



Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería en Medioambiente

Ingeniería Ambiental

**PROPUESTA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE LA
TÉCNICA DE “HUMEDALES CONSTRUIDOS” PARA LA COMUNIDAD DE LOS
GUINDOS, COMUNA DE MELIPILLA.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

AUTOR: JOSÉ JOAQUÍN VARGAS RODRÍGUEZ

PROFESOR GUÍA: DANIEL UNDURRAGA PERALTA

VALPARAÍSO, 2023.

RESUMEN

El concepto de cambio climático es un tema que genera gran preocupación en la actualidad, especialmente por los efectos que tiene sobre nuestro entorno, como lo puede ser la alteración de la disponibilidad de agua. En Chile, esto se ve evidenciado, entre otros efectos, en la sequía que afecta a la zona centro-norte del país. Otra problemática que tiene al recurso hídrico de protagonista es el tratamiento que se le da al agua posterior a su uso, más específicamente a nivel doméstico, donde, aunque en las áreas urbanas del país hay un porcentaje significativamente alto de población que se encuentra atendida por algún sistema de saneamiento, en zonas rurales el porcentaje de alcance de los sistemas de tratamiento convencionales es considerablemente más bajo que en las ciudades. En relación con ambas problemáticas asociadas al agua en nuestro país, ha surgido la necesidad de buscar alternativas que se adecúen al contexto de la zona y las necesidades propias de la población. Ante esta situación, surgen tecnologías de tratamiento de aguas servidas, las cuales se alinean con las exigencias que implica abordar la situación antes descrita. Se elaboró una propuesta para el tratamiento de aguas servidas en tres escalas poblacionales distintas, mediante la técnica de “Humedal construido” en la comunidad de Los Guindos, comuna de Melipilla, para lo cual la información se recopiló a partir de una revisión bibliográfica de diferentes aspectos, como experiencias anteriores, se analizó qué tipo de Humedal Construido (HC) se adapta mejor a las condiciones de este lugar, así como las características de estos distintos tipos de HC. Además, se debió considerar las condiciones meteorológicas, la topografía y la distribución poblacional en la comunidad objetivo. A través de la revisión, identificación y aplicación de las ecuaciones de diseño, se abordó la determinación de la superficie necesaria para los humedales y sus formas, teniendo en cuenta la cantidad de agua servida a tratar y la carga de contaminantes. También se consideró la selección de los materiales de construcción, así como los sistemas de entrada y salida de agua. La parte final de este trabajo se relacionó con la estimación de los costos de inversión que resultarían de la implementación de la propuesta.

Dentro de los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo, primero hay que mencionar que la base para desarrollar este trabajo fue la estimación de la cantidad de aguas servidas en la comunidad de Los Guindos, obteniéndose un valor total de $26,4 m^3/d$. Dentro de los resultados del desarrollo mismo de los sistemas de tratamiento de aguas servidas, destacaron las dimensiones de los humedales construidos para cada escala, en donde para la primera escala se obtuvo un humedal de 4 m de ancho x 8 m de largo y 0,5 m de profundidad. La segunda escala dio por resultado un HC de 20 m de ancho x 40 m de largo y una profundidad de 0,7 m. Por último, la tercera escala estableció un HC de 34 m de ancho x 54 m de largo y 0,7 m de profundidad.

Luego de la estimación de los principales costos de inversión se concluyó que la mejor alternativa era generar dos humedales como el de la segunda escala, en donde la inversión por persona era menor.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ÍNDICE GENERAL	ii
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE ECUACIONES	vii
GLOSARIO	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PROBLEMA.....	6
3. OBJETIVOS	7
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	7
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
4. METODOLOGÍA	8
4.1. Revisión inicial.....	9
4.2. Metodología para identificar las principales características de la zona de Los Guindos, comuna de Melipilla, enfocado en la cantidad de aguas servidas generadas y el impacto de la sequía en la zona.	11
4.2.1. Parámetros y procesos de depuración de interés.....	12
4.2.2. Caudal medio diario anual.	15
4.3. Metodología para establecer tres escalas poblacionales de la comunidad de Los Guindos, comuna de Melipilla a las cuales se les diseñará un sistema de tratamiento de aguas servidas mediante técnica de “Humedales construidos”	16
4.4. Metodología para diseñar un sistema de tratamiento de aguas servidas mediante la técnica de “Humedales construido” para cada escala poblacional.....	17
4.4.1. Ecuaciones de diseño.....	21
4.5. Metodología para determinar los costos de inversión de la aplicación de la técnica de “Humedal construido” en la comunidad de Los Guindos, Comuna de Melipilla.....	23
5. RESULTADOS.....	24
5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE LOS GUINDOS	24
5.1.1. Impacto de la sequía en la zona y Cuantificación de las Aguas servidas por la población	26
5.1.1.1. Población a servir y su proyección a lo largo del período de previsión	28
5.1.1.2. Dotación de consumo medio anual	28

ÍNDICE GENERAL

5.1.1.3.	Coeficiente de recuperación	28
5.1.1.4.	Cálculo del caudal medio diario.....	29
5.2.	IDENTIFICACIÓN DE LAS ESCALAS POBLACIONALES.....	30
5.2.1.	Primera escala poblacional	30
5.2.2.	Segunda escala poblacional	30
5.2.3.	Tercera escala poblacional.....	30
5.3.	DISEÑO DE SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS PARA CADA ESCALA POBLACIONAL.....	32
5.3.1.	Primera escala de diseño	33
5.3.1.1.	Superficie total.	33
5.3.1.2.	Relación Largo-Ancho.	34
5.3.1.3.	Verificaciones.	34
5.3.1.4.	Sistema de distribución de entrada.....	35
5.3.1.5.	Zona de distribución de entrada.....	36
5.3.1.6.	Impermeabilidad.	36
5.3.1.7.	Medio principal.....	37
5.3.1.8.	Plantas.....	38
5.3.1.9.	Sistema de recolección y drenaje.	38
5.3.1.10.	Desinfección	39
5.3.1.11.	Operación y mantenimiento.	40
5.3.2.	Segunda escala de diseño	42
5.3.2.1.	Superficie total.	42
5.3.2.2.	Relación Largo-Ancho.	43
5.3.2.3.	Verificaciones	43
5.3.2.4.	Sistema de distribución de entrada.....	44
5.3.2.5.	Zona de distribución de entrada.....	44
5.3.2.6.	Impermeabilidad.	44
5.3.2.7.	Medio principal.....	44
5.3.2.8.	Plantas.....	45
5.3.2.9.	Sistema de recolección y drenaje.	45
5.3.2.10.	Operación y mantenimiento.	46
5.3.3.	Tercera escala de diseño.....	48

ÍNDICE GENERAL

5.3.3.1.	Superficie total.	49
5.3.3.2.	Relación Largo-Ancho.	49
5.3.3.3.	Verificaciones.	49
5.3.3.4.	Sistema de distribución de entrada.....	50
5.3.3.5.	Zona de distribución de entrada.....	50
5.3.3.6.	Impermeabilidad.	50
5.3.3.7.	Medio principal.....	51
5.3.3.8.	Plantas.....	51
5.3.3.9.	Sistema de recolección y drenaje.	51
5.3.3.10.	Operación y mantenimiento.	52
5.3.4.	Monitoreo del sistema.....	54
5.4.	ESTIMACIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN DE CADA SISTEMA DE TRAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS DISEÑADO.....	55
5.4.1.	Primera escala	55
5.4.2.	Segunda escala	56
5.4.3.	Tercera escala.....	56
5.4.4.	Comparación entre escalas.....	57
6.	DISCUSIÓN	58
7.	CONCLUSIÓN.....	61
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	63
9.	ANEXOS.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Principal normativa relacionada a sistemas de tratamiento de aguas servidas. 5

Tabla 5.1: Parámetros típicos de diseño para humedales construidos para tratamiento de aguas residuales domésticas. 12

Tabla 5.2: Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales en FS: Humedales de flujo superficial, HFSS: Humedales de flujo horizontal subsuperficial y VFSS: Humedales con flujo vertical subsuperficial. 13

Tabla 6.1: Eficiencia de eliminación en tratamiento de aguas servidas. 32

Figura 6.10: Diagrama del HC correspondiente a la primera escala. 39

Tabla 6.2: Tareas de autoinspección para el sistema de tratamiento de la primera escala 41

Tabla 6.3: Tareas de inspección para el sistema de tratamiento de la segunda escala 47

Tabla 6.4: Tareas de inspección para el sistema de tratamiento de la tercera escala 53

Tabla 7.1: Equivalencia de cada humedal construido en términos del HC perteneciente a la primera escala 58

Tabla 8.1: Comparación de las tres escalas poblacionales en términos del área total y de los costos de inversión por persona 62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Comparación de la proporción (%) de población urbana y rural con servicios de tratamiento de aguas servidas, 2017.....	2
Figura 5.1: Ubicación de la localidad de Los Guindos, comuna de Melipilla.....	8
Figura 5.2: Tipos de humedales construidos según el tipo de flujo predominante en los lechos: a) Humedales de flujo superficial con macrófitas flotantes, (b) Humedales de flujo superficial con macrófitas arraigadas, c) Humedales de flujo horizontal subsuperficial y d) Humedales de flujo vertical subsuperficial.....	11
Figura 5.3: Zona de estudio.	16
Figura 5.4: Representación general de un Humedal construidos de flujo Subsuperficial	20
Figura 6.1: Diferentes configuraciones de los Humedales construidos	25
Figura 6.2: Precipitación en Los Guindos	26
Figura 6.3: Precipitación Histórica Anual. Estación Santo Domingo.....	27
Figura 6.4: Caudal Río Maipo en Estación Cabimbao.....	27
Figura 6.5: Canal de distribución de caudal PTAS Verdú.....	35
Figura 6.6: Sistema de Dientes de filtrado de la PTAS de Verdú	35
Figura 6.7: Primera sección de un HCSS vista desde arriba	36
Figura 6.8: Lámina de HDPE instalada usando zanja perimetral	37
Figura 6.9: Lámina dispuesta siendo cubierta con geotextil.	37
Figura 6.10: Diagrama del HC correspondiente a la primera escala.....	39
Figura 6.11: Representación del sistema de desinfección, mediante "Canales abiertos UV"	40
Figura 6.12: Diagrama del Humedal construido para la segunda escala	46
Figura 6.13: Diagrama del Humedal construido diseñado para la tercera escala	52
Figura 6.14: Representación de los elementos generales del sistema de tratamiento.....	54
Figura 6.15: Comparación de costos de inversión entre las distintas escalas.....	57
Figura 10.1: Principales parámetros de verificación en países seleccionados	66

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Caudal medio diario anual	15
Ecuación 2: Modelo PKC.....	21
Ecuación 3: Factor de corrección de la temperatura.....	21
Ecuación 4: Carga orgánica superficial.....	22
Ecuación 5: Carga orgánica transversal.....	22
Ecuación 6: Carga Hidráulica	22
Ecuación 7: Tiempo de retención hidráulico	22

GLOSARIO

Agua contaminada: La presencia en el agua de suficiente material perjudicial o desagradable para causar un daño en la calidad del agua.

Agua Potable: Agua que es segura para beber y para cocinar. Es aquella que por reunir los requisitos organolépticos (olor, sabor y percepción visual), físicos, químicos y microbiológicos, puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a la salud.

Aguas lluvias: Aguas provenientes de la precipitación pluvial.

Aguas servidas: Aguas residuales provenientes de inodoros, es decir, aquellas que transportan excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales.

Aguas residuales domésticas: Desechos líquidos provenientes de la actividad doméstica en residencias, edificios e instituciones.

Alcantarillado: Conjunto de obras para la recolección, conducción y disposición final de las aguas residuales o de las aguas lluvias.

Coliformes Fecales: Bacterias aerobias Gram-negativas, no formadoras de esporas, de forma bacilar y que, incubadas 44.5° C, fermentan la lactosa en un término de 48 horas, con producción de gas, pudiendo ser residentes del tracto digestivo humano y de animales de sangre caliente Coliformes fecales y E. coli son bacterias cuya presencia indica que el agua podría estar contaminada con heces fecales humanas o de animales.

Déficit Hídrico: Diferencia acumulada entre evapotranspiración potencial y precipitación durante un período determinado, en el cual la precipitación es la menor de las dos variables.

DBO (Demanda Biológica de Oxígeno): La cantidad de oxígeno (medido en el mg/l) que es requerido para la descomposición de la materia orgánica por los organismos unicelulares, bajo condiciones de prueba. Se utiliza para medir la cantidad de contaminación orgánica en aguas residuales.

DBO5: Cantidad de oxígeno necesaria para estabilizar biológicamente la materia orgánica del agua, incubada durante cinco días a 20 °C. reproduce el consumo de oxígeno en el medio natural.

Desinfección: La descontaminación de fluidos y superficies. Para desinfectar un fluido o una superficie

una variedad de técnica está disponible, como desinfección por ozono. A menudo desinfección significa eliminación de la presencia de microorganismo con un biocida.

Población servida: Número de habitantes que son servidos por un sistema de recolección y evacuación de aguas residuales

Saneamiento: Se entiende por saneamiento básico y mejoramiento ambiental la ejecución de las obras de acueductos urbanos y rurales, alcantarillados, tratamiento de agua y manejo y disposición de residuos líquidos y sólidos.

Sólidos Suspendidos: Partículas sólidas orgánicas o inorgánicas que se mantienen en suspensión en una solución.

Tratamiento de Aguas Residuales: Conjunto de procesos, operaciones y obras que son necesarias para lograr la depuración de las aguas servidas (residuales, grises, negras), que pueden incluir, además de los procesos de tratamiento tradicionales, obras de conducción y estaciones de bombeo, lagunas de tratamiento y de compensación, entre otros

1. INTRODUCCIÓN

En el último tiempo ha aumentado el interés por el concepto de “cambio climático”, el cual afecta al ciclo hidrológico, trayendo consigo problemas a nivel global, como cambios meteorológicos, fenómenos de temperaturas extremas y problemas de déficit hídrico, afectando incluso a las potencias económicas, países emergentes y a algunos de los más propensos a este cambio, los países pobres (ONU, 2019). El aumento de la población mundial genera un aumento de la demanda de agua en 1% anual durante las últimas 5 décadas (UNESCO, 2019), además, generando un incremento en la generación de residuos sólidos y líquidos, que se vierten directamente al suelo, contaminando las fuentes de agua dulce (Santibáñez, 2018). Según el estudio de World Resources Institute del Pacto Mundial de las Naciones Unidas en 2019, 17 países de 164, que reúnen a una cuarta parte de la población mundial, enfrentan un estrés hídrico, Por otro lado, la población vierte sus aguas residuales domésticas, de las cuales el 80% fluye a los ecosistemas sin ningún tipo de tratamiento o reutilización (Mateo-Sagasta, 2017). Es importante mencionar que, relacionado con el aumento de la población, también se ve en aumento la demanda de alimentos, es aquí donde la producción e industria agrícola juega un papel determinante. según Santibáñez en 2018: “La actividad productiva (agrícola) consume alrededor del 70% del agua disponible. Para el año 2050 este crecimiento se puede tornar insostenible”

Otra perspectiva del uso del agua, fuera de su aprovechamiento en las diferentes industrias, es en el consumo humano y en el saneamiento de las comunidades a nivel mundial. Respecto al saneamiento, en América Latina la situación no es alentadora, siendo alguno de los países menos desarrollados los que tienen mayores complicaciones como Nicaragua, El Salvador, Panamá, Bolivia y Haití, donde el 25% de su población no dispone de saneamiento (Mateo-Sagasta, 2017). Por otro lado, los países con un mayor porcentaje de la población conectada a alcantarillado, lo preside Chile con un 97,3% (SISS, 2020), luego están Colombia y México con 75% (valor estimado para el año 2012), y los países con menor porcentaje se encuentra Paraguay con un 10% (valor estimado para el año 2013) y en último lugar para Haití con un muy bajo 1% (valor estimado para el año 2012) (Mateo-Sagasta, 2017).

Luego de contextualizar la situación mundial, es importante centrarse en la realidad de Chile. En cuanto a las características de disponibilidad del recurso agua ya que está cuenta con 1.251 ríos, aproximadamente 15.000 lagos y lagunas, además, existe un cordón montañoso que provee de agua en la época de primavera y verano a ríos de régimen nival (Törey, 2018). Sin embargo, la distribución de los cuerpos no es homogénea, la realidad indica un contexto dispar en ambos

extremos del territorio, puesto que en la zona norte es representada por un clima seco, la zona intermedia presenta un clima mediterráneo que favorece la disponibilidad de precipitaciones (Martínez, 2018). El déficit de precipitaciones en el territorio nacional desde el año 1940 al 2010, presenta un 30% menos para las zonas comprendidas entre el sur de la región de Coquimbo y el norte de la región del Biobío, siendo el evento de sequía más extenso el comenzado el año 2010 al 2015, el cual aún está en desarrollo y se le ha denominado “mega sequía” (CR2,2015). Por otra parte, el saneamiento de las aguas servidas está cubierto prácticamente en las zonas urbanas de nuestro país, sin embargo, en los sectores rurales la realidad muestra que el alcance es muy distinto, lo que apunta a una deficiencia en nuestros sistemas de políticas medioambientales, dejando fuera a una parte importante de la población, desde el punto de vista de lo fundamental que son las actividades realizadas en estas áreas. Según lo dicho por la Superintendencia de servicios sanitarios (SISS) en 2018 “El área de saneamiento en zonas urbanas logra un 99,98% de cobertura en el territorio operacional, entre alcantarillado y tratamiento de aguas recolectadas”. El Banco mundial (2021) indicó que el déficit existente para contar con un servicio adecuado de alcantarillado y tratamiento rural, en los casos en que resulta técnicamente adecuado, es de gran magnitud. En relación con esta temática se presenta un retraso en el país en comparación con realidades de países de mayor desarrollo. Al respecto, en Europa y Norteamérica en el ámbito rural la conexión a sistemas de alcantarillado y al tratamiento de las aguas servidas alcanza al 50 y 47%, respectivamente, muy superior al 21% y 17% que se informa de Chile. En la figura 1.1 se observa la comparación de la proporción (%) de población urbana y rural con servicios de tratamiento de aguas servidas en el año 2017

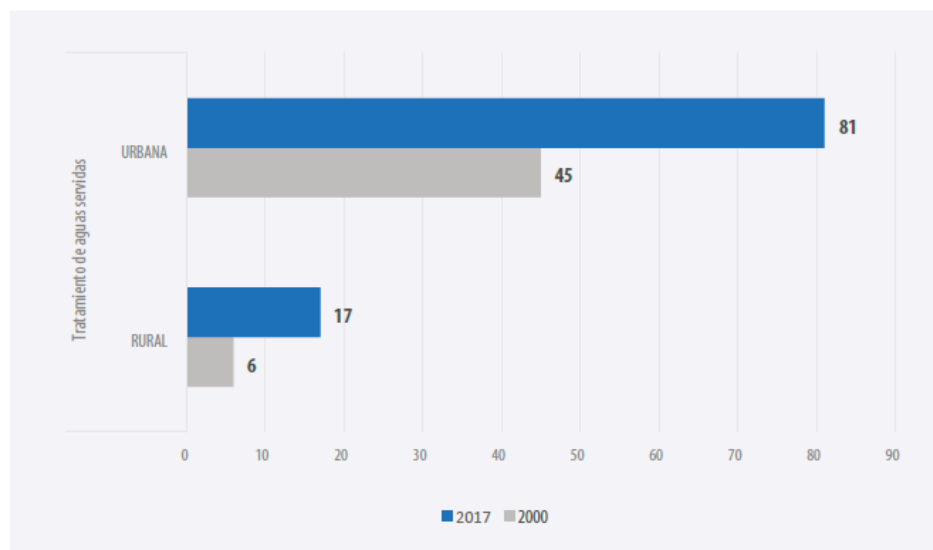


Figura 1.1: Comparación de la proporción (%) de población urbana y rural con servicios de tratamiento de aguas servidas, 2017.

Fuente: Banco mundial, 2021.

En este escenario de falta de saneamiento en las áreas rurales, las soluciones de tratamiento de aguas servidas deben adaptarse a las características de las comunidades. En el Atlas Nacional de España, se hace referencia a la distribución de la población en función de la agrupación de viviendas. Sin embargo, no especifican las distancias entre cada vivienda como medidas de agrupación. De este documento se obtienen las siguientes definiciones:

Concentrado, la población se agrupa en aldeas grandes.

Disperso, en los casos donde los lugares son minúsculos, de 2 a 10 casas.

Mixto, entre las 2 situaciones anteriores.

Diseminado, para referirse a un asentamiento de la población del campo en entidades de una sola casa.

De esta forma, surgió la inquietud de analizar una alternativa económica y fácil de operar en la localidad rural de Los Guindos. Además, evaluar si el agua tratada puede ser reutilizada para riego (Vidal & Araya, 2014). Según el último censo en 2017, Melipilla es una de las provincias de la Región Metropolitana con mayor superficie rural y cuenta con aproximadamente 186.000 habitantes de los cuales el 31,5% vive en zonas rurales. De igual manera, la comunidad de los Guindos se clasifica, según las definiciones anteriores, como una población del tipo mixta, debido a que presenta aproximadamente 60 casas, pero sin llegar a formar una aldea de gran tamaño.

El Programa de infraestructura rural para el desarrollo territorial (PRIDT) en la premisa de que la inversión en infraestructura contribuye al desarrollo de las potencialidades productivas de los subterritorios, considera programas para servicios de infraestructura Saneamiento (evacuación y tratamiento de aguas servidas domiciliarias). Basado en cinco principios esenciales: sostenibilidad económica, social y ambiental de los subterritorios seleccionados; participación de los actores locales públicos y privados; articulación de la infraestructura con los emprendimientos productivos de los subterritorios; plusvalía a la inversión ya existente y eficiencia en los modelos de planificación, inversión y gestión de servicios de infraestructura, El PRIDT identifica proyectos que requieren de un Plan Marco de Desarrollo Territorial (PMDT), en el cual se identifican las oportunidades de negocios, asociadas a uno o varios ejes de desarrollo productivo del subterritorio, que orientan la identificación de las necesidades de inversión para el desarrollo de dichas oportunidades. A partir del PIRDT se desarrollan diagnósticos para cada uno de los subterritorios prioritarios de intervención. De esta manera, en los PMDT se planifica una intervención colaborativa para llevar a cabo en un subterritorio que involucra a instituciones de los sectores público y privado. Entre los cinco territorios prioritarios de intervención que son abordados por el PRIDT, el territorio prioritario 1 agrupa a las comunas de Alhué, María Pinto, San Pedro y Melipilla. El subterritorio de la Comuna de Melipilla comprende las localidades de Los Guindos, San Miguel de Popeta, Cholqui, Paliocabe y El Oliveto; y sus principales ejes productivos se vinculan con la apicultura, ganadería bovina,

frutales y cultivos. También dentro del contexto de la recolección de información, en los sectores de Malleco, Popeta y Los Guindos, el alcantarillado se indicó como segunda prioridad. (PLADECO Melipilla, 2015-2019). De esta manera, se expresa por parte de la comunidad la necesidad de contar con sistemas de tratamiento para sus residuos líquidos domésticos, que sean viables según las características de la zona y que sean viables económicamente. La Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administración en su Estudio de Soluciones Sanitarias para el Sector Rural del 2018 establece los siguientes Sistemas de tratamiento convencionales (STC), no convencionales (STNC): Fosa séptica (STC), Lagunas aireadas mecánicamente (STC), Lombrifiltro o “Sistema Tohá” (STNC) y Humedales construidos (HC) (STNC), destacando este último por ser una alternativa con gastos de operación y mantenimiento bajos, buena eficiencia de eliminación de materia orgánica y nitrógeno, bajo consumo energético, fácil operación y mantención y que se utiliza principalmente en zonas rurales. Dentro de las características demográficas de importancia, de la comunidad de Los Guindos, según el censo del año 2017, existen 58 viviendas particulares tipo casa, de las cuales 53 son viviendas ocupadas por moradores permanentes. Las casas tienen varias fuentes de agua, siendo 37 de ellas alimentadas por redes públicas, 15 a través de pozos o norias, y solo una puede acceder al recurso a través de ríos, vertientes, esteros, canales, entre otros (INE, 2018).

Es por esto que, en la aplicación del tratamiento de las aguas residuales, mediante humedales construidos para zonas rurales, la reutilización de aguas tratadas en el riego es una estrategia clave para hacer un uso más eficiente y sostenible de los recursos hídricos en Chile. Debido a que el país enfrenta desafíos significativos y progresivos en términos de escasez de agua, particularmente en regiones áridas y semiáridas, la reutilización de aguas tratadas puede ser una solución viable para reducir la demanda de agua dulce y contribuir a la conservación de los recursos hídricos disponibles. Dentro de aquellos puntos que resaltan como “claves” han surgido características como el ahorro de agua dulce, debido a que la reutilización de aguas servidas que fueron tratadas previamente permitió aprovechar aguas que normalmente serían descargadas en cuerpos de agua, de esta forma se reduce la dependencia de fuentes de agua dulce, “alivianando” la demanda de los recursos hídricos. En base a lo mencionado, también se destacó como aspecto clave el aumento de la seguridad hídrica, ya que, contar con una fuente, alternativa y confiable, de agua tratada alternativa y confiable en momentos de sequía o escasez hídrica puede ayudar a mantener la producción agrícola y reducir los efectos económicos y sociales asociados con la falta de agua. Ligado a esto, al reutilizar aguas tratadas en riego, se evita la descarga directa a cuerpos de agua, contribuyendo a reducir la contaminación de ríos, lagos o mar. Por otro lado, a pesar de que haya pasado por un proceso de tratamiento (en este caso mediante humedales construidos) se debe considerar que el agua tratada sigue conteniendo nutrientes y materia orgánica, las cuales pueden aportar a reducir la necesidad de utilizar fertilizantes químicos y mejorar la salud de los cultivos, debido a esto, otro elemento es la mejora de la calidad del suelo y la productividad agrícola donde se haga el reúso del agua.

INTRODUCCIÓN

Todos los elementos claves que otorgan virtudes a esta alternativa de tratamiento de aguas servidas se encuentran bajo el alcance de la normativa ambiental aplicable a los sistemas de tratamiento de aguas servidas, donde las normas de emisión y calidad determinan niveles permisibles en los distintos parámetros. A continuación, se presenta la tabla 1.1 con la normativa chilena de emisión y calidad más importante:

Tabla 1.1: Principal normativa relacionada a sistemas de tratamiento de aguas servidas.

Tipo de norma	Norma	Detalle
Norma de Emisión	DS 609/98	Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado.
	DS 90/2000	Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.
	DS 46/2002	Establece norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas.
Norma de Reutilización	Ley 21075/2018	Regula la recolección reutilización y disposición de aguas servidas. (reglamento fijará límites)
	NCh 3483	Directrices para la clasificación de la calidad de agua regenerada para reúso no potable (En estudio por INN)
	NCh 3456/2	Directrices para el uso de aguas residuales tratadas en proyectos de riego-parte 2-desarrollo del proyecto (En estudio INN)

Debido a lo expuesto anteriormente, frente al complejo escenario hídrico que se está viviendo en el mundo y en especial en Chile, la reutilización de las aguas residuales surge como una alternativa necesaria para combatir la crisis hídrica.

2. PROBLEMA

Según la Superintendencia de servicios sanitarios (SISS) en 2018, El área de saneamiento en zonas urbanas logra un 99,98% de cobertura en el territorio operacional, entre alcantarillado y tratamiento de aguas recolectadas. Sin embargo, el alcance de los sistemas de saneamiento en zonas rurales no logra superar por mucho el 20 % en población concentrada. Además, existe una necesidad por parte de la comunidad de Los Guindos de contar con sistemas de tratamiento de sus aguas servidas, lo que refleja una realidad que se hace presente en gran parte de los sectores rurales del país. En relación con este aspecto, existen reiteradas ocasiones donde las distintas comunidades rurales de la comuna de Melipilla, entre ellas Los Guindos, que manifiestan su intención de contar con alguna solución de saneamiento que se adecúe a las características de la zona, incluyendo requisitos como bajo coste energético y monetario, tanto en la operación como en el mantenimiento. A lo anterior, se le suma la distribución de las viviendas en la localidad de Los Guindos, puesto que la comunidad objetivo se encuentra en torno a dos calles que se unen perpendicularmente entre sí, sin embargo, la población se concentra de manera heterogénea en este espacio, por lo que la definición de los límites y alcances de la propuesta representa un desafío a abordar. Una alternativa fue utilizar sistemas de depuración específicos para zonas rurales, según la SISS en 2018, “En los últimos años, el sistema de tratamiento en base a humedales ha ganado considerable interés, debido fundamentalmente a la alta remoción de todo tipo de sustancias, incluyendo metales tóxicos y pesados (...) Desde el punto de vista de la eficiencia de tratamiento, este proceso natural ha mostrado un alto grado de abatimiento de los parámetros contaminantes, incluidos los bacteriológicos, quedando la calidad del efluente final dentro de lo estipulado por normativas restrictivas.” La importancia de administrar de manera efectiva la distribución de recursos es crucial para la implementación de soluciones, debido a que el factor económico es determinante a la hora de tomar decisiones entre varias alternativas. Es por esto, que se presentó la posibilidad de comparar las distintas alternativas de sistemas de tratamiento en base a una misma tecnología (humedales construidos), las cuales presentan variaciones en sus dimensiones, ubicación espacial y principalmente, sus costos. Cabe señalar que los distintos sistemas de HC diseñados presentan algunas similitudes como el material de relleno o las especies de plantas y su disposición en el HC, pero también se observan algunas diferencias como las dimensiones y las relaciones largo/ancho que presentan. Considerando estas similitudes y diferencias fue pertinente hacer una evaluación comparativa de los diferentes diseños para determinar cuál sería la mejor opción a construir en Los Guindos, comuna de Melipilla.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Generar una propuesta de tratamiento de aguas servidas en tres escalas poblacionales distintas, mediante la técnica de "Humedales construidos" en la comunidad de Los Guindos, comuna de Melipilla.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar las principales características de la zona de Los Guindos, comuna de Melipilla, en cuanto a la cantidad de aguas servidas generadas y el impacto de la escasez hídrica en la zona.
2. Establecer tres escalas poblacionales de la comunidad de Los Guindos, comuna de Melipilla, para el tratamiento de sus aguas servidas, mediante la técnica de "Humedales Construidos"
3. Diseñar un sistema de tratamiento de aguas servidas, mediante la técnica de "Humedales construidos" para cada escala poblacional establecida.
4. Estimar los costos de inversión de la aplicación de la técnica de "Humedales construidos" para cada escala poblacional en la comunidad de Los Guindos, comuna de Melipilla.

4. METODOLOGÍA

La localidad Los Guindos se encuentra al sureste de la comuna de Melipilla, perteneciente a la Provincia de Melipilla, en la Región metropolitana de Santiago. Sus coordenadas se expresan en latitud ($33^{\circ}53'23.24''S$) y longitud ($71^{\circ}13'49.41''O$). Los Guindos se encuentra dentro de los cordones de cerros que se desprenden del Macizo de Cantillana. El área de Los Guindos es principalmente agrícola, produciendo una gran cantidad de frutas y hortalizas como uvas, duraznos, ciruelas y tomates, entre otras cosechas. La región cuenta con un clima mediterráneo. También se caracteriza por ser una zona donde, según el sistema de información y monitoreo de biodiversidad, el ecosistema terrestre predominante es el "Bosque esclerófilo mediterráneo costero de *Lithreacaustica - Cryptocarya alba*". En la figura 5.1 se puede observar la ubicación de la localidad de Los Guindos, comuna de Melipilla.

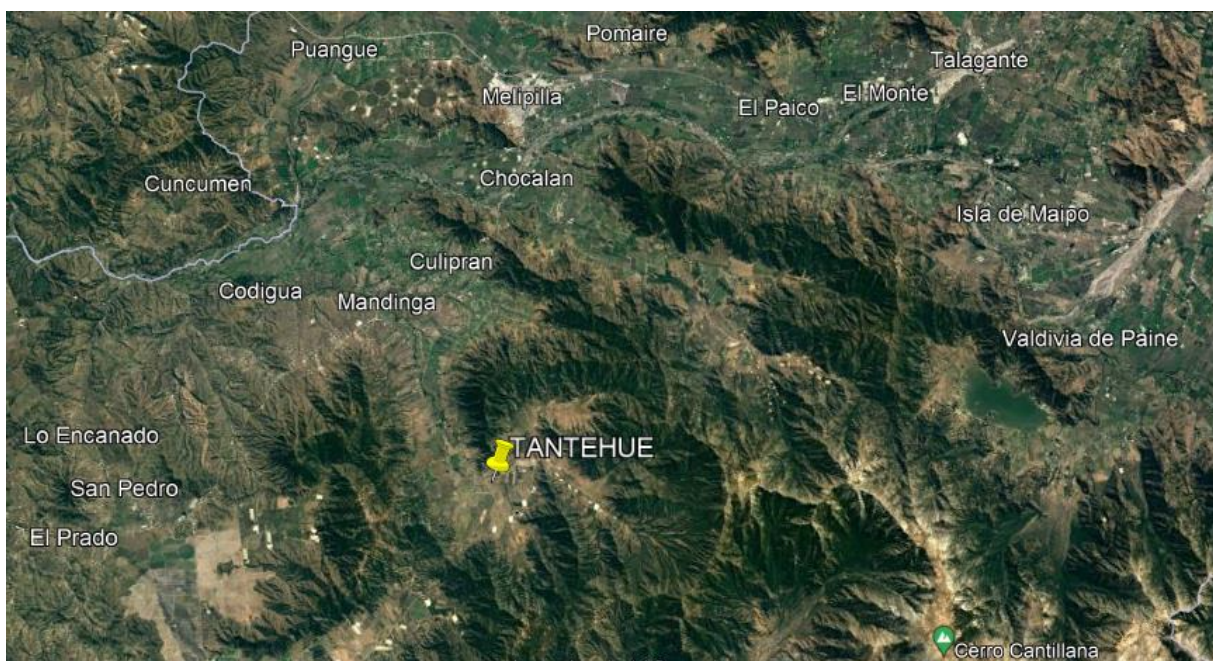


Figura 4.1: Ubicación de la localidad de Los Guindos, comuna de Melipilla.

Fuente: Google Earth Pro.

Se seleccionó la comunidad de Los Guindos para la aplicación de una propuesta a escala conceptual del diseño de un sistema de tratamiento de aguas servidas, mediante la técnica "Humedales Construidos", en base a la información que se recopiló desde una revisión bibliográfica de distintos aspectos, como experiencias anteriores, de igual forma se analizó que tipo de Humedal Construido se adapta mejor a las condiciones de este lugar, así como las características de estos distintos tipos. También se debió tener en cuenta variables meteorológicas, topografía y distribución poblacional de la comunidad objetivo. Dentro de la

cobertura a las problemáticas planteadas anteriormente, surgieron las tareas sobre determinación de la superficie necesaria para los humedales y sus formas, considerando la cantidad de agua servida a tratar y la carga de contaminantes, mediante la revisión, identificación y aplicación de las ecuaciones de diseño, selección de los materiales de construcción y los sistemas de entrada y salida de agua. Para la factibilidad de la propuesta es fundamental abordar los costos económicos que implicaría la aplicación de la propuesta.

4.1. Revisión inicial

La información histórica de los Humedales construidos fue de gran importancia al momento de la recopilación de antecedentes, ya sea de errores cometidos, aciertos, criterios importantes, etc. Para esto, existen diversos trabajos realizados que atendieron estos elementos, se le dio prioridad a aquellas publicaciones o libros ambientados en nuestro país, para así tener una visión más aterrizada a la situación de la zona central. Dentro de las fuentes que ayudaron a esta tarea, al igual que para los tipos de HC y sus características, se utilizaron estudios sobre las soluciones sanitarias para el sector rural, realizados por la Superintendencia de Servicios Sanitarios en 2008 y 2018, también se utilizó el libro “Humedales Construidos: Diseño y Operación” (Vidal y Hormazábal, 2018). En cuanto a la información que permitió establecer el impacto que genera el déficit hídrico en la zona, se obtuvo de las distintas estaciones meteorológicas que existen, por ejemplo, en la localidad de Los Guindos, la cual es la más cercana a la zona de estudio, también existe una estación de mayores características y tecnologías en la comuna de Santo Domingo, a una hora de Los Guindos. Ambas estaciones son pertenecientes a la Dirección meteorológica de Chile, por lo tanto, sus datos están disponibles en su plataforma web, los cuales fueron útiles para estimar el impacto de la sequía en la zona. La Técnica que se utilizó para esta propuesta de tratamiento de aguas servidas (Humedales construidos) requiere de un dato fundamental para el diseño sistema, la cantidad de aguas servidas generadas por la comunidad de Los Guindos. Para este cálculo, se recurrió al estudio de soluciones sanitarias para el sector rural (SISS, 2018), en donde se especifica, primero, las distintas ecuaciones con las que se puede obtener este dato, dependiendo de la disponibilidad de información, para luego detallar las variables y constantes de las distintas ecuaciones propuestas.

Para establecer las escalas poblacionales (3), primero se debió recurrir a una revisión de material bibliográfico sobre diseño de sistemas de tratamiento de aguas servidas, principalmente donde se utilizan tecnologías no convencionales, teniendo en cuenta que aquellas publicaciones de lugares donde esta técnica lleva un mayor tiempo siendo desarrollada, entregarían información más detallada sobre distintos escenarios y comportamientos que podría adoptar el sistema de tratamiento. De igual manera, la revisión otorgó consideraciones y valores característicos de algunos puntos específicos del diseño, como lo pueden ser las dimensiones y capacidades que pueden llegar a presentar los distintos Humedales construidos. Fue necesario adaptar esta

información a la zona de estudio, por lo tanto, plataformas de información geográfica, como por ejemplo Google Earth Pro otorgaron esa referencia espacial que permitió proyectar los sistemas de tratamiento. Este análisis de la información geográfica se realizó con la finalidad de evaluar la disposición de viviendas, cuerpos de agua cercanos, dimensiones de los distintos terrenos privados, entre otros aspectos que resultaron determinantes para establecer las escalas poblacionales a las cuales se les diseñaría el sistema de tratamiento de aguas servidas, mediante HC.

Para el diseño de los tres sistemas de tratamiento de aguas servidas domiciliarias se recurrió a libros y guías en donde se encontraban los criterios, aspectos relevantes y en general, la información necesaria para desarrollar la propuesta. Un libro de bastante utilidad para obtener información sobre el diseño de Humedales construidos será “Humedales Construidos: Diseño y Operación” (Vidal y Hormazábal, 2018)., que en su Capítulo 2 describe el diseño y construcción de humedales para el tratamiento de aguas, en donde se buscó, entre otros elementos, el tipo de HC, dimensión y geometría. De igual manera, los sistemas de canalización, tanto de entrada como de salida de las aguas fueron un aspecto importante de analizar con detalle. Por otra parte, fue necesario recurrir a fuentes que abarcaran temas sobre los pretratamientos que requería el sistema, como también del proceso de desinfección de las aguas, esto a modo de cumplir con la normativa aplicable.

Para estimar los costos de inversión de la aplicación de la técnica de "Humedal construido" en la comunidad de Los Guindos, se debió aplicar una metodología de estimación para sistemas de tratamientos no convencionales. En el estudio de soluciones sanitarias para el sector rural (SISS, 2018) se describe la metodología y criterios de evaluación, entregando información identificación de costos de inversión y reposición, costos de operación y mantenimiento, de igual manera, se define las tarifas de tratamiento de aguas servidas, entre otros elementos.

4.2. Metodología para identificar las principales características de la zona de Los Guindos, comuna de Melipilla, enfocado en la cantidad de aguas servidas generadas y el impacto de la sequía en la zona.

La metodología que atiende el primer objetivo específico se realizó mediante revisión bibliográfica de experiencias anteriores de aplicación de esta técnica (HC), abarcando la evolución cronológica de estos sistemas de tratamiento, incluyendo casos que han existido en el ámbito internacional y nacional. Esta tarea se desarrolló mediante la recopilación de los casos más destacados en la bibliografía seleccionada, intentando rescatar los principales antecedentes claves, características similares e ideas que puedan servir en el diseño.

Se clasificaron algunos tipos de Humedales construidos (HC) existentes, según su tipo de flujo hidráulico. Dentro de los tipos de HC que existen, destacaron los siguientes: Humedales construidos con flujo superficial (FS); Humedales construidos con flujo horizontal subsuperficial (HFSS); Humedales construidos de flujo vertical subsuperficial (VFSS). Se estudiaron y compararon las distintas características de cada tipo. A continuación, en la figura 5.2. se muestra una representación gráfica de los diferentes tipos de HC:

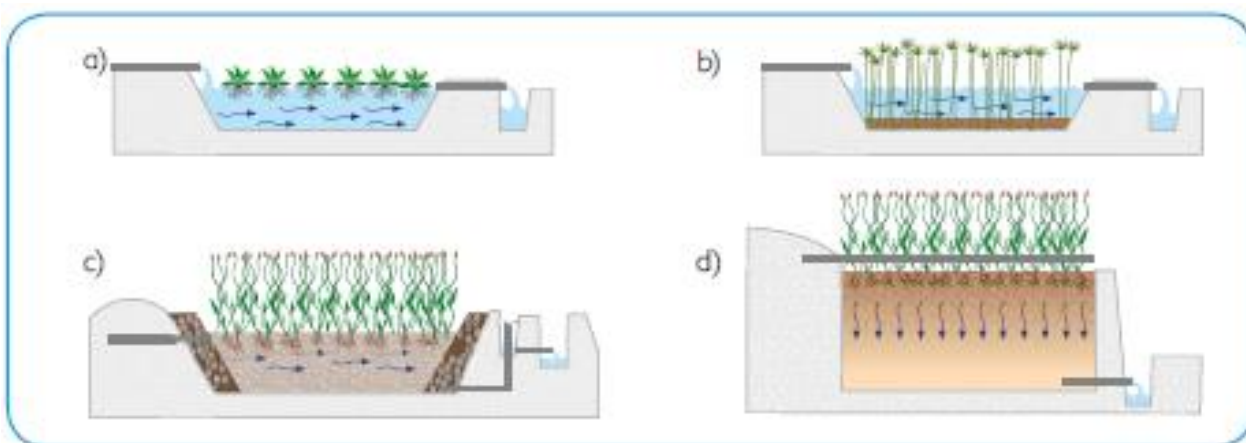


Figura 4.2: Tipos de humedales construidos según el tipo de flujo predominante en los lechos: a) Humedales de flujo superficial con macrófitas flotantes, (b) Humedales de flujo superficial con macrófitas arraigadas, c) Humedales de flujo horizontal subsuperficial y d) Humedales de flujo vertical subsuperficial.

Fuente: Vidal y Hormazábal, 2018

4.2.1. Parámetros y procesos de depuración de interés

Tabla 4.1: Parámetros típicos de diseño para humedales construidos para tratamiento de aguas residuales domésticas.

Fuente: Elaborado a partir de Vidal y Hormazábal, 2018

Parámetro	Flujo Superficial	Horizontal de Flujo Subsuperficial	Vertical Flujo Subsuperficial	Sistemas Tecnificados
Carga Orgánica Afluente	< 6 g DBO5/m ² · d	< 6 g DBO5/m ² · d	40 g DBO5/m ² · d	120g DBO5/m ² · d
Carga hidráulica Superficial	< 5 cm/d	< 5 cm/d	> 5 cm/d	> 5 cm/d
Tiempo de Retención Hidráulica Aprox.	5 – 15 días	> 5 días	Minutos/horas	Variable
Área aproximada por PE	5 m ² a 20 m ² /PE	5 m ² a 10 m ² /PE	1 m ² a 3 m ² /PE	0,5 m ² /PE
Relación Largo-Acho	10:1	3:1	NA	Variable
Profundidad	< 0,40 m	< 0,60 m	≥ 0,80 m	Variable
Pendiente del Fondo	NA	< 0,1%	NA	NA
Tipo de Relleno	NA	Arena y gravas	Arena y gravas	Arena y gravas
Vegetación	Variable	Variable	Variable	Variable

Tabla 4.2: Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales en FS: Humedales de flujo superficial, HFSS: Humedales de flujo horizontal subsuperficial y VFSS: Humedales con flujo vertical subsuperficial.

Fuente: Elaborado a partir de Vidal y Hormazábal, 2018

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

CONTAMINATE	Flujo Superficial	Horizontal de Flujo Subsuperficial	Vertical de Flujo Subsuperficial
Patógenos	Muerte natural, depredación, radiación UV, sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.	Muerte natural, depredación, sedimentación, secreción de antibióticos desde las raíces de las plantas.	Muerte natural, depredación, sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.

Con la finalidad de obtener una mejor panorámica de las características del sector de Los Guindos se analizó algunos datos históricos obtenidos de estaciones meteorológicas ubicadas en zonas cercanas al lugar, datos que permitieron realizar un análisis del impacto de la sequía y escasez hídrica en la zona. Finalmente, se estimaron las cantidades de residuos líquido domésticos generados, utilizando como base de datos el número de personas que habitan las viviendas y la cantidad de agua potable que consumían. Cabe señalar que se utilizó metodologías propuestas por la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo en “Estudio de soluciones sanitarias para el sector rural”, del año 2018. En el capítulo 2 de este estudio se desarrolla el tema de Sistemas de aguas servidas y en particular el punto 2.3, donde explica las consideraciones para el diseño y evaluación de tecnologías de tratamiento, es aquí donde exponen los tipos de caudales de diseño a aplicar en las distintas partes unitarias de las configuraciones de tratamiento:

Medio diario anual

Corresponde al valor medio diario anual del consumo multiplicado por el coeficiente de recuperación.

Medio período verano. Corresponde al valor medio del caudal del periodo de verano (generalmente enero a marzo y diciembre de cada año).

En general, el verano lleva asociado un mayor consumo de agua potable (mayor frecuencia de duchas, mayor consumo, etc.), por lo cual el caudal resultante es mayor que el caudal medio diario anual (en general 5 – 20%).

Medio período resto del año. Corresponde al valor medio del caudal del resto del año (generalmente abril a noviembre).

En general, el resto del año lleva asociado un menor consumo de agua potable, por lo cual el caudal resultante es menor que el caudal medio diario anual (en general 5 – 15%).

Máximo horario. Corresponde a la condición de máximo horario alcanzado a lo largo del año. Para poblaciones superiores a 1.000 habitantes, el caudal máximo horario de aguas servidas se obtiene a partir del coeficiente de Harmon, en tanto que para poblaciones entre los 100 y 1.000 habitantes se determina por interpolación entre los valores de la Boston Society of Civil Engineer's y el Harmon. (SISS, 2018)

En relación con la información disponible sobre las características poblacionales y de vivienda de la comunidad objetivo, se seleccionó el caudal medio diario como base de cálculo para estimar la cantidad de aguas servidas generadas. A continuación, se presenta la información sobre esta variable:

4.2.2. Caudal medio diario anual.

El caudal medio diario anual se utilizó para obtener un valor de aguas servidas generadas por la población, valor que será determinante en el momento de diseñar los sistemas de tratamiento. A continuación, se presenta la ecuación del caudal medio diario (ecuación 1):

$$Q_{med} = P * D * R$$

Ecuación 1: Caudal medio diario anual

Donde:

Q_{med}= Caudal medio diario anual (*l/s*)

P= Población servida media anual(*hab*)

D= Dotación de consumo medio diario anual de agua potable. (*l/hab/d*)

R= Coeficiente de recuperación.

Para determinar el valor **P** se utilizaron los datos del censo del año 2017 y sus proyecciones, desde donde se obtuvo la población total de Los Guindos, así como el porcentaje de población que vive en zonas rurales tanto de la Región Metropolitana, como de Melipilla. Con esta información se pudo determinar el porcentaje de aumento de población en zonas rurales, luego este dato sirvió para proyectar la población actual de la comunidad objetivo.

En cuanto a **D**, se recurrió a recomendaciones de estudios previos en el sector rural.

Finalmente, respecto al coeficiente de recuperación (**R**), se refiere a la cantidad de agua consumida que regresa a la red de alcantarillado, que generalmente se considera el 80% del consumo en el país, lo que significa que $R = 0,8$. El coeficiente de recuperación es menor cuando

la población destina parte de su consumo a actividades que no retornan al alcantarillado, como el riego, el lavado de vehículos, etc., y mayor cuando la mayoría de las actividades retornan al alcantarillado. La adopción del valor debe estar en línea con las costumbres y características particulares de la población servida.

4.3. Metodología para establecer tres escalas poblacionales de la comunidad de Los Guindos, comuna de Melipilla a las cuales se les diseñará un sistema de tratamiento de aguas servidas mediante técnica de “Humedales construidos”

Se recurrió a investigaciones en sistemas de información geográfica, prestando importancia a los potenciales espacios para implementación del sistema, al igual que a la información de los sistemas de tratamientos actuales de las viviendas. De la revisión anterior, se observó que, según el censo del año 2017, existen 58 viviendas particulares, de las cuales 53 son ocupadas por moradores permanentes, siendo todas viviendas del tipo casa. Las casas tienen varias fuentes de agua, de las cuales 37 de ellas son alimentadas por redes públicas, 15 a través de pozos o norias, y solo una puede acceder al recurso a través de ríos, vertientes, esteros, canales, entre otros. En la figura 5.2 se observa la imagen satelital de la zona de estudio de este trabajo, la cual corresponde a una comunidad de la localidad de Los Guindos:



Figura 4.3: Zona de estudio.

Fuente: Google Earth Pro.

Esta actividad fue complementada con una inspección visual en terreno del sector de Los Guindos con la finalidad de obtener una caracterización espacial del entorno de la comunidad, al igual que de la disposición territorial de las viviendas. Luego, se realizó un análisis de la información recopilada, clasificándola y ponderándola. Lo anterior con el objetivo de lograr establecer los criterios o bases, con los elementos clave encontrados en el lugar, sobre las cuales se delinearon las tres escalas poblacionales a las que se le diseñará el sistema de tratamiento.

Finalmente, hay que destacar que las tres escalas determinadas buscan tratar las aguas servidas que genera la población total, en total 220 personas. Sin embargo, esa totalidad de población o 58 viviendas podrían ser tratadas a distintas escalas.

4.4. Metodología para diseñar un sistema de tratamiento de aguas servidas mediante la técnica de “Humedales construido” para cada escala poblacional.

Para lograr el tercer objetivo específico, que trata sobre un diseño de sistema de tratamiento para cada escala poblacional. Se procedió a revisar, identificar y aplicar las tareas asociadas a esta metodología fueron la revisión, identificación y aplicación de las distintas ecuaciones de diseño pertinentes a los sistemas, estas se realizaron para definir aspectos como el tipo, dimensión y geometría de los Humedales Construidos.

La primera actividad asociada a este objetivo fue la determinación de la superficie de cada uno de los humedales a diseñar, para esto se utilizó el método de Constantes de primer orden, más específicamente, el modelo $P*K*C$, en su versión de tanques en serie (Ecuación 2). Para realizar el cálculo se utilizaron las siguientes consideraciones:

- 1) La utilización de tanques sépticos como pretratamiento, con una remoción de un 30 % de la materia orgánica.
- 2) El aporte de carga orgánica es de 60 gDBO/(hab*d)
- 3) La Calidad de salida, en términos de DBO es igual a 30 mg/l.

Luego de obtener la superficie total, se determinaron las dimensiones del humedal (que posteriormente variarían, debido a los ajustes necesarios para cumplir con los criterios de calidad), para esto se debió asignar una relación de Largo/Ancho (L/W), para la cual, los valores recomendados están entre 2:1 y 5:1. De igual manera, fue necesario asignar un valor de profundidad (m), el cual se recomienda que debe ser entre 0,4 y 0,7 m.

(El sistema va a ser estable en el tiempo de vida previsto) Para asegurar que las dimensiones calculadas se relacionan con un adecuado funcionamiento del sistema, se utilizaron tres parámetros, los cuales serán descritos a continuación:

- Carga orgánica superficial (COS): La carga orgánica superficial es una medida utilizada para evaluar la cantidad de materia orgánica presente en un cuerpo de agua o en una

corriente de agua. Se refiere a la concentración de materia orgánica que se encuentra en la superficie del agua o en la capa superior del cuerpo de agua.

- Carga orgánica transversal (COT): La carga orgánica transversal es una medida de chequeo de que el sistema no colapsará por “Clogging” en el corto plazo.
- Carga hidráulica (CH): La carga hidráulica se refiere a la energía total que posee un fluido en movimiento, generalmente agua, debido a su posición y velocidad. Se utiliza para describir la presión y el flujo del agua en sistemas hidráulicos, como tuberías, canales o conductos.

Estas verificaciones cumplen con la necesidad de asegurar las condiciones normales de operación durante su tiempo de vida útil. El principal problema que buscan evitar las ecuaciones de verificación es el “Clogging” el cual se describe a continuación:

Clogging- colmatación

El clogging es un fenómeno de taponamiento, el cual viene a ser el principal problema operativo de los Humedales construidos. Ocurre cuando los espacios de los poros en los medios se obstruyen por acumulación de sólidos, lo que limita el área y tiempo de contacto entre la biopelícula y el agua. Es causada por el exceso de carga orgánica y/o sólidos en el lecho del humedal (Vera, 2021).

Un aspecto para tomar en cuenta para el diseño fue la compartimentalización de los humedales, es decir, el número de lechos de cada sistema. Con relación a lo anterior, se recomienda solamente un lecho cuando se trate de poblaciones bajas, sin embargo, se pueden agregar hasta 4 lechos cuando sea una población mayor (+ 50 hab).

A continuación, se establecieron las generalidades del diseño, es decir, se definió en forma detallada las distintas partes del sistema. Los componentes del sistema se describen a continuación:

- 1) Sistema de distribución de entrada: Corresponde al ingreso del caudal al sistema, debe cumplir con la función de repartir el caudal de la forma más homogénea en la extensión del humedal. Esta distribución se realiza por canales de distribución o por tuberías.
- 2) Zona de distribución de entrada: Es la primera zona del humedal, al igual que el sistema de distribución de entrada, su función es distribuir de manera uniforme el caudal, con la finalidad de evitar que se generen zonas desaprovechadas dentro del humedal (Zonas

muertas). Se caracteriza por contar un material de relleno de mayor diámetro, idealmente más de 25 milímetros.

- 3) Impermeabilización: Parte del sistema encargada de aislar el sistema del medio (suelo). Para la impermeabilización de los sistemas se contó con tres opciones, las cuales se nombran a continuación:
 - HDPE
 - Arcilla compactada
 - Materiales sintéticos (que garantice impermeabilidad y capacidad de soporte de punzonamiento).

- 4) Medio Principal: Corresponde a la parte central del sistema, donde se llevan a cabo los mecanismos de depuración y la mayor parte del tratamiento. Para el relleno del medio principal se utiliza material de menor diámetro que en la zona de distribución de entrada, aquí se recomienda usar tamaños entre 3-16 milímetros, aunque finalmente dependerá de la disponibilidad local. También se recomienda usar valores de pendiente del fondo entre 1-2%.

- 5) Plantas: Es el componente diferencial de los Humedales construidos. Para el diseño de los sistemas se utilizaron plantas del tipo “Hidrófitas”, más específicamente, aquellas que son Emergentes. En cuanto a su instalación, se recomienda ser plantada entre 10-15 centímetros bajo el nivel de la grava, asegurando una distribución ideal de 4 plantas / m^2 . También se tuvieron en cuenta características ligadas al origen de la especie, debido a que se prioriza el carácter nativo por su adaptación a las condiciones ambientales de la zona.

- 6) Sistema de recolección y drenaje: es la parte final del sistema, formado por tuberías de recolección en forma de “U”, posee un material de relleno similar a la zona de distribución de entrada. Posterior al sistema de recolección se encuentra una cámara de salida, desde la cual se puede regular el nivel del agua dentro del sistema de tratamiento.

A continuación, se observa la figura 5.4 que representa de manera general un Humedal Construido de flujo subsuperficial:

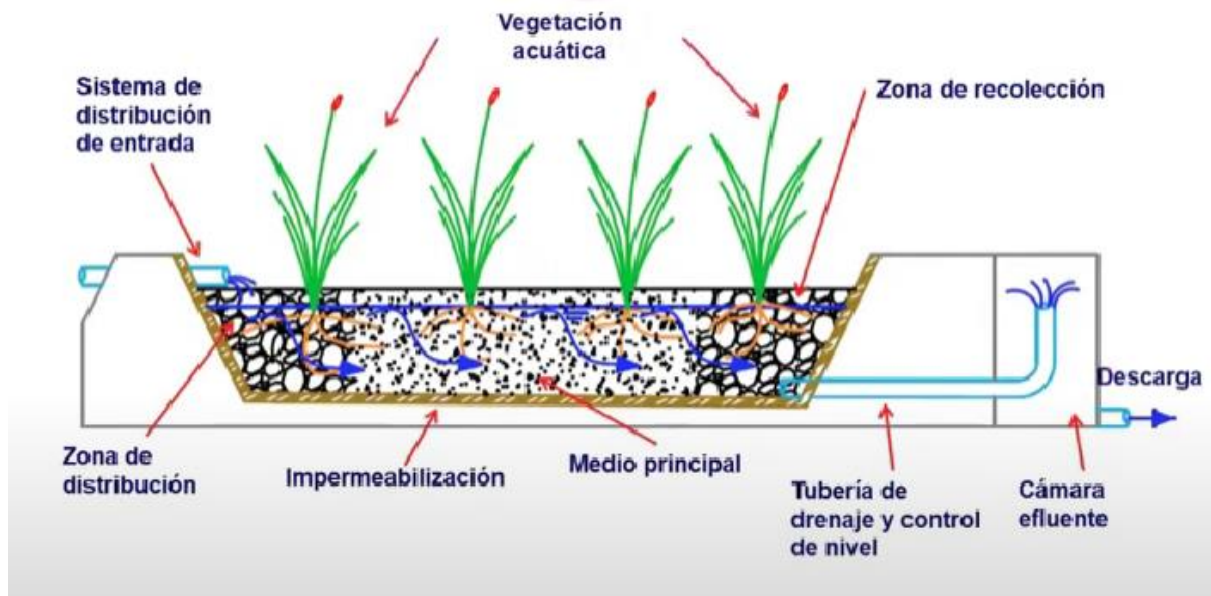


Figura 4.4: Representación general de un Humedal construido de flujo Subsuperficial

Fuente: Vidal y Hormazábal, 2018

En general, los humedales construidos de flujo subsuperficial poseen una buena remoción de parámetros, sin embargo, para lograr una calidad de agua que sea apta para riego debió incluir un sistema de desinfección de las aguas luego del HC, a modo de ajustarse a lo requerido por la normativa, específicamente en el parámetro de los coliformes fecales. Es importante aclarar que el sistema de desinfección no se consideró en la estimación de costos de inversión, debido a la dificultad para valorizar un sistema de estos sin su previa cotización formal con el proveedor.

Por otra parte, los detalles acerca de la operación y mantenimiento de los sistemas fueron recopilados en forma de tablas, donde se indicó la actividad a realizar y las frecuencias mínimas de las distintas tareas.

Finalmente, el sistema requiere de un monitoreo, el cual está ligado a la medición de la calidad del agua en las distintas partes del Humedal. Las razones para ejecutar un monitoreo del sistema se relacionan con conocer los detalles del funcionamiento del sistema, verificar el cumplimiento de la normativa ambiental aplicable y velar por la salud de los operadores. También es relevante saber qué monitorear, debido a que las razones mencionadas anteriormente indicaron los parámetros a cuantificar.

4.4.1. Ecuaciones de diseño.

. Las principales ecuaciones de diseño que fueron utilizadas se presentan a continuación:

$$\frac{C - C^*}{C_i - C^*} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k}{p * q}\right)^p}$$

Ecuación 2: Modelo PKC

Donde:

C = concentración de salida o efluente, $\text{mg } L^{-1}$

C_i = concentración de entrada o afluente, $\text{mg } L^{-1}$

C * = concentración de fondo, $\text{mg } L^{-1}$

K_t = coeficiente superficial de primer orden modificado, $\text{m } d^{-1}$

P = cantidad aparente de tanques en serie (TIS), adimensional

Q_i = caudal de entrada, $\text{m}^3 \text{ } d^{-1}$

$$K_T = K_{20} * \theta^{(T-20)}$$

Ecuación 3: Factor de corrección de la temperatura.

Donde:

K_T = coeficiente de reacción a temperatura del agua T

K₂₀ = coeficiente de reacción a temperatura del agua a 20°C

T = temperatura del agua, °C

θ = Factor de temperatura modificada de Arrhenius, adimensional.

$$COS = CM/A$$

Ecuación 4: Carga orgánica superficial

Donde:

COS= Carga orgánica superficial, $gDBO5 m^{-2}d^{-1}$

CM= Carga Másica, $gDBO5 d^{-1}$

A= área Humedal, m^2

$$COT = CM / (Ac * h)$$

Ecuación 5: Carga orgánica transversal

Donde:

COT= Carga orgánica superficial, $gDBO5 m^{-2}d^{-1}$

CM= Carga másica, $gDBO5 d^{-1}$

Ac = Ancho humedal, m

h= Profundidad humedal, m

$$CH = Qi/A$$

Ecuación 6: Carga Hidráulica

Donde:

CH= Carga Hidráulica, $mm * d^{-1}$

Qi= Caudal de ingreso, m^3/d

A = Área total, m^2

$$TRH = (\epsilon * v) / Qi$$

Ecuación 7: Tiempo de retención hidráulico

Donde:

TRH= Tiempo de retención hidráulico, d

ϵ = Porosidad, 0,35

v=Volumen, m^3

Qi = caudal de entrada, $m^3 d^{-1}$

4.5. Metodología para determinar los costos de inversión de la aplicación de la técnica de “Humedal construido” en la comunidad de Los Guindos, Comuna de Melipilla.

Finalmente, para lograr una estimación de los costos de inversión de la implementación del sistema de tratamiento de aguas servidas diseñado para cada escala poblacional identificada en Los Guindos se recurrió a cotizaciones de proveedores y se analizó la inversión en activos fijos y de costos de operación y mantenimiento que serían necesarios en la aplicación del sistema de tratamiento. También se analizó los posibles beneficios resultantes para cada escala poblacional. Para ambas estimaciones se utilizaron estudios y guías publicadas por organismos gubernamentales, como organizaciones internacionales.

Cabe mencionar que antes de la construcción de un humedal es necesario considerar las pruebas de laboratorio, que demuestren y ratifiquen de forma práctica la eliminación y cumplimiento de la norma, ya que en este estudio solamente se realizó de forma teórica todo el sistema de tratamiento y el cumplimiento de la normativa vigente de emisión y calidad asociada a aguas servidas en el sector rural, al igual que sobre la reutilización de aguas servidas. En el capítulo 2 del “Estudio de soluciones sanitarias para el sector rural”, del año 2018, de la Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo se plantean las normas de emisión y calidad asociadas a este tipo de actividades.

5. RESULTADOS

5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE LOS GUINDOS

La Historia de los humedales construidos nace a partir de la utilización de humedales naturales para el depósito y tratamiento de las aguas residuales, actividad que aún era practicada en la primera parte del siglo pasado, por ejemplo, Great Meadows, cerca del río Lexington, Massachusetts, en donde hasta el año 1912 aún se ejercía esta práctica. Otro caso de la utilización de humedales naturales para la recepción de aguas servidas es la localidad de Brillion Marsh, en Wisconsin, en donde se tienen registros de estas descargas en el año 1925. Estas acciones ocasionaron riesgos sanitarios y una evidente pérdida de biodiversidad, es por esto que a partir de la década de 1950 se comienza a tomar conciencia sobre esta práctica, dando paso a una nueva era en la cronología de los HC. Es de importancia el trabajo realizado por la Dra. Seidel, quien inició la investigación sobre los Humedales construidos en Alemania en el año 1954, siendo la primera persona en incluir vegetación en los sistemas de tratamiento de aguas. Avanzando en el tiempo, en el año 1960, se crea el “Método de Raíces”, el cual fue desarrollado por el Dr. Kickuth en la universidad de *Göttingen, Alemania*. Este método consistía en estanques rectangulares plantados con *Phragmites australis*, el agua fluye de manera horizontal por un lecho de suelo específico, donde era necesario adicionar calcio, hierro o aluminio para favorecer la precipitación del fosfato. El primer HC fue desarrollado en las cercanías del lago Ljsselmeer, Holanda, en 1967. Tres años después, se crea el “Sistema Krefeld, en el instituto Max-Planck, Alemania, con gran participación de la antes mencionada Dra. Kathe Seidel. El Sistema Krefeld consta de cuatro etapas (con la posibilidad de incluir una quinta), donde cada una cuenta con sistemas en paralelo y plantados con macrófitas emergentes. Las dos primeras etapas poseen humedales de flujo vertical subsuperficial, alimentados intermitentemente. Las etapas posteriores constaban de humedales de flujo horizontal subsuperficial. Los principales problemas que enfrentaron estos sistemas pioneros fueron de tipo hidráulico y dificultades operativas, crecimiento de raíces en el sustrato y colmatación. Ante estos problemas, en 1986 se crean los primeros manuales y guías de diseño de HC. Ese mismo año, destaca el Humedal construido en la ciudad Arcata, California, que fue construido en una zona industrial abandonada. La particularidad es que, aparte de funcionar en la actualidad, la zona en donde se encuentra esta planta de tratamiento es conocida como “Santuario de pantano y vida silvestre de Arcata”, abarcando una superficie de 62 hectáreas. Las aguas residuales se filtran en varios estanques de oxidación, humedales de tratamiento y marismas de mejora. Las marismas se encuentran en la ruta migratoria del Pacífico y también sirven como refugio de vida silvestre El Pantano recibió el premio Innovaciones en Gobierno de la Fundación Ford/Harvard University Kennedy School of Government. El año 2021 la planta de tratamiento atendía a una población de 19.056 habitantes, teniendo que recibir un caudal medio anual de 8.703 metros cúbicos cada día.

En cuanto a los tipos de Humedales construidos más comunes en el mundo, tal como se anticipaba en el punto 5.1, destaca la clasificación según su tipo hidráulico, en donde se encuentran los Humedales construidos con flujo superficial (FS); Humedales construidos con flujo horizontal subsuperficial (HFSS); Humedales construidos de flujo vertical subsuperficial (VFSS). También existe la posibilidad de combinarlos secuencialmente, generando sistemas híbridos. Para una mayor comprensión se presenta la figura 6.1:

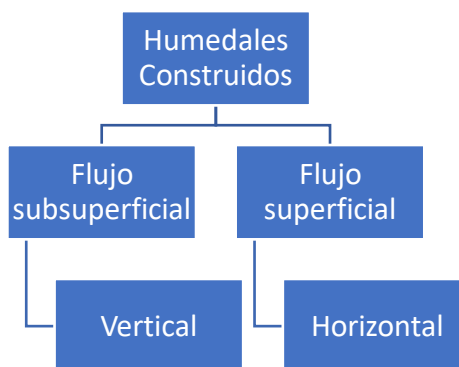


Figura 5.1: Diferentes configuraciones de los Humedales construidos

Fuente: Vidal y Hormazábal, 2018.

Humedal de flujo horizontal superficial

En estos sistemas el agua se vierte por un extremo del lecho, luego avanza estando expuesta a la atmósfera y trasiega horizontalmente para finalmente ser evacuada en el extremo opuesto del lecho, usando un vertedero de control hidráulico. Su profundidad es de aproximadamente 0,3 metros, esto para favorecer la difusión de oxígeno atmosférico en el agua.

Humedal de flujo horizontal subsuperficial

El agua se distribuye en un extremo del lecho, a unos pocos centímetros de la superficie, trasiega en sentido horizontal a través de un medio granular de relleno, entre las raíces de las plantas y sin estar expuesto a la atmósfera. El agua tratada se recoge en el fondo del lecho, mediante una estructura adecuada, que controla el nivel del agua (altura) dentro del lecho y evacúa por medio de tuberías y/o vertederos. Las profundidades no suelen exceder los 0,6 metros.

Humedales de flujo vertical subsuperficial

En estos humedales el agua fluye de manera descendente, se vierte y distribuye homogéneamente sobre toda la superficie del lecho, percola y fluye a través de material de relleno, principalmente arenas o gravas, esto a modo de favorecer la adhesión y crecimiento de

biopelículas. Además, favorece la filtración del agua que se trata y el arraigo de las plantas. Estos sistemas “inyectan” el agua por pulsos, esto para evitar la saturación y dejar espacio para que el lecho se cargue de oxígeno para facilitar los procesos de degradación. Su profundidad efectiva debe ser aproximadamente 1 metro.

Sistemas híbridos

Son una mezcla de los humedales mencionados anteriormente y pueden estar compuestos por varios lechos, áreas de flujo expuesto a la atmósfera, áreas de flujo subsuperficial e incluso sectores de flujo vertical, o sistemas en serie con diversas características. Los objetivos del tratamiento, las características del agua a tratar, las condiciones de operación y la disponibilidad económica determinarán su disposición.

5.1.1. Impacto de la sequía en la zona y Cuantificación de las Aguas servidas por la población

Profundizando los datos climáticos de la zona de estudio, se determinaron dos parámetros para evaluar el impacto del déficit hídrico en la zona, estos fueron la Precipitación y el Caudal de la cuenca. Por una parte, los datos de las precipitaciones se obtuvieron de dos estaciones meteorológicas, una de ellas perteneciente a la Dirección General de Aeronáutica Civil, se ubica en la comuna de Santo Domingo, aproximadamente a 45 kilómetros de distancia. Mientras que los datos de la segunda se obtuvieron desde el Explorador climático del Centro de las Ciencias del clima y la Resiliencia, ubicada en la localidad vecina de Los Guindos, a escasos kilómetros de la zona de estudio. A continuación, en las figuras 6.2 y 6.3 se observa el detalle de los datos de precipitación en la zona en los últimos años:

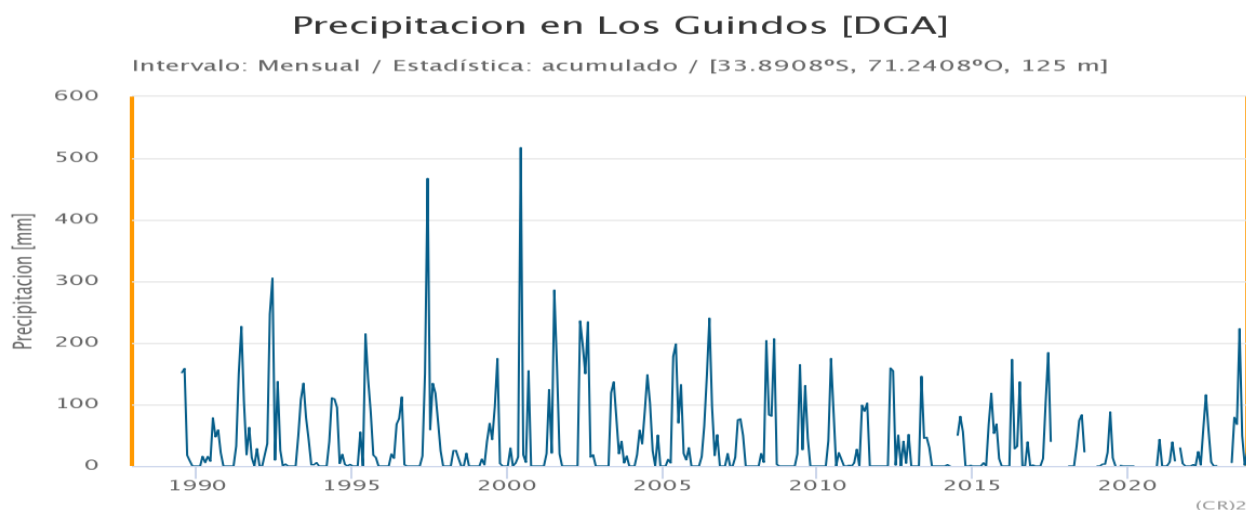


Figura 5.2: Precipitación en Los Guindos entre 1988 y 2023

A grandes rasgos, se observa cierta tendencia a la disminución de las precipitaciones desde aproximadamente las últimas dos décadas, exceptuando fenómenos en años puntuales, dicha tendencia se vuelve más intensa a partir del 2009, esto de acuerdo con datos meteorológicos de la zona.

En cuanto a los datos sobre el caudal de la cuenca, estos corresponden a la estación meteorológica de Cabimbao, ubicada a aproximadamente 30 kilómetros de la zona de estudio y 20 kilómetros desde la unión del estero Popeta con otros cuerpos que tributan al Río Maipo. En la figura 6.4 se observan los datos anuales del caudal del Río Maipo en Cabimbao:

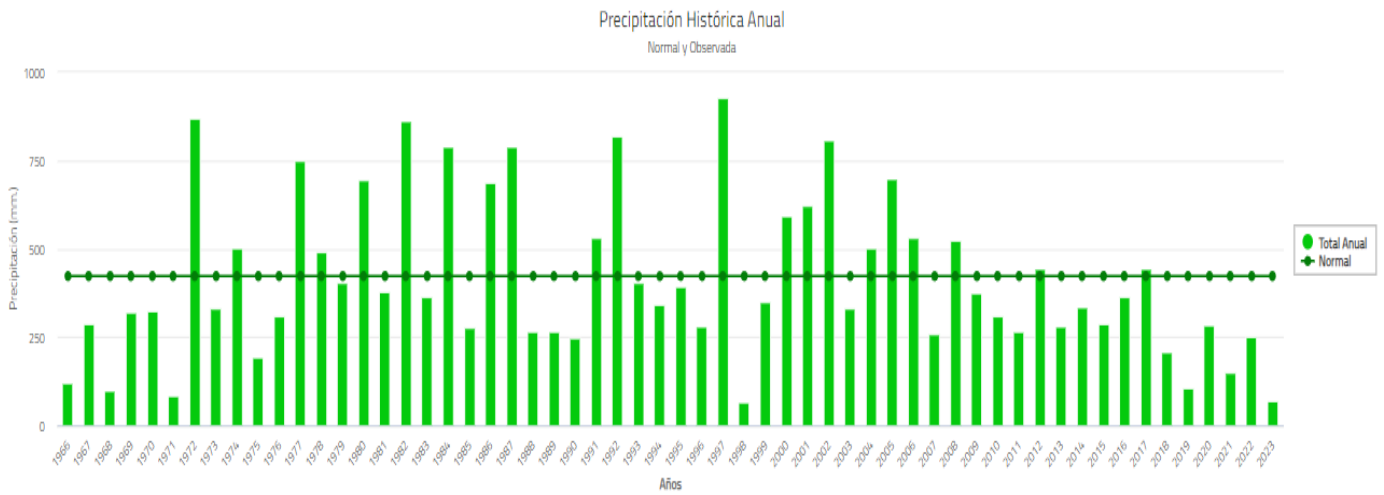


Figura 5.3: Precipitación Histórica Anual. Estación Santo Domingo.

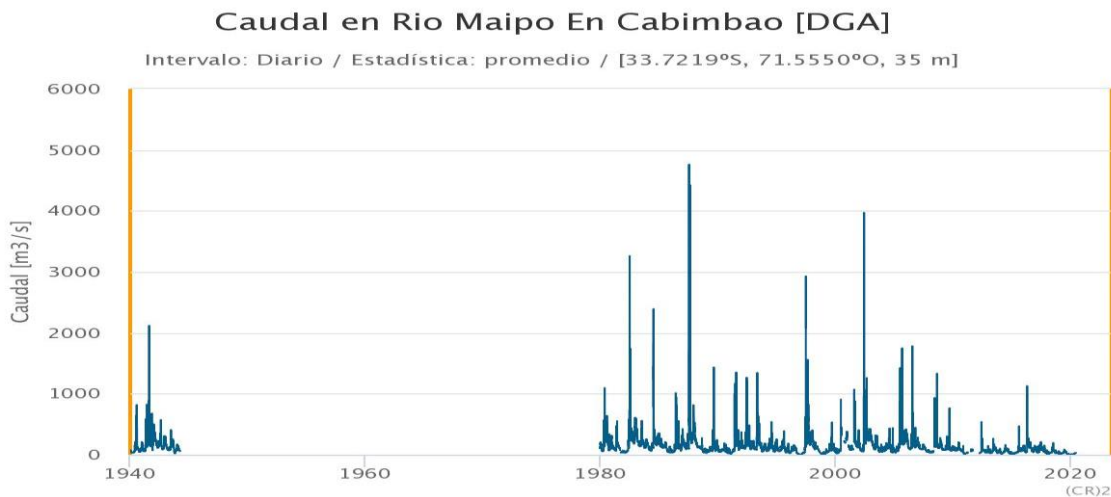


Figura 5.4: Caudal Río Maipo en Estación Cabimbao entre 1940 y 2023.

Al igual que lo que ocurre con las precipitaciones, en las últimas décadas se observa una disminución sostenida de los caudales anuales registrados.

Para estimar la cantidad de aguas servidas generadas por la comunidad se utilizó la ecuación de Caudal medio diario anual (ecuación 1):

$$Q_{med} = P * D * R$$

Donde:

Q_{med} = Caudal medio diario anual (l/s)

P= Población servida media anual (hab)

D= Dotación de consumo medio anual ($\frac{l}{hab} / d$)

R= Coeficiente de recuperación

5.1.1.1. Población a servir y su proyección a lo largo del período de previsión

La población a servir debe obtenerse en base a un catastro previo o como el inicio del estudio para poder definir las bases de cálculo, de importancia para definir las condiciones de borde del tratamiento a precisar y su adecuado dimensionamiento a lo largo del período de previsión.

Para los efectos del presente estudio se consideró un valor de 1.15 como tasa de crecimiento de la población en la comunidad de Los Guindos. El resultado se obtuvo proyectando el porcentaje en que aumentó (hasta 2023) la población desde del censo en 2017 en la población rural de Melipilla. El resultado obtenido fue que la población aumentó en un 15 % aproximadamente, con respecto al año 2017. Al aplicar la tasa de crecimiento (1.15) a la población de la comunidad objetivo en 2017 (190 habitantes) se obtiene una proyección de 219 habitantes en 2023.

5.1.1.2. Dotación de consumo medio anual

Como valor de dotación de consumo medio anual se utilizó la recomendación de las metodologías propuestas por la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo en “Estudio de soluciones sanitarias para el sector rural”, del año 2018. En este estudio se recomienda usar una dotación de agua potable de 150 (l/hab/d).

5.1.1.3. Coeficiente de recuperación

El valor del coeficiente de recuperación utilizado fue de un 0,8, lo cual significa que se considerará que el 80 % de la dotación de consumo medio anual ingresaría al sistema de tratamiento.

5.1.1.4. Cálculo del caudal medio diario

Luego de realizar la estimación de los valores de los elementos necesarios, se procedió a calcular el caudal medio diario. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

$$Q_{med} = 219 [hab] * 150 [l/hab/d] * 0,8$$

Al resolver la ecuación se obtuvo un valor de **$Q_{med} = 26,4 [m^3/d]$** .

De igual forma, para el dimensionamiento de los humedales se ajustaron los distintos caudales de entrada según en N° de personas asociado a cada sistema de tratamiento.

5.2. IDENTIFICACIÓN DE LAS ESCALAS POBLACIONALES

Luego de realizar el análisis de las características de las casas de la zona, sus sistemas de tratamiento de aguas servidas y su disposición territorial, teniendo en cuenta factores como el espacio disponible, pendiente del terreno, entre otros, se establecieron tres escalas poblacionales a las cuales se diseñaría un sistema de tratamiento, considerando que el objetivo es tratar las aguas servidas generadas por el total de la población. Es necesario mencionar que el orden de creación de las escalas no siguió un orden convencional, sino que se seleccionó la primera escala, luego la tercera y finalmente la segunda.

Con la finalidad de calcular y encontrar la mejor propuesta de sistemas de saneamiento de las aguas servidas en Los Guindos, la determinación de cada escala poblacional se realizó pensando en el número de habitantes y viviendas existentes en la localidad de Los Guindos.

Para realizar el diseño de cada sistema de tratamiento de aguas servidas se observó el número mínimo de habitantes por vivienda (cuatro); luego en el número máximo de habitantes (220); y finalmente se calculó el número intermedio de personas.

5.2.1. Primera escala poblacional

Como primera escala se estableció un sistema de tratamiento para una vivienda, es decir, cuatro personas. Se estableció esta cantidad de personas tomando en consideración que es la cantidad mínima de personas, en términos de N° de viviendas, en la que se puede aplicar el sistema. También se eligió la cantidad de personas equivalente una vivienda como primera escala a modo de poder hacer equivalente los distintos diseños, pudiendo establecer una comparación entre escalas.

5.2.2. Segunda escala poblacional

Como se mencionaba anteriormente, la segunda escala fue la última en ser determinada, debido a que se buscó un número intermedio de personas, de esta forma, para esta escala se diseñó un sistema que permita aproximadamente a la mitad de la población.

N° total de habitantes: $220/2=110$ habitantes.

Para trabajar con un número más cómodo, se estableció por aproximación a la centena, u valor de 100 personas para esta escala poblacional.

5.2.3. Tercera escala poblacional

Con la finalidad de conocer cuáles serían los costos de implementación de un sistema de tratamiento de aguas servidas que beneficia a la totalidad de los habitantes de Los Guindos, al contrario de la primera escala, esta tercera escala (o escala mayor) tendría un alcance del total de la población prevista, es decir, las 220 personas (o 58 viviendas) que conforman la comunidad de Los Guindos, comuna de Melipilla.

En síntesis, se diseñaron 3 escalas poblacionales, para cuatro, cien y doscientas veinte personas, respectivamente. Estas escalas permiten compararen cada propuesta la factibilidad, viabilidad, eficiencia y sustentabilidad del tratamiento de aguas servidas. No es lo mismo tratar aguas provenientes de 220 personas en 58 humedales de la primera escala, lo cual implicaría que cada vivienda tuviera el espacio necesario, que en 2 humedales de la segunda escala o en sólo 1 de la tercera.

Cabe señalar que, para la instalación e implementación del sistema de tratamiento de aguas servidas, de acuerdo con la propuesta de la primera escala poblacional se necesitaría un espacio de terreno en cada vivienda.

5.3. DISEÑO DE SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS PARA CADA ESCALA POBLACIONAL

Antes de presentar los resultados obtenidos, es importante volver a mencionar la eficiencia de tratamiento de la tecnología aplicada en los distintos diseños, debido a que es el rendimiento teórico que se asumió para el sistema de depuración de aguas. En la tabla 6.1 se muestra el porcentaje (%) de remoción para cada parámetro seleccionado:

Tabla 5.1: Eficiencia de eliminación en tratamiento de aguas servidas.

Vera (2012); Vymazal (2010)

Parámetro	HC Flujo subsuperficial
Sólidos Suspendidos Totales (%)	70-95
DBO5 (%)	70-95
Demanda Química de Oxígeno (%)	50-90
Nitrógeno Total (%)	40-60
Fósforo Total (%)	20-60
Coliformes Fecales (Unid Log)	1-3

También es importante mencionar que en la actualidad no existe una normativa que fije los límites de materia orgánica en términos de DBO5 para la reutilización de aguas tratadas en riego, sin embargo, usando de referencia estándares internacionales, se puede determinar que para utilizar las aguas servidas tratadas es necesario un proceso de filtración, tratamiento secundario y desinfección. Además, es necesario que el cultivo no tenga contacto con el agua de riego, que tenga menos de 1000 coliformes fecales/100 ml y se recomienda una DBO5 menor a 30 mg/l, siendo estos los parámetros los determinantes en los diseños de sistemas de tratamiento.

Es necesario aclarar que todos los cálculos realizados en este trabajo se encuentran en el Anexo 2, desde donde se extraen los datos de partida para el diseño de los distintos Humedales construidos.

5.3.1. Primera escala de diseño

DATOS		UM
Población	4	Habitantes
Caudal ingreso	0,48	m ³ /d
Remoción Pretratamiento	0,7	
Consumo por persona	150	l/hab/d
Carga orgánica	140	gDBO5/d
Concentración de DBO	291,6666667	mg/l
Nº Tanques	3	
Constante superficial (Ka)	25	m/año
Coeficiente de fondo (C*)	10	mg/l
Concentración de DBO5 Efluente	29	mg/l
Profundidad	0,6	m
Relación L/W	2	
TRH	13,39743412	d
Requerimiento específico de Área superficial	7,655676638	m ² /hab
Nº de plantas	92	

5.3.1.1. Superficie total.

$$\frac{C - C^*}{C_I - C^*} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k}{p * q}\right)^p}$$

$$A = \frac{p * q}{Kt} \left(\left(\frac{C - C^*}{C_I - C^*} \right)^{\frac{1}{p}} - 1 \right)$$

$$A = \frac{3 * 0,6 * 365}{25} \left(\left(\frac{233,33 - 10}{30 - 10} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right)$$

- $A = 32,46 \text{ m}^2$

5.3.1.2. Relación Largo-Ancho.

Si la relación L: W = 2:1

$$A = L * W$$

$$W = \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)}$$

$$W = \sqrt{\left(\frac{32,46}{2}\right)}$$

- $W \approx 4 \text{ m}$
 - $L = 2W$
 - $L = 2 * 4$
- $L = 8 \text{ m}$

5.3.1.3. Verificaciones.

$$COT = CO / (W * q)$$

- $COT = 69,5 \text{ gDBO5}/(\text{m}^2 * \text{d})$

$$COS = \frac{CO}{A}$$

- $COS = 4,313 \text{ gDBO5}/(\text{m}^2 * \text{d})$

$$CH = \frac{q}{A}$$

- $CH = 18,48 \text{ mm/d}$

5.3.1.4. Sistema de distribución de entrada

El sistema de ingreso del caudal se realizó mediante canales de distribución, a modo de evitar problemas en la distribución del caudal por taponamiento de los orificios de salida que se pueden presentar en un sistema de tuberías. Estos canales de distribución cuentan con dientes, de esta forma se entrega el agua por rebalse, acumulando cualquier sólido de gran tamaño que pueda existir. En las figuras 6.5 y 6.6 se observa un ejemplo de canal de distribución con dientes.



Figura 5.5: Canal de distribución de caudal PTAS Verdú

Fuente: Vera, 2021



Figura 5.6: Sistema de Dientes de filtrado de la PTAS de Verdú

Fuente: Vera, 2021

5.3.1.5. Zona de distribución de entrada.

La zona de distribución de entrada corresponde la primera zona del humedal. Se seleccionó para el diseño de esta zona del sistema un material de relleno compuesto por cantos rodados de entre 40 y 80 mm de tamaño. La zona de distribución de entrada tiene un largo de 1 m, sin embargo, la pared vertical inicial del humedal posee una inclinación, haciendo que se forme un ángulo de 101° con respecto al fondo del humedal. (EPA,2000)

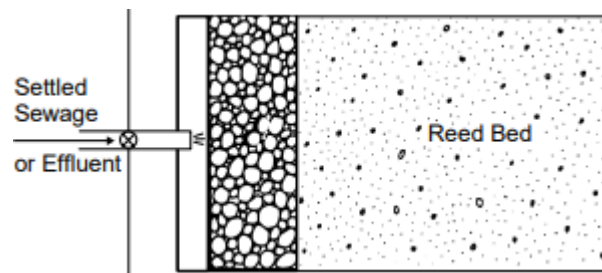


Figura 5.7: Primera sección de un HCSS vista desde arriba

Fuente: EPA, 2000

5.3.1.6. Impermeabilidad.

Para la impermeabilización del sistema se optó por una lámina de HDPE (polietileno de alta densidad) con una medida de 1 mm de grosor aproximadamente. Debido al alto costo de este material, se protegen ambas caras de la lámina con un geotextil de 160 g/m^2 . Además, el diseño contempla una zanja perimetral de 20-30 cm de profundidad en donde los bordes de la lámina deben estar tapados con el material de la zanja a modo de asegurar su estabilidad y estiramiento. A futuro, en caso de tener que hacer alguna intervención a la lámina, se recomienda que su sellado sea con calor (termosoldado).



Figura 5.8: Lámina de HDPE instalada usando zanja perimetral

Fuente: Vera, 2021



Figura 5.9: Lámina dispuesta siendo cubierta con geotextil.

Fuente: Vera, 2021

5.3.1.7. Medio principal.

El medio principal está compuesto por cantos rodados de menor tamaño que en las zonas de entrada y salida del humedal, utilizando una medida menor a 25 mm.

Según la literatura, la primera área de tratamiento ocupa aproximadamente el 30% de la superficie total, mientras que la segunda área realiza la mayor parte del tratamiento. La zona final de tratamiento ocupa el 70% restante del área con pocos cambios en la conductividad hidráulica.

5.3.1.8. *Plantas.*

Las plantas hidrófitas son un elemento de gran importancia dentro de los HC, debido a que son el factor distintivo de esta tecnología. Si bien las plantas como tal no aportan en mayor medida a la depuración del agua, ya que su toma de nutrientes es del rango de 10-20% del total, su aporte principal en el sistema es generar medio para la proliferación microbiana en sus raíces. La intervención de bacterias facultativas y anaeróbicas adheridas a la superficie de las plantas y los detritos del medio de relleno del humedal reducen la materia orgánica por conversión biológica.

Para la selección de plantas se privilegió el criterio de origen de la especie a preferir, por esta razón, se seleccionó la especie “*Schoenoplectus californicus*”, la cual es nativa de la zona central de Chile y, por lo tanto, se asegura una climatización eficiente a largo plazo, aportando a la vida útil (20 años) del sistema de tratamiento. En caso de que no se encuentre esta especie en viveros cercanos, se puede usar alguna otra especie adaptada a condiciones climáticas similares a la zona de Los Guindos, comuna de Melipilla, como, por ejemplo, *Juncus effusus* L. (Totorá).

De acuerdo con la revisión bibliográfica, se recomendó una disposición ideal de las plantas entre 3-4 plantas/m². Por lo tanto, el número total de plantas para este sistema fue de 89 individuos.

5.3.1.9. *Sistema de recolección y drenaje.*

El sistema de recolección está formado por el mismo material de relleno que la zona de distribución de entrada, es decir, con cantos rodado que tuvieran entre 40 y 60 mm de diámetro. También se incluyó un sistema de tuberías de recolección en “U” en la pared final del humedal, buscando asegurar una recolección uniforme del agua. La pared final del HC, la cual al igual que la inicial, cuenta con una inclinación hacia afuera, formando un ángulo de 104°, a modo de calzar con la pendiente del fondo. En la parte final del humedal se encontraba una cámara de salida la cual posee un sistema de tuberías flexible con un gancho, de tal modo que el extremo de la tubería se pueda subir y bajar, regulando el nivel del agua dentro del humedal.

A continuación, se muestra la figura 6.10 con el diagrama del Humedal construido diseñado para la primera escala:

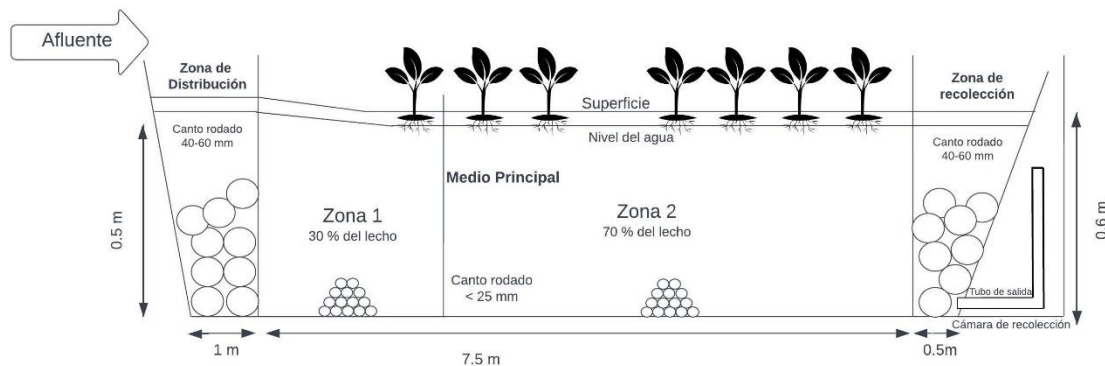


Figura 5.10: Diagrama del HC correspondiente a la primera escala.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.1.10. Desinfección

El sistema de desinfección para esta escala consistió en una estructura de canal abierto que funciona de manera gravitacional. La esencia de este es conducir el flujo de agua proveniente del humedal a través de una cámara de irradiación o canal de contacto, en cuyo interior se ubican varios módulos de lámparas generadoras de luz UV.

El sistema completo se compuso de un canal abierto de concreto, un alineador de flujo, una cámara de irradiación ultravioleta y un vertedero de descarga.

1. El Alineador de flujo ubicado a la entrada recibe el flujo de agua a tratar. Este aparato controla el flujo de agua para eliminar turbulencias y torbellinos y lograr un perfil hidráulico adecuado para el tratamiento ultravioleta.
2. Luego, el agua entrará en las Cámaras de irradiación ultravioleta, donde se encuentran las lámparas ultravioletas.
3. Finalmente, el caudal de agua se descargará a través de un vertedero. Este diseño permite mantener las lámparas UV sumergidas en todo momento y mantener el nivel de agua dentro de rangos controlados, evitando las variaciones en el caudal.

A continuación, se observa la figura 6.11 donde se representa el sistema de desinfección mediante s

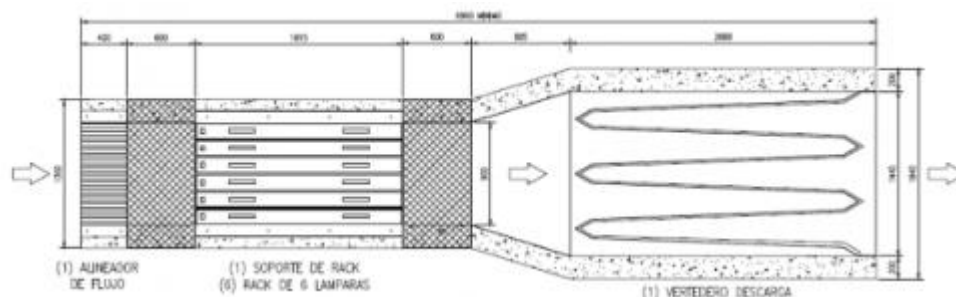


Figura 5.11: Representación del sistema de desinfección, mediante "Canales abiertos UV"

Fuente: Biolight SA

5.3.1.11. Operación y mantenimiento.

Puesta en marcha:

Como se mencionó anteriormente, la mayor parte del tratamiento es llevado a cabo por acción microbiana de todo tipo, por lo tanto, en el arranque del sistema es necesario generar un incremento de la población bacteriana durante un periodo de 3 a 6 meses para un funcionamiento adecuado del sistema. Este aumento de la población se relaciona directamente con el desarrollo de las plantas en el medio, es por esto que el proceso de puesta en marcha del sistema se centra en el establecimiento total de las plantas en el sistema.

Una vez puesta la vegetación en el medio se debe saturar hasta el nivel de la raíz de la planta durante 2 o 3 días, es recomendable no usar agua residual. Luego se debe reducir el nivel de agua progresivamente con la intención de generar colonización radicular. Finalmente se debe comenzar a aplicar agua residual (se recomienda empezar en mezcla con agua al 50%) e ir aumentando la proporción de forma gradual hasta cortar el suministro de agua. El tiempo total de este proceso dura entre 1 a 2 semanas.

Consideraciones relacionadas a esta etapa:

- El establecimiento de las plantas ocurre normalmente después del primer ciclo primavera-verano.
- Eliminar manualmente malezas que puedan surgir.
- Proteger la vegetación en caso de saber sobre la existencia de animales que puedan utilizarlas como alimento.
- No utilizar suelo orgánico, se recomienda plantar a raíz desnuda.

Tareas de autoinspección:

Las labores necesarias para la operación y mantenimiento del sistema diseñado para una escala de 4 personas se recopilaron de acuerdo a la Norma alemana (DWA-A 262E, 2017). La particularidad de esta escala fue que, al tratarse de un sistema para una vivienda en particular, estas tareas pueden ser ejecutadas por los usuarios. A continuación, se presenta la tabla 6.2 con las actividades necesarias para cada componente del sistema, al igual que la frecuencia en la que deben ser realizadas:

Tabla 5.2: Tareas de autoinspección para el sistema de tratamiento de la primera escala

Componente	Tarea	Frecuencia mínima	Comentarios
General	Documentar todas las labores en un libro de procedimientos.	Continuo	Mantener documentación de actividades de inspección y mantenimiento.
Pretratamiento	Inspección visual de los niveles de agua, así como de la entrada y salida con la finalidad de detectar anomalías.	Mensual	Revisar posibles fugas o bloqueos sobre el nivel del lodo.
	Eliminación de lodos	Cuando se necesite (acorde al nivel del lodo). Se recomienda una vez al año.	Eliminación de lodo fecal por entidad autorizada para su manejo.
Equipo de bombeo (si existe)	Verificar la capacidad operativa.	Mensual	Documentar en el libro de procedimientos.
Estructura de entrada	Inspección visual de su capacidad operativa.	Mensual	Limpiar si es necesario.
Estructura principal	Inspección de la salud de la vegetación y aparición de encharcamientos.	Mensual	Consultar a especialista.
Estructura efluente	Inspección visual de la capacidad operativa.	Mensual	Limpiar si es necesario.

5.3.2. Segunda escala de diseño

DATOS		UM
Población	100	Habitantes
Caudal ingreso	15	m ³ /d
Remoción Pretratamiento	0,7	
Consumo por persona	150	l/hab/d
Carga orgánica	3500	gDBO5/d
Concentración de DBO	233,3333333	mg/l
Nº Tanques	3	
Constante superficial (Ka)	25	m/año
Coefficiente de fondo (C*)	10	mg/l
Concentración de DBO5 Efluente	29	mg/l
Profundidad	0,8	m
Relación L/W	2	
TRH	16	d
Requerimiento específico de Área superficial	8,368214293	m ² /hab
Nº de plantas	2510	

5.3.2.1. Superficie total.

$$\frac{C - C^*}{C_I - C^*} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k}{p * q}\right)^p}$$

$$A = \frac{p * q}{Kt} \left(\left(\frac{C - C^*}{C_I - C^*} \right)^{\frac{1}{p}} - 1 \right)$$

$$A = \frac{3 * 15 * 365}{25} \left(\left(\frac{233.33 - 10}{30 - 10} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right)$$

- $A = 811,5 \text{ m}^2$

5.3.2.2. Relación Largo-Ancho.

Si la relación L: W = 2:1

$$A = L * W$$

$$W = \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)}$$

$$W = \sqrt{\left(\frac{811,5}{2}\right)}$$

- $W \approx 40 \text{ m}$
 $L = 2W$
 $L = 2 * 40$
- $L = 80 \text{ m}$

5.3.2.3. Verificaciones

$$COT = CO / (W * q)$$

- $COT = 248,22 \text{ gDBO}_5 / (\text{m}^2 * \text{d})$

$$COS = \frac{CO}{A}$$

- $COS = 4,313 \text{ gDBO}_5 / (\text{m}^2 * \text{d})$

$$CH = \frac{q}{A}$$

- $CH = 18,48 \text{ mm/d}$

5.3.2.4. Sistema de distribución de entrada

De manera similar que, en la escala anterior, el sistema de ingreso del caudal se realizó mediante canales de distribución, los cuales cuentan con dientes, de esta forma se entrega el agua por rebalse y acumulando cualquier sólido de gran tamaño que pueda existir. El canal de distribución se dispone a lo ancho del humedal, es decir, abarca un largo de 20 m.

5.3.2.5. Zona de distribución de entrada.

Se seleccionó para el diseño de esta zona del sistema un material de relleno compuesto por cantos rodados de entre 40 y 80 mm de tamaño. La zona de distribución de entrada tendrá un largo de 2 m, sin embargo, la pared vertical inicial del humedal posee una inclinación, haciendo que se forme un ángulo de 101° con respecto al fondo del humedal, de igual manera que en la primera escala.

5.3.2.6. Impermeabilidad.

En cuanto a la impermeabilidad de este diseño, se seleccionaron los mismos elementos que en la primera escala, es decir, utilizar el polietileno de alta densidad termosoldado recubierto en ambas caras por un geotextil de 150 g/m^2 . En esta escala no se contempla la existencia de una zanja perimetral.

5.3.2.7. Medio principal.

El medio principal mantuvo las características de la primera escala, es decir, un material de relleno (Cantos rodados) de menos de 25 mm de diámetro. El medio principal resultó de 37 m de largo por 20 de ancho, manteniendo la pendiente de fondo de entre 1-2%.

5.3.2.8. *Plantas.*

De igual manera que la escala anterior, para la selección de plantas se privilegió el criterio de origen de la especie a preferir, por esta razón, se seleccionó la especie “*Schoenoplectus californicus*”, la cual es nativa de la zona central de Chile y, por lo tanto, se asegura una climatización eficiente a largo plazo, aportando a la vida útil (20 años) del sistema de tratamiento. En caso de que no se encuentre esta especie en viveros cercanos, se podría usar alguna otra especie adaptada a condiciones climáticas similares a la zona de Los Guindos, comuna de Melipilla.

De acuerdo con la revisión bibliográfica, fue recomendable disponer idealmente de plantas entre 3-4 plantas/m². Por lo tanto, el número total de plantas para este sistema será de 2434 individuos.

5.3.2.9. *Sistema de recolección y drenaje.*

El sistema de recolección fue construido con el mismo material de relleno que en la zona de distribución de entrada, es decir, cantos rodados de entre 40 a 60 mm de diámetro. Para garantizar una recolección uniforme del agua, también se incluyó un sistema de tuberías de recolección en forma de "U" en la pared final del humedal. La pared final del HC, al igual que la pared inicial, se inclinó hacia el exterior formando un ángulo de 104° para ajustarse a la pendiente del fondo. En la última parte del humedal se encuentra una cámara de salida que cuenta con un sistema de tuberías flexible con un gancho, el cual tiene la función de permitir regular manualmente el nivel del agua dentro del humedal.

A continuación, se muestra la figura 6.12 con el diagrama del Humedal construido diseñado para la segunda escala:

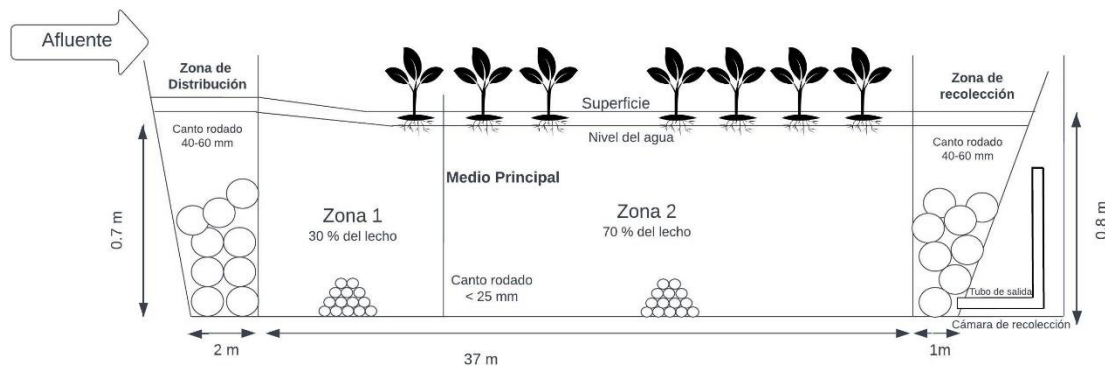


Figura 5.12: Diagrama del Humedal construido para la segunda escala.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.2.10. Operación y mantenimiento.

Puesta en marcha:

De igual forma que en la escala anterior, para el arranque del sistema es necesario generar un incremento de la población bacteriana durante un periodo de 3 a 6 meses para un funcionamiento adecuado del sistema. Este aumento de la población se relaciona directamente con el desarrollo de las plantas en el medio, es por esto que el proceso de puesta en marcha del sistema se centra en el establecimiento total de las plantas en el sistema.

Una vez puesta la vegetación en el medio se debe saturar hasta el nivel de la raíz de la planta durante 2 o 3 días, fue preferible no usar agua residual. Luego se debe reducir el nivel de agua progresivamente con la intención de generar colonización radicular. Finalmente se debe comenzar a aplicar agua residual (se recomienda empezar en mezcla con agua al 50%) e ir aumentando la proporción de forma gradual hasta cortar el suministro de agua. El tiempo total de este proceso dura de 1 a 2 semanas.

Consideraciones relacionadas a esta etapa:

- El establecimiento de las plantas ocurre normalmente después del primer ciclo primavera-verano.
- Eliminar manualmente malezas que puedan surgir.
- Proteger la vegetación en caso de saber sobre la existencia de animales que puedan utilizarlas como alimento.
- No utilizar suelo orgánico, se recomienda plantar a raíz desnuda.

Tareas de inspección:

Las labores necesarias para la operación y mantenimiento del sistema diseñado para una escala de 100 personas que se presentan a continuación se basaron en lo dicho por Tshrintzis (2017). A diferencia de la escala anterior, este sistema requiere un operador para ejecutar las acciones de operación y mantenimiento. A continuación, se presenta la tabla 6.3 con las tareas a realizar por el operador del sistema, al igual que la frecuencia mínima en la que deben se deben ejecutar:

Tabla 5.3:Tareas de inspección para el sistema de tratamiento de la segunda escala

Tarea	Frecuencia mínima
Revisar estructuras de entrada y salida	1-2 días
Revisar/ Limpiar las rejillas, eliminar sólidos acumulados	1-2 días
Revisar las celdas del HC, en busca signos de drenaje deficiente o encharcamientos.	1-2 días
Revisar las celdas del H, en busca de fugas y desbordes.	1-2 días
Revisión de cambios de flujo entre lechos del HC (en caso de corresponder).	1-2 días
Revisión de dispositivos de caudal.	Semanal
Retirar restos de vegetación o residuos en las camas del humedal.	Semanal
Tomar muestras para análisis de calidad del agua	Semanal
Revisar/Repara las paredes del HC	Mensual
Revisar signos de erosión.	Mensual
Verificar/ Controlar la existencia de mosquitos o roedores.	Mensual

Tarea	Frecuencia mínima
Verificar obras de drenaje para la escorrentía pluvial.	Mensual
Verificar la integridad del sistema de impermeabilización del humedal	Mensual
Controlar/Cosechar la vegetación del humedal.	Anual

5.3.3. Tercera escala de diseño

DATOS		UM
Población	220	Habitantes
Caudal ingreso	26,4	m ³ /d
Remoción Pretratamiento	0,7	
Consumo por persona	150	l/hab/d
Carga orgánica	6160	gDBO5/d
Concentración de DBO	233,3333333	mg/l
N° Tanques	2	
Constante superficial (Ka)	25	m/año
Coefficiente de fondo (C*)	10	mg/l
Concentración de DBO5 Efluente	30	mg/l
Profundidad	0,85	m
Relación L/W	1,6	
TRH	15	d
Requerimiento específico de Área superficial	8,205163591	m ² /hab
N° de plantas	5415	

5.3.3.1. Superficie total.

$$\frac{C - C^*}{C_I - C^*} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k}{p * q}\right)^p}$$

$$A = \frac{p * q}{Kt} \left(\left(\frac{C - C^*}{C_I - C^*} \right)^{\frac{1}{p}} - 1 \right)$$

$$A = \frac{3 * 26.4 * 365}{25} \left(\left(\frac{233.33 - 10}{30 - 10} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right)$$

$$A = 1805,14 \text{ m}^2$$

5.3.3.2. Relación Largo-Ancho.

Si la relación L: W = 1,6:1

$$A = L * W$$

$$W = \sqrt{\left(\frac{A}{1,6}\right)}$$

$$W = \sqrt{\left(\frac{1805,14}{1,6}\right)}$$

- $W \approx 34 \text{ m}$
- $L = 1,6 * W$
- $L = 1,6 * 34$
- $L \approx 54 \text{ m}$

5.3.3.3. Verificaciones.

$$COT = CO / (W * q)$$

- $COT = 244,53 \text{ gDBO5}/(m^2 * d)$

$$COS = \frac{CO}{A}$$

- $COS = 3,41 \text{ gDBO5}/(m^2 * d)$

$$CH = \frac{q}{A}$$

- $CH = 14,62 \text{ mm}/d$

5.3.3.4. Sistema de distribución de entrada

El sistema de distribución de entrada se diseñó de manera similar a las escalas anteriores, es decir, mediante un canal abierto con dientes para filtrar los sólidos de gran tamaño presentes en el agua. El canal abierto permite distribuir el volumen en todo el ancho del Humedal, el cual tiene una extensión de 34 m.

5.3.3.5. Zona de distribución de entrada.

La zona de distribución de entrada corresponde la primera zona del humedal. Se seleccionó para el diseño de esta zona del sistema un material de relleno compuesto por cantos rodados de entre 40 y 80 mm de tamaño. La zona de distribución de entrada tuvo un largo de 2,5 m, sin embargo, la pared vertical inicial del humedal poseía una inclinación, haciendo que se formara un ángulo de 101° con respecto al fondo del humedal.

5.3.3.6. Impermeabilidad.

En cuanto a la impermeabilidad de este diseño, se diseñó en base al polietileno de alta densidad termosoldado recubierto en ambas caras por un geotextil de 150 g/m². Al igual que en la segunda escala, no se contempla la existencia de una zanja perimetral.

5.3.3.7. Medio principal.

El medio principal mantuvo las características de las escalas anteriores, es decir, un material de relleno (Cantos rodados) de menos de 25 mm de diámetro. La diferencia se observa en que el medio principal resultó de 50 m de largo por 34 de ancho, manteniendo la pendiente de fondo de entre 1-2%.

5.3.3.8. Plantas.

Para la selección de plantas se privilegió el criterio de origen de la especie a elegir, por esta razón, se prefirió la especie “*Schoenoplectus californicus*”, la cual es nativa de la zona central de Chile y, por lo tanto, se aseguraba una climatización eficiente a largo plazo, aportando a la vida útil (20 años) del sistema de tratamiento. En caso de que no se encuentre esta especie en viveros cercanos, se puede usar alguna otra especie adaptada a condiciones climáticas similares a la zona de Los Guindos, comuna de Melipilla.

De acuerdo con la revisión bibliográfica, es preferible disponer idealmente de plantas entre 3-4 plantas/m². Por lo tanto, el número total de plantas para este sistema fue de 5415 individuos.

5.3.3.9. Sistema de recolección y drenaje.

Siguiendo las características de las escalas anteriores, el sistema de recolección está formado por cantos rodado de entre 40 y 60 mm de diámetro. También se incluyó un sistema de tuberías de recolección en “U” en la parte final de esta zona para asegurar una recolección uniforme del agua. La pared final del HC, al igual que la pared inicial, se inclina hacia el exterior formando un ángulo de 104° para ajustarse a la pendiente del fondo. En la parte final del humedal se encuentra una cámara de salida la cual posee un sistema de tuberías flexible con un gancho, de tal modo que el extremo de la tubería se pueda subir y bajar, regulando el nivel del agua dentro del humedal.

A continuación, se muestra la figura 6.13 con el diagrama del Humedal construido diseñado para la tercera escala:

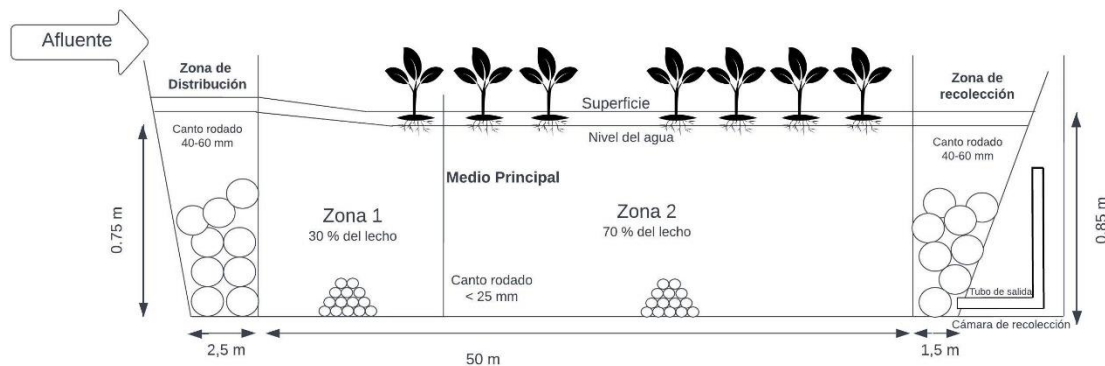


Figura 5.13: Diagrama del Humedal construido diseñado para la tercera escala.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.10. Operación y mantenimiento.

Puesta en marcha:

Como se mencionó anteriormente, la mayor parte del tratamiento es llevado a cabo por acción microbiana, por lo tanto, en el arranque del sistema es necesario generar un incremento de la población bacteriana durante un periodo de 3 a 6 meses para un funcionamiento adecuado del sistema. Este aumento de la población se relaciona directamente con el desarrollo de las plantas en el medio, es por esto que el proceso de puesta en marcha del sistema se centra en el establecimiento total de las plantas en el sistema.

Una vez puesta la vegetación en el medio se debe saturar hasta el nivel de la raíz de la planta durante 2 o 3 días, es recomendable no usar agua residual. Luego se debe reducir el nivel de agua progresivamente con la intención de generar colonización radicular. Finalmente se debe comenzar a aplicar agua residual (comenzando en mezcla con agua al 50%) y luego aumentando la proporción de forma gradual hasta cortar el suministro de agua. El tiempo total de este proceso dura entre 1 a 2 semanas.

Consideraciones relacionadas a esta etapa:

- El establecimiento de las plantas ocurre normalmente después del primer ciclo primavera-verano.
- Eliminar manualmente malezas que puedan surgir.

- Proteger la vegetación en caso de saber sobre la existencia de animales que puedan utilizarlas como alimento.
- No utilizar suelo orgánico, se recomienda plantar a raíz desnuda.

Tareas de inspección:

Las labores necesarias para la operación y mantenimiento del sistema diseñado para una escala de 220 personas, al igual que en la escala anterior, se basaron en lo dicho por Tslhrintzis (2017). La operación de este sistema requiere personal para ejecutar las acciones de operación y mantenimiento. A continuación, se presenta la tabla 6.4 con las tareas a realizar por el operador del sistema, al igual que la frecuencia mínima en la que deben se deben ejecutar:

Tabla 5.4: Tareas de inspección para el sistema de tratamiento de la tercera escala

Tarea	Frecuencia mínima
Revisar estructuras de entrada y salida	1-2 días
Revisar/ Limpiar las rejillas, eliminar sólidos acumulados	1-2 días
Revisar las celdas del HC, en busca signos de drenaje deficiente o encharcamientos.	1-2 días
Revisar las celdas del H, en busca de fugas y desbordes.	1-2 días
Revisión de cambios de flujo entre lechos del HC (en caso de corresponder).	1-2 días
Revisión de dispositivos de caudal.	Semanal
Retirar restos de vegetación o residuos en las camas del humedal.	Semanal
Tomar muestras para análisis de calidad del agua	Semanal
Revisar/Repara las paredes del HC	Mensual
Revisar signos de erosión.	Mensual

Tarea	Frecuencia mínima
Verificar/ Controlar la existencia de mosquitos o roedores.	Mensual
Verificar obras de drenaje para la escorrentía pluvial.	Mensual
Verificar la integridad del sistema de impermeabilización del humedal	Mensual
Controlar/Cosechar la vegetación del humedal.	Anual

5.3.4. Monitoreo del sistema.

El monitoreo del sistema en todas las escalas se realizó fijando tres 3 putos de monitoreo, los cuales se sitúan en el afluente del HC, a su salida y en el efluente, luego de la etapa de desinfección. Los parámetros seleccionados para medir son los siguientes:

- pH
- Potencial óxido-reducción
- Temperatura
- DBO5
- Sólidos suspendidos totales
- Nutrientes (Nitrato, fosfato)
- Patógenos (Coliformes fecales)

Finalmente, a continuación, se muestra la figura 6.14 donde se exponen los distintos componentes que conforman el sistema de tratamiento general:



Figura 5.14: Representación de los elementos generales del sistema de tratamiento.

Fuente: Elaboración propia.

5.4. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN DE CADA SISTEMA DE TRAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS DISEÑADO.

A continuación, se presenta la estimación de los costos de inversión más importantes de cada sistema de tratamiento asociado a una cada escala.

5.4.1. Primera escala

MATERIALES	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO
Material de relleno 40-60 mm	3 m ³	\$8.900 + IVA
Material de relleno < 25 mm	18 m ³	\$19.900 + IVA
Tuberías de desagüe 6"	1	\$560.000
Geotextil (4m x 25m)	1	\$81.700 + IVA
Plantas	89	\$ 7.000
Hormigón (m ³)	1	\$54.620
Mano de obra	20 hh	\$4.000
Movimiento de tierra	20 m ³	15 m ³ /h
Lámina HDPE 7 m x 25 m	1	\$1.099.934 + IVA
Tanque de almacenamiento 3000L	1	\$315.897

5.4.2. Segunda escala

MATERIALES	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO
Material de relleno 40-60 mm	42 m ³	\$8.900 +IVA
Material de relleno < 25 mm	518 m ³	\$19.900 + IVA
Tuberías de desagüe	1	\$560.000
Geotextil (4m x 75 m)	3	\$ 242.315 + IVA
Plantas	2434	\$7.000
Hormigón (m ³)	4	\$54.620
Mano de obra	45 hh	\$4.000
Movimiento de tierra	640 m ³	15 m ³ /h
Lámina HDPE (7 m x 100 m)	1	\$2.956.986 + IVA
Lámina HDPE (7 m x 25 m)	1	\$1.099.934 + IVA
Vías de acceso	24.8 m ³	\$11.125
Estanque de acumulación 20 m ³	1	\$2.329.901

5.4.3. Tercera escala

MATERIALES	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO
Material de relleno 40-60 mm	102 m ³	\$8.900 + IVA
Material de relleno < 25 mm	1.190 m ³	\$19.900 + IVA
Tuberías de desagüe	1	\$560.000
Geotextil (4m x 75 m)	6	\$242.315 + IVA
Plantas	5415	\$7.000
Hormigón (m ³)	6.8	\$54.620
Mano de obra	60 hh	\$4.000
Movimiento de tierra	1.469 m ³	15 m ³ /h
Lámina HDPE (7m x 150m)	1	\$4.435.479 +IVA
Lámina HDPE (7m x 100m)	1	\$2.956.986 +IVA
Lámina HDPE (7m x 25m)	1	\$1.099.934 +IVA
Vías de acceso	36 m ³	\$11.125
Estanque de acumulación 40 m ³	1	\$4.774.875

5.4.4. Comparación entre escalas

A continuación, se presenta la figura 6.15, donde se comparan tanto los costos totales de inversión de cada diseño como el costo de inversión equivalente a cada usuario:

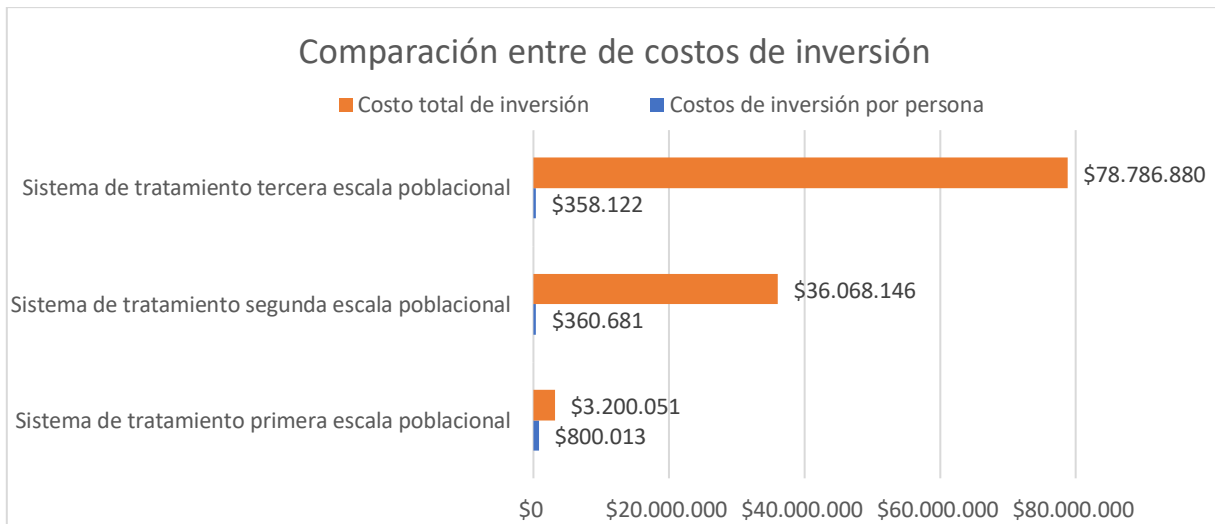


Figura 5.15: Comparación de costos de inversión entre las distintas escalas

6. DISCUSIÓN

Habiendo finalizado este trabajo, el principal resultado sugiere que, para la comunidad de Los Guindos, la opción más factible son dos Humedales construidos de 40 m de largo x 20 m de ancho y 0,7 m de profundidad. Este resultado se generó en base a las características de la zona (espacio disponible y disposición de las viviendas), la superficie de los sistemas de tratamiento y a la estimación de los principales costos de inversión por persona. Este resultado da cuenta de que no siempre es más conveniente solamente un sistema que trate aguas servidas del total de la población objetivo.

Luego de analizar los principales resultados obtenidos por este trabajo se observó que la importancia de la determinación de escalas es permitir establecer una equivalencia entre los tres Humedales construidos, ya que, entregó las primeras variables de diseño, puesto que establecer tres números distintos de usuarios para un sistema implica la definición de los tres caudales de diseño, los cuales fueron el dato de partida para el diseño de los HC. Dicha equivalencia se explica en que un HC de la tercera escala (220 personas) es equivalente a 55 humedales de la primera escala (4 personas). Por otra parte, si esta equivalencia la vemos desde la perspectiva del área, construir 25 HC de 4 m de ancho x 8 m de largo, se obtendría una superficie total similar a un HC de la segunda escala poblacional. Lo anterior indica dos elementos comparativos entre escalas, el N° de usuarios y la superficie del sistema de tratamiento, generando una relación entre cada escala, utilizando de referencia el HC de 4 m de ancho x 8 m de largo. Lo anteriormente mencionado, se expresa a continuación en la tabla 7.1:

Tabla 6.1: Equivalencia de cada humedal construido en términos del HC perteneciente a la primera escala

Escala poblacional	Área del HC	Equivalencia en HC de la primera escala	Número de HC para cubrir al total de población	Área necesaria para cubrir a la población total
4 personas	32,46 m ²	1	55	1.786 m ²
100 personas	811,5 m ²	25	2	1.623 m ²
220 personas	1805,13 m ²	55	1	1.806 m ²

Los resultados de los diseños de los sistemas de tratamiento principalmente entregaron las dimensiones espaciales necesarias para cada escala poblacional, primero mediante la determinación del área total de cada HC y luego con el dimensionamiento más detallado, resultando interesante que las variables relación largo-ancho y profundidad fueran las más relevantes, no solo en la obtención del largo y ancho del humedal, sino que también tienen una fuerte influencia en las ecuaciones de verificación del funcionamiento del sistema. Ligado a los factores que influyen el diseño del sistema de tratamiento está el pretratamiento utilizado, en

este caso se optó por aprovechar las fosas sépticas existentes en las viviendas, las cuales para efectos de este trabajo contaron con una eficiencia de remoción de Carga orgánica y Sólidos suspendidos totales de un 30 %. Al comparar los resultados del dimensionamiento del HC de la primera escala con un diseño propuesto en la Guía para el diseño y construcción de un Humedal construido con flujos subsuperficiales de la U.S. EPA de Agosto de 1993 se observó que para tratar las aguas servidas provenientes de una vivienda se necesitó una superficie total de 30 metros cuadrados aproximadamente en el sistema diseñado en el presente trabajo, mientras que en el ejercicio de EPA se obtuvo un área total de 56,2 metros cuadrados, dicha diferencia se explica principalmente en la metodología de determinación de la superficie, ya que en este trabajo se utilizó el Modelo P*K*C, mientras que en la guía de la EPA se calculó mediante la Ecuación de eliminación de DBO de primer orden. Otros datos que varían entre el diseño elaborado y el expuesto en la guía en cuestión son aporte de carga orgánica por persona al sistema y la cantidad de aguas servidas generadas por persona al día, los cuales en ambos casos resultaron mayores que los valores utilizados en el diseño del HC correspondiente a la primera escala poblacional.

La estimación de costos de inversión se hizo en términos de los costos totales del sistema de tratamiento y de los costos por persona, siendo este último un factor determinante en la comparación entre escalas. La estimación de costos de inversión por persona de cada escala entregó como resultado destacado la similitud entre los valores determinados para la segunda y tercera escala, siendo económicamente mucho más viables que la escala de una sola vivienda (ver figura 6.15). Estos resultados cobran gran importancia a la hora de comparar escalas, ya que, como se mencionaba anteriormente, se desprenden dos elementos comparativos, los usuarios y el espacio necesario para la propuesta, siendo los costos de inversión por persona la expresión del factor “Usuarios”, mientras que los resultados del diseño de los sistemas de tratamiento se encargan de representar el criterio de “Superficie necesaria”.

Como análisis de la comparación entre escalas, se desprende principalmente que, por un tema de costos, se descarta el diseño de la primera escala, ya que, resultó de más del doble por persona que en las restantes dos escalas. Por otra parte, centrándose en el criterio de superficie necesaria para la propuesta, resulta más viable y cómodo separar el tratamiento, debido a que la disponibilidad de espacio en la zona de estudio complica concentrar todo el tratamiento en un solo sistema, ya que, no existen terrenos cercanos con la disponibilidad espacial para establecer este sistema de tratamiento, al realizarlo en zonas aledañas, los costos de la canalización y el movimiento de las aguas servidas se verían incrementados. Es por esto que la segunda escala poblacional asoma como la alternativa más viable considerando los elementos (criterios) de comparación utilizados, tal como se menciona al inicio de este capítulo. El hecho que la escala intermedia sea la más factible implica que podría existir un límite en la agrupación de población en un solo sistema, más tratándose de un número bajo de usuarios en comparación a otros autores, en donde se diseñaron sistemas de tratamiento de aguas servidas, mediante HC, para poblaciones significativamente mayores a las abordadas por este trabajo. Esta conclusión está

limitada por los aspectos que escapan a los alcances de este trabajo, por ejemplo, elementos como el sistema de desinfección, que no fue incluido en la estimación de costos de inversión.

Por otra parte, el hecho de que el sistema fuera diseñado para recibir aguas servidas (aguas grises + aguas negras) y entregar, luego del tratamiento, una calidad apta para el riego en los parámetros expuestos en el punto 6.3.4 puede haber afectado la dimensión, debido a que un sistema que requiera entregar una calidad menor de agua tratada no necesitará de tanta superficie ni profundidad, pudiendo configurarse de manera distinta a los HC diseñados en este trabajo.

Es necesario dejar en claro que es posible que las dimensiones de los distintos humedales puedan variar en caso de diseñarse considerando otros elementos, a diferencia del presente trabajo, por ejemplo, incluir la Escalabilidad del sistema, ya que, en algunos casos, puede ser necesario expandir o escalar el sistema de humedal para satisfacer las necesidades futuras.

Finalmente, una última sugerencia para nuevas investigaciones ligadas al tema sería determinar sobre las limitaciones y beneficios de las distintas tecnologías de tratamiento no convencionales (STNC) en términos de la población a la cual pueden tratar sus aguas servidas, debido a que no existe claridad sobre cuál es el caudal máximo que puede recibir un STNC en zonas rurales de nuestro país, cualquiera sea la tecnología, sin tener que recurrir a las tecnologías convencionales, las cuales sí están hechas para grandes caudales.

7. CONCLUSIÓN

En este trabajo, se elaboraron tres propuestas para el tratamiento de aguas servidas, mediante humedales construidos, de las aguas servidas generadas por la comunidad de Los Guindos, comuna de Melipilla, entregando agua tratada con la calidad suficiente para ser reutilizada para riego agrícola. Estos sistemas se diseñaron utilizando la tecnología “Humedales Construidos”, luego se realizó una comparación entre las distintas escalas, buscando la mejor alternativa para tratar las aguas residuales generadas por el total de la comunidad, es decir, 220 personas.

En primer lugar, se caracterizó a la comunidad de Los Guindo en función del impacto de la sequía en la zona y en la cantidad de aguas servidas generadas por la comunidad, concluyendo que tanto en términos de precipitaciones, como de caudales se ha registrado una baja en ambos parámetros, según las estaciones de monitoreo cercanas. Por otra parte, la estimación de las aguas servidas generadas por la comunidad resultó en un total de $26,4 \text{ m}^3/\text{d}$. En síntesis, se puede afirmar que se logró cumplir con el objetivo específico planteado.

La selección de las distintas escalas poblacionales logró distribuir de manera equilibrada a la población según los distintos sistemas de tratamiento, obteniendo en una primera escala un HC que trate las aguas servidas de una vivienda, siendo la cantidad mínima de personas a las cuales se puede aplicar esta técnica para que tenga sentido. La segunda escala posee un HC que cuenta con 100 usuarios a modo de evaluar un tratamiento a la mitad de la población total. Finalmente, para evaluar para evaluar la opción de un HC que sirva para tratar el total de aguas servidas generadas. Estos resultados cumplen con el objetivo de establecer las tres escalas poblacionales a las cuales se les diseñó un sistema de tratamiento de aguas servidas mediante humedales construidos. El logro de este objetivo específico permitió establecer comparación entre alternativas que buscan satisfacer una misma finalidad (tratar las aguas servidas del total de la población de la comunidad de Los Guindos, Melipilla), en busca de la mejor opción desde el punto de vista espacial y de costos de inversión, agregando un carácter nuevo a las investigaciones ligadas al mundo de los humedales construidos.

Aunque existen HC diseñados para poblaciones mucho mayores (+2000 habitantes) que la comunidad total de Los Guindos, donde los sistemas, en su mayoría, no abordan aspectos relacionados con la reutilización de las aguas tratadas en el sistema, a diferencia de la presente propuesta. Después de establecer los diseños de HC para cada escala poblacional, el análisis concluyó que la segunda escala población, la cual se relaciona con una población usuaria de 100 personas resultó ser una opción más viable desde un punto de vista de la relación precio-espacio necesario, seguido por la tercera escala (220 personas), la cual, si bien requiere más espacio, presenta un valor de inversión por persona muy similar a la escala más conveniente. Finalmente, la escala “menos conveniente” resultó ser el sistema para viviendas individuales (4 personas), en donde el costo de inversión por persona asciende casi al doble que en las otras propuestas.

A continuación, se presenta la tabla 8.1 en donde se observa la comparación de las tres escalas poblacionales en términos del área total y de los costos de inversión por persona:

Tabla 7.1: Comparación de las tres escalas poblacionales en términos del área total y de los costos de inversión por persona

Escala poblacional	Área necesaria para cubrir a la población total	Costo por persona
4 personas	1.786 m ²	\$800.013
100 personas	1.623 m ²	\$360.681
220 personas	1.806 m ²	\$358.122

Luego de logrados cada uno de los objetivos específicos, con sus tareas asociadas, se considera que se cumplió satisfactoriamente con el objetivo general de este trabajo, obteniendo resultados que satisfacen los planteamientos iniciales, presentando tres sistemas de tratamiento, mediante la técnica de “Humedales Construidos”, implementados en la localidad de Los Guindos. Además, estas tres propuestas fueron comparadas entre sí, resultando la segunda escala como la más viable, es decir, de acuerdo con lo expuesto en este trabajo, la manera más eficiente de tratar las aguas servidas generadas por la comunidad de Los Guindos es mediante dos HC de 20 metros de ancho, 40 metros de largo y una profundidad de 0,8 metros, lo cual es correspondiente a aplicar dos veces el HC de la segunda escala de diseño.

El presente trabajo representa un antecedente para la aplicación de esta técnica en la zona central rural del país, específicamente en cuanto a la reutilización de las aguas tratadas para riego y cultivos agrícolas, lo que contribuye a enfrentar la crisis hídrica de la zona centro-norte de Chile. Se recomienda que, en futuras investigaciones relacionadas al diseño de sistemas de tratamiento, mediante humedales construidos, se preste especial atención a la normativa vigente que pueda existir después del tiempo en el que fue realizada esta investigación, debido a que, en la actualidad, la normativa relacionada a la reutilización de las aguas tratadas, en términos de DBO₅, es insuficiente. Otra recomendación sería evaluar la posibilidad de implementar un sistema híbrido (dos tipos de HC en un mismo sistema de tratamiento) a modo de abarcar el tratamiento primario, secundario y la desinfección sin la necesidad de implementar algún otro sistema para alcanzar los valores de coliformes fecales exigidos por la normativa.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Rivas D. López and G. Vidal. (2017). Life-cycle greenhouse gas emissions assessment and extended exergy accounting of a horizontal-flow constructed wetland for municipal wastewater treatment: A case study in Chile. *Ecol. Indicators* 74: 130-139.
- Banco Mundial. (2021). Chile Rural Brief 2021. Washington, DC: Banco Mundial. Recuperado de <https://documents1.worldbank.org/curated/en/193131621327775848/pdf/Chile-Informe-Rural-2021.pdf>.
- Cisternas, M., y González, M. (2019). Calidad del agua en la cuenca del río Rapel, Chile central. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 76(2), 183-194.
- Cui, L., Li, Y., y Li, Y. (2019). Design principles and application of constructed wetlands for wastewater treatment in rural areas. *Journal of Environmental Management*, 238, 210-219.
- CR2. (2015). La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Informe a la Nación [en línea]. Centro de Ciencia del el Clima y la Resiliencia (CR)2, Chile. Disponible en: <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf> [Consultado el 26 de abril de 2023].
- Cui, L., Li, Y., Xiong, Y., y Li, Y. (2018). Cost-benefit analysis of constructed wetlands for rural domestic wastewater treatment and reuse in China. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1100-1108.
- Donoso, G., C. Calderón y M. Silva. (2015). Informe final de evaluación. Infraestructura hidráulica de agua potable rural (APR) [en línea]. Dirección de Presupuestos, Chile. Disponible en: http://www.dipres.gob.cl/595/articles-141243_informe_final.pdf [Consultado el 02 de mayo del 2023].
- García, J., y Bécares, E. (2011). Tratamiento de aguas residuales mediante humedales construidos: una revisión. *Ingeniería del Agua*, 18(1), 3-18.
- García, J., y Bécares, E. (2011). Economic analysis of constructed wetlands for wastewater treatment: a review. *Water Science and Technology*, 64(11), 2183-2190.
- Hofste, R. W. (s. f.). 17 Countries, Home to One-Quarter of the World's Population, Face Extremely High Water Stress. World Resources Institute. Disponible en: <https://www.wri.org/> [Consultado el 04 de mayo 2023]
- I. Municipalidad de Melipilla. Caracterización communal (2015.) Plan de Desarrollo Comunal de la comuna de Melipilla 2015 -2019. Melipilla: Autor
- I. Municipalidad de Melipilla. Caracterización communal (2022.) Plan de Desarrollo Comunal por el Buen Vivir 2022 -2026. Melipilla: Autor
- INE (Chile). (2018). Síntesis de resultados Censo 2017. Instituto Nacional de Estadísticas. Santiago, Chile.

BIBLIOGRAFÍA

- López-López, E., y Vidal, G. (2018). Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales construidos: una revisión. *Ingeniería del Agua*, 22(1), 57-72.
- Martínez, M.L. (2018). Radiografía del agua: brecha y riesgo hídrico en Chile. *Escenarios Hídricos 2030*. Santiago, Chile.
- Mateo-Sagasta, M. (2017). Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe. Estado, principios y necesidades. FAO. Santiago, Chile.
- Sánchez, S. (2019). Análisis de la sequía en la Región Metropolitana de Santiago de Chile: una revisión. *Revista de Geografía Norte Grande*, 73, 61-79.
- SUBDERE (Chile). (2018). Estudio de soluciones sanitarias para el sector rural. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo. Santiago, Chile.
- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) (2018). Informe anual sobre la calidad de los servicios sanitarios en Chile. Recuperado de https://www.siss.gob.cl/594/articles-43385_doc_pdf.pdf
- Törey, S. (2018). Claves para la gestión de aguas residuales rurales. Primera planta de reúso de aguas tratadas en la Región de Coquimbo, una experiencia replicable. Fundación Chile. Santiago, Chile.
- Vera, I. (2021). Diseño y cálculos asociados en Humedales construidos subsuperficiales. Vera, I. (Ed), *Curso Corto Introducción al Diseño y Construcción de Humedales Construidos para Depuración*. Centro Humedales Río Cruces.
- Vidal, G. y F. Araya. (2014). Las aguas servidas y su depuración en zonas rurales: situación actual y desafíos. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
- Vidal, G. y S. Hormazábal. (2018). *Humedales construidos: diseño y operación*. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
- Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: a review. *Water*, 3(4), 1131-1165.
- Vymazal, J. (2010). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Agua*, 2 (3), 530–549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>- Vymazal, J. (2018). Constructed wetlands for wastewater treatment: ten years of experience in the Czech Republic. *Ecological Engineering*, 120, 157-165.
- Wang, X., Liu, Y., y Zhang, X. (2020). Optimization of constructed wetland design for treating domestic wastewater in rural areas. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(6), 5992-6002.
- Water Environmental Federation, (1992). Vol I. *Manual of Practice N°8*, 825 pp. Book Press, Inc., Brattleboro, Vermont.

Anexo 2: Diseño HC OFICIAL

Anexo 3:

Principales parámetros de diseño en países seleccionados

	Republica Checa	España	Estados Unidos de América	Reino Unido
Etapas de tratamiento	Secundario	Secundario	Secundario	Terciario
Pretratamiento	Rejillas + Tanque Imhoff	Rejillas + Tanque Séptico	Tanque Séptico	Sedimentación primaria + tratamiento biológico
Requerimiento específico de área superficial (m²/hab-eq)	5	10	5 - 10	0.7
Máxima tasa de carga orgánica superficial (gDBO₅/m².d)	-	6	4 - 8	2 - 13
Máxima tasa de carga orgánica transversal (gDBO₅/m².d)	-	-	250 ^a	-
Tasa de carga hidráulica (mm/d)	-	20	20 - 40	200
Tamaño de grava (mm)	< 20	5 - 8	> 4	10 - 12
Sistema de distribución	Tubería subsuperficial	Tubería subsuperficial	Tubería subsuperficial	Canal superficial
Referencia	Vymazal (1996) Vymazal y Krápfelová (2008)	García y Corzo (2008)	Wallace y Knight (2006)	Cooper et al. (1996) Griffin et al. (2008)

Figura 9.1: Principales parámetros de verificación en países seleccionados