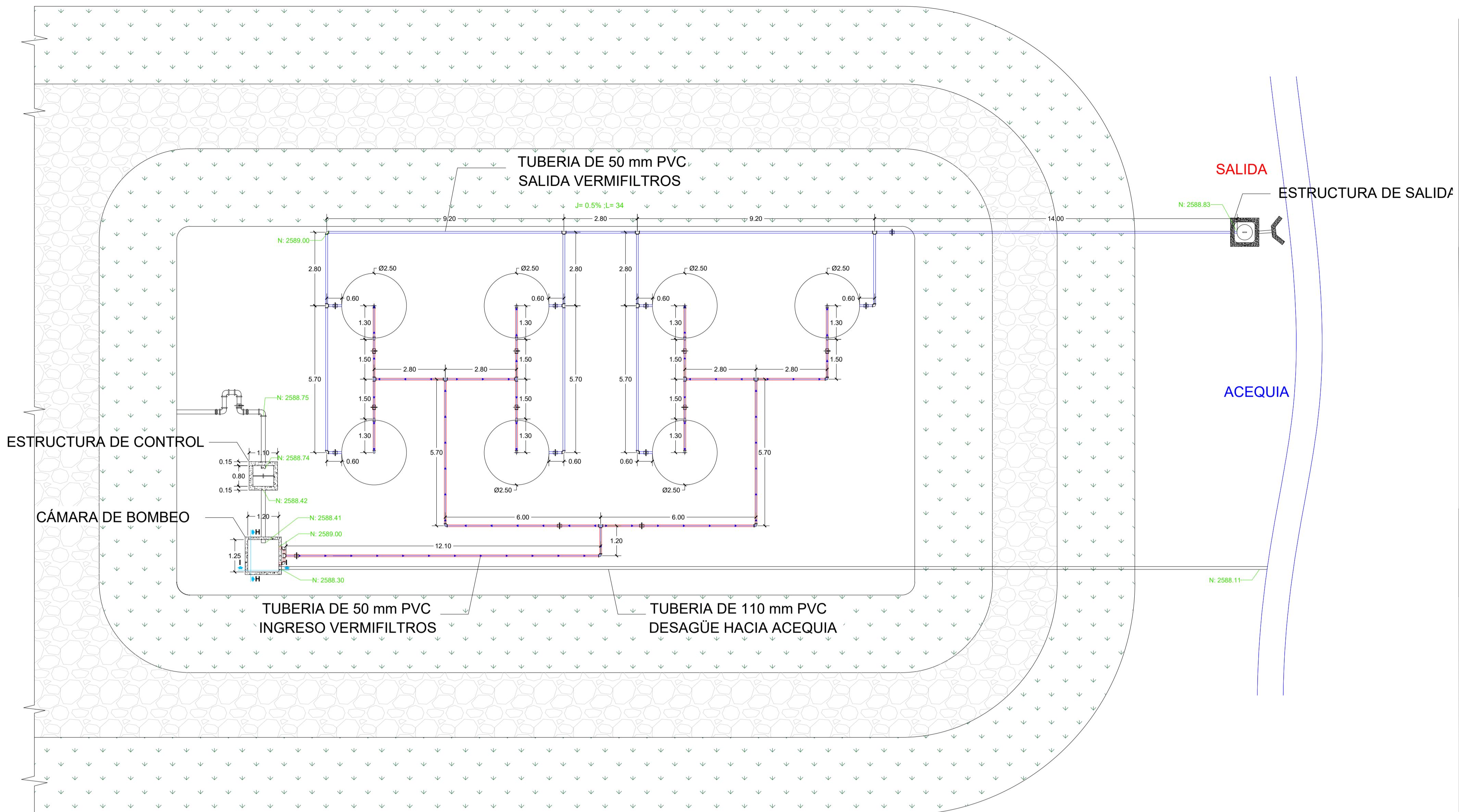


UBICACIÓN	
SIMBOLOGÍA	
	Dirección del Flujo de Agua
	Paredes Laterales del Talud
	Plantas de Totora Vista en Planta
	Plantas de Totora Vista Lateral
	Válvula Globo Vista en Planta
	Unión de PVC Vista en Planta
NOTAS	
Las dimensiones de longitud se encuentran en metros. N= Nivel, en msnm (metros sobre el nivel del mar)	
Todas las tuberías son de PVC con presión nominal de trabajo de 0.8 MPa.	
Abreviaturas: • PVC= Polícloruro de Vinilo	
PROYECTO:	
ESTUDIO Y PROPUESTA DE DESINFECCIÓN NATURAL DEL EFLUENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CHURUGUZO, CANTÓN CUENCA, ECUADOR	
CONTIENE:	
ESTRUCTURA DE TRATAMIENTO SECUNDARIO Humedal Artificial de Flujo Horizontal Sub Superficial: Vista en Planta Detalles: Corte longitudinal del Humedal, corte transversal del Humedal, tubería de distribución y tubería de recolección	
ESCALA:	
LAS INDICADAS	
REVISADO POR:	
Ing. Andres Alvarado M. DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	
DISEÑADOR/ES:	
Paiwa Paccha Acero Mainato Sebastián Ismael Morochó Arenillas	
SISTEMA DE REFERENCIACIÓN ESPACIAL:	
UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur.	
LÁMINA N°:	
4 de 7	

# SISTEMA DE VERMIFILTRACIÓN

## Vista en Planta

Esc\_1:100



UBICACIÓN	
9.665 000 N	750 000 E
9.660 000 N 750 000 E	
9.655 000 N	750 000 E
9.650 000 N	750 000 E
9.645 000 N	750 000 E
9.640 000 N	750 000 E
9.635 000 N	750 000 E
9.630 000 N	750 000 E
9.625 000 N	750 000 E
9.620 000 N	750 000 E
9.615 000 N	750 000 E
9.610 000 N	750 000 E
9.605 000 N	750 000 E
9.600 000 N	750 000 E
9.595 000 N	750 000 E
9.590 000 N	750 000 E
9.585 000 N	750 000 E
9.580 000 N	750 000 E
9.575 000 N	750 000 E
9.570 000 N	750 000 E
9.565 000 N	750 000 E
9.560 000 N	750 000 E
9.555 000 N	750 000 E
9.550 000 N	750 000 E
9.545 000 N	750 000 E
9.540 000 N	750 000 E
9.535 000 N	750 000 E
9.530 000 N	750 000 E
9.525 000 N	750 000 E
9.520 000 N	750 000 E
9.515 000 N	750 000 E
9.510 000 N	750 000 E
9.505 000 N	750 000 E
9.500 000 N	750 000 E
9.495 000 N	750 000 E
9.490 000 N	750 000 E
9.485 000 N	750 000 E
9.480 000 N	750 000 E
9.475 000 N	750 000 E
9.470 000 N	750 000 E
9.465 000 N	750 000 E
9.460 000 N	750 000 E
9.455 000 N	750 000 E
9.450 000 N	750 000 E
9.445 000 N	750 000 E
9.440 000 N	750 000 E
9.435 000 N	750 000 E
9.430 000 N	750 000 E
9.425 000 N	750 000 E
9.420 000 N	750 000 E
9.415 000 N	750 000 E
9.410 000 N	750 000 E
9.405 000 N	750 000 E
9.400 000 N	750 000 E
9.395 000 N	750 000 E
9.390 000 N	750 000 E
9.385 000 N	750 000 E
9.380 000 N	750 000 E
9.375 000 N	750 000 E
9.370 000 N	750 000 E
9.365 000 N	750 000 E
9.360 000 N	750 000 E
9.355 000 N	750 000 E
9.350 000 N	750 000 E
9.345 000 N	750 000 E
9.340 000 N	750 000 E
9.335 000 N	750 000 E
9.330 000 N	750 000 E
9.325 000 N	750 000 E
9.320 000 N	750 000 E
9.315 000 N	750 000 E
9.310 000 N	750 000 E
9.305 000 N	750 000 E
9.300 000 N	750 000 E
9.295 000 N	750 000 E
9.290 000 N	750 000 E
9.285 000 N	750 000 E
9.280 000 N	750 000 E
9.275 000 N	750 000 E
9.270 000 N	750 000 E
9.265 000 N	750 000 E
9.260 000 N	750 000 E
9.255 000 N	750 000 E
9.250 000 N	750 000 E
9.245 000 N	750 000 E
9.240 000 N	750 000 E
9.235 000 N	750 000 E
9.230 000 N	750 000 E
9.225 000 N	750 000 E
9.220 000 N	750 000 E
9.215 000 N	750 000 E
9.210 000 N	750 000 E
9.205 000 N	750 000 E
9.200 000 N	750 000 E
9.195 000 N	750 000 E
9.190 000 N	750 000 E
9.185 000 N	750 000 E
9.180 000 N	750 000 E
9.175 000 N	750 000 E
9.170 000 N	750 000 E
9.165 000 N	750 000 E
9.160 000 N	750 000 E
9.155 000 N	750 000 E
9.150 000 N	750 000 E
9.145 000 N	750 000 E
9.140 000 N	750 000 E
9.135 000 N	750 000 E
9.130 000 N	750 000 E
9.125 000 N	750 000 E
9.120 000 N	750 000 E
9.115 000 N	750 000 E
9.110 000 N	750 000 E
9.105 000 N	750 000 E
9.100 000 N	750 000 E
9.095 000 N	750 000 E
9.090 000 N	750 000 E
9.085 000 N	750 000 E
9.080 000 N	750 000 E
9.075 000 N	750 000 E
9.070 000 N	750 000 E
9.065 000 N	750 000 E
9.060 000 N	750 000 E
9.055 000 N	750 000 E
9.050 000 N	750 000 E
9.045 000 N	750 000 E
9.040 000 N	750 000 E
9.035 000 N	750 000 E
9.030 000 N	750 000 E
9.025 000 N	750 000 E
9.020 000 N	750 000 E
9.015 000 N	750 000 E
9.010 000 N	750 000 E
9.005 000 N	750 000 E
9.000 000 N	750 000 E
9.000 000 N	750 000 E



**CONTIENE:**

ESTRUCTURA DE TRATAMIENTO TERCIARIO  
Vermifiltros: Vista en Planta  
Detalle: Estación de Bombeo, Estructura de salida, Cabezote

**ESCALA:**  
LAS INDICADAS

**REVISADO POR:**

Ing. Andres Alvarado M.  
DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACION

**DISEÑADOR/ES:**

Paiwa Paccha Acero Mainato  
Sebastián Ismael Morochó Arenillas

**SISTEMA DE REFERENCIACIÓN ESPACIAL:**  
UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur.

LÁMINA N°:  
5 de 7

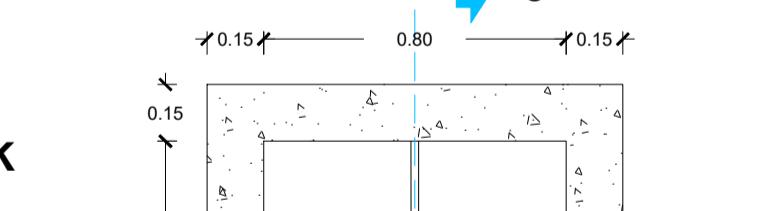
## CÁMARA DE BOMBEO

CORTE H - H  
Esc\_1:20

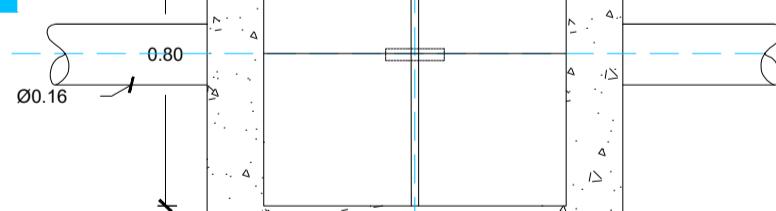
CORTE I - I  
Esc\_1:20

**ESTRUCTURA DE CONTROL**  
Vista en Planta  
Esc\_1:20

J



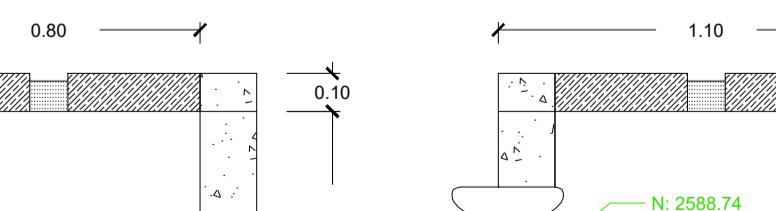
K K



J J



I I

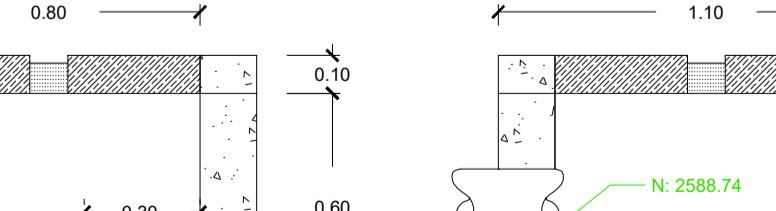


H H

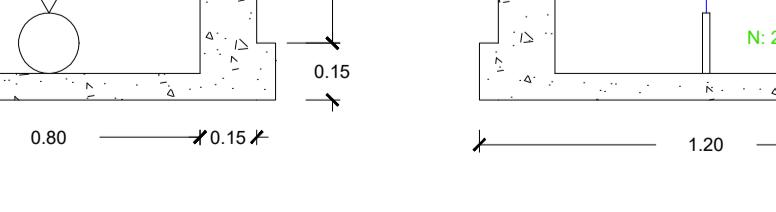
Tubería de 110mm PVC  
Desagüe hacia Acequia

Losa para el  
anclaje de bombas

**CORTE J - J**  
Esc\_1:20



N: 2588.06



N: 2588.06



N: 2588.06

N: 2588.06



N: 2588.06



N: 2588.06



N: 2588.06



N: 2588.06



N: 2588.06



N: 2588.06



N: 2588.06

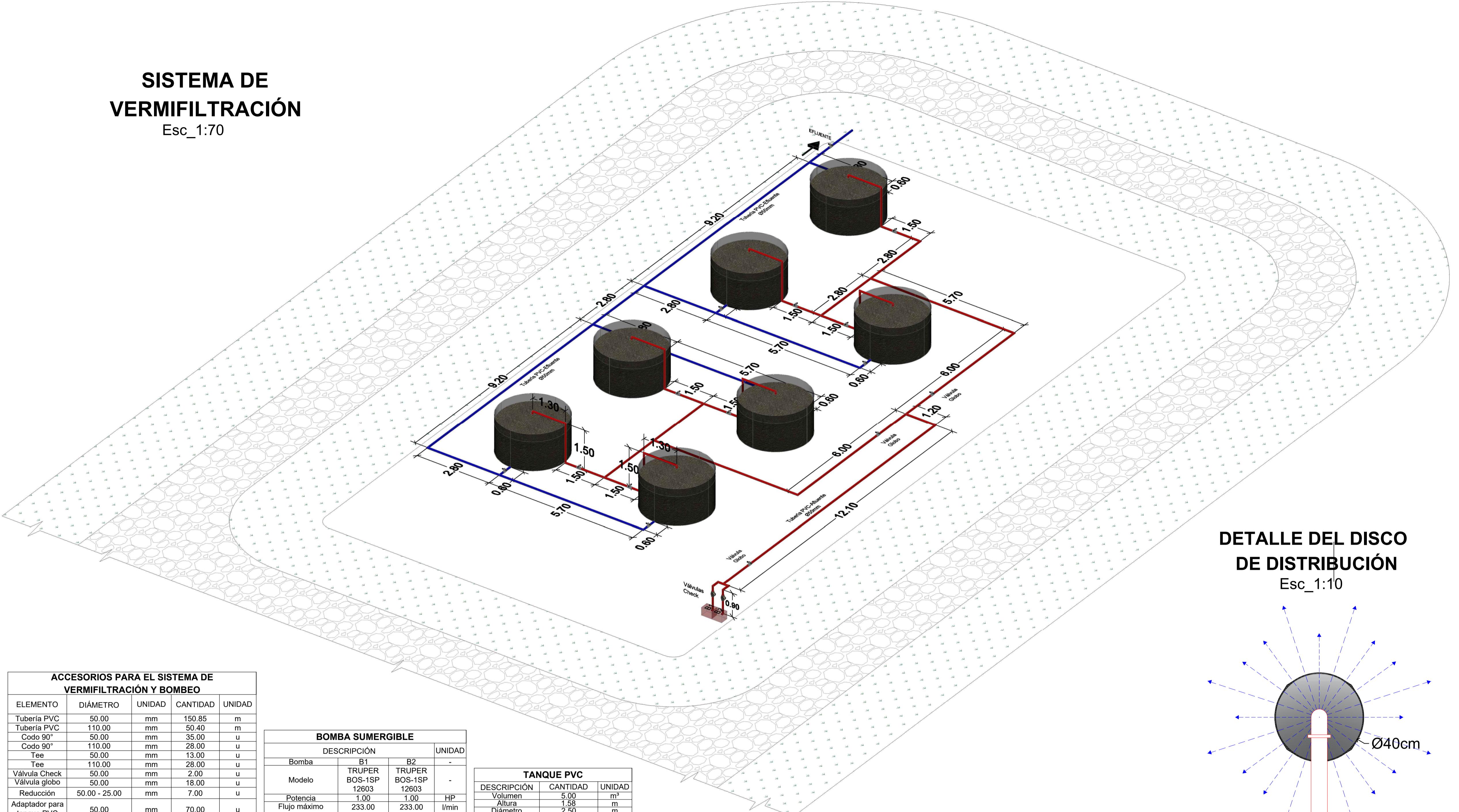


N: 2588.06



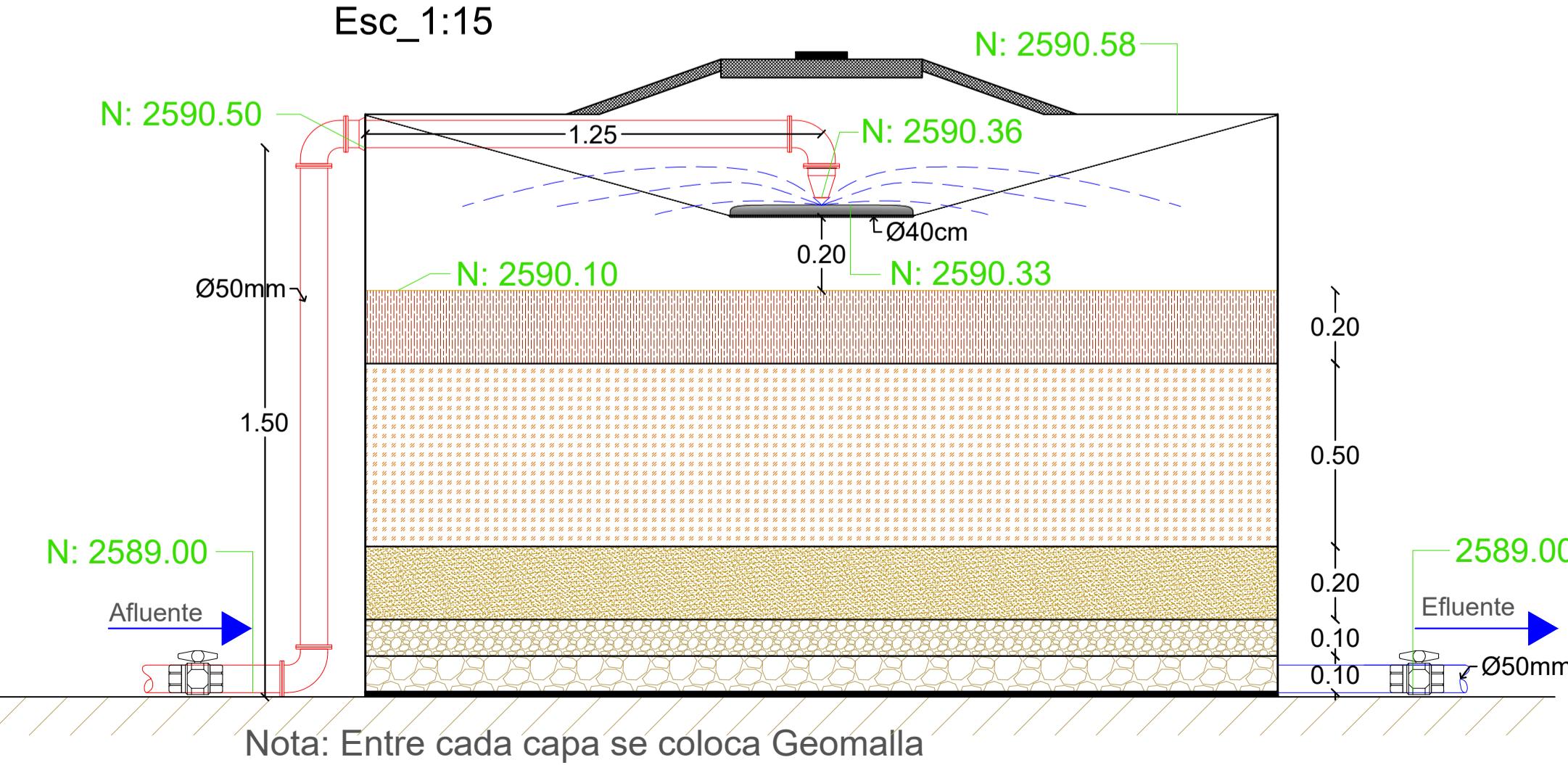
# SISTEMA DE VERMIFILTRACIÓN

Esc\_1:70



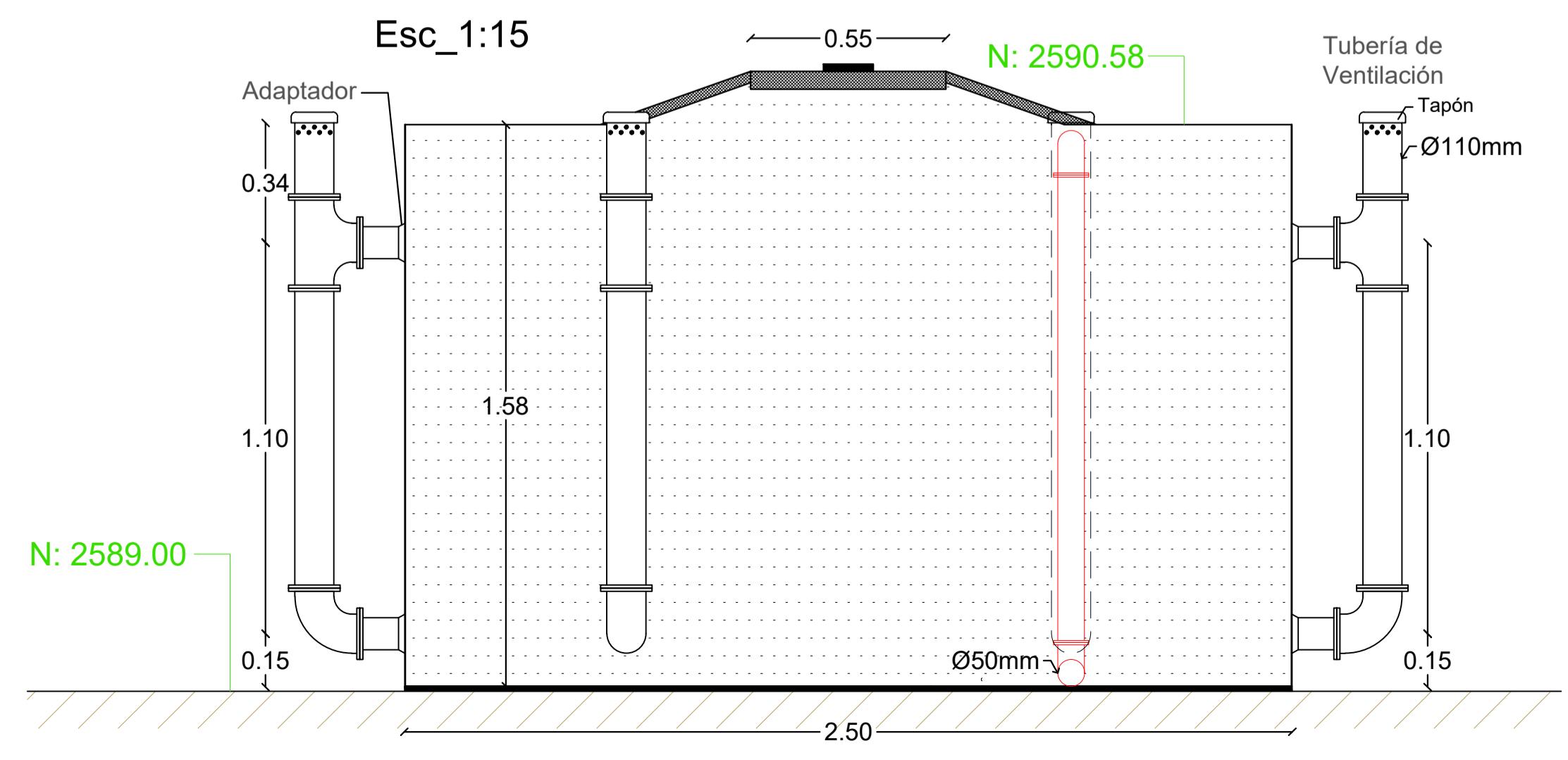
## CONFIGURACIÓN DEL VERMIFILTRO

Esc\_1:15



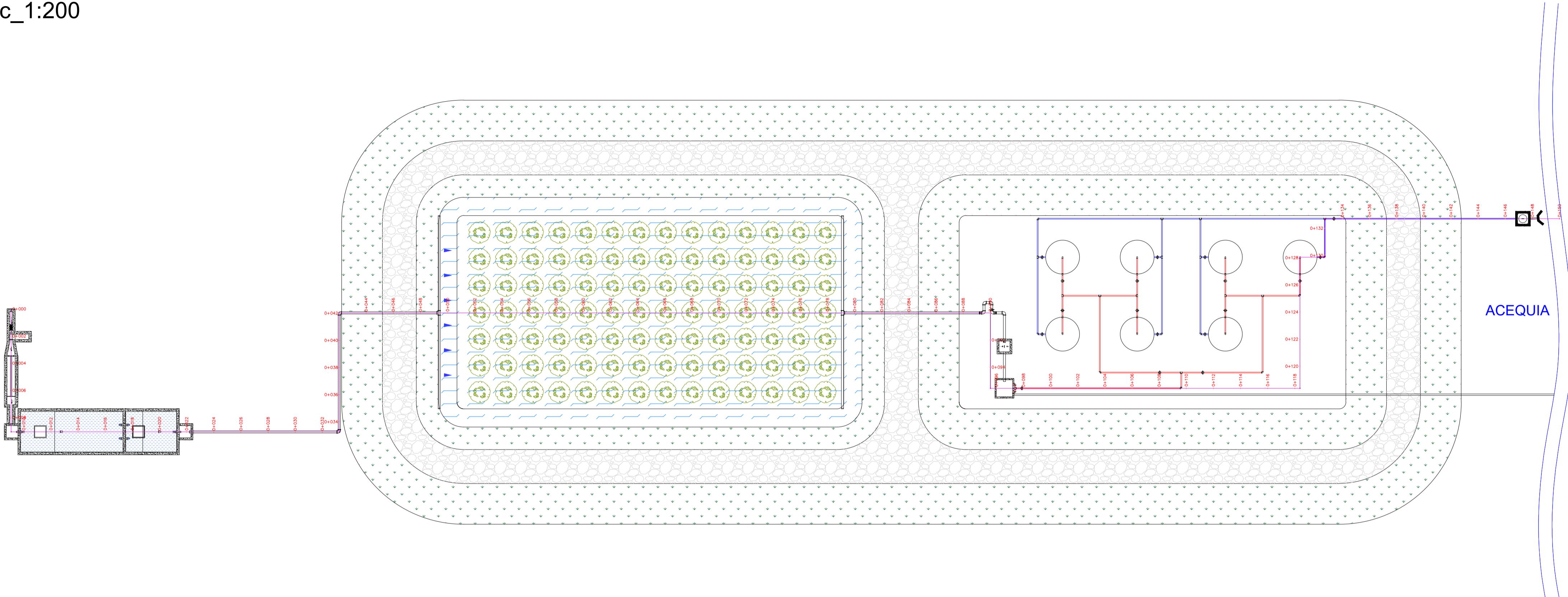
## SISTEMA DE VENTILACIÓN DEL VERMIFILTRO

Esc\_1:15



UBICACIÓN	
SÍMBOLOGÍA	
Tubería del Afluente Ø50mm	Válvula globo
Tubería del Efluente Ø50mm	Adaptador para tanque PVC
Capa de tierra con lombrices	Fibra de coco
Arena (1-2mm)	Reducción Ø50mm - 25mm
Grava (4-6mm)	Tapón PVC
Geomalla	Disco de distribución
NOTAS	
Las dimensiones de longitud se encuentran en metros.	
N= Nivel, en msnm (metros sobre el nivel del mar)	
Todas las tuberías son de PVC con presión nominal de trabajo de 0.8 MPa.	
Abreviaturas:	
• PVC= Polícloruro de Vinilo	
PROYECTO:	
ESTUDIO Y PROPUESTA DE DESINFECCIÓN NATURAL DEL EFLUENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CHURUGUZO, CANTÓN CUENCA, ECUADOR	
CONTIENE:	
ESTRUCTURA DE TRATAMIENTO TERCARIO Vermifiltros: Configuración, Sistema de Ventilación y Vista en 3D	
ESCALA:	
LAS INDICADAS	
REVISADO POR:	
Ing. Andres Alvarado M. DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	
DISEÑADOR/ES:	
Paiwa Paccha Acero Mainato Sebastián Ismael Morrocho Arenillas	
SISTEMA DE REFERENCIACIÓN ESPACIAL:	
UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur.	
LÁMINA N°:	
6 de 7	

**Abscisado de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Churuguzo**  
**Vista en Planta**  
**Esc\_1:200**



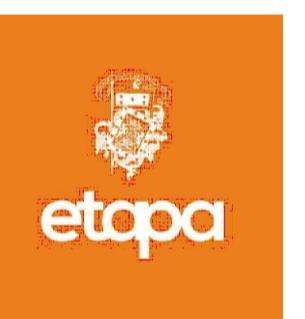
**SÍMBOLOGÍA**

Alineamiento Abscisas	Paredes Laterales del Talud
Plantas de Totora Vista en Planta	Cabecera del Talud
Plantas de Totora Vista Lateral	Superficie de Agua
Válvula Globo Vista en Planta	Hormigón

**NOTAS**

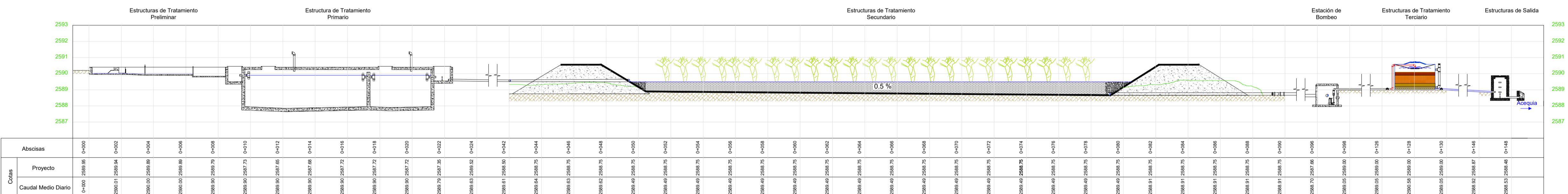
Las dimensiones de longitud se encuentran en metros.  
Todas las tuberías son de PVC con presión nominal de trabajo de 0.8 MPa.  
Abreviaturas:  
• PVC= Polícloruro de Vinilo

**PROYECTO:**  
ESTUDIO Y PROPUESTA DE DESINFECCIÓN NATURAL DEL EFLUENTE  
DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE  
CHURUGUZO, CANTÓN CUENCA, ECUADOR



**Perfil Hidráulico de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Churuguzo**

Esc\_1:150



**CONTIENE:**  
CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA  
Estructuras de Tratamiento del Sistema: Vista en Planta  
Perfil Hidráulico del Sistema

**ESCALA:**  
LAS INDICADAS

**REVISADO POR:**  
Ing. Andres Alvarado M.  
DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

**DISEÑADOR/ES:**  
Paiwa Paccha Acero Mainato  
Sebastián Ismael Morochó Arenillas

**SISTEMA DE REFERENCIACIÓN ESPACIAL:**  
UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur.

LÁMINA N°:  
7 de 7