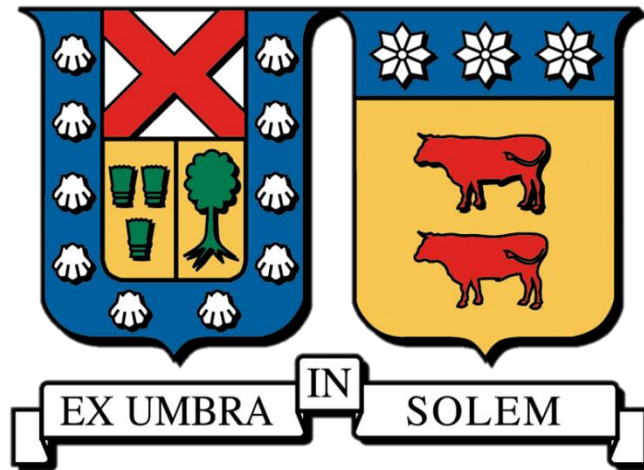


Universidad Técnica Federico Santa María  
Departamento de Obras Civiles



## Humedales construidos para el tratamiento de aguas servidas - Un caso de edificio en Viña del Mar

Memoria para optar al título de Constructor Civil  
Alberto Dünner Turner

Profesor guía: Daniel Radrigán Valencia  
Profesor correferente: Felipe Araya Araya

Valparaíso, abril 2022



## Agradecimientos

Agradezco a todos los que me ayudaron de alguna u otra forma en este trabajo. A quienes me dieron una mano directamente, guiándome en el proceso ayudándome con los temas desconocidos o todos los que tuvieron la buena disposición de leer mi trabajo. Quiero agradecer especialmente al profesor Rodrigan por su guía y consejo. Pero por sobre todo, agradezco a aquellas personas que estuvieron ahí indirectamente, apoyándome a empezar y motivándome a avanzar, obligándome e insistiéndome en terminar y estando ahí siempre en los momentos difíciles.

Antes de comenzar a escribir pensaba que el camino sería más corto y sencillo, pero resulta que terminar este ciclo de mi carrera fue más arduo y pedregoso de lo esperado. Con un gran esfuerzo y mucho trabajo por fin puedo decir que este trabajo está terminado y estoy orgulloso del resultado. Ahora puedo decir, con toda seguridad, que ha valido la pena.

Ahora solo espero que todos los que me ayudaron sigan acompañándome en mi vida profesional para así seguir creciendo y nunca dejar de aprender.

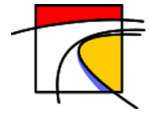


## Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a todos los que quieran explorar y aventurarse en el mundo de los humedales, ya sean naturales o construidos, que busquen aprender sobre las características de este increíble ecosistema y quieran aprovechar el tremendo potencial de estos sistemas.

*"Aprender siempre del mundo natural, que optimiza al máximo los recursos, que no produce residuos, que se adapta y evoluciona"*

*Janine Benyus*



## Resumen

El problema hídrico que sufre el planeta no deja de agravarse y surge la necesidad de buscar nuevas soluciones más eficientes y sustentables para el manejo del agua dulce disponible. Debido al aumento de la población, cada vez más familias tienen acceso a sistemas de agua potable y alcantarillado, pero, según las estadísticas mundiales, gran parte de esas aguas servidas son descargadas a la naturaleza sin un tratamiento adecuado. De esta forma, estas aguas no se aprovechan y contaminan los afluentes naturales, existiendo actualmente la tecnología para reutilizarlas. Especialmente en un país en vías de desarrollo como Chile se vuelve fundamental encontrar una alternativa al tratamiento de aguas servidas que sea a la vez económicamente viable y sustentable con el medioambiente con la finalidad de mejorar el aprovechamiento hídrico.

Una alternativa frente a este dilema es la relativamente nueva tecnología de tratamiento de aguas servidas mediante humedales construidos artificialmente. El principio de esta tecnología es mejorar la calidad del agua a través de procesos naturales y procesos de infiltración ya utilizados en los sistemas de alcantarillado particular en un ambiente controlado, emulando procesos que ocurren de forma espontánea y autónoma en los humedales naturales. Es decir, producir efluentes de buena calidad a través de operaciones simples y con un mínimo consumo de energía, beneficiando el entorno en que se implementan al permitir un segundo aprovechamiento de estas aguas en otras actividades con menores exigencias de calidad que la necesiten.

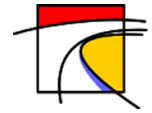
El objetivo principal de este estudio es determinar la factibilidad técnica, legal y económica de un sistema de humedal construido para una edificación urbana en Chile.

Antes de comenzar a estudiar los humedales construidos como forma de tratamiento se presenta el escenario actual alrededor del tratamiento de aguas servidas. Para esto, se presenta la situación de tratamientos de aguas en Chile, su distribución y características, una introducción a las aguas residuales y se reúnen las leyes y normas que limitan y condicionan las características y tratamientos de estas aguas en territorio nacional.

El estudio de los humedales construidos se compone de la comprensión de los distintos tipos de humedales, sus características principales y formas de funcionamiento, los componentes de estos sistemas y los mecanismos de remoción de contaminantes que permiten generar efluentes de buena calidad. Una vez estudiado el marco técnico de los humedales construidos se puede responder a la pregunta de qué características, ya sean de funcionamiento, económicas, sociales o medio ambientales, hacen competitivos a estos sistemas en comparación a tecnologías convencionales.

Con el fin de llevar esta tecnología a un caso práctico en Chile, se estudiaron los criterios y parámetros de diseño de estos sistemas de tratamiento, como también las actividades de construcción, operación y mantenimiento necesarias para que el humedal construido actúe como método de tratamiento.

Al terminar el estudio se logró validar el diseño y la implementación de un humedal, específicamente uno construido de flujo subsuperficial horizontal, para el tratamiento de aguas grises como una alternativa viable técnica y legalmente, además de atractiva desde un punto de vista económico, en una zona urbana.



## Abstract

The water problem that the planet suffers continues to worsen and the need arises to seek new, more efficient and sustainable solutions for the management of available fresh water. Due to the increase in population, more and more families have access to drinking water and sewage systems, but, according to world statistics, a large part of this wastewater is discharged into nature without adequate treatment. In this way, these waters are not reused and contaminate the natural water sources, despite that the technology to reuse them currently exists. Especially in a developing country like Chile, it becomes essential to find an alternative to wastewater treatment that is both economically viable and environmentally sustainable in order to improve water use.

An alternative to this dilemma is the relatively new technology of wastewater treatment through artificially constructed wetlands. The principle of this technology is to improve water quality through natural processes and infiltration already used in private sewage systems in controlled environment, emulating processes that occur spontaneously and autonomously in natural wetlands. That is, to produce good quality effluents through simple operations and with a minimum energy consumption, benefiting the environment in which they are implemented by allowing a second use of these waters in other activities with lower quality requirements that need it.

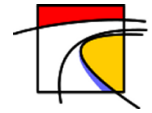
The main objective of this study is to determine the technical, legal and economic feasibility of a constructed wetland system for an urban building in Chile.

Before beginning to study constructed wetlands as a form of treatment, the current scenario around wastewater treatment is presented. For this, the situation of water treatment in Chile is presented, its distribution and characteristics, an introduction to wastewater and the laws and regulations that limit and condition the characteristics and treatment of these waters in national territory are gathered.

The study of constructed wetlands is made up of the understanding of the different types of wetlands, their main characteristics and ways of functioning, the components of these systems and the mechanisms for removing pollutants that allow the generation of good quality effluents. Once the technical framework of constructed wetlands has been studied, it is possible to answer the question of what characteristics, whether operational, economic, social or environmental, make these systems competitive compared to conventional technologies.

In order to apply this technology to a practical case in Chile, the design criteria and parameters of these treatment systems were studied, as well as the construction, operation and maintenance activities necessary for the constructed wetland to act as a treatment method.

At the end of the study, it was possible to validate the design and implementation of a wetland, specifically one built with horizontal subsurface flow, for the treatment of gray water as a technically and legally viable alternative, as well as attractive from an economic point of view, in a urban zone.



## Glosario

**Aeración:** introducción de aire en un líquido.

**Afluente:** entrada de agua a un proceso industrial o de aguas residuales a una planta de tratamiento.

**Aguas grises:** aguas residuales provenientes de las tinajas y duchas, lavatorios, lavaplatos y otros similares, excluyendo las aguas negras.

**Aguas negras:** aguas residuales que contienen excretas.

**Aguas residuales:** aguas que se descargan después de haber sido usadas en un proceso, o producidas por éste, y que no tienen ningún valor inmediato para ese proceso.

**Aguas servidas o aguas servidas domésticas:** aguas residuales que sólo contienen los desechos de una comunidad, compuestas por aguas grises y aguas negras.

**Aguas servidas tratadas:** las que han recibido un tratamiento parcial o total para la remoción y mineralización de la materia orgánica u otras materias.

**Bacterias:** grupo de organismos microscópicos, unicelulares procariones, es decir, que poseen núcleo disperso, no compartimentalizado. Metabólicamente activos, generalmente autónomos y que se multiplican por fisión binaria.

**Biodegradación:** degradación molecular de un compuesto orgánico, resultante de acciones complejas de organismos vivos, generalmente en medio acuoso.

**Colmatación:** obstrucción o bloqueo de los intersticios o poros de un lecho filtrante.

**Condición aeróbica:** descriptivo de una condición en la cual está presente oxígeno disuelto.

**Condición anaeróbica:** descriptivo de una condición en la cual está ausente oxígeno disuelto.

**Decantación:** proceso de extracción del líquido sobrenadante después de la sedimentación de los sólidos suspendidos o después de la separación de un líquido de mayor densidad.

**Demanda bioquímica de oxígeno, DBO:** cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos para oxidar o biodegradar la materia orgánica y/o inorgánica contenida en el agua. Es un proceso biológico y aeróbico.

**Demanda química de oxígeno, DQO:** medida del oxígeno, equivalente al contenido de materia orgánica en la muestra, y que es susceptible de ser oxidada por un agente químico fuerte.

**Depuración:** proceso por el cual se eliminan impurezas desde el agua.

**Digestión:** estabilización, por un proceso biológico, de la materia orgánica de los lodos normalmente en un medio anaeróbico.

**Ecosistema:** sistema en el cual hay intercambios cíclicos de materiales y energía, debidos a las interacciones dentro los diferentes organismos presentes y su medio ambiente.

**Efluente:** salida de agua o de aguas residuales desde el lugar que las contiene tal como una planta de tratamiento o un proceso industrial.

**Infiltración (en el suelo):** introducción (recarga) natural o artificial del agua en el suelo.

**Lodos activados:** acumulación de masa biológica (flóculos) producida en el tratamiento de aguas, por el desarrollo de bacterias y otros microorganismos en presencia de oxígeno disuelto.

**Lodos:** acumulación de sólidos sedimentables separados de varios tipos de agua mediante procesos naturales o artificiales.

**Macrófitas:** plantas acuáticas macroscópicas.

**Nitrógeno Kjeldahl:** concentración de nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal en una muestra, determinada bajo condiciones específicas basadas en la digestión con ácido sulfúrico.



**Patógeno:** organismo capaz de producir enfermedad en una planta o animal susceptibles, incluido el hombre.

**Película biológica o biofilm:** película compuesta de microorganismos vivos, muertos o moribundos, que se forma en una superficie en contacto con agua.

**Percolación:** movimiento descendente del agua a través del suelo por efecto de la gravedad.

**Periodo de retención:** tiempo teórico durante el cual el agua o las aguas residuales son retenidas en una cantidad o en un sistema particular de tratamiento, y que es calculado en función de un flujo específico.

**Permeabilidad:** propiedad de una membrana u otro material que caracteriza su capacidad selectiva para permitir que las sustancias pasen a través de ella. También llamada conductividad hidráulica.

**Población equivalente:** relación entre las características del agua residual y las propias de aguas servidas domésticas, tales como DBO, DQO u otras, expresadas en términos de población.

**Rizoma:** tallo horizontal y subterráneo.

**Sedimentación:** proceso para depositar la materia suspendida que contiene el agua o las aguas residuales, mediante la influencia de la gravedad.

**Sólidos sedimentables:** sólidos suspendidos que se asientan en el agua, aguas negras, u otro líquido en reposo, en el periodo razonable. Tal periodo se considera, aunque arbitrariamente, igual a una hora.

**Sólidos suspendidos:** Fracción de sólidos de un agua susceptibles de ser reparados de esta mediante operaciones físicas o la combinación de estas con procesos químicos como coagulación, floculación, sedimentación, filtración, centrifugación u otras.

**Definiciones de la norma chilena NCh 410: Calidad del agua – Vocabulario.**



## Lista de abreviaturas

APR	Agua potable rural
CONAF	Corporación Nacional Forestal
CONAF	Corporación Nacional Forestal
COT	Carbono orgánico total
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
EPA	Environmental Protection Agency
FDA	Food and Drug Administration
FS	HA de flujo superficial
FSS	HA de flujo subsuperficial
HA	Humedal artificial
HC	Humedal construido
HDPE	High density polyethylene o Polietileno de alta densidad
HFSS	HA de flujo subsuperficial horizontal
ILG	Institute for Local Government
ks	Conductividad hidraulica
MMA	Ministerio de Medio Ambiente
MOD	Materia Orgánica Disuelta
MOP	Materia Orgánica Particulada
n	Porosidad
N/A	No aplica
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NKT	Nitrógeno total de Kjeldahl
PE	Persona equivalente
PT	Fósforo total
PTAS	Plantas de aratamiento de aguas servidas
PUCV	Pontifice Universidad Catolica de Valparaiso
RBC	Contactores Biológicos Rotativos
SBR	Tratamiento Biológico Secuencial
SiSS	Superintendencia de Servicios Sanitarios
SNASPE	Sistema Nacional de áreas Silvestres Protegidas del Estado
SNASPE	Sistema Nacional de áreas Silvestres Protegidas del Estado
SST	Sólidos suspendidos totales
SUBDERE	Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico
UEH	Unidad de equivalencia hidraulica
VFSS	HA de flujo subsuperficial vertical
WWAP	World Water Assessment Programme - Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos
WWDR	World Water Development Report - Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos

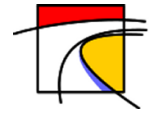


## Índice de contenidos

1.	Introducción .....	13
2.	Antecedentes .....	15
2.1.	Humedales construidos como sistema de tratamiento .....	15
2.2.	Situación en Chile .....	16
2.3.	Generalidades sobre aguas residuales .....	18
2.4.	Marco legal y normativo .....	22
3.	Objetivos .....	26
4.	Humedales naturales.....	27
5.	Humedales artificiales .....	29
5.1.	Tipos de Humedales Construidos.....	29
5.1.1.	Humedales construidos de flujo superficial (FS) .....	30
5.1.2.	Humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial (HFSS).....	31
5.1.3.	Humedales construidos de flujo vertical subsuperficial (VFSS) .....	32
5.2.	Componentes de los Humedales Construidos .....	33
5.2.1.	Agua residual .....	33
5.2.2.	Sustrato o medio granular .....	33
5.2.3.	Vegetación.....	34
5.2.4.	Microorganismos.....	35
5.3.	Mecanismos de remoción de contaminantes .....	35
5.3.1.	Remoción de materia orgánica .....	36
5.3.2.	Remoción de sólidos suspendidos .....	37
5.3.3.	Remoción de nitrógeno .....	37
5.3.4.	Remoción de fósforo .....	38
5.3.5.	Remoción de metales pesados.....	38
5.3.6.	Remoción de bacterias .....	39
5.4.	Generalidades de diseño de Humedales Construidos.....	40
6.	Análisis comparativo entre Humedales Construidos y otros tratamientos .....	41
6.1.	Características de funcionamiento.....	41
6.2.	Características económicas .....	43
6.3.	Características sociales.....	44
6.4.	Características medioambientales .....	44
7.	Diseño de Humedales Construidos .....	45
7.1.	Tratamientos previos .....	45
7.1.1.	Pretratamiento .....	45
7.1.2.	Tratamiento primario .....	46
7.2.	Elección del sistema .....	47
7.3.	Humedales de flujo subsuperficial horizontal.....	48
7.3.1.	Diseño biológico .....	48
7.3.2.	Diseño hidráulico:.....	48
7.3.3.	Compartimentación.....	51
7.3.4.	Estructuras de distribución y mantenimiento .....	51
7.4.	Humedales de flujo subsuperficial vertical .....	51
7.5.	Caso de estudio .....	52



7.6.	Dimensiones del HC para el caso de estudio .....	54
7.7.	Diseño del Sistema de Tratamiento para el caso de estudio .....	55
8.	Construcción de Humedales Construidos .....	57
8.1.	Desbroce y limpieza.....	57
8.2.	Replanteo .....	58
8.3.	Excavación y movimiento de tierras.....	58
8.4.	Nivelación y compactación.....	58
8.5.	Impermeabilización .....	59
8.6.	Sistemas de distribución y recogida .....	59
8.7.	Material granular.....	60
8.8.	Plantado .....	60
8.9.	Operación y mantenimiento .....	60
8.10.	Costos de construcción.....	61
8.11.	Costos de construcción del HC para el caso de estudio .....	62
9.	Conclusiones.....	66
10.	Bibliografía.....	69
11.	Anexo A – Memoria de Calculo .....	72
12.	Anexo B – Planta de Superficie .....	74
13.	Anexo C – Humedal Construido .....	78
14.	Anexo D – Planta de tratamiento de Bioplastic .....	82



## Índice de figuras

Figura 1: Distribución de tecnologías de tratamiento de aguas servidas en el sector urbano. ....	16
Figura 2: Distribución de tecnologías de tratamiento de aguas servidas en el sector rural. ....	17
Figura 3: Santuario de la naturaleza Carlos Anwandter, Valdivia. ....	28
Figura 4: Tipos de Macrófitas (Adaptado de Vymazal, 1998). ....	29
Figura 5: Tipos de humedales construidos según el tipo de flujo (Fuente: Vidal y Hormazábal, 2018). ....	30
Figura 6: Humedal construido de flujo libre (FS) (Fuente: Andreo, 2014). ....	31
Figura 7: Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal (HFSS) (Fuente: Andreo, 2014). ....	32
Figura 8: Humedal construido de flujo subsuperficial vertical (VFSS) (Fuente: Andreo, 2014). ....	32
Figura 9: Plantas típicas utilizadas en sistemas de tratamiento con HC. ....	34
Figura 10: Interrelaciones de una macrófitas en un HC (Adaptado de Wallace, 2007). ....	36
Figura 11: Alternativa de tratamiento previo (Fuente: García y Coroz, 2008). ....	45
Figura 12: Esquema de un canal de desbaste (Fuente: García y Coroz, 2008). ....	46
Figura 13: Esquema de una fosa séptica y tanque Imhoff (Adaptado de Huertas y Marcos, 2013). ....	47
Figura 14: Modelo 3D (Software Revit) Instituto de Música PUCV. ....	52
Figura 15: Esquema del sistema de tratamiento con HC para el Instituto de Música PUCV. ....	55
Figura 16: Diseño de las cámaras disipadoras de energía. ....	55
Figura 17: Diseño estanque de acumulación para aguas grises. ....	55
Figura 18: Diseño de la cámara de control de nivel del HC. ....	56
Figura 19: Diseño del sistema de desinfección y acumulación del efluente del HFSS. ....	56
Figura 20: Esquema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal. ....	57
Figura 21: Costos (%) de las actividades de construcción de un lecho de HFSS. ....	61
Figura 22: Costos (%) de las actividades de construcción del lecho de HFSS según el caso práctico. ....	62



## Índice de tablas

Tabla 1: Parámetros típicos de las aguas servidas (Adaptado de Vidal y Hormazábal, 2018). .....	19
Tabla 2: Parámetros típicos de las aguas grises (Santasmassas, 2018). .....	19
Tabla 3: Procesos que contribuye a la depuración de aguas residuales en HC (Arias y Brix, 2003). .....	39
Tabla 4: Parámetros típicos de diseño para HC (Arias y Briz, 2003). .....	40
Tabla 5: Comparación entre sistemas de tratamiento de aguas servidas (Adaptado de Pizarro, 2011). .....	43
Tabla 6: Parámetros del medio granular (Delgadillo et al., 2010). .....	50
Tabla 7: Cuadro de superficies generales del Instituto de Música PUCV. ....	52
Tabla 8: Cuadro de superficies por tipo de espacio del Instituto de Música PUCV. ....	53
Tabla 9: Cuadro de artefactos conectados al alcantarillado general del Instituto de Música PUCV. ....	53
Tabla 10: Cuadro de artefactos conectados al alcantarillado de aguas grises del Instituto de Música PUCV. ....	53
Tabla 11: Características del HFSS diseñado para el Instituto de Música PUCV. ....	54
Tabla 12: Presupuesto del sistema con HFSS diseñado para el Instituto de Música PUCV. ....	63
Tabla 13: Detalle del presupuesto del lecho del HFSS para el Instituto de Música PUCV. ....	65



## 1. Introducción

A pesar de que el agua es el elemento más frecuente en la Tierra, solamente el 2,5% de ella es agua dulce. De dicho porcentaje, solo un tercio está en estado líquido y los otros dos tercios se encuentran en glaciares o nieves perpetuas. A esta cantidad de agua dulce natural presente en ríos, lagos y acuíferos, se suman otros 8.000 kilómetros cúbicos ( $\text{km}^3$ ) de agua almacenada en embalses.

En general, excepto por algunas aguas subterráneas, los recursos hídricos son renovables y su distribución en el mundo es muy variable, con distinta cantidad de precipitación y diferente disponibilidad alrededor del globo. Por otro lado, los recursos de agua dulce se ven reducidos por la contaminación. Unos 2 millones de toneladas de desechos son arrojados diariamente en aguas receptoras, incluyendo residuos industriales, químicos, vertidos humanos y desechos agrícolas. Se estima que la producción global de aguas residuales es de aproximadamente 1.500 [ $\text{km}^3$ ] (WWAP, 2003).

El uso global de agua se ha multiplicado por seis en los últimos 100 años y sigue aumentando a un ritmo constante de 1% anual debido al crecimiento demográfico, al desarrollo económico y al cambio en los patrones de consumo. Según el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) de la UNESCO el ser humano extrae un 54% de las aguas de escorrentía accesibles (WWAP, 2003). De ellas, las acciones de la agricultura representan actualmente el 69% de todas las extracciones de agua dulce disponible, mientras que la industria (incluido el sector energético) extrae el 19% de los recursos mundiales de agua dulce (WWAP, 2003).

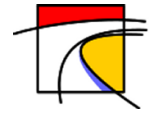
En Chile, un país en vías de desarrollo, el problema de la disponibilidad del recurso hídrico no deja de agravarse producto del crecimiento de la población y la falta de planificación en el desarrollo urbano e industrial. Esto se ve reflejado en el avance de la desertificación hacia la zona centro del país, generando escasez de agua para el consumo humano, la industria y, principalmente, la agricultura. Frente a esta situación, la administración del recurso hídrico y todo lo que esto engloba se ha convertido en una prioridad nacional y la búsqueda de soluciones para el buen uso del agua disponible se ha vuelto el tema central de la discusión.

Por ejemplo, a mediados del año 2019 se lanza en Chile el Plan de Embalses que, a través de la construcción de 26 nuevos embalses, busca mejorar la seguridad de abastecimiento hídrico de 150 mil agricultores y para el consumo humano, utilizando los acuíferos naturales para inyectar agua en periodos de abundancia y desarrollar nuevas fuentes de abastecimiento (Gob, 2019).

Por otro lado, el aumento demográfico y la actividad humana no solo representan un aumento en el consumo de agua sino también un aumento en la producción de aguas residuales. La magnitud de este problema se incrementa especialmente cuando se trata de grandes ciudades. Si bien las aguas residuales constituyen una alternativa como fuente de aguas de menor calidad, cuyos usos pueden variar sin necesariamente ser aptas para el consumo humano; cómo, por ejemplo, para riego o fines estéticos, ellas requieren de un tratamiento adecuado para minimizar los riesgos asociados a su reutilización.

La idea de reutilizar las aguas servidas es una de varias opciones para el uso eficiente y ahorro de agua. El principio es aprovechar el agua que ya fue utilizada una o varias veces para satisfacer la necesidad del recurso hídrico en otra actividad después de haber sido tratada adecuadamente. En la actualidad está disponible la tecnología necesaria para tratar las aguas residuales y conseguir que adquieran una calidad suficiente para su reutilización, contribuyendo con ello a cubrir parte de la demanda hídrica.

Este principio no es nuevo en el mundo industrial donde recibe el nombre de “Gestión circular del agua”. En un proceso tradicional el agua se mueve de forma lineal a través del sistema, contaminándose y convirtiéndose en aguas residuales. En cambio, en una gestión circular el agua recircula en el sistema y vuelve a circular para su uso continuo en el proceso. Esta gestión se caracteriza por el enfoque 5R: reducir, reutilizar, reciclar, restaurar y recuperar (WWAP, 2020).



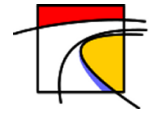
A nivel mundial las Naciones Unidas estiman que un 80% de las aguas servidas no recibe un tratamiento adecuado y son descargadas en estas condiciones a los cuerpos de agua en el medio ambiente (WWAP,2020). Ahora bien, la cantidad de aguas servidas tratadas depende principalmente del nivel de desarrollo de los países. Los países desarrollados tratan aproximadamente el 70% de las aguas residuales que generan, mientras que en los países subdesarrollados solo recibe algún tipo de tratamiento el 8% de las aguas residuales (WWAP, 2017).

De la misma forma, la cantidad de agua reutilizada es muy variable entre los países. Estados Unidos es uno de los países que más volumen de aguas residuales reutiliza, entre 7-8% de las aguas residuales generadas son reutilizadas, alrededor de 32 billones de galones por días (EPA, 2012). En tanto, se estima que Europa sólo reutiliza el 2% de las aguas residuales tratadas (WWAP, 2020). De acuerdo con las estadísticas internacionales, los principales usos que se le da al agua residual, con tratamiento terciario, es el siguiente: 32,0% en el riego agrícola y 19,3% en la industria, mientras que un 8% se destina a usos urbanos no potables (WWAP, 2017).

La composición de las aguas residuales depende de las diferentes fuentes y del clima, pero en general las componen aproximadamente un 99% de agua y un 1% de sólidos disueltos, coloidales y en suspensión (WWAP, 2017). Se pueden clasificar según su procedencia en domésticas, agrícolas e industriales. Las domésticas se caracterizan por ser una mezcla de sustancias orgánicas (aproximadamente 70%), como residuos alimenticios, excretas, etc., y sustancias inorgánicas (aproximadamente 30% restante). Por su parte, las agrícolas son una combinación de aguas domésticas, de riego y actividad ganadera. Por último, las aguas industriales son las más diversas dependiendo del proceso en que se utilicen (Fundación Chile, 2016).

En Chile se usan más de 4.700 metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ) de agua, de los cuales el 89% corresponde a los usos no consuntivos y 11% a usos consuntivos. Las actividades de riego, concentradas principalmente entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos, representan el 73% de las extracciones. Las aguas para el uso doméstico constituyen un 6% de las extracciones y logran abastecer al 99,8% de la población urbana y rural concentrada. Mientras que los usos mineros e industriales representan el 9 y 12% de las extracciones totales, respectivamente (Banco Mundial, 2011). En la actualidad, Chile ha alcanzado a los países desarrollados en la materia con niveles de cobertura en el tratamiento de las aguas residuales que superan el 99% en sectores urbanos, contando con 300 sistemas de tratamiento de aguas residuales (SiSS, 2019).

Este panorama nos lleva a buscar nuevas formas de tratamiento de aguas residuales que sean económicamente atractivas, tecnológicamente viables y de sencilla operación y mantenimiento, es decir, que se ajusten a la realidad nacional. Durante las últimas décadas se ha demostrado que gracias a los componentes de los humedales artificiales: agua, vegetación, suelo y microorganismos, y sus interacciones físicas, químicas y biológicas, ellos son capaces de tratar la materia orgánica, nutrientes y sustancias tóxicas presentes en las aguas servidas. Es decir, estos sistemas son capaces de producir efluentes de buena calidad, a través de operaciones simples y con un mínimo consumo de energía, además de beneficiar el entorno en que se implementan (Arias y Brix, 2003).



## 2. Antecedentes

### 2.1. Humedales construidos como sistema de tratamiento

El caso de los HC no es la primera vez en que la tecnología se inspira y busca imitar los procesos naturales, en este caso, el funcionamiento de los humedales naturales. Ellos son un ecosistema que desempeña funciones fundamentales en el bioma, como regulador del régimen hídrico, depósito de nutrientes y materia orgánica y como hábitat de una amplia y diversa flora y fauna.

Las primeras ideas para utilizar humedales como medio de tratamiento no consideraban un sistema controlado y cerrado, sino que simplemente se dejaba que humedales naturales recibieran las descargas de aguas servidas y de esa forma se mejorara la calidad del agua antes de que volviera a los afluentes. Un ejemplo en nuestro país de esta idea fueron los humedales del Río Cruces en Valdivia que recibieron las descargas descontroladas de efluentes provenientes de la industria de la celulosa que culminó con la pérdida de la biodiversidad en las zonas húmedas (Delgado et al., 2014).

La idea de mejorar la calidad del agua a través de procesos naturales en un ambiente controlado, como ocurre en los HC, llevó en los años 50, a las primeras tesis sobre la capacidad de las plantas de tratar grandes cantidades de sustancias orgánicas e inorgánicas, como bacterias y metales pesados mientras enriquecen el suelo en el que se desarrollan (Zhang, 2012). Así es como en los años 1967 y 1970 se construye en la ciudad de Elburg, Holanda, el primer HC para el tratamiento de aguas servidas y se desarrolla el “Sistema Krefeld” o “Proceso del Instituto Max Planck”, que establecerá la base de los actuales sistemas híbridos de tratamiento (Kadlec y Wallace, 2009). Recién en la década de 1980 comienzan a aparecer en Alemania y Estados Unidos los primeros manuales de diseño y construcción de HC.

Es en el año 1986 que se construye en Arcata, California, uno de los humedales más famosos de la historia. El actualmente conocido como Santuario de Pantano y Vida Silvestre de Arcata (*Arcata Marsh and Wildlife Sanctuary*). El humedal tiene una superficie de 62 hectáreas (ha) y fue diseñado para tratar las aguas servidas de una población de 12.600 personas, que actualmente supera los 19.000, y un caudal de 8.706 metros cúbicos diarios ( $m^3/d$ ). En su diseño participaron organismos estadounidenses como la EPA, la FDA y la NASA (ILG, s.f.).

En la actualidad, los HC siguen siendo una tecnología relativamente poco utilizada a nivel mundial pese a su gran potencial. Un ejemplo de aplicación se encuentra en la isla Koh Phi Phi, Tailandia, que tras el paso de un tsunami en 2005 que devastó la infraestructura sanitaria, implementó esta tecnología. A partir del 2007, el HC trata las aguas servidas de toda la isla. Este humedal no solo se orienta al tratamiento de las aguas servidas sino también al embellecimiento de su entorno turístico a través de su moderno diseño (Brix et al., 2011).

Actualmente se registran más de 1.400 artículos científicos que abordan el tratamiento de aguas servidas de distintos tipos a través de HC como sistema alternativo de tratamiento. Su uso es cada vez más aceptado en el mundo y ya se pueden encontrar humedales artificiales en países desarrollados como Alemania, Inglaterra, Francia, Dinamarca y Polonia. Se estima que, alrededor del mundo, hay más de 50.000 de estos sistemas de operación (Vidal y Hormazábal, 2018).

Esta tecnología permite tratar las aguas servidas, de origen doméstico tanto como industrial, de distintos tipos y características. Por un lado, los HC para el tratamiento de aguas servidas domésticas se han enfocado y desarrollado principalmente en las zonas rurales y comunidades pequeñas, debido a su baja capacidad de tratamiento en comparación con los sistemas convencionales y con la ventaja de favorecer la biodiversidad y embellecer el entorno (Vidal y Hormazábal, 2018). Por otro lado, en el caso de las aguas servidas industriales generalmente el proceso de tratamiento es más complejo debido a la mayor concentración de contaminantes y, por esta razón, se debe realizar un pretratamiento, ya sea físico, químico o biológico, para asegurar el adecuado funcionamiento de humedal (Kadlec y Wallace, 2009).

La implementación de los sistemas de tratamiento a través de HC ha permitido el desarrollo de distintos tipos de configuraciones. La clasificación más común y aplicada a estos sistemas depende de la hidrología del humedal. Según ella, los HC pueden ser de flujo superficial (FS) o subsuperficial (FSS). En el caso de los humedales de flujo subsuperficial se han diseñado sistemas de flujo horizontal (HFSS), vertical (VFSS) y combinaciones de ambos en “sistemas híbridos”.

- Los humedales FS imitan un humedal natural, tanto en apariencia como funcionamiento, porque el agua fluye horizontalmente en la superficie.
- En los humedales HFSS y como su nombre lo indica, el agua fluye bajo la superficie entrando en contacto con las zonas aeróbicas, anaeróbicas y anóxicas del humedal.
- De la misma forma, en los humedales VFSS el agua es vertida en la superficie y drena a través del humedal teniendo el mismo efecto anterior.
- Finalmente, los subsistemas híbridos resultan de una combinación secuencial de varios tipos de humedales consiguiendo aprovechar las ventajas de los humedales VFSS y HFSS.

El continuo desarrollo de esta tecnología de tratamiento ha llevado a la publicación de guías de diseño y operación específicas. Así, por ejemplo, en 2005 apareció la guía sobre el uso de humedales VFSS en el tratamiento de aguas servidas en pequeñas comunidades o áreas rurales de Brix & Arias y en 2008, el manual HFSS de Vymazal & Kröpfelova (Vidal y Hormazábal, 2018).

## 2.2. Situación en Chile

Actualmente en Chile más del 80% de la población está concentrada en zonas urbanas donde los servicios de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas servidas son provistos por una empresa concesionaria. De acuerdo con la legislación sanitaria, principalmente el Decreto con Fuerza de Ley N°382 MOP, los servicios de producción y distribución de agua potable y de recolección y disposición de aguas servidas a través de concesiones solo pueden otorgarse para zonas urbanas o urbanizables.

De acuerdo con la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SiSS), entidad normativa y fiscalizadora de las empresas concesionarias que prestan los servicios de agua potable y alcantarillado con el fin de garantizar que el agua una vez utilizada sea tratada adecuadamente para ser devuelta a la naturaleza, existe una cobertura en los territorios urbanos y concesionados a nivel nacional de agua potable del 99,94% y de alcantarillado del 97,27%. Asimismo, la cobertura de tratamiento de las aguas servidas, recolectada a través del alcantarillado público, es de 99,98% respecto a la población (SiSS, 2019).

Según las estadísticas de la SiSS existen, hasta diciembre 2019, un total de 300 plantas de tratamiento de aguas servidas en el territorio nacional. Entre todos estos sistemas de tratamiento la tecnología más recurrente utilizada es el sistema de Lodos Activados, con 186 plantas de tratamiento equivalente a un 63% del total de sistemas operativos. A continuación, el número de plantas de tratamiento que utiliza el sistema de Lagunas Aireadas alcanza un 18% y los sistemas en base a Emisarios Submarinos un 11% respecto al total.

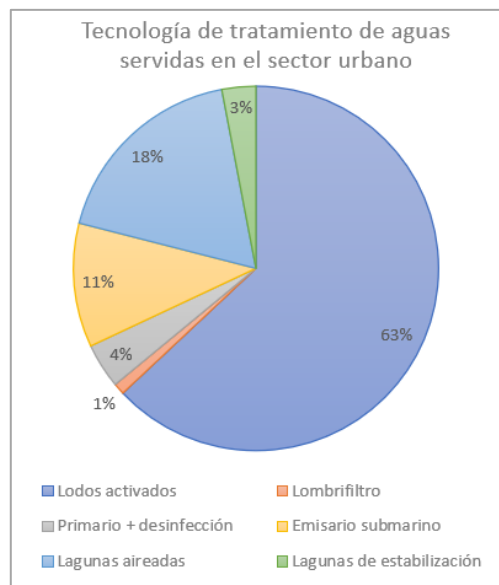


Figura 1: Distribución de tecnologías de tratamiento de aguas servidas en el sector urbano.

Respecto al sector rural el Censo de Población del año 2002 indica que el 13% de la población habita en estas zonas, que ocupan 13,6% de las viviendas del país. De estas viviendas un 80% tiene acceso a agua potable, solo un 18% tiene acceso a un sistema de alcantarillado tradicional y un 8% tiene un sistema de tratamiento (Vidal y Hormazábal, 2018). Generalmente el abastecimiento de estas zonas se hace a través de cooperativas y comités de agua potable rural, que pertenecen al Programa de Agua Potable Rural (APR) del Ministerio de Obras Públicas. Los catastros de PTAS rurales indican que existen 550 plantas de tratamiento que atienden principalmente a grandes comunidades.

El sistema predominante para el tratamiento de las aguas servidas en el sector rural corresponde al de Lodos Activados con Aireación Extendida, con un 72% de las plantas de tratamiento. Otros sistemas utilizados, pero con una baja presencia en comparación son sistemas de Lombifiltro con un 7% y los sistemas de Biodiscos y Biofiltros con un 5% (Vera et al., 2016).

Tras el tratamiento de las aguas servidas, un 97% de los sistemas realiza descargas a cuerpos de agua superficiales, continentales o marinos, mientras que sólo un 3,6% del agua tratada se reutiliza directamente en distintos fines. En cuanto al destino final de las descargas de agua tratada, un 77% se descarga a cursos fluviales y un 22,3% al mar (SiSS, 2019).

De acuerdo con la Subsecretaría de Desarrollo Regional (SUBDERE, 2012) existen 10 plantas de tratamiento de aguas servidas cuyo sistema secundario de tratamiento está compuesto por un HC. Estas plantas de tratamiento fueron construidas a partir de 2002, principalmente en la zona centro-sur del país.

El año 2015 se inaugura un humedal construido para tratar las aguas grises de la Escuela Carlos Ariztía, ubicado en la localidad de Trapiche, La Ligua, Región de Valparaíso. Durante ese mismo año la empresa Infraplast, asociada con Fundación Chile, la Cementera Polpaico y el Comité de Agua Potable Rural (APR) implementan la tecnología “Biotreat” como forma de tratamiento de las aguas servidas producidas por la comunidad de Estación Polpaico, comuna de Til Til, Región Metropolitana (Vidal y Hormazábal, 2018).

Además, la Universidad de Concepción junto a la Municipalidad de Hualqui, la Dirección de Obras Hidráulicas y ESSBIO, están ejecutando en la región del Bio Bio el Proyecto INNOVA BIO BIO 13.3327-IN.IPP: “Recuperación de Agua mediante Jardines Depuradores a partir de Aguas Servidas Rurales: Aplicaciones Innovadoras con Impacto para la Comunidad Rural”, que contempla la construcción de varios jardines depuradores para el tratamiento de las aguas residuales rurales a través de la capacidad depuradora de plantas macrófitas. Los objetivos del proyecto son la producción de flores y fibras, utilizando los diferentes tipos de plantas macrófitas y ornamentales que puedan generar un beneficio social y económico para la comunidad y la reutilización de las aguas tratadas en la agricultura rural (GIBA, s.f.).

Gracias al desarrollo de estas tecnologías sustentables también se han fundado empresas especialistas en el tema. La empresa Bioantu es una de las primeras organizaciones en Chile dedicada a la eco-ingeniería y el tratamiento de agua a través de HC de flujo vertical subsuperficial y lidera su desarrollo con experiencia en unidades domésticas. Desde el año 2009, ha construido 37 jardines depuradores, proyectos unifamiliares o colectivos, en 22 comunas del país.

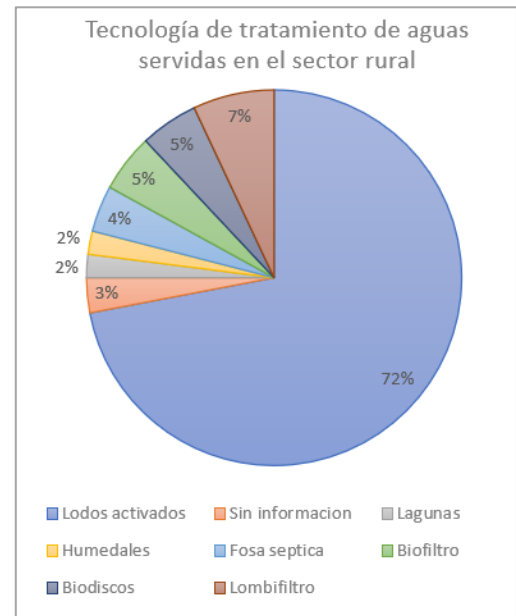


Figura 2: Distribución de tecnologías de tratamiento de aguas servidas en el sector rural.



### 2.3. Generalidades sobre aguas residuales

Las aguas residuales o servidas son aquellos vertidos que se generan por la actividad humana, principalmente en los núcleos urbanos, en forma de desechos líquidos provenientes de los hogares, instituciones y comercios (aguas residuales domésticas), las fábricas e industrias (aguas residuales industriales) y las aguas de precipitaciones (lluvia). Sus características dependen principalmente de la población en que se generen, influyendo también aspectos como el clima, ubicación geográfica, número de habitantes, la existencia de industrias o comercios dentro del sistema, tipos de industria, etc.

Las aguas servidas se pueden clasificar según su origen como urbanas o rurales. El criterio de clasificación puede ser según la cantidad producida o la población. Por ejemplo, la EPA indica que son aguas rurales las provenientes de poblaciones que producen menos de 3.800 [m<sup>3</sup>/día] mientras que en Chile las aguas servidas rurales son aquellas producidas por poblaciones no superior a 1.000 habitantes o hasta 2.000 habitantes con menos del 50% de su población económicamente activa dedicada a actividades secundarias y/o terciarias (Vidal y Araya, 2014).

Las aguas servidas son una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos y se pueden caracterizar basándose en sus constituyentes físicos, químicos y biológicos (Vidal y Araya, 2014):

- a. Características físicas: entre estas características se encuentran los sólidos sedimentables, suspendidos y disueltos; la temperatura, que tiene efecto en la solubilidad de diversos gases y en las reacciones químicas y biológicas; la turbiedad y color, debido a la materia en suspensión y microorganismos; el olor, causado por los gases liberados.
- b. Características químicas: incluyen el pH, la tendencia a la acidez generalmente está en un rango neutro; nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo en sus diversas formas; metales pesados, como arsénico (As), plomo (Pb) y plata (Ag) que son vertidos a las aguas en su origen.
- c. Características biológicas: en las aguas servidas se encuentra una gran cantidad de microorganismos potencialmente patógenos, que van desde virus submicroscópicos a gusanos parásitos visibles a simple vista, incluyendo bacterias, protozoos, virus, helmintos, rotíferos, entre otros.

Las aguas residuales son principalmente agua y solo un 0,1% corresponde a materia sólida, de las cuales aproximadamente un 70% corresponde a materia orgánica. Los contaminantes habituales que se deben considerar al trabajar con aguas residuales son (Toro, 2005; Pérez, 2010; Andreo, 2014):

- Materia orgánica: habitualmente un 75% de las partículas suspendidas y un 40% de las partículas filtrables son de naturaleza orgánica, generalmente relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos. Estos compuestos orgánicos son propensos a oxidarse de manera natural y consumir el oxígeno del medio.
- Arenas: son partículas minerales de tamaño apreciable que enturbian el agua en movimiento o se asientan en el fondo en condiciones estáticas.
- Grasas y aceites: son sustancias lipídicas que permanecen en la superficie del agua al tener características hidrofóbicas, generando natas y espumas que entorpecen los tratamientos.
- Nitrógeno y Fósforo: provienen principalmente de detergentes y fertilizantes, además, las excretas humanas aportan nitrógeno orgánico. Estos componentes son los principales responsables del deterioro de las masas acuáticas.
- Agentes patógenos: son organismos capaces de producir o transmitir enfermedades (bacterias, protozoos, helmintos y virus).
- Otros contaminantes como: metales pesados, fenoles, petróleo, pesticidas, etc.

Los siguientes parámetros se ocupan para medir los contaminantes anteriores:

- DQO: la demanda química de oxígeno que corresponde a la cantidad de oxígeno necesaria para la completa oxidación de los componentes orgánicos del agua.
- DBO<sub>5</sub>: la demanda bioquímica de oxígeno corresponde al contenido de materia orgánica en las aguas servidas. La medición corresponde a la cantidad de oxígeno disuelto consumido por los microorganismos responsables de la digestión de la materia orgánica.
- Sólidos Suspendidos Totales (SST): indica el contenido de materia en suspensión en las aguas servidas, distinguiendo sólidos volátiles y sólidos fijos.
- Nitrógeno Kjeldahl (NKT): corresponde a la suma del nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal, aproximadamente en aguas servidas domesticas 40% y 60% respectivamente.
- Fósforo total (PT): considera una componente orgánica (35%) e inorgánica (65%) de fosforo.
- Coliformes totales y fecales: evalúa la contaminación fecal a través de indicadores de organismos patógenos.

Tabla 1: Parámetros típicos de las aguas servidas (Adaptado de Vidal y Hormazábal, 2018).

Parámetros Físicoquímicos	Unidad	Tipo		
		Concentrada	Moderada	Diluida
pH	-	7-8	7-8	7-8
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg SST/L	450	300	190
DBO5 Total	mg O <sub>2</sub> /L	350	250	150
DQO Total	mg O <sub>2</sub> /L	740	530	320
Carbono Orgánico Total (COT)	mg C/L	250	180	110
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg N/L	80	50	30
Fósforo Total (PT)	mg P/L	14	10	6

Tabla 2: Parámetros típicos de las aguas grises (Santasmassas, 2018).

Parámetros Físicoquímicos	Unidad	Tipo	
		Concentrada	Diluida
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg SST/L	330	45
DBO5 Total	mg O <sub>2</sub> /L	290	90
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg N/L	30	2

El tratamiento o depuración de aguas residuales tiene como fin eliminar los contaminantes presentes en el agua, lo que involucra reducir el contenido orgánico, remover nutrientes y neutralizar organismos patógenos. Para alcanzar este objetivo se realizan de forma sucesiva y combinada una serie de métodos individuales que consiguen diversos niveles de tratamiento y calidad de efluentes. De estos procesos se generan subproductos denominados lodos y biosólidos que deben ser tratados adecuadamente según sea su disposición final. El efluente final de estos procesos puede ser descargado o reintroducido al ambiente o ser reutilizado en nuevas actividades.

Dentro de todos los métodos para tratar las aguas residuales se puede hablar de una serie de procesos generales: físicos, químicos y biológicos que componen el sistema de tratamiento con el objetivo de reducir y eliminar los contaminantes presentes en el agua. Estos procesos generales se denominan (Andreo, 2014; Toro, 2005):

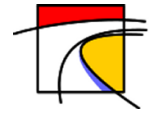
- i. Tratamiento preliminar o pretratamiento: involucra el desbaste y remoción de sólidos o elementos de gran tamaño, incluyendo elementos flotantes, trapos, grasas y arenas, a través de rejillas, desarenadores y desengrasadores.
- ii. Tratamiento primario: consiste en eliminar pequeñas partículas suspendidas, además de grasas, aceites y elementos flotantes que pudieron pasar el pretratamiento. A través de procesos de centrifugación, sedimentación y flotación en grandes estanques denominados sedimentadores o clarificadores primarios se reducen las concentraciones de sólidos en suspensión.
- iii. Tratamiento secundario: consiste en el proceso biológico de coagulación y eliminación de sustancias orgánicas disueltas o de sólidos que no han sido separados en etapas anteriores. El proceso biológico es capaz de remover la materia orgánica biodegradable activando los microorganismos responsables de la descomposición por medio de agitación y oxigenación del agua, en procesos mecánicos de aireación, decantación y sedimentación.
- iv. Tratamiento terciario o avanzado: a través de un proceso fisicoquímico se eliminan contaminantes que persisten de los tratamientos anteriores con el fin de desinfectar el efluente. Entre los procesos más utilizados son la desinfección con cloro, la ozonización y la radiación ultravioleta.

Las aguas residuales que se generan ya sean domésticas, industriales o agrícolas, pueden ser tratadas en el mismo sitio de origen, por ejemplo, en fosas sépticas u otros medios, o bien se pueden recolectar y transportar a través de un alcantarillado hasta una planta de tratamiento.

Como se mencionó en el apartado anterior, en Chile se utilizan varios tipos de tratamiento de aguas servidas. La mayoría de los sistemas de tratamiento utilizados son sistemas biológicos porque utilizan microorganismos para degradar la materia orgánica presente en las aguas servidas. Entre los sistemas más utilizados se pueden mencionar los siguientes:

**Lodos Activados:** Este sistema de tratamiento aeróbico de cultivo en suspensión es el proceso biológico más común en el tratamiento de aguas servidas. El proceso convencional consiste en tres etapas: durante una sedimentación primaria se remueven los sólidos en suspensión, luego en un tanque de aireación se introducen microorganismos y se suministra oxígeno para que crezcan y estabilicen la materia orgánica para finalmente durante una sedimentación secundaria decanten los lodos activados. La popularidad de este sistema de tratamiento se debe a que genera efluente de muy alta calidad utilizando poco espacio y se puede adaptar a los distintos tipos de aguas residuales, además de tener una muy alta eficiencia de eliminación de materia orgánica. Sin embargo, es un método que consume grandes cantidades de energía debido a la necesidad de suministrar oxígeno a los microorganismos. Existen algunas variantes a este método (Pérez, 2010, Vidal y Araya, 2014):

- Los Lodos Activados con Aireación Extendida tienen periodos de aireación más largos que los convencionales y en estanques más grandes, con menor concentración de materia orgánica.
- Las Zanjales de Oxidación retienen los sólidos por un largo periodo de tiempo para remover los compuestos orgánicos biodegradables. Esta variante es principalmente atractiva debido a su bajo costo de operación y mantención.
- El Reactor Discontinuo Secuencial (SBR) utiliza un estanque para todos los procesos, que es llenado y descargado secuencialmente formando ciclos. Este sistema es muy flexible de operar y controlar, además de ocupar una superficie mínima de terreno.



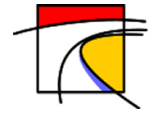
**Lagunas de Estabilización:** Las Lagunas de estabilización facultativas son estanques de poca profundidad donde se acumulan las aguas servidas y la materia orgánica se degrada naturalmente por el actuar de bacterias aerobias en la capa superficial debido a la aireación atmosférica y oxígeno es suministrado por algas, microorganismos anaeróbicos en el fondo donde se acumulan los lodos y bacterias facultativas en la zona intermedia que es parcialmente aerobia y anaeróbica. Es un sistema atractivo debido a sus bajos costos de construcción y operación, su sencilla operación, bajo consumo energético y relativamente baja producción de lodos. Algunas desventajas del método son el requerimiento de grandes superficies y variabilidad incontrolable del proceso debido al viento, la temperatura, entre otros factores (Pérez, 2010).

**Lagunas Aireadas:** De forma similar a las lagunas de estabilización la reacción ocurre en una piscina excavada en terreno, con la diferencia que a estas se le suministra oxígeno mediante difusores sumergidos o aireadores superficiales. La aireación generalmente no es uniforme en toda la laguna, en el primer sector es mayor y va reduciéndose según se avanza en la laguna para permitir la sedimentación. El sistema es similar al de Lodos activados, excepto por la falta de recirculación del material en la laguna y una menor concentración de sólidos en suspensión que implica que el proceso biológico requiere de más tiempo. La laguna tiene la ventaja de generar relativamente pocos lodos y consistir en un proceso simple y confiable. Además, el sistema permite una operación intermitente y genera efluentes de alta calidad a bajos costos. Sin embargo, es un sistema que consume altos niveles de energía que lo vuelven poco atractivo en condiciones de baja carga sanitaria y al estar expuestos a la atmósfera son susceptibles a la temperatura y otras variables (Pérez, 2010; Vidal y Araya, 2014).

**Biodiscos (RBC):** Un reactor biológico rotativo de contacto está formado por una serie de discos, alineados sobre un eje, parcialmente sumergidos en el agua residual que giran lentamente. A la superficie de los discos se adhieren los microorganismos formando una película biológica (*biofilm*) que entran en contacto alternativo con la atmósfera y la materia orgánica en el agua residual. Además, la rotación de los discos mantiene los sólidos en suspensión y evita la acumulación de lodos en estas estructuras. La rotación de los discos consume poca energía y el uso de un cultivo fijo produce pocos lodos, sin embargo, este sistema requiere de un tratamiento primario y cada cierto tiempo se paraliza el proceso debido al desprendimiento del biofilm (Pérez, 2010; Vidal y Araya, 2014).

**Lombrifiltración:** Las aguas servidas son precoladas a través de un medio filtrante de aserrín o viruta donde habita una gran cantidad de lombrices, de ahí el nombre del sistema, y otros microorganismos que digieren la materia orgánica. El sistema tiene bajos costos operacionales debido a su mínimo consumo de energía, además, de forma simultánea las lombrices generan humus que puede ser utilizado como abono orgánico. Sin embargo, requiere de mayores superficies de terreno por habitante que otros métodos y puede generar olores y vectores sanitarios (Pérez, 2010).

**Biofiltros o Filtros Percoladores:** En estos sistemas las aguas servidas atraviesan un filtro sumamente permeable, generalmente construido con grava, al que se adhieren microorganismos formando *biofilms*, que degradan la materia orgánica a medida que el agua percola. Debajo del filtro se recogen los líquidos y sólidos que pasan a un estanque de sedimentación. Parte del efluente recircula en el sistema para diluir el agua servida entrante. Particularmente esta forma de tratamiento genera consistentemente efluentes de muy alta calidad y es sumamente estable ante variaciones de carga y concentración del afluente. El sistema requiere de clarificadores primarios y de mecanismos de bombeo para alimentar el filtro, además existe el riesgo de que se generen malos olores y vectores sanitarios (Pérez, 2010).



**Fosa Séptica:** El sistema de tratamiento por Fosa séptica es una de las soluciones más utilizadas cuando se necesita un sistema pequeño y descentralizado. Se utiliza principalmente en zonas rurales donde no se cuenta con acceso a alcantarillado y la carga del sistema sea relativamente baja, es decir, en viviendas individuales o pequeñas comunidades. Este sistema corresponde a un pretratamiento, cuyo principal objetivo es eliminar sólidos suspendidos, al que se le pueden agregar componentes para que actúe también como tratamiento primario. Generalmente consiste en un contenedor hermético o tanque cerrado en el que ocurren procesos de sedimentación, desengrasado, almacenamiento de lodos y donde microorganismos digieren anaeróticamente la materia orgánica. Si bien la digestión de los microorganismos disminuye el volumen de lodos sedimentados, no son capaces de eliminarlos por completo generando una acumulación que debe ser extraída cada cierto periodo de tiempo para asegurar el correcto funcionamiento de la cámara. El agua, una vez separada de los sólidos sedimentados y las grasas, aceites y otros flotantes, es extraída de la cámara y normalmente infiltrada en el suelo a través de drenes o posos absorbentes, aunque también se pueden someter a otros tratamientos complementarios. Las principales ventajas de este sistema son sus bajos costos de mantención y operación como también su fácil y rápida construcción. Además, el sistema no consume energía, pero tiene bajos rendimientos de reducción de carga orgánica y eliminación de patógenos (SUBDERE, 2009; Vidal y Araya, 2014).

**Emisarios Submarinos:** Es un método de efusión de aguas servidas y no clasifica como un método de tratamiento, aun así, es uno de los sistemas más utilizados en Chile. El emisario es un conducto a través del cual se bombea el agua residual, después de haber atravesado un tratamiento primario, a grandes distancias y profundidades mar adentro. El final de la tubería es un tramo perforado, llamado difusor, que permite la difusión del agua servida en la masa de agua receptora. De esta manera el agua residual se diluye naturalmente a una distancia segura de la costa y la salinidad del mar completa el proceso de reciclaje (Pizarro, 2011).

#### 2.4. Marco legal y normativo

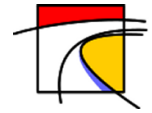
La normativa chilena actual no contempla la implementación de sistemas de tratamiento alternativo o no convencional de aguas servidas, como, por ejemplo: lagunaje, lechos bacterianos, biofiltros y humedales artificiales. Sin embargo, existe una variedad de manuales y catálogos, derivados de estudios y fabricantes, que explican y detallan los procesos de diseño y construcción de estas alternativas que, en caso de ser implementadas en el territorio nacional, deben adecuarse a las normativas y reglamentos generales sobre aguas servidas, su recolección, tratamiento y descarga a aguas superficiales o por infiltración.

De los principales cuerpos legales que abordan las aguas servidas, su disposición y tratamiento, se desprenden las distintas normas y reglamentos a los que se debe hacer referencia al momento de gestionar un proyecto alternativo de tratamiento. A continuación, se presentan las distintas legislaciones y los organismos responsables de velar por su aplicación.

Respecto a los principales cuerpos legales:

- **Ley 19.300:** Bases Generales del Medio Ambiente.

Esta ley busca regular el derecho de la población a vivir en un ambiente libre de contaminación y la protección, preservación y conservación del medio ambiente. Aborda los instrumentos de gestión ambiental, como la evaluación de impacto ambiental y las actividades que sean susceptibles de causar impacto ambiental. En este sentido, se aplica específicamente a aquellas actividades que tengan repercusiones en recursos hídricos. Aborda asimismo la responsabilidad por daño ambiental, la fiscalización y los organismos responsables de la protección de recursos naturales y áreas protegidas.



- **Decreto con Fuerza de Ley 725, Ministerio de Salud: Código Sanitario.**  
El Código Sanitario rige todas las cuestiones relacionadas con el fomento, protección y recuperación de la salud de la población. Sus normas y reglamentos complementarios resguardan las condiciones sanitarias de todos los ambientes susceptibles de ser contaminados producto de la actividad humana. En este marco, establece un conjunto de disposiciones vinculadas al agua y sus usos sanitarios: prohíbe la descarga de aguas servidas o residuos industriales en masas de agua sin su previa depuración en la forma en que determinen los reglamentos y señala que las aguas de alcantarillado, desagües u otras aguas consideradas contaminadas se podrán usar en el riego cuando se cuente con la autorización correspondiente del Servicio de Salud; determinando su grado de tratamiento, depuración o desinfección necesario.
- **Decreto con Fuerza de Ley 1.122, Ministerio de Justicia: Código de Aguas.**  
El Código de Aguas es el principal cuerpo legal en materia de gestión de los recursos hídricos en el país. Regula un conjunto muy amplio de aspectos en materia de aguas terrestres y su aprovechamiento, abordando en el marco sanitario materias tales como; los cauces de las aguas, naturales y artificiales; las aguas subterráneas; la protección de las aguas y cauces; aspectos sobre construcción de ciertas obras hidráulicas y aspectos sobre la Dirección General de Aguas, sus atribuciones y funciones.

La legislación chilena dispone de las aguas residuales en dos grandes grupos: las aguas residuales industriales y las aguas residuales no industriales o domésticas. De esta forma existe normativa específica para cada uno de estos grupos, entre otros, los contaminantes en las descargas de aguas, la calidad del agua y las especificaciones de diseño y construcción de instalaciones.

Respecto a la regulación de contaminantes:

- **Decreto 90, Ministerio Secretaria General de la Presidencia:** Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.  
Su objetivo es prevenir la contaminación de las aguas marinas y continentales superficiales (incluyendo cuerpos de agua fluviales, lacustres, marinas dentro y fuera de la zona de protección litoral) mediante el control de contaminantes asociados a los residuos líquidos que se descargan a estos cuerpos, con la finalidad de mejorar la calidad ambiental de estos cuerpos de agua. Con este fin, establece la concentración máxima de contaminantes permitida para residuos líquidos descargados. Están contemplados para su fiscalización la Superintendencia de Servicios Sanitarios, la Dirección General de Territorio Marítimo y de Marina Mercante y los Servicios de Salud correspondientes.
- **Decreto 46, Ministerio Secretaria General de la Presidencia:** Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas.  
Su objetivo es prevenir la contaminación de las aguas subterráneas mediante el control de las concentraciones de los contaminantes en residuos líquidos que son descargados, a través del suelo, a las zonas saturadas de los acuíferos mediante obras destinadas a infiltrarlo. Este decreto establece las concentraciones máximas de contaminantes permitidas para residuos líquidos descargados. Sus normas no son aplicables a las labores de riego, a los depósitos de relaves y a la inyección de las aguas de formación a los pozos de producción en los yacimientos de hidrocarburos. Están contemplados para su fiscalización la Superintendencia de Servicios Sanitarios y los Servicios de Salud correspondientes.



- **Decreto 609, Ministerio de Obras Publicas:** Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado.  
Con el fin de mejorar la calidad ambiental de las aguas servidas vertidas a los servicios públicos, la norma establece los límites máximos de contaminantes permitidos para residuos industriales líquidos descargados al sistema de alcantarillado público. De esta forma se protegen y preservan los servicios públicos de recolección y disposición de aguas servidas.  
Su fiscalización está a cargo de los prestadores de servicios sanitarios, sin perjuicio de las facultades de inspección y supervigilancia que corresponden a la Superintendencia de Servicios Sanitarios, organismo competente de acuerdo con la ley N°19.300.

Respecto a los requisitos de calidad del agua:

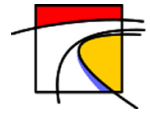
- **Norma Chilena NCh 1333 Of.1978, Modificada en 1987:** Requisitos de calidad del agua para diferentes usos.  
Esta norma establece requisitos de calidad del agua según su uso: agua para consumo humano, agua para la bebida de animales, riego, recreación y estética y vida acuática, a través de criterios de calidad de acuerdo con requerimientos físicos, químicos y biológicos. De esta forma, se protege y preserva la calidad del agua de la degradación producida por contaminantes de cualquier tipo u origen. Los organismos dispuestos para su regulación y fiscalización son la Dirección General de Aguas y el Ministerio de Obras Públicas, así como las oficinas del Servicios de Salud correspondientes.

Respecto a la normativa de instalaciones sanitarias:

- **Ley 21.075:** Regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises.  
La ley establece y regula los sistemas de reutilización de las aguas grises, aplicable a áreas urbanas y rurales. De acuerdo con la ley, cada vez que no exista factibilidad de alcantarillado se puede instalar un sistema de tratamiento tanto de aguas negras y aguas grises, mientras que, de existir alcantarillado, sólo se podrán tratar las aguas grises.
- **Decreto Supremo 50, Ministerio de Obras Publicas:** Reglamento de instalaciones domiciliarias de agua potable y de alcantarillado (RIDDA).  
El RIDDA aborda los proyectos, la construcción y puesta en servicio de las instalaciones domiciliarias de agua potable y de alcantarillado y establece las normas técnicas para este tipo de instalaciones. La Superintendencia de Servicios Sanitarios, sujeto a la supervigilancia del Ministerio de Obras Públicas, es responsable de la fiscalización de este reglamento.
- **Decreto 236, Ministerio de Salud:** Reglamento general de alcantarillados particulares, fosas sépticas, cámaras filtrantes, cámaras de contacto, cámaras absorbentes y letrinas domiciliarias.  
El reglamento aborda la disposición de las aguas servidas caseras en las ciudades, pueblos u otros lugares poblados en donde no exista una red de alcantarillado público y de todos los edificios particulares o públicos, urbanos o rurales, destinados a la habitación o vivienda transitorio o permanente que no puedan descargar sus aguas servidas a alguna red pública existente. Su aplicación debe ser fiscalizada por la Superintendencia de Servicios Sanitarios correspondiente.



- **Norma Chilena NCh 1104 Of.1998:** Ingeniería sanitaria – Presentación y contenido de proyectos de sistemas de agua potable y alcantarillado.  
La norma establece las disposiciones generales para la elaboración de los proyectos de agua potable y de alcantarillado, respecto a su presentación y contenido.
- **Norma Chilena NCh 1105 Of.1999:** Ingeniería sanitaria - Alcantarillado de aguas residuales - Diseño y cálculo de redes.  
La norma establece las condiciones generales relativas al diseño y cálculo de una red de alcantarillado de aguas residuales.
- **Norma Chilena NCh 3371 Of.2017:** Instalaciones domiciliarias de alcantarillado de aguas servidas – Diseño, cálculo y requisitos.  
La norma establece los requisitos básicos que se deben cumplir en el diseño y cálculo de las instalaciones domiciliarias de alcantarillado de aguas servidas domesticas que son descargadas gravitacionalmente. Establece también las disposiciones generales para el diseño de las instalaciones domiciliarias aplicable en todo el territorio nacional.



### 3. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es determinar la factibilidad técnica, legal y económica de un sistema de humedal construido para una edificación urbana en la ciudad de Viña del Mar, Chile.

Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la posibilidad de diseño e implementación de un humedal construido para el tratamiento de las aguas grises en un entorno urbano como solución sustentable para el problema hídrico a través de la reutilización de las aguas recuperadas, por ejemplo, para el riego de áreas verdes y usos estéticos.
- Evaluar si el marco legal vigente en Chile permite la construcción de un humedal artificial y en qué condiciones se puede integrar un sistema de este tipo al tratamiento de aguas servidas.
- Realizar un análisis comparativo de las tecnologías de tratamiento de agua más comúnmente utilizadas en Chile en sistemas de alcantarillado particular y el sistema de humedales construidos artificialmente, considerando factores de funcionamiento, económicos y ecológicos, tales como cantidad de agua a tratar, costos, permisos medioambientales requeridos, desechos generados, entre otros.
- Aplicar todo el análisis anterior en un caso real de diseño de un humedal construido para el edificio Instituto de Música de la Universidad Católica de Valparaíso, ubicado en Viña del Mar. Dicho edificio está destinado a la escuela de Música de la PUCV y cuenta con una superficie total construida de 2.500 m<sup>2</sup> aproximadamente. El proyecto es ideal para implementar un tratamiento alternativo de aguas ya que cuenta con las instalaciones sanitarias de aguas servidas separadas en aguas grises y aguas negras. La finalidad es determinar el tipo, características y dimensiones del humedal artificial necesario para depurar las aguas grises domiciliarias y darle un nuevo uso como agua de riego de áreas verdes.



#### 4. Humedales naturales

Con normalidad describen a los humedales naturales, extensiones de terreno temporal o permanentemente inundadas, como los “riñones de la tierra” haciendo referencia a las diversas funciones que cumplen dentro de los ecosistemas como transformar y almacenar materia orgánica y nutrientes, regular el régimen hidrológico, estabilizan el clima y constituyen el hábitat de una amplia variedad de flora y fauna.

La definición más utilizada y a la que más se hace referencia cuando se habla de humedales naturales está dada en el texto de la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Ramsar en su artículo 1 de 1971, que dice:

*“Son humedales las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (Ramsar, 1994).*

Con la celebración continua de congresos sobre humedales se ha actualizado la definición de Ramsar y así mantener la coherencia entre humedales, indicando que los humedales son zonas donde el agua es el principal factor controlador del medio y la vida vegetal y animal asociada a él y se dan donde la capa freática se halla en la superficie terrestre o cerca de ella o donde la tierra está cubierta por aguas poco profundas (Ramsar, 2006).

Sin embargo, muchas otras instituciones han adoptado sus propias definiciones para humedales. Por ejemplo, la EPA define humedal como un área donde el agua cubre el suelo o está cerca de la superficie durante periodos o todo el año, donde la saturación determina como el suelo se desarrolla y el tipo de flora y fauna que habitan dicho suelo (EPA, 2021).

Esta definición de la EPA incorpora aspectos más específicos descritos en la clasificación de humedales del Departamento del Interior de Estados Unidos relacionados con los suelos hídricos, vegetación hidrófita y regulación hidrológica. De acuerdo con la clasificación se deben cumplir algunos de los siguientes atributos (Cowardin et al., 1979):

- a. La tierra soporta de forma periódica vegetación predominantemente hidrófita.
- b. El sustrato es predominantemente suelo hídrico (con mal drenaje o sin drenaje).
- c. El sustrato está saturado o cubierto con aguas superficiales durante el periodo anual de crecimiento de la vegetación.

Los humedales naturales cumplen diversas funciones como ecosistema y sistema regulador, entre las más destacables se pueden mencionar (MMA, 2011):

- Soportan una gran biodiversidad, representando un ecosistema singular para flora y fauna y actúan como reservorio de diversidad biológica.
- Tienen la capacidad para almacenar agua, recargar los niveles freáticos y napas subterráneas, controlar inundaciones y estabilización de la línea de agua.
- Remueven ciertos contaminantes, desintoxican y depuran el agua, retienen y exportan sedimentos y nutrientes.
- A través de la evapotranspiración aportan al clima local y global.

En Chile el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) está encargado del registro de los humedales naturales en todo el territorio nacional. De acuerdo con el último catastro, “Diseño del Inventario Nacional de Humedales y el Seguimiento Ambiental” del año 2011, se estima que la superficie de humedales no supera el 2%. Cabe señalar que en esta cifra no se contemplan los humedales de las islas oceánicas, ni las turberas y mallines de la zona sur austral (regiones de Aysén y Magallanes del territorio chileno). Se contabiliza una superficie país de 1.986.167 [ha] de humedales, subdivididas en tres tipologías básicas respecto a las condiciones del área: agua 1.411.586,3 [ha]; vegetación 301.342,4 [ha] y vegetación-agua 273.238,9 [ha].

El catastro también indica que solo el 0,5% de los humedales del país se encuentran bajo áreas de protección y equivalen a 2,7% de las áreas protegidas (MMA, 2011). Además, de acuerdo con los registros Ramsar, Chile tiene actualmente 16 sitios designados como Humedales de Importancia Internacional o sitios Ramsar, con una superficie de 363.927 [ha] (Ramsar, 2020).

En el año 1981 Chile se suscribe a la Convención Ramsar y la promulga como ley de la República. Desde ahí, algunos de los humedales más relevantes han sido protegidos por el Sistema Nacional de áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE) administrado actualmente por la Corporación Nacional Forestal (CONAF), o nombrándolos “Santuario de la naturaleza”, como por ejemplo el santuario Carlos Anwandter, Valdivia. Para el año 2005 se crea el Comité Nacional de Humedales y la Estrategia Nacional para la Conservación y Uso Racional de Humedales. Finalmente, en el año 2010 se funda el Ministerio de Medio Ambiente y el Servicio de Biodiversidad y áreas Protegidas. A pesar de estos avances en la materia los expertos afirman que aún hay mucho que hacer respecto a la conservación y utilización de humedales.



*Figura 3: Santuario de la naturaleza Carlos Anwandter, Valdivia.*

## 5. Humedales artificiales

Entre las soluciones más atractivas para el tratamiento de las aguas servidas, que son ambientalmente convenientes y económicamente viables, se encuentran los tratamientos naturales, llamados así por su forma de funcionamiento, imitando fenómenos naturales que ocurren espontáneamente. Entre algunas de las ventajas que estos sistemas tienen esta su capacidad de depurar y producir efluentes de buena calidad y presentar bajos costos de inversión, operación y mantenimiento. Algunos de estos sistemas son los lagunajes, filtros biológicos y los humedales construidos (HC).

Como se mencionó, los humedales naturales son extensiones de tierra que permanece inundadas de forma natural, en cambio, los HC son diseñados a partir de las características de los humedales naturales y su capacidad de depuración a través de procesos físicos, químicos y biológicos relacionados con la vegetación, el suelo y los microorganismos en un ambiente controlado. Este ambiente controlado está construido generalmente por lagunas o canales de poca profundidad por donde circula el agua contaminada.

En los HC se distinguen tres funciones básicas que les conceden un atractivo potencial; fijan físicamente los contaminantes al suelo y la materia orgánica, utilizan y transforman los elementos por medio de microorganismos y alcanzan niveles de tratamiento consistentes con poca mantención y bajo consumo de energético (Delgadillo et al., 2010).

### 5.1. Tipos de Humedales Construidos

La definición de los tipos de HC es variable y se han propuesto varias clasificaciones para los distintos sistemas. Una de estas opciones es la clasificación de acuerdo con la forma de la macrófitas predominante en el humedal (Vymazal, 1998):

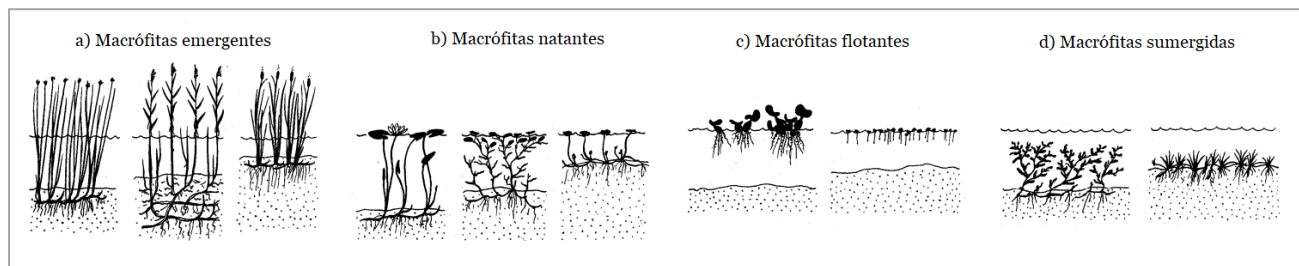


Figura 4: Tipos de Macrófitas (Adaptado de Vymazal, 1998).

- Sistemas basados en macrófitas libres flotantes: el cuerpo vegetal flota total o parcialmente, son muy diversas en forma y hábito, abarcando desde grandes plantas con hojas aéreas y flotantes con raíces desarrolladas (Ej: Jacinto de agua - *Pontederia crassipes*) hasta diminutas plantas flotantes sin raíces (Ej: Lenteja de agua - *Lemnoideae*).
- Sistemas basados en macrófitas de hojas flotantes o natantes: las raíces de la planta se anclan al fondo del lecho y se caracterizan por tener hojas relativamente grandes que descansan sobre la superficie del agua (Ej: Nenufar europeo - *Nymphaea alba*).
- Sistemas basados en macrófitas sumergidas: en este caso el tejido fotosintético está completamente sumergido. Sin embargo, plantas de este tipo solo se desarrollan adecuadamente en aguas oxigenadas y relativamente transparentes. Por esta razón lo más común es encontrar estas plantas en sistemas secundarios de tratamiento (Ej: Luchecillo - *Egeria densa*).
- Sistemas basados en macrófitas emergentes: son plantas que nacen en el lecho y afirmadas por raíces que crecen por sobre la línea de agua, teniendo una parte de su estructura sumergida y la otra abierta a la atmósfera (Ej: Totorá - *Typha latifolia*).

Se pueden combinar los distintos sistemas de macrófitas entre sí o con otros sistemas convencionales de tratamiento para aprovechar de mejor forma las ventajas de cada método. La calidad del efluente final tiende a mejorar junto con la complejidad de las instalaciones.

Probablemente la clasificación más utilizada para HC es de acuerdo con las características del flujo hidráulico en el lecho. Bajo esta clasificación se distinguen dos tipos de humedales: los sistemas de Flujo Superficial o Libre (FS) y sistemas de Flujo Subsuperficial (FSS), dentro de este último se distinguen entre Flujo Horizontal (HFSS) y Flujo Vertical (VFSS).

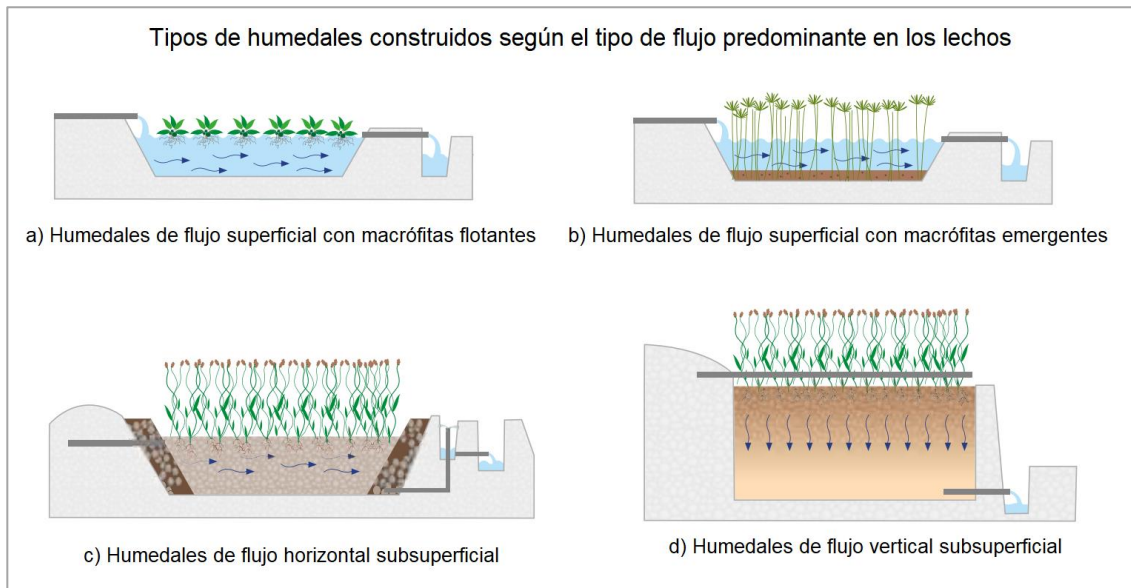


Figura 5: Tipos de humedales construidos según el tipo de flujo (Fuente: Vidal y Hormazábal, 2018).

### 5.1.1. Humedales construidos de flujo superficial (FS)

En este tipo de humedal el agua fluye sobre la superficie a través de las plantas acuáticas, siendo la mejor imitación de un sistema natural, tanto en apariencia como funcionamiento. Esta estrecha similitud transforma al FS en un hábitat atractivo para la vida silvestre. Durante la circulación del agua a través de los tallos, sistemas foliares y raíces de las macrófitas a una relativa baja velocidad de flujo ocurren procesos de sedimentación, filtración, oxidación, reducción, adsorción y precipitación (EPA, 2000).

Las principales características de los FS son:

- Capa de suelo entre 0,2 y 0,3 [m].
- Profundidades de agua entre 0,2 y 0,6 [m].
- Carga hidráulica entre 12 y 50 [mm/d].
- Carga orgánica superficial entre 1 y 11 [gDBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>·d].
- Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) entre 5 y 15 días.

Los FS se utilizan generalmente como tratamientos secundarios y terciarios o también como tratamiento de aguas lluvia y agrícolas gracias a su capacidad de funcionar con flujos intermitentes y niveles de agua variables (Vidal y Hormazábal, 2018).

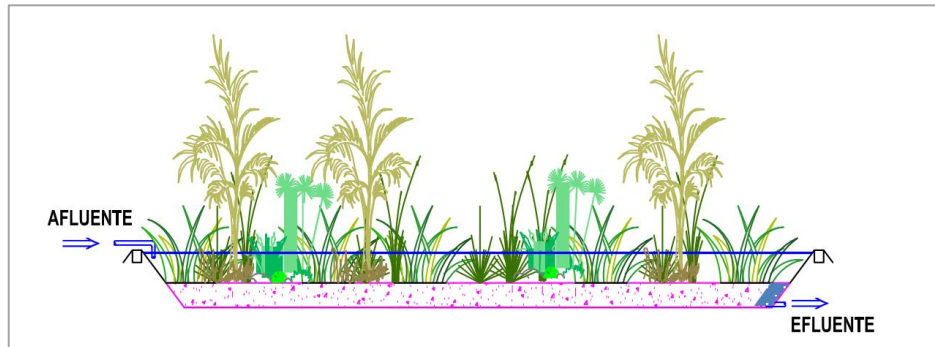


Figura 6: Humedal construido de flujo libre (FS) (Fuente: Andreo, 2014).

El formato más común de los humedales FS es utilizando macrófitas emergentes y de hojas flotantes. Sin embargo y a diferencia de los humedales de flujo subsuperficial, los humedales FS también se pueden construir utilizando macrófitas libres flotantes o macrófitas sumergidas.

Los humedales FS basados en macrófitas flotantes son muy similares a los sistemas que utilizan lagunas de tratamiento, excepto por la profundidad de los estanques y la presencia de macrófitas en vez de algas. La población de microorganismos se construye en las raíces de las plantas flotantes que además ayudan a minimizar los efectos del viento en la superficie favoreciendo la sedimentación de las partículas suspendidas. La presencia de las macrófitas flotantes impide la entrada de luz solar lo que previene el desarrollo de algas bajo la superficie.

No se han desarrollado estudios completos sobre los humedales FS basados en macrófitas sumergidas, aunque existen actualmente sistemas en funcionamiento. Las macrófitas sumergidas se pueden desarrollar en cualquier tipo de humedal mientras existan las condiciones adecuadas (Andreo, 2014).

### 5.1.2. Humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial (HFSS)

En un humedal HFSS el agua percola, principalmente en un sentido horizontal, a través de un suelo granular y las raíces de las plantas. Las aguas servidas, anteriormente tratadas, entran al medio poroso por donde circulan lentamente bajo la superficie, entrando en contacto con la vegetación emergente, hasta salir y ser descargada en un dispositivo de control de nivel. El flujo de agua atraviesa zonas aeróbicas, anaeróbicas y anoxias donde experimenta una variedad de procesos de tratamiento. Por ejemplo, la materia orgánica es degradada por microorganismos adheridos a las raíces y rizomas de la vegetación en las zonas aeróbicas y anaeróbicas.

Esta cama de suelo, generalmente con geometría regular para facilitar una adecuada distribución de las aguas y con una leve pendiente de fondo (entre 0.5 y 1%), tiene su base y costados impermeabilizados de manera de asegurar el confinamiento de las aguas.

Las principales características de los HFSS son:

- Profundidades de agua entre 0,3 y 1,0 [m] y permanecen permanentemente inundados.
- Carga hidráulica entre 10 y 50 [mm/d].
- Carga orgánica superficial entre 3 y 15 [gDBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>-d].
- TRH entre 2 y 10 días.
- El medio filtrante está compuesto por arenas gruesas hasta gravas gruesas, empleándose tamaños más grandes para mejorar la distribución del agua.

Los HFSS se utilizan generalmente como tratamientos secundarios en viviendas unifamiliares o comunidades pequeñas. Tienen la ventaja añadida que, al fluir el agua bajo la superficie, el riesgo de exposición a organismos patógenos es mínimo. Además, el flujo subterráneo está aislado de las condiciones superficiales permitiendo al HFSS funcionar en climas más fríos (Vidal y Hormazábal, 2018).

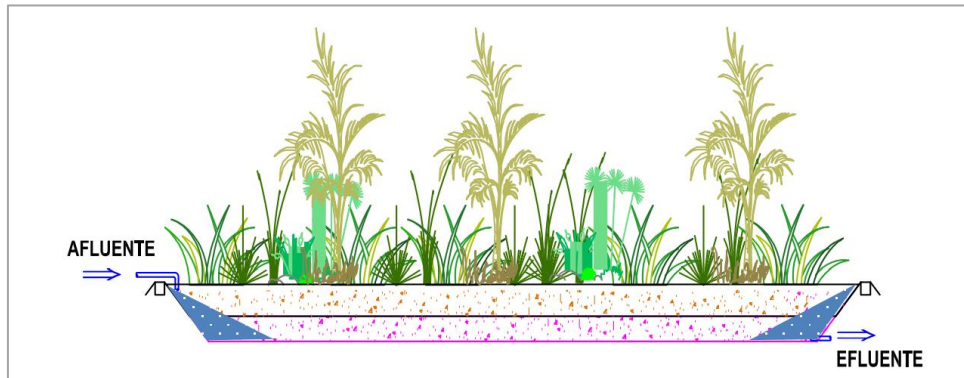


Figura 7: Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal (HFSS) (Fuente: Andreo, 2014).

Generalmente las áreas superficiales de estos humedales, que han presentado buenos rendimientos, varían entre 3 y 5 [m<sup>2</sup>/PE]. Otras aproximaciones se refieren a la “Regla de oro” que indica una superficie de 5 [m<sup>2</sup>/PE], es decir, una relación de 12-20 [m<sup>2</sup>] para un caudal de 1000 litros diarios (Andreo, 2014).

### 5.1.3. Humedales construidos de flujo vertical subsuperficial (VFSS)

En un humedal VFSS, a diferencia de un humedal HFSS, el agua es vertida uniformemente en la superficie en forma de riego y se filtra a través del medio poroso y las raíces de las plantas siguiendo un flujo más o menos vertical. En el fondo del humedal se disponen una serie de drenes que recolectan el agua percolada y la evacuan del sistema, adicionalmente se suelen instalar tuberías de aireación en el medio poroso, que junto a la aplicación de agua intermitente estimula al máximo las condiciones aeróbicas del medio. La impermeabilización y la vegetación es igual al de un HFSS.

Otra diferencia con los humedales HFSS es que en estos sistemas el agua residual se inyecta de forma intermitente encima del lecho, por lo tanto, se distingue entre las etapas de llenado, reacción y vaciado. Para un correcto funcionamiento se recomienda siempre construir dos humedales (o una cantidad par de celdas) que operen en paralelo, de manera que los periodos de reposo y aplicación de agua sean intercalados.

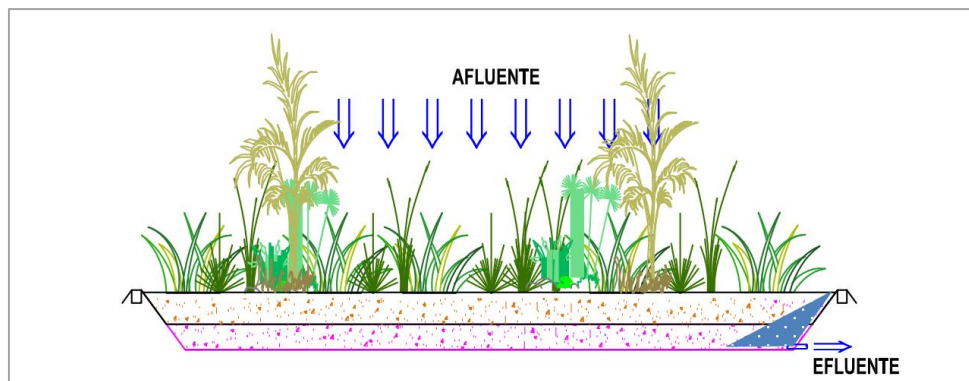


Figura 8: Humedal construido de flujo subsuperficial vertical (VFSS) (Fuente: Andreo, 2014).



Durante el funcionamiento del HC se debe asegurar que no quede agua en la superficie del lecho, de esta manera se condiciona la frecuencia de aplicación del riego. Esta aplicación intermitente favorece la oxigenación del lecho y generan condiciones más oxidadas. Esta característica permite que los humedales VFSS puedan operar con cargas orgánicas mayores a los HFSS (García y Corzo, 2008; Vidal y Hormazábal, 2018).

Generalmente los humedales VFSS requieren menores áreas superficiales de tratamiento comparados con los humedales HFSS, usualmente varían entre 1 y 3 [m<sup>2</sup>/PE], pero requieren de una mayor y más compleja operación y mantención (Andreo, 2014).

Las principales características de los VFSS son:

- Profundidad media entre 0,5 y 1,4 [m].
- Profundidad del medio granular entre 0,5 y 0,8 [m] y no permanecen permanentemente inundados, es decir, son cargados de forma intermitente.
- Carga orgánica superficial entre 10 y 25 [gDBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>·d].
- TRH entre 1 y 2 días.
- El medio filtrante lo componen capas de material granular horizontales de distintas granulometrías.

## 5.2. Componentes de los Humedales Construidos

El fundamento del funcionamiento de los HC se encuentra en tres principios básicos: la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de la vegetación y el apoyo de un lecho inerte, tanto como soporte para la vegetación como medio filtrante. En conjunto estos elementos son capaces de remover materiales disueltos y suspendidos y biodegradar la materia orgánica (Delgadillo et al., 2010).

Los HC están constituidos por cuatro partes principales claramente distinguibles entre sí:

### 5.2.1. Agua residual

En este caso se habla del agua y los diversos contaminantes que traen consigo, de acuerdo con su procedencia. Debido a que el agua es el medio que reúne todas las funciones de un humedal, la hidrología es el factor de diseño de más importancia. En gran medida el éxito de un HC depende del diseño hidrológico (Lara, 1999):

- Pequeños cambios en el diseño pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento.
- Debido al área superficial y poca profundidad del agua, el sistema está fuertemente relacionado a la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración.
- La densidad de la vegetación puede obstruir el flujo y bloquear la exposición al viento y al sol.

### 5.2.2. Sustrato o medio granular

En los HC el medio granular cumple dos funciones principales: sirve de soporte para la vegetación y actúa como medio filtrante del agua. Este sustrato está conformado por el suelo (arena y grava, roca), sedimentos y restos de vegetación acumulados por el crecimiento biológico en el humedal.

Como este sustrato actúa de medio filtrante, su principal característica es tener la permeabilidad suficiente para permitir el flujo de agua a través de él. Para conseguir estas características se utilizan generalmente suelos granulares con baja presencia de finos. Este medio soporta una gran variedad de microorganismos y plantas que realizan la actividad biodegradadora que facilitan la eliminación de contaminantes. Además, el sustrato es responsable de extraer algunos contaminantes de forma directa a través de interacciones físicas y químicas (Delgadillo et al., 2010).

La granulometría del lecho afecta directamente el flujo hidráulico del HC y por lo tanto también el caudal de funcionamiento. Si se emplean elevadas cantidades de arcilla y limo mejora la capacidad de adsorción y de filtración del medio debido al menor tamaño de huecos, pero también aumenta la resistencia hidráulica del sustrato y disminuye las velocidades del flujo. En cambio, al utilizarse arenas y gravas limpias disminuyen las capacidades de adsorción y filtración del medio, pero mejora la conductividad hidráulica (Lara, 1999).

### 5.2.3. Vegetación

Las plantas macrófitas son vegetales cormófitos, es decir, tiene raíces, tallos y hojas que habitan espacios inundados, ya sea sumergido o emergentes, formando asociaciones o colonias de vegetación entre ellas. La mayoría son especies que crecen en agua dulce, existiendo solo algunas que sobreviven en aguas saladas. Estas especies se clasifican como flotantes libres, sumergidas o arraigadas con hojas flotantes, y emergentes. Generalmente estas formas coexisten y potencian las condiciones necesarias para el desarrollo entre ellas.

La vegetación en un HC, generalmente compuesta por macrófitas emergentes, contribuye al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras: estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo; disminuyen la velocidad del flujo permitiendo la sedimentación; absorben el carbono, nutrientes y elementos traza y los incorporan a sus tejidos; transportan oxígeno al agua y al sustrato; los tallos y raíces sirven de lugar para la fijación de microorganismos.

Las macrófitas, igual que todas las plantas, forman biopelículas bacterianas en torno a sus raíces y rizomas que son responsables de la biodegradación, filtración y adsorción de los contaminantes y nutrientes que traen las aguas residuales. Al mismo tiempo, transportan oxígeno a la columna de agua y al sustrato de suelo, generando zonas aeróbicas, y limitan la entrada de luz solar que controlan el desarrollo de algas (Delgadillo et al., 2010; Vidal y Hormazábal, 2018).







<b><i>Phragmites</i> - Cañas</b> Ej: <i>Phragmites australis</i> (Caña Común)	<b><i>Typha</i> - Espadaña o Aneas</b> Ej: <i>Typha angustifolia</i> (Tora de hoja estrecha)	<b><i>Scirpus</i> - Totoras</b> Ej: <i>Scirpus acutus</i> (Tule)
		
		

Figura 9: Plantas típicas utilizadas en sistemas de tratamiento con HC.



A pesar de que existe una gran variedad de especies, solo algunas pocas se han utilizado dentro de los sistemas de HC. Para que las plantas se puedan usar en estos sistemas deben tolerar altas cargas orgánicas y nutrientes, desarrollar abundantes raíces y rizomas para potenciar la creación de biopelículas y tener una biomasa aérea importante para la recolección de nutrientes. En la actualidad se ha estudiado la incorporación de plantas ornamentales a los HC para mejorar la infraestructura del sistema de tratamiento, entregando un mayor realce estético y, posiblemente, generar beneficios económicos (Vymazal, 2011).

La mayoría de los sistemas está construido como monocultivo de macrófitas, sin embargo, estudios de humedales a base de policultivo indican que se puede conseguir una adecuada distribución de las raíces y desarrollar una población microbiana más diversa.

La vegetación de los HC va cambiando en el tiempo y de acuerdo con los ciclos de vida de las macrófitas, ya que tienen lugar adaptaciones locales a los patrones hídricos y la calidad del agua. El desarrollo de la comunidad vegetal está relacionado con la carga orgánica, la hidrología y el clima (Kadlec & Wallace, 2009).

Una forma de mejorar la eficiencia de eliminación de contaminantes es la poda controlada y sistemática de las macrófitas, por ejemplo, el rápido crecimiento de las plantas podadas incrementa la eliminación de nitrógeno. Pero la poda puede afectar negativamente a la población de microorganismos en las raíces y rizomas de las plantas disminuyendo así el rendimiento del HC (Andreo, 2014).

#### 5.2.4. Microorganismos

La estructura de un HC constituye un hábitat ideal para el desarrollo de microorganismos responsables de la biodegradación. Entre estos, los organismos más comunes que habitan los HC son bacterias, hongos y algas. Los microorganismos que habitan dentro de un HC son los responsables de realizar el tratamiento biológico de las aguas descargadas. Dentro del humedal se pueden distinguir dos zonas de microorganismos: cerca de la atmósfera, en la zona superior, donde abunda el oxígeno se desarrollan colonias de microorganismos aeróbicos, mientras que en el lecho granular predominan los microorganismos anaerobios.

Estos microorganismos realizan los procesos de degradación de materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza y la desinfección de patógenos alterando las condiciones de oxidación-reducción del sustrato repercutiendo así en la capacidad de proceso del humedal. A su vez, la biomasa microbiana consume gran parte del carbono y otros nutrientes presentes en el medio y convierte en gases muchos de los contaminantes (Lara, 1999; Andreo, 2014).

#### 5.3. Mecanismos de remoción de contaminantes

La eliminación de contaminantes en los HC ocurre a través de varios procesos y mecanismos físicos, químicos y biológicos que ocurren a medida que el agua servida fluye a través del sistema. De esta manera los HC actúan como sistema de tratamiento secundario y en condiciones especiales también como tratamiento primario y terciario de las aguas residuales. Entre los diferentes métodos de eliminación existen dos que predominan en los sistemas de tratamiento: la separación entre sólidos y líquidos, como son la sedimentación, filtración, absorción y adsorción, y la transformación química y bioquímica (EPA, 2000).

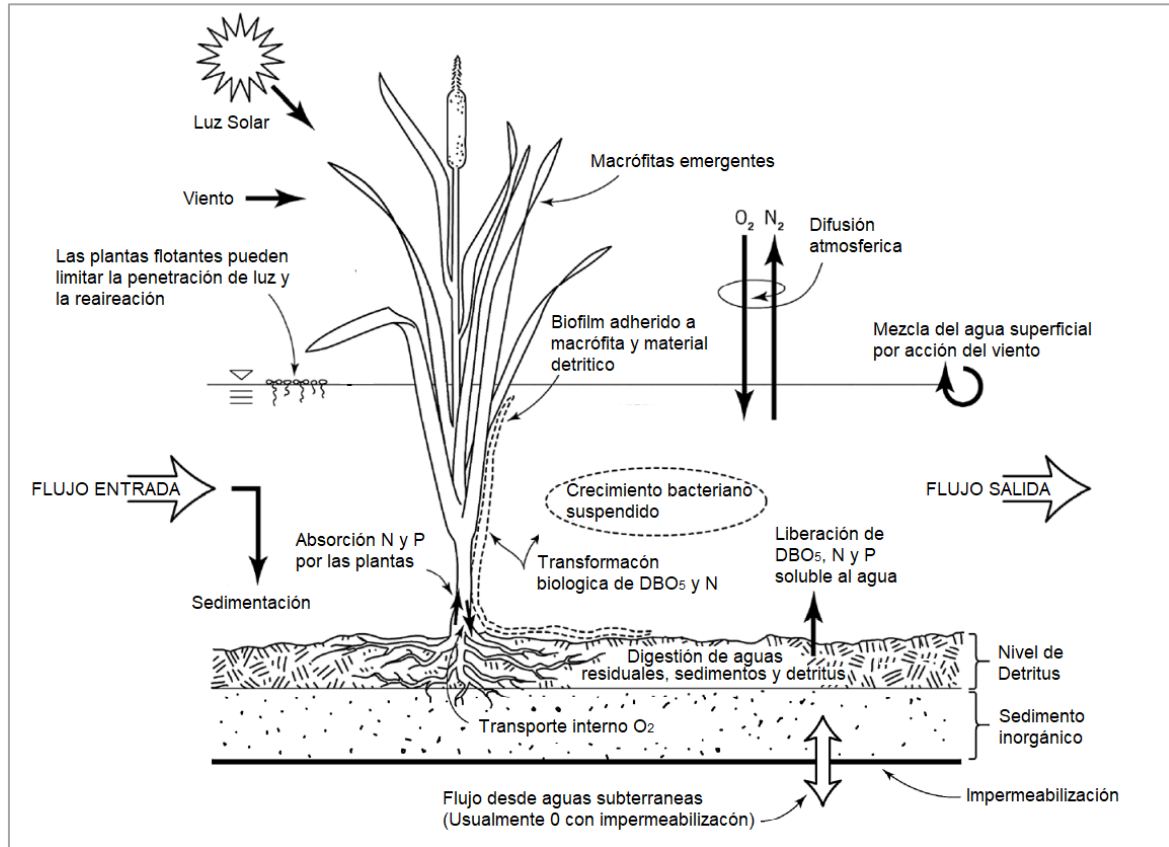


Figura 10: Interrelaciones de una macrófita en un HC (Adaptado de Wallace, 2007).

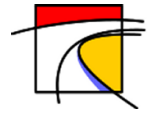
A continuación, se presentan los diferentes mecanismos y procesos de remoción que tienen lugar en un HC de acuerdo con cada contaminante encontrado en las aguas servidas, vistos anteriormente:

### 5.3.1. Remoción de materia orgánica

En las aguas servidas que entran al HC se encuentra materia orgánica en dos formas: particulada, que se puede remover a través de procesos físicos como la sedimentación y filtración, y disuelta, que es degradada dentro del humedal. Los HC son un caso particular en lo que respecta a las fuentes de materia orgánica, porque por una parte ingresa materia orgánica contenida en las aguas residuales, llamada carga externa, y por otra parte el HC y la vegetación producen su propio material, llamado carga interna.

La carga interna se produce de forma natural por la acumulación de sedimentos, restos de la vegetación y la fracción no biodegradable de la microfauna y flora. La acumulación de este material dentro del HC hace que se vuelva progresivamente más difícil de degradar con el tiempo.

La carga externa que ingresa en las aguas servidas al HC puede ser clasificada en particulada: Materia Orgánica Particulada (MOP) y disuelta: Materia Orgánica Disuelta (MOD), ambas con procesos diferentes de remoción. La fracción particulada está relacionada con macromoléculas que se deben descomponer antes de poder aprovecharse por los microorganismos, en cambio, la fracción disuelta puede ser adsorbida directamente por lo que su biodegradación es mucho más rápida (Vidal y Hormazábal, 2018).



La mayor parte de la MOP es retenida por mecanismos físicos, principalmente a través de la sedimentación y filtración. Esta interacción entre el agua y el sustrato tiene importantes consecuencias en la calidad del agua y el humedal. Los principales factores que contribuyen a la retención de las partículas dentro de un HC son: las constricciones del flujo producidas por el medio granular, la baja velocidad del flujo y las fuerzas de adhesión entre partículas, contribuyen además las raíces de la vegetación. Habitualmente los valores de eliminación de MOP están entre 85-95%. La EPA recomienda que para alcanzar niveles de eficiencia superiores a 90% la carga máxima de MOP no supere los 20 [g MOP/m<sup>2</sup>-d] y así evitar la colmatación (EPA, 2000).

El principal método de remoción de la MOD es mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. Los encargados de la biodegradación son los microorganismos fijados a la vegetación, el medio granular y los sedimentos. Estos microorganismos requieren energía y carbono para poder sintetizar nuevas células como también otros nutrientes y elementos de traza. Se distinguen dos tipos de biodegradación dependiendo de la presencia de oxígeno que ocurren simultáneamente en los HC. Si existe suficiente oxígeno para satisfacer la demanda de los microorganismos prevalecen procesos aeróbicos, generalmente en la superficie y zonas adyacentes a las raíces, en cambio si no se satisface la demanda de oxígeno prevalecen procesos anaeróbicos, generalmente dentro del medio granular. Habitualmente los valores de eliminación de MOP están entre 76-94% (Vidal y Hormazábal, 2018).

En la actualidad está estudiado que la profundidad del agua y la carga orgánica afectan los distintos procesos de degradación de la materia orgánica y, por lo tanto, también los rendimientos de eliminación. La disminución de la eficiencia a medida que prevalecen los procesos anaeróbicos por sobre los anóxicos y aeróbicos explica por qué los VFSS alcanzan mejores rendimientos de eliminación, debido a que en ellos prevalecen las vías aeróbicas (García y Coroz, 2008).

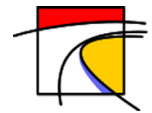
### 5.3.2. Remoción de sólidos suspendidos

El lento flujo del agua a través de las estructuras de las macrófitas y el sustrato favorecen los procesos de filtrado y sedimentación de los sólidos suspendidos y sedimentables que no lograron ser eliminados completamente en el pretratamiento. Estos procesos se ven potenciados por las fuerzas de adhesión entre sólidos que resultan en partículas de mayor tamaño.

En general, tanto los sistemas horizontales como verticales tienen rendimientos de remoción muy elevados, superando el 90%, produciendo efluentes con concentraciones menores de 20 [mg/L] de forma sistemática. Aunque el HC es capaz de completar esta remoción es importante que el agua proveniente del tratamiento previo contenga la menor cantidad de sólidos suspendidos de manera de evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal (Delgadillo et al., 2010; Gracia y Coroz, 2008).

### 5.3.3. Remoción de nitrógeno

La mayor parte del nitrógeno presente en el agua residual que ingresa al HC está en forma de amonio o nitrógeno amoniacal (60%), siendo el resto nitrógeno orgánico (40%). Existen diferentes procesos de remoción de nitrógeno dentro de un HC. Se distinguen procesos biológicos: como la amonificación, nitrificación, desnitrificación, incorporación a tejidos vegetales y asimilación de microorganismos, procesos de oxidación anaerobia y procesos fisicoquímicos: como la adsorción, sedimentación y volatilización (EPA, 2000)



Los dos principales mecanismos de remoción son la nitrificación y la desnitrificación. El proceso completo se puede describir en tres pasos (Delgadillo et al., 2010):

- a. La amonificación es la mineralización del nitrógeno orgánico, es decir, se convierte biológicamente en amoníaco, y ocurre en las zonas aeróbicas y anaeróbicas.
- b. La nitrificación ocurre en zonas aeróbicas, porque requiere la presencia de oxígeno, y corresponde a la oxidación biológica del amonio a nitrato.
- c. La desnitrificación es el paso final. Este proceso ocurre en condiciones anóxicas, es decir, no hay oxígeno disuelto presente pero el oxígeno está disponible en fuentes tales como el nitrato, nitrito o incluso sulfato. En este proceso se elimina el nitrato producido y convertirlo en gas nitrógeno.

Las macrófitas son capaces de eliminar el nitrógeno a través de la asimilación de amonio o nitrato, utilizándose generalmente el amonio que es más abundante. El nitrógeno asimilado es incorporado a la biomasa y por tanto eliminado del agua. Este puede reincorporarse al agua una vez que la parte aérea de las plantas muere, por lo que se recomienda podar las plantas antes de la senescencia. Las plantas son capaces de eliminar entre 10-20% del nitrógeno (Gracia y Coroz, 2008).

#### 5.3.4. Remoción de fósforo

En las aguas residuales se encuentran tres distintas formas de fósforo: ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. El ortofosfato, alrededor del 25% del fósforo total, está disponible para el metabolismo biológico inmediato. En términos de utilización, para el tratamiento de las aguas es más importante la concentración de fosfato orgánico que la concentración total de fósforo (Delgadillo et al., 2010).

Los procesos de remoción de fósforo se pueden dar de forma biótica y abiótica. Los procesos bióticos comprenden la asimilación por las plantas y microorganismos, y la mineralización de los restos de vegetación y del fósforo orgánico. A su vez, los procesos abióticos abarcan fundamentalmente la adsorción por el medio granular, incluyendo también la fragmentación, sedimentación, lixiviación, precipitación y dilución.

Las propiedades fisicoquímicas e hidrológicas del sustrato son el principal factor en los procesos de remoción de fósforo debido a que la adsorción y precipitación ocurren principalmente en este medio. De forma similar, las plantas, principalmente las raíces y hojas, son capaces de asimilar una muy baja cantidad de fósforo. Por último, los microorganismos también son capaces de asimilar el fósforo de forma muy rápida, pero en magnitudes (cantidad almacenada) muy pequeñas (García y Coroz, 2008; Vidal y Ormazábal, 2018).

Se ha observado que durante los primeros meses de funcionamiento de un HC se tiene la mejor eficiencia de remoción de fósforo, que pasado un tiempo comienza a reducirse rápidamente. Esto se debe a la capacidad de adsorción del medio granular que es máxima cuando el sustrato está limpio. Para solucionar este problema se puede reemplazar el medio granular o incorporar al sistema procesos de precipitación, por ejemplo, por adición de sales de aluminio (García y Coroz, 2008).

#### 5.3.5. Remoción de metales pesados

Se pueden encontrar los metales pesados en formas solubles, sus formas más biodisponibles, y como partículas asociadas. Estos metales tienen una alta afinidad para la adsorción y complejización con material orgánico, de manera que estos procesos fisicoquímicos son su principal método de remoción. Un problema desde los HC es la resolubilización de los metales pesados (Delgadillo et al., 2010).

### 5.3.6. Remoción de bacterias

Las aguas residuales son un ambiente ideal para la supervivencia y proliferación de bacterias patógenas y virus, que desde el punto de vista de la salud pública deben ser monitoreados y removidos. Su remoción ocurre por una combinación de factores físicos (filtración, sedimentación, agregación y acción de la radiación ultravioleta), químicos (oxidación, adsorción y la exposición a toxinas) y biológicos (depredación, ataque por bacteriófagos y la declinación *die-off*) Los procesos de remoción dependen del tiempo de permanencia y de las características del medio granular.

Sin embargo, los niveles de eliminación no suelen ser suficientes para producir efluentes de calidad, por ejemplo, para riego agrícola. En estos casos se debe incorporar al sistema un método de desinfección, ya sea un humedal FS que favorezca la desinfección o un sistema para clorar el efluente (Delgadillo et al., 2010; García y Coroz, 2008).

Tabla 3: Procesos que contribuye a la depuración de aguas residuales en HC (Arias y Brix, 2003).

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

#### 5.4. Generalidades de diseño de Humedales Construidos

Las características físicas y dimensiones de un HC dependen de la ubicación geográfica y las características climáticas del lugar; las características y variaciones del influente; las características deseadas en el efluente y las restricciones para el vertido de aguas tratadas.

Las guías de diseño y construcción de HC generalmente determinan las características y dimensiones a través de ecuaciones de primer orden, regresiones estadísticas y modelos numéricos. A través de estos métodos se determinan áreas mínimas de tratamiento, que dependen del contaminante que se quiera tratar, su concentración original, la calidad final requerida, la ubicación geográfica y de las condiciones climáticas. El área de tratamiento luego se ajusta a una serie de recomendaciones que incluyen áreas específicas de tratamiento mínima por Persona Equivalente (PE), relación largo-ancho, profundidad y pendiente. Además, se deben verificar las características del medio granular seleccionado, como son su porosidad, granulometría, conductividad hidráulica y resistencia mecánica.

De forma complementaria al dimensionamiento de áreas mínimas de tratamiento se debe incluir al diseño un cálculo hidráulico para asegurar que las dimensiones obtenidas cumplan con las condiciones hidráulicas que garantice el movimiento del agua dentro del lecho y que todas las superficies de tratamiento sean aprovechadas. Este cálculo de dimensiones hidráulicos y de las condiciones de flujo es propio de cada tipo de humedal, debido a que las características difieren entre sistemas.

Las estructuras de distribución y recogida de aguas, generalmente canales o tuberías, deben asegurar una distribución homogénea y efectiva del influente en el lecho. Su ubicación y forma dependen del sistema, en los HFSS la entrada y distribución se hace en la cabecera del lecho y la evacuación por el otro extremo de manera de aprovechar al máximo el área de tratamiento, en cambio en los VFSS la distribución se hace sobre el lecho, recubriendo la superficie, y el agua percolada se evacua en el fondo.

En la tabla 4 se muestran algunos valores típicos de los parámetros de diseño utilizados en Europa, sin ser estrictamente obligatorios brindan información de las condiciones normales de diseño.

Tabla 4: Parámetros típicos de diseño para HC (Arias y Briz, 2003).

Tipo Flujo	FS	HFSS	VFSS
Carga Orgánica Afluente	< 6 g DBO5/m <sup>2</sup> · d	< 6 g DBO5/m <sup>2</sup> · d	40 g DBO5/m <sup>2</sup> · d
Carga Hidráulica Superficial	< 5 cm/d	< 5 cm/d	> 5 cm/d
Tiempo de Retención Hidráulico aproximado	5 - 15 días	> 5 días	Minutos/horas
Área aproximada por PE	5 - 20 m <sup>2</sup> /PE	5 - 10 m <sup>2</sup> /PE	1 - 3 m <sup>2</sup> /PE
Relación Largo - Ancho	10:1	3:1	N/A
Profundidad	< 0,40 m	< 0,60 m	t 0,80 m
Pendiente del Fondo	N/A	< 0,1%	N/A
Tipo de Relleno	N/A	Arenas y gravas	Arenas y gravas
Vegetación	Variable	Variable	Variable

## 6. Análisis comparativo entre Humedales Construidos y otros tratamientos

La elección del sistema de tratamiento para un proyecto está dada por una combinación de factores, características del sistema y del entorno y condicionantes o requerimientos específicos. De esta forma se puede escoger la alternativa de tratamiento más adecuada y conveniente.

Todos los sistemas de tratamiento de aguas servidas presentan ventajas y desventajas frente a las demás tecnologías, ya sea en sus características de funcionamiento, factores económicos, atractivos sociales y medioambientales, estos dos últimos aumentando su relevancia en los tiempos modernos.

Los sistemas con humedales construidos son sin duda una alternativa de tratamiento muy interesante e innovadora que, debido a sus características, ha entrado con mucha fuerza en el mercado de sistemas de tratamiento. Con el objetivo de entender porque los HC se ocupan cada vez con mayor frecuencia como el sistema de tratamiento de elección es necesario conocer las características que los hacen relevantes y competitivos frente a otras tecnologías.

Las características más relevantes y que se comparan entre los distintos sistemas de tratamiento al momento de seleccionar el más adecuado se pueden agrupar en cuatro categorías: características de funcionamiento, económicas, sociales y medioambientales.

### 6.1. Características de funcionamiento

**Superficie:** Cuando se selecciona el método de tratamiento se debe tener en cuenta cuanta superficie requiere la planta de tratamiento tanto por el espacio disponible como por los costos de construcción por metro cuadrado. Este aspecto de los HC es una de las mayores desventajas que tienen frente a otros sistemas de tratamiento, especialmente cuando se emplazan en una zona con superficies reducidas, como por ejemplo dentro de áreas urbanas. Esta necesidad de grandes superficies también se traduce en un esfuerzo importante de inversión en terreno. Entre los sistemas que menos superficie de terreno requieren para funcionar se encuentran el sistema de Lodos Activados y Biodiscos.

**Rendimiento:** Los HC tienen la capacidad de tratar grandes cantidades de aguas residuales, comparable con los sistemas de tratamiento convencionales utilizados para satisfacer las demandas de grandes poblaciones, pero el rendimiento de tratamiento por metro cuadrado es considerablemente más bajo que en otros sistemas. Por esta razón es que estos sistemas necesitan mayores superficies para competir con los otros sistemas de tratamiento. Entre los sistemas con mejores rendimientos se encuentran los Lodos activados y Biodiscos, mientras que los sistemas que utilizan lagunas y humedales generalmente requieren de mayores superficies de tratamiento. Otra desventaja importante de los sistemas que utilizan procesos naturales como forma de tratamiento es que los rendimientos de los procesos tienen una mayor variabilidad frente a los procesos convencionales.

**Consumo energético:** La necesidad de energía para que un proceso pueda funcionar adecuadamente es muchas veces el principal factor de decisión sobre qué sistema utilizar. Nuevamente este factor dependerá del lugar de emplazamiento, en el sentido de la accesibilidad y disponibilidad de la energía necesaria, y de los costos de funcionamiento esperados. Generalmente se tiene una relación directa entre el consumo de energía y la complejidad de los procesos de tratamiento. Sistemas de tratamiento como los Lodos activados y Lagunas aireadas consumen altos niveles de energía durante sus procesos, mientras que otros sistemas como los HC, Lagunas de estabilización, Lombrifiltros y Biofiltros requieren de poca energía para su funcionamiento. Los sistemas que menos energía consumen son aquellos que utilizan procesos naturales para la depuración de las aguas residuales, en el caso de los HC estos procesos los realizan las macrófitas.



**Construcción:** Los costos de construcción de los distintos sistemas de tratamiento se definen principalmente por la complejidad de los procesos que se llevarán a cabo en la planta. Los procesos más complejos normalmente requieren de una mayor infraestructura y maquinaria más costosa para funcionar adecuadamente. Por lo tanto, aquellos sistemas que emulen procesos naturales o cuyo funcionamiento sean relativamente sencillo son generalmente más económicos de construir. Entre los sistemas más baratos de construir se encuentran los HC, Lagunas de estabilización y Lombrifiltros.

**Operación y mantención:** La mantención y operación de los sistemas de tratamiento generalmente es una relación directa entre costos y complejidad del sistema, sistemas con procesos más complejos requieren de una mayor atención para su correcto funcionamiento y de mano de obra más especializada. La mantención y operación está muy relacionada con el consumo energético y con la cantidad de mano de obra necesaria para el funcionamiento de la planta, ambos son buenos indicadores del nivel de complejidad de los procesos de tratamiento. Aunque la mantención de los HC no es complicada, se debe ser muy estricto con sus actividades para evitar la colmatación del sistema. Además, a diferencia de otros sistemas, el HC siempre debe contener agua, de lo contrario las macrófitas responsables del tratamiento no son capaces de sobrevivir.

**Mano de Obra:** Para el funcionamiento continuo y adecuado de todos los distintos tipos de sistemas de tratamiento se requiere de mano de obra que atienda a los sistemas de forma constante. El objetivo es que los sistemas tengan un mayor grado de autovalencia y que dependan lo menos posible de operarios externos, disminuyendo así la cantidad y costos de operación. Generalmente la necesidad de maquinaria y la complejidad de los procesos implica operarios con mayores niveles de especialización y además un mayor riesgo de fallas. Tratamientos como los HC y las Lagunas de Estabilización destacan por la mínima cantidad de personal necesario para asegurar su correcto y continuo funcionamiento.

**Generación de subproductos:** Durante los procesos de tratamientos siempre se generan lodos como subproducto común de los procesos. Estos sólidos aun contienen gran cantidad de contaminantes y por esta razón deben ser transportados a zonas de tratamiento autorizadas. La disposición de los lodos es un gasto adicional en la mantención de los sistemas de tratamiento por lo que se busca que el sistema produzca la menor cantidad posible de este subproducto para disminuir los costos y la frecuencia de la mantención. De todos los sistemas los Lodos activados es el que más subproducto genera, mientras que los sistemas naturales como los HC, Lagunas de estabilización, Lombrifiltros y Biofiltros destacan por la baja producción de lodos.

**Aplicaciones:** Los sistemas que utilizan HC para el tratamiento de aguas pueden ser usados para una variedad de aplicaciones, convirtiéndolos en sistemas muy versátiles. Entre los usos que se les dan se encuentra: tratamiento de aguas residuales domésticas, municipales e industriales; tratamiento y retención de aguas lluvia; complemento a otros sistemas de tratamiento; sistemas de tratamiento de respaldo; entre otros. Algunas de estas aplicaciones no las pueden emular los sistemas convencionales debido a las características de sus procesos, sus niveles de intervención y la necesidad de energía para operar.

**Tiempo de estabilización:** Todos los sistemas de tratamiento requieren de un periodo de tiempo cuando se ponen en marcha para alcanzar su nivel de funcionamiento óptimo. Una vez alcanzado este régimen óptimo el sistema tuvo tiempo de estabilizarse y se puede asegurar que el efluente sea de buena calidad y que no tendrá grandes variaciones en sus características. Esta es otra de las grandes desventajas de los sistemas naturales, ya que sus tiempos de estabilización son considerablemente más largos que en los sistemas convencionales de tratamiento, pudiendo alcanzar en el caso de los HC periodos de hasta un año.

Tabla 5: Comparación entre sistemas de tratamiento de aguas servidas (Adaptado de Pizarro, 2011).

Tipo Tratamiento	Criterio						
	Superficie	Rendimiento	Consumo energético	Construcción	Operación/ Mantenimiento	Mano de Obra	Generación Lodos
Lodos activados	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Laguna estabilización	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Laguna aireada	Alto	Bajo	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio
Biodiscos (RBC)	Bajo	Alto	Medio	Alto	Medio	Alto	Medio
Lombrifiltro	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Bajo
Biofiltros	Medio	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Medio	Bajo
Humedales Construidos	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

## 6.2. Características económicas

Al referirse a las características económicas y los costos involucrados en los distintos sistemas de tratamiento es difícil comparar directamente entre sistemas ya que los valores están condicionados por el contexto en que se construyen e implementan cada uno de ellos. Muchas de las diferencias en los costos e inversiones que requieren los sistemas de tratamiento están dadas por sus características de funcionamiento.

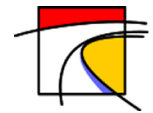
La primera inversión importante en la construcción e implementación de un HC es la superficie de terreno necesaria para cumplir con las características determinadas durante el diseño. Los HC, al igual que los otros sistemas de tratamiento a base de piscinas y lagunas, requieren generalmente de mayores superficies para alcanzar las cuotas de tratamiento requeridas. Esta inversión se vuelve especialmente importante cuando el sistema se emplaza en un área donde la demanda de suelo es mayor y donde el uso eficiente de suelo es una necesidad, por ejemplo, en las zonas urbanas.

En la línea cronológica del proyecto de un HC la segunda inversión importante es el diseño y construcción del sistema. En este aspecto, la simplicidad de los sistemas de HC es el factor principal que determina el valor de la inversión. Como se verá más en detalle más adelante, la construcción de estos sistemas no requiere de materiales especialmente escasos o particulares, ni mano de obra o maquinaria altamente especializada.

Finalmente, una vez está terminado el HC y comienza a funcionar, la tercera inversión será el costo de operación y mantenimiento del sistema. Al igual que durante el diseño y construcción, la simplicidad del sistema es el factor principal que condiciona estos costos. Como se expuso en las características de funcionamiento, el funcionamiento y mantenimiento de estos sistemas es relativamente sencillo, esto debido a la simplicidad de los procesos que ocurren en los lechos del humedal. De esta forma y complementado con la alta autovalencia del sistema, la inversión en poca mano de obra con baja especialización que mantenga al HC es significativamente menor que en casos en la que la complejidad de los procesos requiere de especialistas para atender al sistema.

Otros costos asociados al funcionamiento de los HC son el consumo de energía y la producción de lodos como subproductos. En ambos casos la relación entre cantidad de energía consumida o lodos producidos es directamente proporcional al gasto en energía o al gasto en la disposición segura de los subproductos, por lo tanto, se puede afirmar con seguridad que los HC son más atractivos económicamente.

Existen beneficios económicos que trae la construcción y utilización de estos sistemas al área circundante a la planta de tratamiento. En primer lugar, aumenta la plusvalía del suelo al mejorar la valorización estética y de conservación del lugar. Además, permiten habilitar los lechos y transformarlos en áreas protegidas con accesos públicos o privados. En segundo lugar, se puede utilizar el potencial de exploración que generan los lechos del HC en diversas áreas de interés relacionadas a este tipo de ecosistema, como son la investigación, educación, recreación y esparcimiento.



### 6.3. Características sociales

Entre todos los sistemas de tratamiento, los HC son los únicos que permiten que el espacio utilizado para los procesos de tratamiento sea habitable, es decir, los lechos están en contacto directo con la población a la que satisfacen sus necesidades. Además, el lecho se convierte en el hábitat de una gran variedad de especies de plantas y animales. Otros métodos, debido a sus características, pierden la posibilidad de contribuir al paisajismo y a la estética del lugar, en cambio, los humedales tienen la facultad innata de convertirse en un aporte y potenciar así las interacciones de la comunidad con el entorno.

Los HC brindan una oportunidad única a la comunidad donde se emplazan. Como se mencionó anteriormente, los humedales traen consigo un potencial de exploración que la comunidad puede aprovechar. Se ha visto casos en los que los lechos incentivan la educación, fomentando el aprendizaje de temas como el ciclo del agua y como aprovechar mejor el recurso hídrico. También es posible que, como la operación y mantención de estos sistemas es relativamente sencilla, la misma comunidad se hace cargo de conservar el humedal en buen estado y funcionando correctamente, aumentando y mejorando la cooperación entre los miembros de la comunidad. En otros casos se crea una industria alrededor del HC, se sabe de humedales en los que se cultivan plantas y flores para la venta o para cosechar subproductos, como son fibras vegetales.

Un ejemplo de las características económicas y sociales se aprecian claramente en el proyecto INNOVA BIO BIO 13.3327-IN.IPP: “Recuperación de Agua mediante Jardines Depuradores a partir de Aguas Servidas Rurales: Aplicaciones Innovadoras con Impacto para la Comunidad Rural” que busca tratar las aguas servidas de la comunidad y simultáneamente generar un beneficio económico a través del cultivo de flores y producción de fibras vegetales.

### 6.4. Características medioambientales

Como se ha señalado anteriormente, el diseño de HC se puede debe adecuar a diversas combinaciones de condiciones de funcionamiento; tipo y cantidad de contaminantes; calidad deseada del efluente; clima del sector; entre otros, convirtiéndolos en sistemas muy versátiles y adaptables. Esta adaptabilidad permite traer las ventajas de estos sistemas a casi todos los rincones del planeta.

Estas mismas características permiten que los HC se integran mejor a los sistemas naturales que otras formas de tratamientos y contribuyen así al entorno en donde se emplazan. Como se describió en el apartado de humedales naturales, los HC contribuyen de manera muy similar al entorno: actúan como ecosistema que soporta una gran biodiversidad y en el ciclo del agua cumplen un papel fundamental en la retención de las aguas lluvia evitando inundaciones y previniendo otras catástrofes naturales.

Independiente del tamaño del humedal que integre el sistema de tratamiento estos permiten restaurar la biodiversidad de la zona, mejorando las capacidades de adaptación a cambios del entorno y aumentando el valor ecológico del sector, además de reestablecer las relaciones simbióticas que ocurren en la naturaleza. La construcción de un HC de gran tamaño para satisfacer las necesidades de grandes comunidades es una oportunidad especial de rescatar o reconstruir un ecosistema único en el planeta, como son los humedales.

De forma indirecta los HC también son ecológicamente atractivos debido a su bajo consumo energético y la baja producción de lodos como subproducto. El bajo consumo energético y la autonomía de estos sistemas significa que pueden continuar funcionando incluso en condiciones de catástrofe. Además, las energías renovables aun no son la fuente principal de electricidad, por lo tanto, todo ahorro de energía contribuye con el medioambiente. Respecto a los lodos producidos cabe recalcar que este subproducto debe ser transportado y dispuesto en instalaciones especiales para su tratamiento, que generalmente involucra procesos complejos. De esta forma también se contribuye con medioambiente al disponer de la menor cantidad de lodos posible.

## 7. Diseño de Humedales Construidos

Como se expuso anteriormente, los HC se pueden clasificar según el tipo y dirección del flujo. El tipo de flujo determina las características hidráulicas del sistema y, por lo tanto, tiene importantes repercusiones en el diseño, operación y mantenimiento de cada uno de los tipos de humedales. Es por esta razón que existen importantes diferencias en el diseño y cálculo de humedales de flujo horizontal y vertical.

El diseño de HC contempla varias actividades: cálculos hidráulicos, cálculo de áreas de tratamiento necesarias, sistemas de distribución y recolección, aislamiento, sistemas de pretratamiento y tratamiento primario, además de estructuras complementarias.

Las dimensiones y disposición del lecho se ajustan al diseño hidráulico de manera de satisfacer las condiciones para la eliminación de contaminantes. Los HC son sistemas dinámicos cuyas características físicas y condiciones hidráulicas (del sustrato) cambian con el paso del tiempo, en la mayoría de los casos esto resulta en una menor capacidad hidráulica y mayores pérdidas de energía, pudiendo modificar el tipo de flujo y las características hidráulicas, por lo que el diseño de uno de estos sistemas es un asunto complicado (Vidal y Hormazábal, 2018).

### 7.1. Tratamientos previos

En la mayoría de los casos los sistemas de HC están compuestos por tres unidades que funcionan en serie: el pretratamiento, el tratamiento primario y el tratamiento secundario que corresponde al humedal propiamente tal. Generalmente los tratamientos previos al humedal constan de una primera etapa donde se eliminan sólidos de gran tamaño y una segunda donde se retienen los sólidos suspendidos.

Los métodos para el pretratamiento y tratamiento primario dependerán de muchos factores, incluyendo la calidad del agua a tratar, la topografía y el espacio disponible, como también los costos de construcción y la experiencia del proyectista. Como los sistemas de HC se caracterizan su gasto mínimo de energía se recomienda utilizar la menor cantidad de equipos electromecánicos posibles (García y Coroz, 2008).

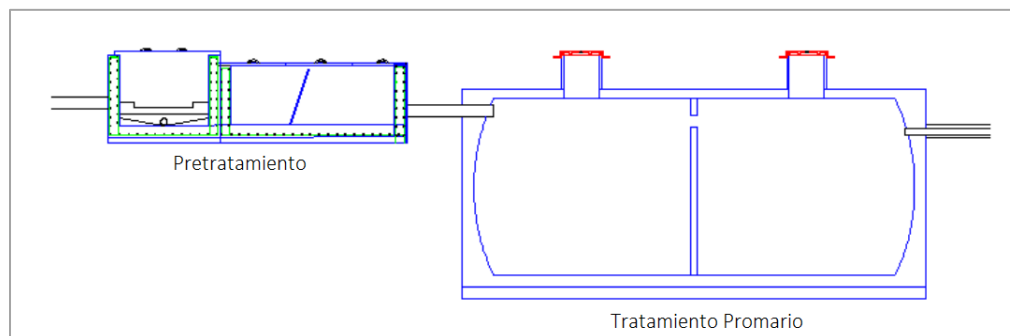


Figura 11: Alternativa de tratamiento previo (Fuente: García y Coroz, 2008).

#### 7.1.1. Pretratamiento

Los procesos de pretratamiento se encuentran en la entrada del sistema de depuración para poder remover sólidos gruesos (piedras, ramas, plásticos, etc.), grasas y arenas que pueden interferir en los procesos siguientes.

Cuando se trata de pequeñas comunidades (menos de 2000 habitantes) generalmente el pretratamiento toma la forma de un canal, las aguas servidas atraviesan sucesivamente una zona con un aliviadero de exceso de caudal, luego una zona con rejilla de gruesos y de finos y finalmente una zona de desarenado. Adicionalmente, en caso de que el agua tenga un alto contenido de aceites y grasas, se puede agregar un desengrasador al final del canal.

**Aliviadero de entrada:** Esta primera estructura se asegura que el sistema no experimente una sobrecarga de caudal. Generalmente consiste en una arqueta en la que, a cierta altura de agua, la fracción del caudal cuya altura supere dicha marca es separada y vertida directamente pasando tan solo por una reja en un canal adjunto al canal de desbaste. Las dimensiones del aliviadero se basan en que el agua residual excedente está tan diluida que la concentración de contaminantes es considerablemente menor al estado normal del agua.

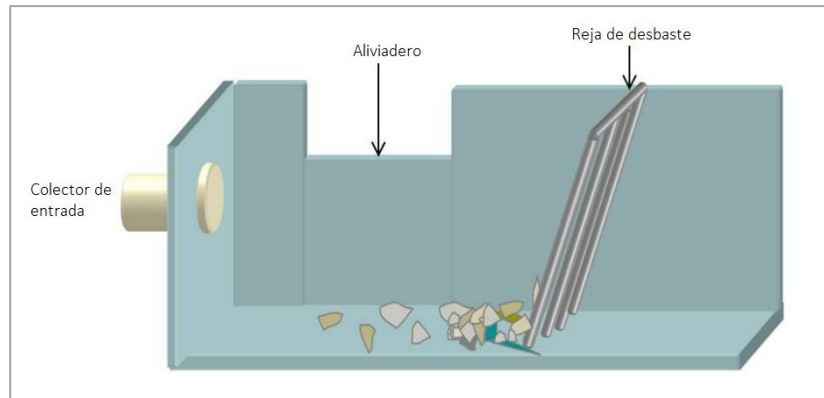


Figura 12: Esquema de un canal de desbaste (Fuente: García y Coroz, 2008).

**Canal de desbaste:** Este canal realiza funciones de desbaste, separa mediante rejilla los grandes sólidos, y desarenado simultáneamente. Este desarenador, denominado de flujo horizontal, permite remover partículas pesadas de tamaño superior a 0,2 [mm], evitando su futura sedimentación, protegiendo de la abrasión y previniendo sobrecargas en los tratamientos siguientes.

Generalmente se trata de canales rectangulares que cuenta con una primera rejilla de separación de gruesos (separación entre barros entre 50-100 [mm]), en caso de ser necesario se agrega una rejilla de separación de finos (separación entre barros entre 10-25 [mm]) y en el último tramo el área de extracción de arenas. El canal tiene un ancho constante que se determina en función del ancho necesario para las rejillas y el calculado para el desarenador.

### 7.1.2. Tratamiento primario

Durante este proceso se reduce la cantidad de material en suspensión, esto es particularmente importante en los sistemas con HC porque reducen o mitigan el proceso paulatino de colmatación. Generalmente este tratamiento se hace en fosas sépticas, en poblaciones pequeñas de no más de 200 habitantes, o tanques Imhoff, en poblaciones más grandes existiendo la posibilidad de utilizar tanques en paralelo.

**Fosas sépticas:** Dentro de una fosa séptica el material suspendido sedimenta y se acumula en el fondo formando lodos que se descomponen anaeróbicamente. A este proceso se le llama digestión y permite reducir la cantidad de lodos acumulados. Los gases producidos durante la digestión contribuyen a la formación de una espuma espesa en la superficie que es un indicador del correcto funcionamiento de la fosa.

Habitualmente las fosas sépticas tienen dos o más cámaras de manera para evitar la resuspensión de los lodos sedimentados. En la primera cámara se produce la sedimentación de la mayoría de las partículas, por lo que también es la que más lodos acumula, mientras que en las cámaras siguientes continúan sedimentando las partículas que rebosan entre cámaras cuya concentración va disminuyendo. Cualquier gas que se produzca durante la digestión es evacuado a través de chimeneas al exterior.

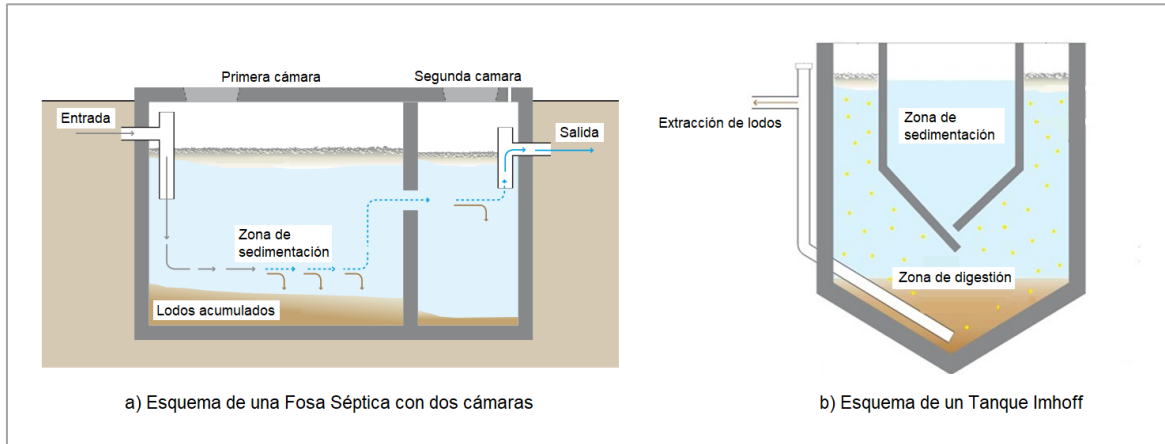


Figura 13: Esquema de una fosa séptica y tanque Imhoff (Adaptado de Huertas y Marcos, 2013).

**Tanque Imhoff:** También es conocido como tanque decantador-digestor y puede describirse como una variante de la fosa séptica convencional donde las zonas de decantación y de digestión están separadas una encima de la otra. A medida que los sólidos suspendidos sedimentan a través de rejillas en el fondo del compartimiento superior pasando a la zona de digestión donde se acumulan y son digeridos. Al evitar que las burbujas de gases de la digestión arrastren sólidos suspendidos a la superficie se mejora la sedimentación y no se forma la espuma espesa que se encuentra en las fosas sépticas. De acuerdo con la cantidad de habitantes que atiende el tanque Imhoff se determina la geometría (circular, cuadrada o rectangular) y dimensiones del tanque (Rodríguez, 2011; García y Coroz, 2008).

## 7.2. Elección del sistema

Como se estudió en los capítulos anteriores existen varias opciones de diseño y construcción de sistemas de HC. Primero se debe seleccionar entre un sistema de flujo superficial o subsuperficial. La preocupación en el caso de estudio es que las aguas residuales serán tratadas dentro de un entorno urbano y se tiene que evitar la emisión de malos olores, la presencia de insectos y sobre todo disminuir la probabilidad de aparición de vectores biológicos. Por esta razón se prefieren los sistemas de flujo subsuperficial, donde el agua fluye a través del lecho y no hay contacto entre la atmósfera y las aguas contaminadas.

Entre los sistemas de flujo subsuperficial el sistema puede ser de flujo horizontal o vertical. A pesar de que los sistemas de flujo vertical son más eficientes sobre superficies menores, estos son más caros de construir y de operar debido a los sistemas de distribución mecanizados, además de una operación y mantenimiento más compleja. Como el caso de estudio trata de una instalación relativamente pequeña y las aguas a tratar tienen una baja carga orgánica superficial, se prioriza un sistema de flujo horizontal.

Para el caso de estudio se selecciona un HC de flujo subsuperficial horizontal (HFSS). El diseño de estos humedales consiste en dos etapas para determinar sus dimensiones: el diseño biológico determina las dimensiones de superficie necesarias para el tratamiento de las aguas contaminadas y el diseño hidráulico determina las dimensiones geométricas del sistema.

### 7.3. Humedales de flujo subsuperficial horizontal

#### 7.3.1. Diseño biológico

El cálculo del área superficial del humedal HFSS se realiza en función al contaminante que se desea disminuir o remover del medio y la velocidad con la que estos procesos ocurren. Generalmente los diseños se realizan para disminución de la DBO<sub>5</sub> (Delgadillo et al., 2010; García y Coroz, 2008).

Para esto se utiliza la ecuación 1 para el cálculo del área superficial:

$$As = \frac{Q \times \ln\left(\frac{C_0}{C_e}\right)}{K_T \times h \times \eta} \quad (Ec. 1)$$

Donde:  $As$ : Área superficial (m<sup>2</sup>)  
 $Q$ : Caudal de diseño del humedal (m<sup>3</sup>/día)  
 $C_0$ : Concentración del contaminante en el efluente (mg/L)  
 $C_e$ : Concentración del contaminante en el afluente (mg/L)  
 $K_T$ : Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura (d<sup>-1</sup>)  
 $h$ : Profundidad del humedal (m)  
 $\eta$ : Porosidad del medio granular (% expresado en fracción)

La constante de velocidad de reacción de primer orden según datos empíricos depende de la temperatura:

$$K_T = K_{20} \times 1.06^{(T-20)} \quad (Ec. 2)$$

Donde:  $K_T$ : Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura (d<sup>-1</sup>)  
 $K_{20}$ : Constante de primer orden a 20°C ( $K_{20}=1.104$  d<sup>-1</sup>)  
 $T$ : Temperatura del agua (°C)

Adicionalmente se calcula el tiempo de retención hidráulico en el humedal (Andreo, 2014):

$$t = \frac{As \times h \times \eta}{Q} \quad (Ec. 3)$$

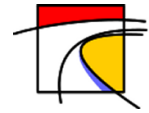
Donde:  $t$ : Tiempo de retención hidráulico (día)  
 $As$ : Área superficial (m<sup>2</sup>)  
 $h$ : Profundidad del humedal (m)  
 $\eta$ : Porosidad del medio granular (% expresado en fracción)  
 $Q$ : Caudal de diseño del humedal (m<sup>3</sup>/día)

#### 7.3.2. Diseño hidráulico:

En los HC de flujo horizontal subsuperficial el diseño hidráulico se asume que el sistema se comporta como un canal con un medio de relleno que se comporta de acuerdo con la ley de Darcy, es decir, el caudal es directamente proporcional a las características hidráulicas del medio granular, la sección transversal y la pendiente del fondo.

$$Q = k_S \times A_C \times S \quad (Ec. 4)$$

Donde:  $Q$ : Caudal promedio del humedal (m<sup>3</sup>/día)  
 $k_S$ : Conductividad hidráulica (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d)  
 $A_C$ : Área transversal del canal (m<sup>2</sup>)  
 $S$ : Pendiente del gradiente hidráulico (m/m)



En el diseño hidráulico, de acuerdo con la ley de Darcy, se deben considerar la pendiente del lecho y las pérdidas de energía por fricción generadas por las plantas, biopelículas y el sustrato. Es importante tener en cuenta que la pendiente no debe usarse como un mecanismo de control de flujo, se deben instalar componentes de drenaje especiales para el control del nivel de aguas. Otros factores que hay que considerar en el diseño incluyen: la profundidad efectiva de la columna de agua, los ciclos hidrológicos de precipitaciones (con el fin de estimar caudales máximos y mínimos) y la posibilidad de colmatación (Vidal y Hormazábal, 2018).

Luego del diseño hidráulico se procede a estimar las áreas necesarias para el tratamiento, de manera de asegurar la eliminación de contaminantes y la calidad del efluente. Para esto existen diferentes métodos:

- a. Uso de Reglas de oro (Rule of the thumb) que especifica el área necesaria de acuerdo con el tipo de HC, asignando áreas determinadas para cada sistema, sin considerar factores como calidad del agua, as condiciones climáticas y otros factores específicos.
- b. Uso de bases de datos de sistemas similares construidos en condiciones comparables para obtener rendimientos esperados y áreas de tratamiento necesarias.
- c. Uso de ecuaciones que permiten estimar el comportamiento de depuración de contaminantes involucrando constantes de degradación biológicas, tipos de contaminante, temperaturas y otros factores.
- d. Uso de modelos de tanques en serie que combinan el comportamiento hidráulico y biológico dentro de los sistemas permitiendo estimar su comportamiento.
- e. Uso de modelos complejos a través de recursos computacionales, combinando el conocimiento de los procesos y más información de la que generalmente hay disponible. Actualmente el modelo de diseño más usado es el denominado modelo PKC\* basado en degradación de primer orden.

Criterios de diseño:

- **Profundidad:** El volumen de agua presente en el sistema está directamente relacionado con la profundidad del humedal, por lo tanto, el caudal y tiempo de residencia dentro del humedal también dependerán de este parámetro. El principal factor para determinar la profundidad del humedal es la especie de planta que se utilizara en el sistema de tratamiento y las características de sus raíces. La profundidad del humedal generalmente varía entre 0,3 y 1,0 [m], siendo lo más común una profundidad de 0,6 [m].
- **Pendiente:** La pendiente del lecho se encuentra generalmente en un rango de 0,1 a 1,0%, siendo el valor usual de 0,5%.
- **Sustrato:** El medio granular depende del tipo de humedal, en los HC de flujo subsuperficial es necesario que el sustrato pueda albergar las plantas y biopelículas y simultáneamente tener una buena conductividad hidráulica y evitar la colmatación. Para que desempeñe su función de forma efectiva se deben considerar factores como el pH, el contenido de metales y nutrientes, la textura del suelo, la porosidad y la granulometría.

Una opción para minimizar costos durante la construcción de los lechos es utilizar el material excavado como componente del sustrato, ahora bien, este material debe ser apropiado, de lo contrario se debe importar material de otras fuentes.

Existen diferentes métodos para seleccionar el material que compone el sustrato en un HFSS. Por ejemplo, Vymazal (1998) recomienda diferentes diámetros de gravas en función de la calidad del agua que atraviesa el sistema, mientras que las guías de diseño de la agencia del medio ambiente de Dinamarca entrega bandas granulométricas que limitan el tamaño de las partículas.

Generalmente se recomienda utilizar gravas de diámetros menores a 30 [mm] ( $\frac{3}{4}$ " de diámetro y un coeficiente de uniformidad entre 1 y 6. En la tabla 4 se presentan los rangos de las características principales de los materiales utilizados en el sustrato de los HC. Generalmente se recomienda aplicar un factor de seguridad de  $\frac{1}{3}$  o 10% a la conductividad hidráulica para prevenir problemas de colmatación por acumulación de lodos, raíces y otros.

Si el tamaño de la grava en el sustrato es demasiado grande la velocidad del agua se incrementa resultando en un flujo turbulento y no se cumple la ley de Darcy. En el caso contrario, si el tamaño de la grava es muy pequeño se reduce la velocidad de circulación produciendo zonas con presencia de agua en la superficie y flujos preferenciales. En casos particulares se emplean ciertos tipos de arcillas para mejorar la absorción de metales pesados, fosfatos, entre otros (Delgadillo et al., 2010; Vidal y Hormazábal, 2018).

Tabla 6: Parámetros del medio granular (Delgadillo et al., 2010).

Tipo de material	Tamaño efectivo D10 (mm)	Conductividad hidráulica, $k_s$ (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d)	Porosidad, n (%)
Arena gruesa	2	100-1.000	28-32
Arena gravosa	8	500-5.000	30-35
Grava fina	16	1.000-10.000	35-38
Grava media	32	10.000-50.000	36-40
Roca gruesa	128	50.000-250.000	38-45

A través de la ecuación de la ley de Darcy se determinan las dimensiones del humedal:

$$A_c = \frac{Q}{k_s \times S} \quad (Ec. 5)$$

Donde:  $A_c$ : Área transversal del canal (m<sup>2</sup>)  
 $Q$ : Caudal promedio del humedal (m<sup>3</sup>/día)  
 $k_s$ : Conductividad hidráulica (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-d)  
 $S$ : Pendiente del gradiente hidráulico (m/m)

Utilizando el área transversal del canal y la profundidad fijada se determina el ancho del lecho:

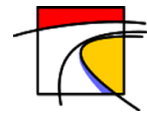
$$W = \frac{A_c}{h} \quad (Ec. 6)$$

Donde:  $W$ : Ancho del humedal (m)  
 $A_c$ : Área transversal del canal (m<sup>2</sup>)  
 $h$ : Profundidad del humedal (m)

De la misma forma, utilizando el área superficial (determinada en el diseño biológico) y el ancho del humedal se determina el largo del lecho:

$$L = \frac{A_s}{W} \quad (Ec. 7)$$

Donde:  $L$ : Largo del humedal (m)  
 $A_s$ : Área superficial (m<sup>2</sup>)  
 $W$ : Ancho del humedal (m)



### 7.3.3. Compartimentación

Una vez determinada las dimensiones del humedal (diseño biológico e hidráulico) se debe comprobar la relación largo-ancho (L/A). Un HC cuya relación L/A es mayor tiene una mejor capacidad de depuración de aguas contaminadas, pero también aumenta la posibilidad de problemas de cortocircuito, flujos preferenciales, presencia de agua sobre el lecho de grava y otros. Para alcanzar un balance generalmente se recomiendan relaciones L/A de 2:1, 3:1 y 4:1.

Se recomienda que, incluso si las dimensiones del lecho estén dentro de los parámetros recomendados, el sistema se divida en al menos dos lechos que funcionan en paralelo. De esta forma se da flexibilidad al sistema durante su operación, principalmente durante operaciones de mantención permitiendo que el sistema funcione de forma continua.

La construcción de varios lechos tiene repercusiones importantes en los costos por lo que se debe evitar la construcción de lechos redundantes. La cantidad de lechos estará determinada por el área total mínima para asegurar el tratamiento deseado, las condiciones topográficas y geológicas, las condiciones de calidad del efluente, entre otros factores.

Junto con determinar el número de lechos se debe determinar la configuración geométrica del sistema. El objetivo es conseguir lechos regulares que favorezcan una distribución uniforme de las aguas, reduzcan la posibilidad de cortocircuitos hidráulicos y mejoren el control de flujo dentro del sistema. La relación largo-ancho del lecho se determina en función del diseño hidráulico, considerando factores como la topografía del sitio, el área disponible para construcción y los impactos ambientales que genera el sistema (Delgadillo et al., 2010; Vidal y Hormazábal, 2018).

### 7.3.4. Estructuras de distribución y mantenimiento

Las estructuras de distribución y recogida de agua deben diseñarse para que funcionen de forma efectiva, autónoma y de fácil operación y mantenimiento. Es especialmente importante que se pueda acceder a ellas de forma fácil para permitir el control de caudales y su mantenimiento. Las estructuras de salida deben evacuar efectivamente las aguas del sistema y regular los niveles de agua dentro del lecho. Generalmente se componen de tuberías perforadas, tuberías con válvulas de compuerta y canales de distribución (Vidal y Hormazábal, 2018).

### 7.4. Humedales de flujo subsuperficial vertical

Para el diseño de este tipo de humedales existe poca información disponible y muchas ecuaciones para calcular áreas superficiales, generalmente en función a poblaciones equivalentes o superficies unitarias. Una aproximación general al área necesaria de tratamiento es dimensionar utilizando  $2.5 [m^2/PE]$ .

En este trabajo no se entra en detalles sobre el procedimiento de diseño y construcción de humedales de flujo subsuperficial vertical debido a que no corresponden al caso de estudio y no se alinean con los objetivos del trabajo.

## 7.5. Caso de estudio

La Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV) comenzó la construcción de su nuevo edificio “Instituto de Música” ubicado en la Av. Alcalde Juan Luis Trejo S/N en Viña del mar. El proyecto consiste en la construcción de un edificio de cinco plantas destinadas a la escuela de música de la universidad y cuenta con una superficie total construida de 2.300 m<sup>2</sup> aproximadamente.

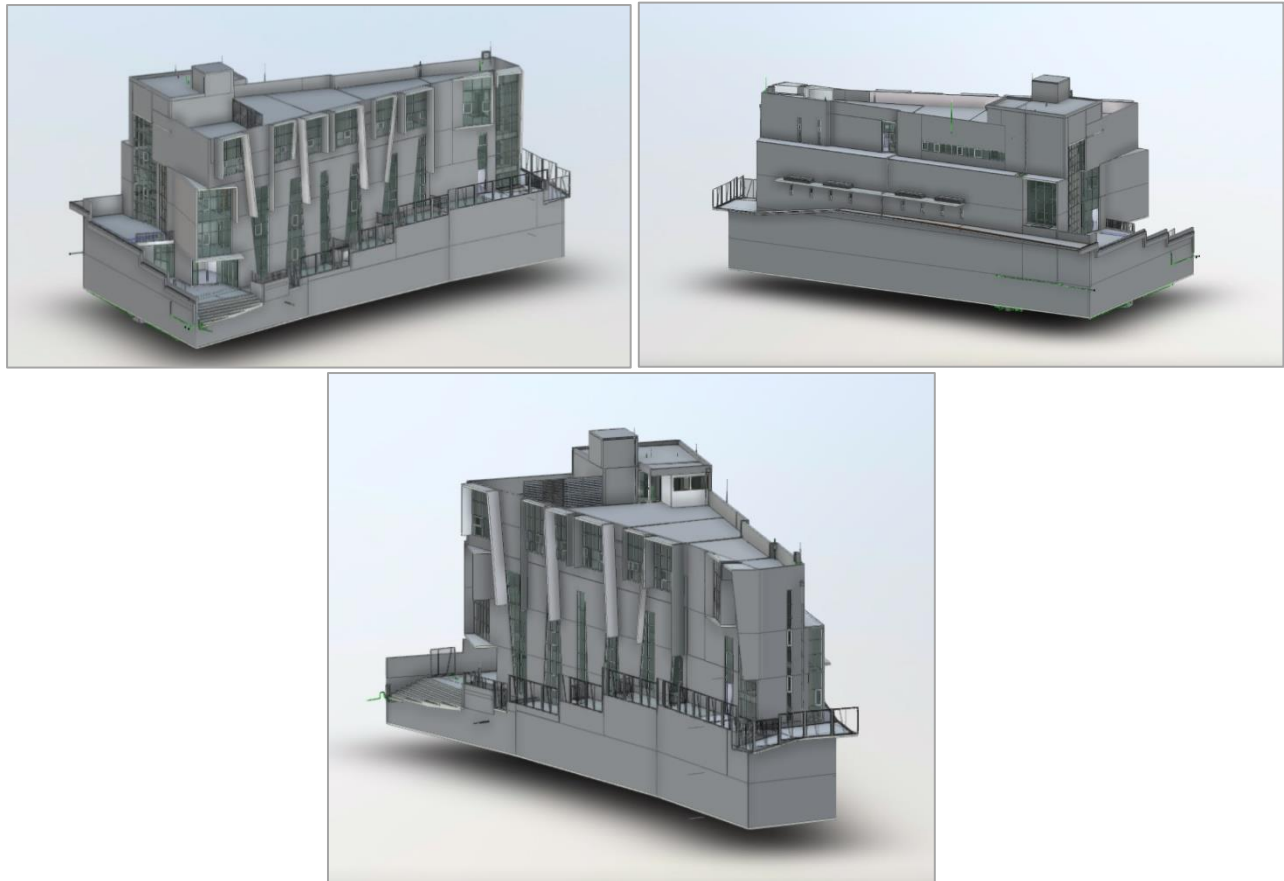


Figura 14: Modelo 3D (Software Revit) Instituto de Música PUCV.

La distribución del espacio considera espacios como oficinas para la dirección y profesores; salas de clases, reuniones y ensayos; laboratorios; estudios y bodegas. Las instalaciones de agua potable (AP) y alcantarillado (ALC) comprenden baños para estudiantes, profesores y discapacitados, kitchenettes y una sala de basura. En el Anexo B: *Planta de Superficies* se presenta un detalle de la distribución de los espacios y superficies en planta del edificio.

Tabla 7: Cuadro de superficies generales del Instituto de Música PUCV.

Piso	Cota [m]	Constructibilidad	Superficie [m <sup>2</sup> ]
Subterráneo 1°	-10,35	Subterráneo	656,20
Piso 1°	-7,00	Subterráneo	530,70
Piso 2°	-3,50	Sobre terreno	387,90
Piso 3°	0,00	Sobre terreno	385,30
Piso 4°	3,50	Sobre terreno	331,00
Piso 5°	7,00	Sobre terreno	36,00
Total [m <sup>2</sup> ]			2327,10

Tabla 8: Cuadro de superficies por tipo de espacio del Instituto de Música PUCV.

Piso	Superficie por Espacio [m <sup>2</sup> ]					
	Salas, talleres, etc.	Laboratorios	Oficinas	Baños	Bodegas	Kitchenette
Subterráneo 1°	228,5	61,7	-	18,9	44,2	-
Piso 1°	239,7	-	-	8,3	3,2	-
Piso 2°	123,9	66,7	-	8,9	2,1	-
Piso 3°	129,2	-	73,1	14,6	2,9	6,9
Piso 4°	23,8	-	149,3	7,8	1,8	4,4
Piso 5°	6,1	-	-	4,5	-	-
Total [m <sup>2</sup> ]	751,2	128,4	222,4	63	54,2	11,3

Los consumos estimados del establecimiento educacional contemplan una población de 260 estudiantes y una dotación de 50 [Lt/hab/día], un consumo máximo diario de 13,00 [m<sup>3</sup>] y un consumo promedio diario de 8,67 [m<sup>3</sup>]. El total de artefactos sanitarios que conforman las instalaciones se presentan en la tabla 9:

Tabla 9: Cuadro de artefactos conectados al alcantarillado general del Instituto de Música PUCV.

Artefacto	UEH	Piso						Total	
		-1	1	2	3	4	5	Artefactos	UEH
Inodoro (Wc)	5	7	3	3	6	3	2	24	120
Lavatorio (Lo)	2	7	4	3	6	3	2	25	50
Lavacopas (Lc)	3	0	0	0	1	1	1	3	9
Urinario (Ur)	3	0	0	0	1	1	0	2	6
Pileta Piso (PP)	3	0	1	0	0	0	0	1	3
								Total	188

El proyecto es ideal para implementar un tratamiento alternativo de aguas ya que está proyectado con las instalaciones sanitarias de aguas servidas separadas en aguas grises y aguas negras. En el proyecto original se planifica que las aguas grises queden acumuladas en un estanque para uso posterior en regadío, aunque esto aún no está confirmado, mientras que las aguas negras son vertidas al colector existente a través de la unión domiciliaria.

Al estar separados los sistemas de tuberías de aguas grises y aguas negras no todos los artefactos contribuyen al caudal que se proyecta almacenar para ser reutilizado en las actividades de riego. De todos los artefactos en el proyecto solo los siguientes están conectados a la red de aguas grises:

Tabla 10: Cuadro de artefactos conectados al alcantarillado de aguas grises del Instituto de Música PUCV.

Artefacto	UEH	Piso						Total	
		-1	1	2	3	4	5	Artefactos	UEH
Lo (Lavatorio)	2	7	0	3	5	3	2	20	40
								Total	40

## 7.6. Dimensiones del HC para el caso de estudio

De acuerdo con el procedimiento descrito en el apartado anterior para el diseño y dimensionamiento de un humedal HFSS y utilizando los valores especificados para el caso de estudio “Edificio de Música” de la PUCV, se presenta a continuación la tabla resumen del *Anexo A: Memoria de cálculo*.

Tabla 11: Características del HFSS diseñado para el Instituto de Música PUCV.

Variable	Símbolo	Unidad	Valor
Caudal medio diario	Q	m <sup>3</sup> /día	3,46
Pendiente del lecho	S	m/m	0,01
Profundidad del lecho	h	m	0,60
Concentración DBO5 Efluente	Co	mg/L	150,00
Concentración DBO5 Afluente	Ce	mg/L	35,00
<b>Características del sustrato</b>			
Material	Arena Gravosa		
Tamaño efectivo	D10	mm	8,00
Conductividad hidráulica	Ks	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d	1500,00
Porosidad	n	%	35,00
<b>Diseño biológico</b>			
Área superficial	As	m <sup>2</sup>	29,06
Constante de reacción	KT	d <sup>-1</sup>	0,82
Tiempo de retención hidráulico	t	d	1,76
<b>Diseño hidráulico</b>			
Área transversal del canal	Ac	m <sup>2</sup>	1,15
Ancho del canal	W	m	1,92
Largo del canal	L	m	15,12
<b>Dimensionamiento</b>			
Relación L/A	3/1		
Ancho del canal	W'	m	2,00
Largo del canal	L'	m	5,80
Numero de lechos	N°	Un	3
Area superficial por lecho	As'	m <sup>2</sup>	11,60

### 7.7. Diseño del Sistema de Tratamiento para el caso de estudio

Como se expuso en puntos anteriores los HC no son el único componente del sistema de tratamiento. Para el diseño y construcción del sistema en el caso del “Instituto de Música” de la PUCV, donde solo se propone tratar las aguas grises del edificio, se propone el siguiente sistema y componentes:

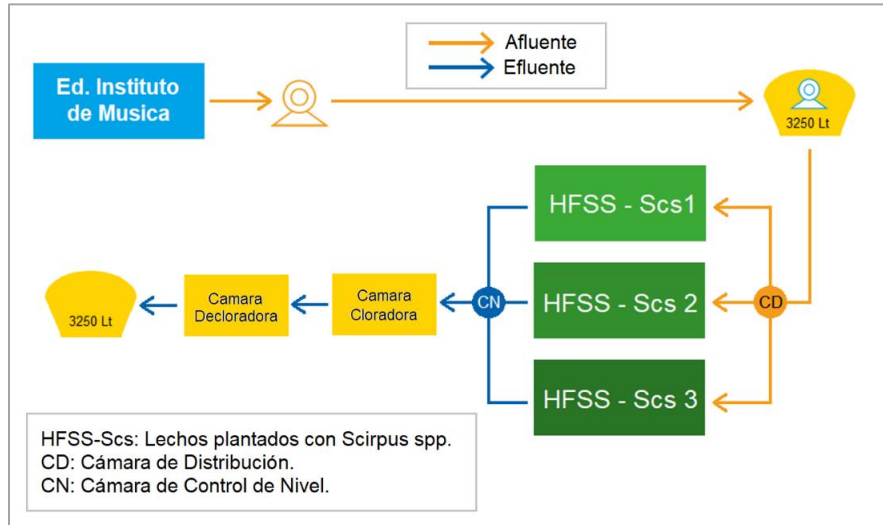


Figura 15: Esquema del sistema de tratamiento con HC para el Instituto de Música PUCV.

Como se muestra en el diagrama, las aguas recolectadas por la red de tuberías exclusiva para las aguas grises del edificio son impulsadas hasta un primer estanque de acumulación. Antes de este primer estanque se debe proyectar una cámara disipadora de energía, para asegurar que la entrada de agua al estanque sea a presión atmosférica y a baja velocidad.

Al tratarse únicamente de aguas grises, cuya carga orgánica es relativamente baja y no transportan grandes cantidades de sólidos suspendidos, no es necesario anteponer al HC un canal de desbaste o una fosa séptica como pretratamiento y tratamiento primario respectivamente como se vio en apartados anteriores. De esta forma, desde el primer estanque de acumulación se puede enviar directamente las aguas al humedal.

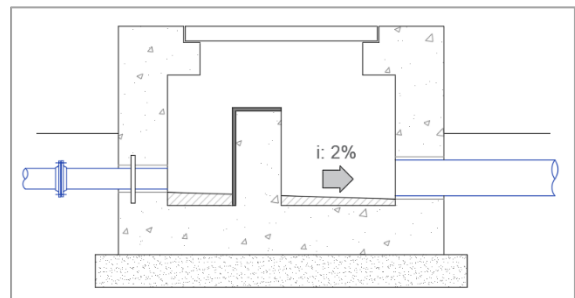


Figura 16: Diseño de las cámaras disipadoras de energía.

El agua acumulada en el estanque está en condiciones para entrar al humedal, sin embargo, como el sistema de lechos granulares funciona por gravedad y el HC está ubicado a nivel de suelo mientras que el estanque de acumulación está enterrado es necesario elevar las aguas grises hasta la cota del lecho. Esta diferencia de altura es relativamente pequeña por lo que se utiliza una pequeña bomba de impulsión, junto a ella se dispone de una segunda bomba de respaldo en caso de fallas del sistema.

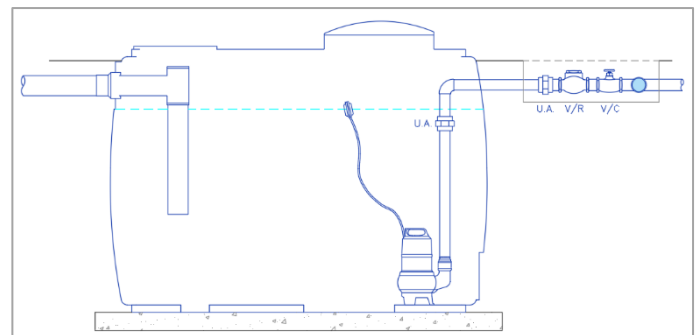


Figura 17: Diseño estanque de acumulación para aguas grises.

Durante la etapa de dimensionamiento del lecho del humedal se determinó que el sistema se compone de tres lechos construidos en paralelo. Por lo tanto, las aguas elevadas desde el estanque de acumulación deben ser distribuidas de manera uniforme en los tres lechos. Para esto, se dispone de una cámara distribuidora que cumple simultáneamente la función de cámara disipadora de energía. Esta cámara conecta con los lechos del humedal donde el agua se distribuye uniformemente a través del sistema de distribución, atraviesan el medio granular y son captadas por el sistema de recogida. Las salidas de los lechos se conectan nuevamente antes de llegar a la cámara de control de nivel, este sistema, relativamente simple, mantiene el nivel del agua dentro del humedal para asegurar la supervivencia de la vegetación y el correcto funcionamiento.

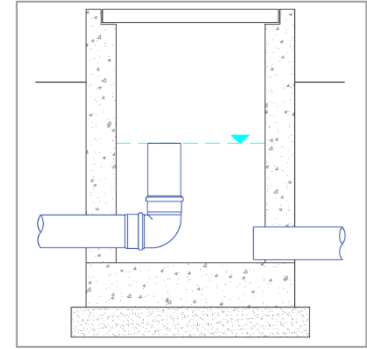


Figura 18: Diseño de la cámara de control de nivel del HC.

Finalmente, antes de poder acumular las aguas tratadas para ser reutilizadas, se dispone de una cámara cloradora, donde se garantiza un tiempo de retención hidráulico de media hora en contacto con pastillas de hipoclorito de calcio para eliminar los posibles patógenos y bacterias sobrevivientes en las aguas, y a continuación una cámara de cloración, donde se reduce los niveles de cloro a una cantidad segura para el uso de las aguas mediante la adición de pastillas de bisulfito de sodio. El último componente del sistema es un segundo estanque de acumulación donde se reciben las aguas tratadas y se almacenan para su reutilización. De este estanque saldrán las instalaciones de riego, drenes de infiltración o la forma que se escoja para disponer las aguas tratadas.

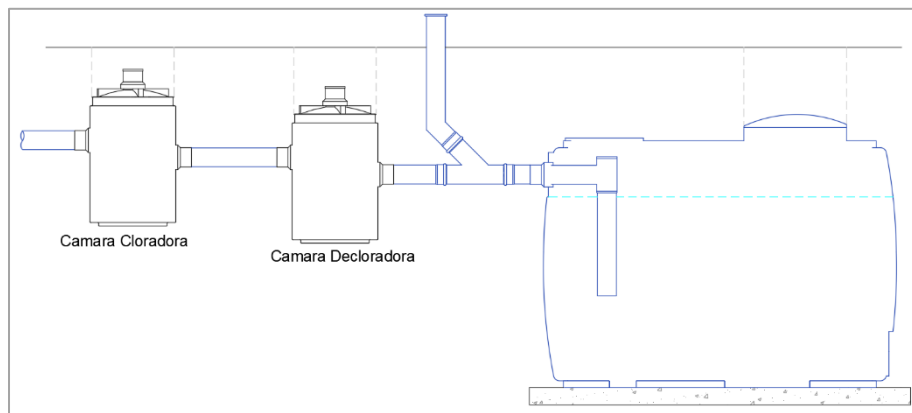


Figura 19: Diseño del sistema de desinfección y acumulación del efluente del HFSS.

En el Anexo C: *Diseño del Sistema con HFSS* se presentan tres laminas con el diseño del sistema de tratamiento, el detalle del lecho del humedal según lo especificado durante el proceso de diseño y el detalle de los diversos componentes que integran el sistema y son mencionados anteriormente.

## 8. Construcción de Humedales Construidos

Existe mucha información disponible sobre las actividades de construcción de los HC. La construcción de humedales de flujo libre, subsuperficial horizontal y subsuperficial vertical es muy similar, aunque difiere en algunos aspectos claves que están relacionados con las características distintivas de cada sistema. A continuación, se describen las actividades a seguir durante la construcción de un humedal HFSS, de acuerdo con el caso de estudio, basado en el Capítulo 2 de Vidal y Hormazábal (2018, Pag.47-60), el Capítulo 8 de García y Coroz (2008, Pag.83-95) y el Capítulo 3 de Delgado et al. (2010, Pag.39-45).

Previamente a cualquier actividad de construcción se recomienda realizar una visita al terreno de emplazamiento con todo el material de diseño y especificaciones de para verificar que tanto la ubicación geográfica, la topografía y las características físicas del diseño correspondan al sitio.

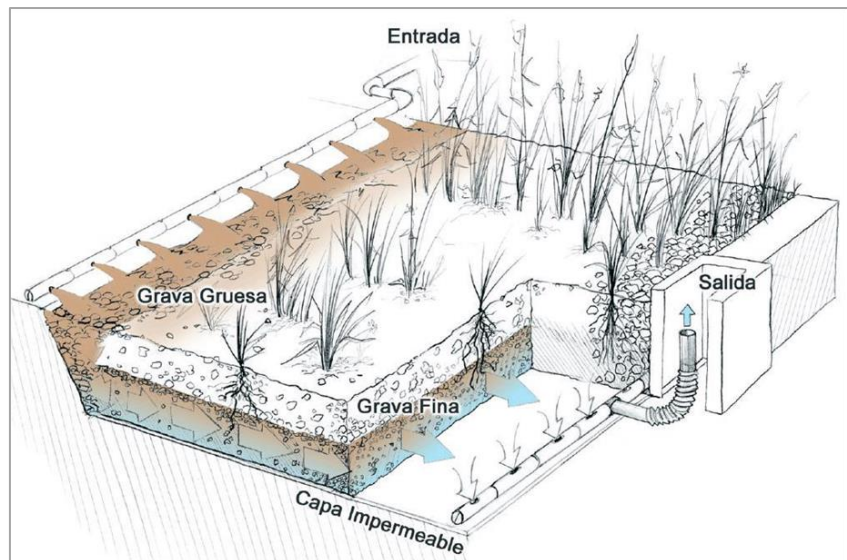


Figura 20: Esquema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.

### 8.1. Desbroce y limpieza

El proceso de construcción empieza con el retiro de toda la vegetación, materiales, basura, construcciones existentes y la capa superficial del suelo (aproximadamente 0,2 [m] de espesor) que se encuentren en el sitio donde se construirá el sistema. El objetivo final de estas actividades de desbroce y limpieza es la construcción de una plataforma de trabajo bien definida y apropiada para las futuras actividades de construcción.

Adicionalmente se deben remover todas las raíces y troncos, a través de medios manuales o mecánicos, bajo la superficie del terreno de manera de conseguir como mínimo 0,3 [m] de profundidad libres de obstáculos. Se debe identificar además todas las instalaciones de tuberías, cables eléctricos u otros conocidos dentro de la zona de excavación y que deban conservarse o posteriormente reponerse.

Cualquier material retirado durante el desbroce y limpieza de la obra debe ser transportado y entregado en un botadero autorizado. En casos particulares se puede reservar parte del material del desbroce para ocuparlo en obras complementarias como restauración, armado de taludes, compartimentación de lechos, entre otras. En ninguna circunstancia este material resultante será utilizado como sustrato o relleno dentro del lecho.



## 8.2. Replanteo

Teniendo la plataforma de trabajo terminada y limpia se procede al replanteo del proyecto de acuerdo con las dimensiones especificadas en el diseño y todas las obras complementarias correspondientes. Se recomienda usar algún método de señalización que indiquen los puntos más singulares e importantes de la construcción.

## 8.3. Excavación y movimiento de tierras

Una vez definido el proyecto en terreno se inician las actividades de excavación o relleno según corresponda, utilizando dentro de lo posible el material del mismo terreno para rellenar. Dependiendo de la magnitud del proyecto se demandará el uso de maquinaria de excavación o bien métodos manuales. Si se trata de un sistema que requiere áreas extensas es indispensable incluir estudios geotécnicos en el proyecto.

Entre las excavaciones que se deben realizar están: zanjas para tuberías y arquetas de distribución e inspección, lechos del HC y estructuras complementarias. Las dimensiones y características de las zanjas estarán determinadas por los diámetros y pendientes exigidas de acuerdo con el diseño hidráulico. En el caso de las arquetas, la excavación se hace del mismo diámetro de estas. En todos los casos se coloca una cama de arena para proteger y nivelar las instalaciones.

La excavación de los lechos del HC estarán definidos por el tamaño del proyecto y su diseño, la topografía del terreno y la calidad del suelo. Las paredes del lecho, dependiendo del tipo de humedal y las características del material, pueden tener taludes que varían desde totalmente verticales (en humedales VFSS o donde las limitaciones lo requieran) a relaciones 1:1 (suelos inestables: arenosos) o 1:2 (suelos cohesivos: limo-arcillosos).

La profundidad del lecho está definida por el tipo de HC que se construirá, en el caso de humedales HFSS la excavación no supera 1,0 [m] de profundidad, en cambio en los humedales VFSS las profundidades alcanzan los 1,5 [m]. Se debe tener en cuenta que el material excavado se puede usar, en caso de tener las características necesarias, en rellenos de nivelación y para la construcción de taludes y muros de coronación. A lo largo del perímetro de los lechos se deben construir muros de coronación de entre 40 y 50 [cm] de altura para evitar la entrada de aguas de escorrentía al HC.

Una vez finalizadas las actividades de excavación y movimiento de tierras se debe realizar un levantamiento topográfico, especialmente dentro de los lechos, para verificar las dimensiones y niveles del sistema. Además, se debe verificar la calidad del suelo en el fondo de la excavación sobre el cual se construirán los lechos.

## 8.4. Nivelación y compactación

La nivelación del lecho es una de las actividades fundamentales para el correcto funcionamiento del humedal, asegurando una correcta y homogénea circulación del agua dentro del lecho. Tanto los muros como el fondo de la excavación deben ser compactados, controlándose el contenido de humedad y el grado de compactación, de acuerdo con los estudios de laboratorio. Una recomendación particular es que la compactación se realice con equipos que no dejen huella para así evitar los caminos preferenciales de escurrimiento.

De la misma forma que en las zanjas y arquetas, se recomienda instalar una capa de arena limpia en el fondo de la excavación que debe ser nivelada y compactada, con el fin de proteger del punzonamiento el material impermeabilizante y facilitar las actividades de nivelación (usualmente se trabaja con pendientes del 1%).



## 8.5. Impermeabilización

Los HC son sistemas estancos, es decir, no debe existir infiltración ni aportes entre el lecho y el suelo. Según el diseño se puede realizar una impermeabilización con membranas impermeables o con capas sucesivas de arcilla.

Para sistemas pequeños se recomienda utilizar plásticos de alta densidad, materiales inertes que no se degradan y son resistentes a la luz solar, que garantizan la impermeabilización del sistema. En ningún caso se pueden ocupar películas bituminosas o materiales degradables en contacto con el agua para impermeabilizar el sistema. La instalación del plástico es relativamente sencilla, se extiende sobre la capa de arena de manera uniforme, sin arrugas y cuidando que no se modifique la capa subyacente. En caso de necesitar soldaduras en las juntas estas no deben sobresalir y ser estancas. Es importante que el plástico alcance a cubrir el fondo del lecho, sus taludes y los muros de coronación. Sobre el plástico se recomienda colocar una membrana geotextil con el fin de proteger el impermeabilizante del material granular que compondrá el lecho del HC.

La impermeabilización con capas de arcilla consiste en colocar capas consecutivas de arcilla que se va compactando hasta alcanzar normalmente los 0,3 [m] de espesor. Actualmente se está reemplazando este método por la aplicación de una capa de arcilla bentónica, permitiendo un ahorro en costos y tiempo.

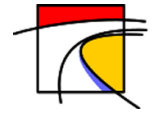
## 8.6. Sistemas de distribución y recogida

Una vez está terminada la impermeabilización del lecho se deben instalar las tuberías de entrada y salida. Generalmente la conexión de entrada y de salida atravesará el plástico impermeabilizante, este se debe perforar para permitir el paso de las tuberías y una vez instaladas se debe asegurar que se mantiene la impermeabilidad de lecho pegando (resinas o adhesivos industriales) o fundiendo la junta. En los casos que la tubería penetre en el lecho se utilizan piezas especiales, denominadas “manguitos”, que se deslizan por la tubería y se sueldan a esta y al plástico de manera de asegurar la impermeabilidad.

Posterior a la instalación de la acometida y descarga del lecho se continua con la instalación de arquetas y sistemas de conducción y control hidráulico. Los tanques de pretratamiento y arquetas pueden ser comprados en forma de prefabricados o ser construidos *in-situ* de acuerdo con guías de cálculo y construcción para asegurar que funciones adecuadamente. Se debe tener presente que en sistemas de distribución de mayor tamaño se necesita de losas de hormigón en la base de estanques y arquetas calculadas para soportar las estructuras.

En el sistema de tuberías se distinguen dos componentes: las tuberías de influente y las tuberías de drenado. En la cabecera del humedal se encuentran las tuberías de influente que alimentaran el lecho. Estas tuberías conectan la salida del pretratamiento con la cabecera del humedal y su diámetro es proporcional al caudal de agua a tratar. Este sistema de tuberías va enterrado en zanjas pre excavadas y como el transporte del agua es por gravedad se debe prestar especial atención a las pendientes calculadas. Por esta razón se recomienda aplicar una capa de arena limpia en el fondo para facilitar la nivelación y a su vez proteger las tuberías. En caso de tratarse de un sistema con más de un lecho se debe asegurar una distribución equitativa del caudal entre todas las unidades.

Para distribuir el agua uniformemente en la entrada del humedal se pueden usar canales o una tubería perforada con diámetros suficientemente grandes para evitar la colmatación. Los ramales deben estar nivelados de manera de asegurar una pareja distribución a lo ancho de la cabecera y así evitar posibles sobrecargas locales del sistema. El sistema de distribución esta insertado en una capa de grava gruesa que favorece una distribución homogénea del agua dentro del lecho.



Las tuberías de drenado, por el contrario, se instalan al final y en el fondo del lecho, pero de la misma forma que las tuberías de influente estas deben recorrer todo el ancho del lecho para evitar flujos preferenciales. Generalmente se utiliza una tubería perforada que se conecta a la salida del lecho. La tubería de descarga debe terminar en una arqueta que cuente con un sistema de regulación de altura de nivel de agua dentro del humedal.

### 8.7. Material granular

Una vez instalados los sistemas de distribución y recogida de aguas se procede al relleno del lecho con el material granular. El material granular utilizado debe estar en todos los casos limpio y lavado sin presencia de arcillas ni limos.

En la cabecera y el final del lecho se coloca primero una franja de material de mayor tamaño (entre 8 y 15 [cm]) para facilitar la infiltración y distribución del agua en la cabecera y la recogida por las tuberías de drenaje. A continuación, se procede a rellenar el resto del lecho. En el caso particular de los humedales VFSS el material se coloca en capas según sus tamaños evitando que se mezclen entre sí.

La faena se puede hacer manualmente o con equipos mecanizados teniendo siempre las precauciones de no dañar la impermeabilización y evitar compactar el material. Finalmente se realiza una nivelación superficial del lecho.

### 8.8. Plantado

La última etapa de construcción consiste en plantar la vegetación del HC. Para esta actividad el lecho ya debe tener agua, por lo tanto, se deben haber terminado todas las actividades anteriores y llevado a cabo las comprobaciones hidráulicas.

Se deben escoger especies de plantas que sean resistentes a las condiciones ambientales en las que se deben desarrollar dentro del HC. Existe una amplia variedad de especies de plantas que se pueden utilizar, aunque siempre se recomienda usar especies nativas porque se adaptan mejor y es más fácil su supervivencia. Las plantas deben ser adultas y estar completamente desarrolladas. Generalmente se siembran con una densidad entre 3 y 4 plantas por metro cuadrado.

Una vez plantada la vegetación se recomienda encharcar el HC con una capa superficial de agua de uno o dos centímetros durante los dos primeros meses. Esto puede generar malos olores y atraer a insectos por lo que tampoco es recomendado durante largos periodos de tiempo. Cuando las plantas ya se han adaptado al sistema el nivel de agua se baja a 5 [cm] por debajo de la superficie, siendo este el nivel habitual de operación.

### 8.9. Operación y mantenimiento

De la misma forma que existen guías de diseño y construcción de HC, también existen manuales de operación y mantención de estos sistemas. Terminada la construcción, el constructor hace entrega del sistema al propietario quien será responsable de su correcto uso y mantención.

El HC termina su etapa de puesta en marcha y comienza su funcionamiento normal cuando la vegetación está bien consolidada (aproximadamente 1 año) y la población de microorganismos se desarrolló lo suficiente (entre 3 a 6 meses). La mantención de un HC contempla algunas actividades como:

- **Mantenimiento de los pretratamientos:** Para asegurar la adecuada operación y retardar el proceso de colmatación del HC se debe asegurar que los tratamientos previos funcionen correctamente de forma continua. Especialmente se tiene que mantener limpio el estanque de sedimentación (fosa séptica) que debe ser vaciado al menos una vez al año o en caso de que se requiera este se debe vaciar con mayor frecuencia.

- Control del nivel del agua: En condiciones normales el nivel del agua se debe mantener entre 5 y 10 [cm] bajo la superficie de forma que no aflore agua a la superficie. Durante el invierno, especialmente en zonas heladas, se debe bajar aún más el nivel del agua para evitar que el agua se congele.
- Supervisión de la vegetación: Se debe asegurar que la densidad de plantas alcance al menos las 2 plantas por metro cuadrado y en de ser necesario se debe replantar. Además, se debe mantener la superficie limpia de malezas, teniendo cuidado de no afectar el sistema. En estos sistemas no es necesario recoger el material vegetal que se acumula en la superficie porque actúa como aislamiento térmico y protege de las heladas.
- Lavado a presión (spooling) de los sistemas de distribución y drenaje: Para eliminar el fango acumulado en las tuberías y limpiar los agujeros se debe realizar un lavado a alta presión, generalmente con una regularidad de una vez al año.
- Reparar obstrucciones en el humedal: Cuando un HC se sobrecarga de materia orgánica este se obstruye. Para solucionar este problema se recomienda vaciar completamente el lecho y dejarlo reposar en seco durante 3 a 4 semanas, idealmente durante la temporada más calurosa del año. Si esto no soluciona el problema una vez llenado nuevamente el humedal se puede repetir el procedimiento y, si el problema persiste, se requiere reemplazar el lecho completamente con nuevo material.
- Actividades de mantención de las partes mecánicas del sistema y otras estructuras complementarias.

#### 8.10. Costos de construcción

Los costos básicos para la construcción de un sistema de tratamiento con HC incluyen el terreno para la construcción, el proyecto del sistema y diversas actividades de construcción: los movimientos de tierras y excavaciones, la impermeabilización, los sistemas de distribución y drenaje, el medio granular, la vegetación y otras estructuras complementarias.

Los datos disponibles de Estados Unidos, República Checa, Portugal, España y Portugal indican que, de las diferentes actividades de construcción de los lechos de los HC de flujo subsuperficial horizontal (HFSS), las que más influyen en el costo total son el medio granular: entre el 27 y el 53%, y la impermeabilización del lecho: entre el 13 y el 33%. El costo porcentual de las demás actividades de construcción es: para la excavación y movimiento de tierras entre 7 y 27.4%, la plantación de la vegetación entre 2 y 12%, los sistemas de distribución y drenaje entre 6 y 12%, los sistemas de control hidráulico entre 3.1 y 5.7% y finalmente otros costos asociados entre 1.8 y 12% del total (Andreo, 2014; Vymazal y Kröpfelová, 2008).

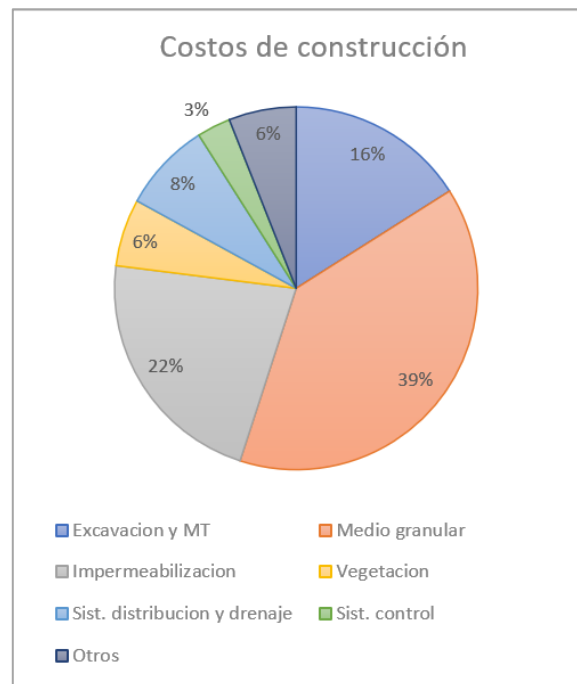


Figura 21: Costos (%) de las actividades de construcción de un lecho de HFSS.

En la construcción de humedales se observan dos situaciones recurrentes: en primer lugar, la construcción de humedales de mayor tamaño para tratar mayores volúmenes de agua se traduce en un menor costo por metro cuadrado, en segundo lugar, los humedales de flujo subsuperficial son generalmente más costosos que los humedales de flujo superficial debido a la ausencia del medio granular, que como se mencionó anteriormente, es la actividad más influyente en los costos de construcción. La diferencia entre los costos de los HC de flujo subsuperficial horizontal y vertical es que los últimos requieren de sistemas de distribución de agua más complejos aumentando así los costos de construcción (Vymazal, 2010).

Además, existe una importante diferencia en el costo del metro cuadrado construido de los HFSS de acuerdo con el nivel de desarrollo del país, por ejemplo, en Bélgica los costos alcanzan los 290 dólares por metro cuadrado y en Italia los 140 [US\$/m<sup>2</sup>] mientras que en India y Centroamérica bordean los 29 y 33 [US\$/m<sup>2</sup>] respectivamente (Andreo, 2014; Vymazal y Kröpfelová, 2008).

### 8.11. Costos de construcción del HC para el caso de estudio

De acuerdo con el dimensionamiento del lecho y posterior diseño del sistema de tratamiento con el HFSS se presenta en la tabla 12 el presupuesto detallado de los costos de inversión necesarios para llevar a cabo la propuesta. El presupuesto contempla las obras de construcción de los tres lechos que componen el HC y las estructuras complementarias del sistema para la acumulación, distribución y tratamiento de las aguas. El total neto del presupuesto alcanza los \$ 7.375.882 considerando materiales, maquinaria para las excavaciones y movimiento de tierra por 16 horas maquina y la mano de obra necesaria por 10 días de trabajo.

Para poder hacer una comparación con la información disponible sobre costos de humedales de flujo horizontal, en la tabla 13 se presentan los costos asociados solamente a los materiales de construcción de los lechos que componen el humedal. De esta forma, según la propuesta para el sistema de tratamiento las actividades más influyentes en el presupuesto vendrían siendo la construcción del medio granular, con un 36 % del total de los costos, y la impermeabilización de los lechos, con un 22%.

Además, como parámetro comparativo se determina el valor por metro cuadrado de humedal, siendo la superficie total de los tres lechos de 34,80 m<sup>2</sup> y un costo en materiales de construcción de \$ 1.794.055, se alcanza un valor de \$ 51.553 por metro cuadrado o 65 dólares por metro cuadrado.

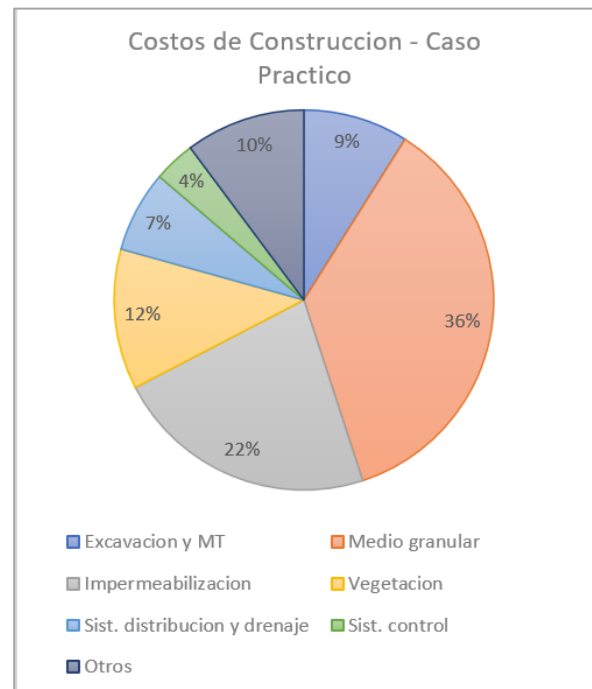
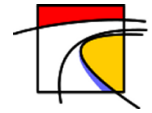


Figura 22: Costos (%) de las actividades de construcción del lecho de HFSS según el caso práctico.

Tabla 12: Presupuesto del sistema con HFSS diseñado para el Instituto de Música PUCV.

Ítem	Unidad	Cantidad	PU	Total
<b>Excavación y Movimiento Tierra</b>				
Excavación	H/Maq	8,00	20.000	160.000
<b>Tuberías y Fittings</b>				
PVC Sanitario				
PVC Sanitario 110 mm	ML	6,50	2.017	13.109
Tee PCV Sanitario	UN	2,00	3.857	7.714
Vee PVC Sanitario	UN	1,00	3.605	3.605
PVC Hidráulico				
PVC Hid PN10 50 mm	ML	4,80	3.359	16.121
Tee PVC Hid PN10 50 mm	UN	1,00	1.420	1.420
Codo 90° PVC Hid PN10 50 mm	UN	4,00	664	2.655
Terminales	UN	8,00	4.277	34.218
Otros				
Unión Americana PVC	UN	4,00	4.277	17.109
Válvula Retención 1 1/2" Bronce	UN	2,00	10.664	21.328
Válvula Bola 1 1/2"	UN	2,00	15.706	31.412
Adhesivo PVC Vinilit	UN	2,00	2.429	4.857
Teflón 1/2"	UN	2,00	580	1.160
<b>Cámaras y Estanques</b>				
Estanques Acumulación				
Estanque Acumulación 3250 Lt	UN	2,00	521.662	1.043.324
Hormigón Emplantillado	M3	0,78	64.500	50.442
Cámaras Prefabricadas				
Cámara Cloradora 170 Lt	UN	1,00	62.252	62.252
Cámara Decloradora 170 Lt	UN	1,00	59.495	59.495
Cámara Disipadora de energía				
Emplantillado Cámara Disipadora	M3	0,11	64.500	6.912
Hormigón Cámara Disipadora	M3	0,40	79.800	31.601
Tapa Cámara 60x60 cm	UN	1,00	9.151	9.151
<b>Equipos de Impulsión</b>				
Electrobomba sumergible agua sucia monofásica 1 HP 0,75 kW	UN	2,00	280.664	561.328
<b>Humedal Construido</b>				
Excavación y Movimiento Tierra				
Excavación	H/Maq	8,00	20.000	160.000
Impermeabilización				
Membrana Impermeable - Polietileno alta densidad Negro	M2	90,59	4.419	400.333
Sistema Distribución y Drenaje				
Cámara Distribuidora				
Emplantillado Cámara Distribuidora	M3	0,11	64.500	6.912
Hormigón Cámara Distribuidora	M3	0,40	79.800	31.601
Tapa Cámara 60x60 cm	UN	1,00	9.151	9.151
Sistema Distribución				
Tee PCV Sanitario	UN	3,00	3.857	11.571
Tapa Tubo PCV Sanitario	UN	6,00	1.000	6.000
PVC Sanitario 110 mm	M	13,35	2.017	26.924
Codo 87,5° PVC Sanitario	UN	2,00	2.176	4.353
Sistema Recogida				
Tee PCV Sanitario	UN	3,00	3.857	11.571
Tapa Tubo PCV Sanitario	UN	6,00	1.000	6.000
PVC Sanitario 110 mm	M	4,80	2.017	9.681
Sist. Control Hidráulico				
Emplantillado Cámara Control de Nivel	M3	0,06	64.500	4.128
Hormigón Cámara Control Nivel	M3	0,29	79.800	23.142
Tapa Cámara 60x60 cm	UN	1,00	9.151	9.151

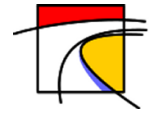


PVC Sanitario 110 mm	M	10,10	2.017	20.370
Codo 87,5° PVC Sanitario	UN	1,00	2.176	2.176
Codo 45° PVC Sanitario	UN	2,00	2.176	4.353
Vee PVC Sanitario	UN	2,00	3.605	7.210
<b>Medio Granular</b>				
Relleno Arena	M3	4,44	24.000	106.551
Relleno Grava	M3	16,69	26.000	433.973
Relleno Bolones	M3	4,13	25.000	103.212
<b>Vegetación</b>				
Plantas - Scirpus spp	UN	141,00	1.513	213.277
<b>Otros</b>				
Hormigón Solera	M3	2,29	79.800	182.413
<b>Mano de Obra</b>				
Albañil	DIA	10,00	29.545	295.455
Jornal (x3)	DIA	10,00	20.455	613.636
<b>Subtotal</b>				<b>4.842.359</b>
Utilidades			10,00%	484.236
Gastos Generales			18,00%	871.625
Total Neto				6.198.220
IVA			19,00%	1.177.662
<b>Total Presupuesto</b>				<b>7.375.882</b>

De la tabla 12 sobre el presupuesto de la construcción del sistema con HFSS se desprende la siguiente tabla con el detalle del presupuesto de los lechos del HFSS a construir con el objetivo de determinar los porcentajes de los costos de las partidas respecto al total del costo del lecho. Estos porcentajes se presentan en la figura 22: Costos (%) de las actividades de construcción del lecho de HFSS según el caso práctico.

Tabla 13: Detalle del presupuesto del lecho del HFSS para el Instituto de Música PUCV.

Ítem	Unidad	Cantidad	PU	Total	% Parcial
<b>Humedal Construido</b>					
Excavación y Movimiento Tierra					9%
Excavación	H/Maq	8,00	20.000	160.000	
Impermeabilización					22%
Membrana Impermeable - Polietileno alta densidad Negro	M2	90,59	4.419	400.333	
Sistema Distribución y Drenaje					7%
Cámara Distribuidora					
Emplantillado Cámara Distribuidora	M3	0,11	64.500	6.912	
Hormigón Cámara Distribuidora	M3	0,40	79.800	31.601	
Tapa Cámara 60x60 cm	UN	1,00	9.151	9.151	
Sistema Distribución					
Tee PCV Sanitario	UN	3,00	3.857	11.571	
Tapa Tubo PCV Sanitario	UN	6,00	1.000	6.000	
PVC Sanitario 110 mm	M	13,35	2.017	26.924	
Codo 87,5° PVC Sanitario	UN	2,00	2.176	4.353	
Sistema Recogida					
Tee PCV Sanitario	UN	3,00	3.857	11.571	
Tapa Tubo PCV Sanitario	UN	6,00	1.000	6.000	
PVC Sanitario 110 mm	M	4,80	2.017	9.681	
Sistema Control Hidráulico					4%
Emplantillado Cámara Control de Nivel	M3	0,06	64.500	4.128	
Hormigón Cámara Control Nivel	M3	0,29	79.800	23.142	
Tapa Cámara 60x60 cm	UN	1,00	9.151	9.151	
PVC Sanitario 110 mm	M	10,10	2.017	20.370	
Codo 87,5° PVC Sanitario	UN	1,00	2.176	2.176	
Codo 45° PVC Sanitario	UN	2,00	2.176	4.353	
Vee PVC Sanitario	UN	2,00	3.605	7.210	
Medio Granular					36%
Relleno Arena	M3	4,44	24.000	106.551	
Relleno Grava	M3	16,69	26.000	433.973	
Relleno Bolones	M3	4,13	25.000	103.212	
Vegetación					12%
Plantas - Scirpus spp	UN	141,00	1.513	213.277	
Otros					10%
Hormigón Solera	M3	2,29	79.800	182.413	
<b>Subtotal Humedal construido</b>				<b>1.794.055</b>	<b>100%</b>



## 9. Conclusiones

A modo de cierre del presente estudio es posible concluir que se logró el objetivo principal de determinar la factibilidad legal, técnica y económica de los sistemas de tratamiento con HC. Cada objetivo se alcanzó a través de levantamiento de información técnica, el estudio de la factibilidad legal y normativa de los sistemas de humedales construidos, la aplicación de los conocimientos adquiridos a un caso práctico y la evaluación de la viabilidad económica de estos sistemas.

Refiriéndose al diseño y funcionamiento de esta tecnología, se logró sistematizar las clases y características de los diferentes tipos de HC, en particular, de los sistemas de flujo subsuperficial horizontal, modelos de diseño recomendados, procesos de construcción, operación y mantención. Durante el levantamiento de información sobre los HC también quedó en evidencia la existencia de una experiencia acumulada para implementar estos sistemas con relativa seguridad en su funcionamiento y desempeño, para dejar de considerarlos como una tecnología emergente. Sin embargo, la falta de información sobre experiencia nacional genera cuestionamientos sobre la implementación de estos sistemas a lo largo de Chile en sus diferentes condiciones geográficas y climáticas.

Respecto al objetivo de evaluar la implementación de HC en Chile, se logró levantar el marco legal vigente sobre las condiciones y requerimientos de recolección, reutilización, disposición y calidad de las aguas servidas tratadas y la normativa de ingeniería e instalaciones sanitarias. En este sentido, se concluye que, aunque no existe una legislación o normativa específica que regule el uso y funcionamiento de los HC como método de tratamiento de aguas servidas, existen limitantes y regulaciones aplicadas al efluente del sistema de tratamiento que condicionan el diseño e implementación de esta tecnología. La legislación vigente más relevante para el diseño e implementación de los HC es la que determina las condiciones y características de los efluentes del sistema. Además, para el caso de estudio se destaca que dentro de los límites urbanos solo se permite tratar las aguas grises de los edificios y no la totalidad de las aguas servidas. Por lo tanto, se puede decir con seguridad que existen las condiciones legales para integrar esta tecnología al contexto nacional como sistema de tratamiento.

A través del análisis comparativo se mostraron las características más atractivas de los HC y permite responder a la pregunta de por qué los sistemas de tratamiento con HC pueden preferirse por sobre otros sistemas de tratamientos convencionales. Entre los aspectos funcionales más atractivos del sistema destacan los bajos requerimientos de energía, mantención y sencilla operación, todas ventajas derivadas de la baja complejidad de los procesos que ocurren dentro de los lechos de los humedales. En cambio, los detractores más significativos al momento de elegir estos sistemas de tratamiento son el uso extensivo de suelo y el bajo rendimiento de los lechos de tratamiento. Ambas desventajas están directamente relacionadas al ser necesario lechos de mayor extensión para alcanzar rendimientos de tratamiento competitivos con otras tecnologías convencionales.

Fuera de las ventajas y desventajas técnicas que tiene esta tecnología; el verdadero atractivo y potencial radica en su aporte social y medioambiental a la comunidad y al entorno donde se construyen. La posibilidad de los HC de ser un espacio habitable es una característica única de estos sistemas que le facilita una interacción con la comunidad que no se consigue en ninguna otra planta de tratamiento, convirtiéndolos así en posibles nichos de innovación. Además, junto con el paso del tiempo, la importancia de las consecuencias medioambientales de la construcción ha aumentado progresivamente, así también, la posibilidad de restaurar un ecosistema y la diversidad ambiental, pudiendo convertirse en un factor tan relevante que sea decisivo al momento de escoger entre otros sistemas de tratamiento.



Finalmente, respecto al objetivo de aplicar los conocimientos técnicos recopilados a lo largo del trabajo a un caso práctico, específicamente el edificio “Instituto de Música” de la PUCV, se logró demostrar que el diseño teórico de un HC se puede aplicar a un proyecto de construcción real, cuyas características específicas condicionan los parámetros del sistema, sin que el humedal pierda su funcionalidad o propiedades que lo vuelven atractivo como sistema de tratamiento.

Al tratar de implementar estos sistemas de tratamiento a proyectos existentes, como es el caso del edificio “Instituto de Música”, se demuestra que algunas características de dicho proyecto condicionan la implementación del HC. En el caso práctico se distinguen dos condiciones fundamentales para la implementación del sistema. En primer lugar, queda en evidencia la principal desventaja de los HC de requerir grandes superficies de terreno para su construcción. La falta de espacio libre puede dificultar el diseño y construcción del sistema de tratamiento, debido a que se busca calzar lechos de áreas determinadas en espacios reducidos, o bien puede imposibilitar la implementación del sistema. Además, gran parte del potencial que tienen estos sistemas nace de la integración de la planta de tratamiento a su entorno. Sucede que al incorporar un HC a un proyecto existente es más difícil integrarlo completamente que si este se considerara y construyera desde un inicio con el proyecto. En el “Instituto de Música” no se tiene el espacio libre disponible para implementar los lechos diseñados e integrarlos al proyecto. Una propuesta alternativa sería la remodelación de las terrazas del frente del edificio para convertirlas en los lechos del HC, esto implica obras mayores de intervención en el edificio mismo y diseñar una nueva disposición de las obras civiles de la planta de tratamiento.

En segundo lugar, el edificio “Instituto de Música” fue elegido particularmente ya que cuenta con un sistema separado de aguas servidas. Como el estudio se enfoca en la implementación de los sistemas con HC en una zona urbana y de acuerdo con la Ley 21.075, dentro de estos límites solo está permitido tratar las aguas grises, esta condición de separación de aguas servidas es fundamental para poder incorporar este sistema al edificio. En proyectos que no disponen de las instalaciones para la separación de aguas grises y negras los costos de modificación de instalaciones son muy elevados, involucran intervenciones importantes en la construcción que en muchos casos son inviables técnica, estructural y económicamente.

La recomendación que surge del estudio de estas dos condiciones es que, para alcanzar el máximo potencial de esta tecnología, los HC se deben incorporar en el diseño inicial de un proyecto de construcción y estar considerados como su mecanismo de tratamiento de aguas grises. De esta forma el proyecto dispondrá de todas las condiciones necesarias para el correcto funcionamiento del humedal, la planta se podrá integrar estética y funcionalmente a la construcción y no se incorporarán costos adicionales de modificación y remodelación.

A partir del dimensionamiento de la planta de tratamiento para el edificio “Instituto de Música” se alcanzó un costo final de \$ 7.375.882 (Tabla 12) que demuestra la factibilidad económica de los HFSS, además de demostrar competitividad con otras formas de tratamiento. La alternativa más recomendada cuando se pretende tratar las aguas servidas de forma particular es la implementación de una planta de tratamiento prefabricada, en el Anexo D se analiza esta alternativa que alcanza un costo de implementación final de \$ 6.847.501. A pesar de que la planta prefabricada es más atractiva económicamente, la diferencia de inversión es mínima, pero en aportes potenciales a la comunidad y al medio ambiente la planta compacta queda muy por debajo del HC.



Otro análisis económico es el tiempo en que el ahorro de agua para riego devuelve a la comunidad la inversión que significa el HC. Para el año 2022 la compañía *Esval* fijó el valor del agua potable, durante la temporada baja en la zona de Viña del mar, en \$ 958,95 por metro cúbico, por lo tanto, en 74 meses (aproximadamente 6 años) la PUCV recuperará por completo lo invertido en el HFSS. A pesar de que la recuperación es lenta, el ahorro de agua para cualquier sistema de tratamiento que permita reutilizar las aguas grises será el mismo, la diferencia radicará en el costo inicial de la inversión y los aportes adicionales que el sistema traiga consigo durante ese periodo de tiempo.

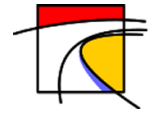
Además, la comparación entre los costos de las actividades de construcción del caso práctico (Figura 22) y la experiencia internacional (Figura 21) validan el dimensionamiento de la planta de tratamiento y refuerzan los resultados obtenidos del estudio. Dentro de la misma línea, el costo de 65 dólares por metro cuadrado de lecho de humedal está dentro de lo esperado para el caso de un país en vías de desarrollo como Chile.

Al terminar el estudio se validó la implementación de los humedales construidos como sistemas de tratamiento, específicamente de los humedales de flujo subsuperficial horizontal, como una alternativa viable técnica y legal, además de atractiva desde un punto de vista económico para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una zona urbana.

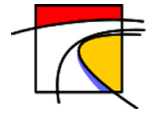


## 10. Bibliografía

- Andreo, P. (2014). Evaluación y Diseño de un Humedal Construido para la Depuración de Aguas Residuales Domésticas. Universidad de Murcia.
- Arias, C. y Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, núm. 13, julio, 2003, pp. 17-24.
- Banco Mundial (2011). Chile - Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Bioplastic. (s.f.) Plantas de tratamiento de aguas servidas 9300 L. Ficha técnica.  
<https://bioplastic.cl/Productos/view/18/1>.
- Brix, H., Koottatepb, T., Frydc, O. y Laugesend, C. (2010). The flower and the butterfly constructed wetland system at Koh Phi Phi—System design and lessons learned during implementation and operation. Ecological Engineering.
- Cowardin, L., Carter, V., Golet, F. y LaRoe, E. (1979). Classification of Wetlands and Deepwater Habitats of the United States. U.S. Department of the Interior.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Perez, L. y Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Universidad Mayor de San Simón.
- Delgado, L., Tironi, A., Vila, I., Verardi, G., Ibáñez, C., Agüero, B. y Marín, V. (2014). El humedal del Río Cruces, Valdivia, Chile: una síntesis ecosistémica. Latin American Journal of Aquatic Research, vol. 42, núm. 5, noviembre, pp. 937-949. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O. y Von Sperling, M. (2017). Treatment Wetlands. Volume seven. Biological Wastewater Treatment Series.
- EPA. (2000). Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA. (2012). Guidelines for Water Reuse. U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA. (31 de marzo de 2021). Wetlands. U.S. Environmental Protection Agency.  
<https://www.epa.gov/wetlands/what-wetland>.
- ESVAL. (02 de febrero de 2022). Aviso. Avisoslegales. El Mostrador.
- Fundación Chile. (2016). Aguas residuales como nueva fuente de agua. Diagnóstico del potencial reúso de aguas residuales en la Región de Valparaíso.
- Garcias, J. y Coroz, A. (2008). Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial.
- Gobierno de Chile. (20 de junio de 2019). Presidente Piñera lanzó Plan de Embalses para beneficiar a 150 mil agricultores y comunas rurales. <https://www.gob.cl/noticias/presidente-pinera-lanzo-plan-de-embalses-para-beneficiar-150-mil-agricultores-y-comunas-rurales/>.
- Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental GIBA. (s.f.). Jardines depuradores. Centro de Ciencias Ambientales EULA-CHILE. <http://www.eula.cl/giba/proyecto/jardinesdepuradores>.



- Huertas, R. y Marcos, C. (2013). Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España.
- Institute for Local Government. (s.f.). Arcata's Innovative Wastewater Treatment Facility Serves as a Wildlife Sanctuary. <https://www.ca-ilg.org/post/arcatas-innovative-wastewater-treatment-facility-serves-wildlife-sanctuary>.
- Kadlec, R. y Wallace, S. (2009). Treatment wetlands. Second edition. CRC Press.
- Lara, J. (1999). Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Llagas, W. y Guadalupe, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG vol. 15, núm. 17, pp. 85-96.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2011). Informe final - Diseño del inventario nacional de humedales y el seguimiento ambiental. Gobierno de Chile.
- Morales, G., López, D., Vera, I. y Vidal, G. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas. Theoria, vol. 22, núm. 1, pp. 33-46.
- Pérez, A. (2010). Selección de sistema de tratamiento de Aguas Residuales para localidad de Santa Bárbara usando metodología de decisión multicriterio AHP. Universidad de Chile.
- Pizarro, L. (2011) Diagnóstico y desafíos para los Sistemas de Tratamiento de Aguas servidas en localidades rurales. Universidad de Chile.
- Ramsar. (1994). Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas.
- Ramsar. (2006). Manual de la Convención de Ramsar, 4a. edición.
- Ramsar. (2020). Annotated List of Wetlands of International Importance Chile.
- Santasmasas, C. (2018). Aguas grises: origen, composición y tecnologías para su reciclaje. Aqua España.
- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo. (2009). Manual de Soluciones de Saneamiento Sanitario para Zonas Rurales. Gobierno de Chile.
- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo. (2012). Resumen catastro plantas de tratamiento de aguas servidas sector rural año 2012. Gobierno de Chile.
- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo. (2018). Estudio de Soluciones Sanitarias para el Sector Rural. Gobierno de Chile.
- Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2019). Informe de Gestión del Sector Sanitario. Gobierno de Chile.
- Toro, F. (2005). Áreas potenciales para la aplicación de biosólidos en plantaciones forestales de la VI región de Chile. Universidad de Chile.



- Vera, I., Jorquera, C., Lopez, D. y Vidal, G. (2016). Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: reflexiones. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 7, núm. 3, pp. 19-35.
- Vidal, G. y Araya, F. (2014). Las aguas servidas y su depuración en zonas rurales: situación actual y desafíos. Universidad de Concepción.
- Vidal, G. y Hormazábal, S. (2018). Humedales construidos. Universidad de concepción.
- Vymazal, J. (1998). Removal mechanisms in constructed wetlands.
- Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, vol. 25, pp. 478-490.
- Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, vol. 2, pp. 530-549.
- Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review.
- Vymazal, J. y Kröpfelová, L. (2008). Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow.
- Wallace, S. (2007). The wetland wastewater alternative.
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). (2003). Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. Agua para todos, agua para la vida - Resumen. UNESCO.
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. UNESCO.
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017 – Cifras y Datos. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. UNESCO
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). (2020). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020. Agua y Cambio climático. UNESCO
- Zhang, Y. (2012). Design of a Constructed Wetland for Wastewater Treatment and Reuse in Mount Pleasant, Utah. All Graduate Plan B and other Reports, pp. 216.

## Anexo A - Memoria de Calculo

A continuación, se presenta el procedimiento de cálculo y diseño de un HC de flujo subsuperficial horizontal (HFSS) para el proyecto “Instituto de Música” de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), ubicado en Viña del Mar.

### Diseño biológico:

El caudal medio diario que entrara al HC se calcula utilizando la proporción (P) entre las unidades equivalentes de los artefactos conectados a la red de aguas grises ( $UEH_{AG}$ ) y las unidades equivalentes totales ( $UEH_T$ ) del edificio:

$$P = \frac{UEH_{AG}}{UEH_T} = \frac{50}{188} = 0.27$$

Se especifica que el consumo máximo diario de agua es de 13 [m<sup>3</sup>/día], por lo tanto, el volumen de aguas residuales generadas y descargadas a través de la red de aguas grises será:

$$Q = P \times Q_{Max} = 0.27 \times 13.00 = 3.46 \text{ m}^3/\text{día}$$

La carga orgánica de las aguas grises que ingresan al HC ( $C_0$ ) se estima según la tabla 2. Se considera que las aguas grises tienen las características de aguas residuales diluidas, porque los artefactos conectados a la red no debieran generar descargas con importantes cargas orgánicas:

$$C_0 = 150 \text{ mg/L}$$

Se considera que la eficiencia de remoción del contenido de materia orgánica (ER), representado por la DBO<sub>5</sub>, alcanza el 90%, por lo tanto, la carga orgánica del efluente ( $C_e$ ) será:

$$C_e = C_0 \times (1 - ER) = 150 \times (1.00 - 0.90) = 15 \text{ mg/L}$$

De acuerdo con el proyecto de reglamento sobre condiciones sanitarias básicas para la reutilización de aguas grises destinadas a riego ornamental, y respaldado por el DS 90/2001 y la NCh 1333/87 sobre los requisitos de calidad del agua para diversos usos, la concentración máxima permitida de DBO<sub>5</sub> es 35 [mg/L].

Se fija una profundidad del lecho de 0.40 [m], el parámetro se estima entre los valores típicos de este tipo de HC de flujo subsuperficial horizontal.

La constante de velocidad de reacción de primer orden (Ec.2) se calcula utilizando una temperatura del agua de 15°C:

$$K_T = K_{20} \times 1.06^{(T-20)} = 1.104 \times 1.06^{(15-20)} = 0.82 \text{ d}^{-1}$$

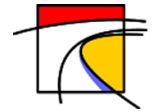
Para construir el lecho se ocupa una grava fina de diámetro efectivo (D10) de 8 [mm]. Se estima que una grava de este tipo tiene una conductividad hidráulica (Ks) de 1500,00 [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d] y una porosidad (n) de 35%.

El área superficial (Ec.1) se determina como:

$$As = \frac{Q \times \ln\left(\frac{C_0}{C_e}\right)}{K_T \times h \times \eta} = \frac{3.46 \times \ln\left(\frac{150}{35}\right)}{0.82 \times 0.60 \times 0.35} = 29.06 \text{ m}^2$$

El tiempo de retención hidráulico (Ec.3) se determina como:

$$t = \frac{As \times h \times \eta}{Q} = \frac{13.32 \times 0.40 \times 0.35}{3.46} = 1.76 \text{ dias}$$



### Diseño hidráulico:

Se fija una pendiente de fondo del lecho de 0.01 [m/m] como valor típico.

El área transversal del canal (Ec.5), a través de la ley de Darcy, se determina como:

$$A_c = \frac{Q}{\frac{k_s}{FS} \times S} = \frac{3.46}{\frac{3000.00}{5} \times 0.01} = 1.15 \text{ m}^2$$

A la conductividad hidráulica (Ks) se le aplica un factor de seguridad (FS) igual a 5, con el fin de evitar la colmatación en el lecho y representar el desarrollo de la biopelícula.

El ancho del lecho (Ec.6) se determina como:

$$W = \frac{A_c}{h} = \frac{0.58}{0.40} = 1.92 \text{ m}$$

El largo del lecho (Ec.7) se determina como:

$$L = \frac{A_s}{W} = \frac{19.20}{1.44} = 15.12 \text{ m}$$

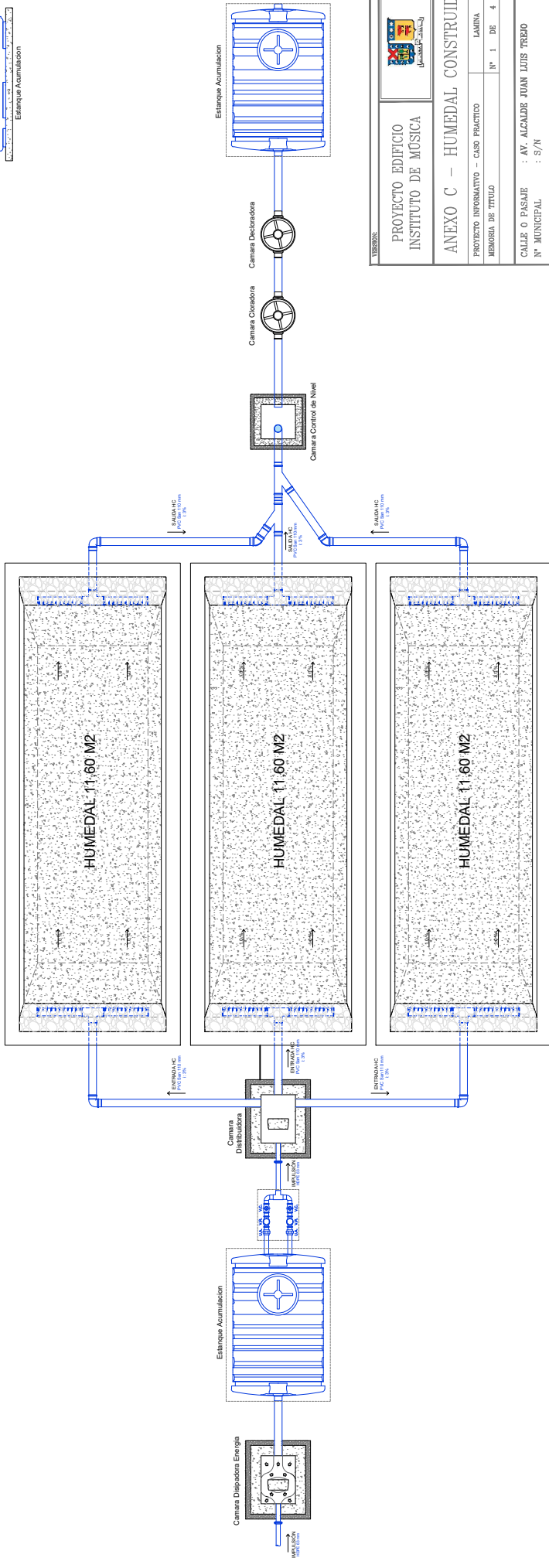
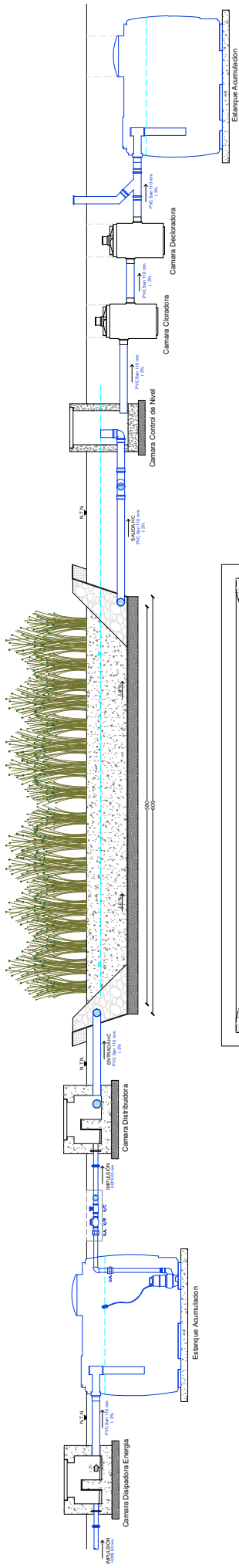
### Compartimentación:

Una vez determinada las dimensiones del humedal (diseño biológico e hidráulico) se utiliza una relación largo-ancho (L/A) de 3/1 para determinar la cantidad de celdas en paralelo que debe tener el HFSS.


La distribución final de los lechos será:

Tabla 1: Resumen de dimensiones de lechos del HFSS para el Edificio "Instituto de Música".

Dimensionamiento			
Relación L/A	3/1		
Ancho del canal	W'	m	2,00
Largo del canal	L'	m	5,80
Numero de lechos	N°	Un	3
Área superficial por lecho	As'	m <sup>2</sup>	11,60



Variable	Simbolo	Unidad	Valor
Caudal medio diario	Q	m <sup>3</sup> /día	3,36
Profundidad del lecho	S	m/m	0,03
Profundidad del lecho	h	m	0,95
Concentración DBO5 efluentes	CO	mg/L	150,00
Concentración DBO5 influente	CO	mg/L	35,00
Características del Lecho			
Material			arena gravosa
Tamaño efectivo	D10	mm	8,00
Conductividad hidráulica	Ks	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> -d	1800,00
Porosidad	n	%	35,00
Características del Estanque			
Área superficial	A	m <sup>2</sup>	29,06
Constante del fricción	KT	s <sup>2</sup>	0,60
Tiempo de retención hidráulico	t	d	1,76
Características del Canal			
Área superficial del canal	A	m <sup>2</sup>	1,16
Longitud del canal	L	m	1,36
Perímetro del canal	P	m	15,11
Dimensionamiento			
Potencia LVA	W	m	37,1
Longitud del canal	L'	m	5,00
Numero de bocanosa	N'	Un.	3
Área superficial por bocanosa	A'	m <sup>2</sup>	11,95



**PROYECTO EDIFICIO  
INSTITUTO DE MUSICA**

**ANEXO C – HUMEDAL CONSTRUIDO**

MEMORIA DE TITULO

Nº 1 DE 4

PROYECTO INFORMATIVO – CASO PRACTICO

LAMINA

CALLE O PASADJE : AV. ALCAUDE JUAN LUIS TREJO


Nº MUNICIPAL : 5/11

ROL AVALUO : 297-03

LOTRO O POBLACION : LOTE 1-C

COMUNA : VIRA DEL MAR

UBICACION

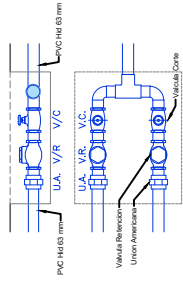


PRIMAS

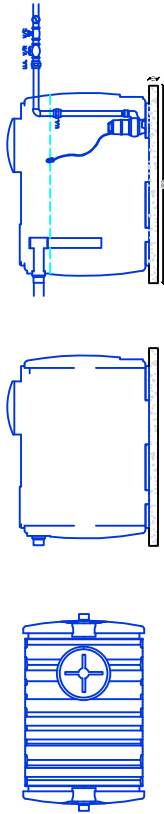
Alberto Dünner Turner  
18.824.958-1

ELABORACION PROPIA

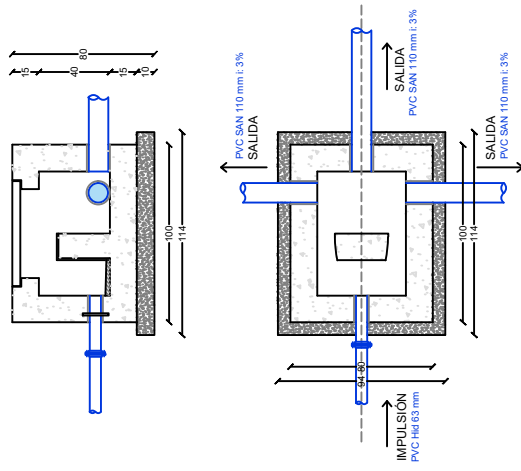
DETALLE CAJA DE VALVULAS  
ESC. 1:10



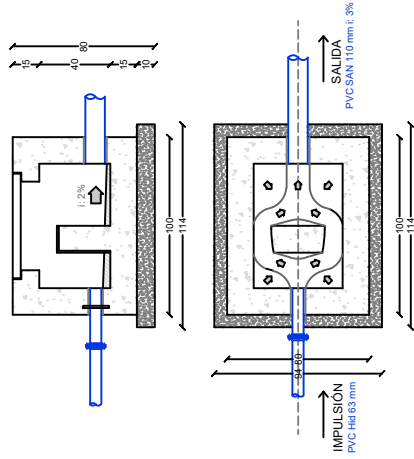
DETALLE ESTANQUE DE ACUMULACION 3250 LTS  
ESC. 1:20



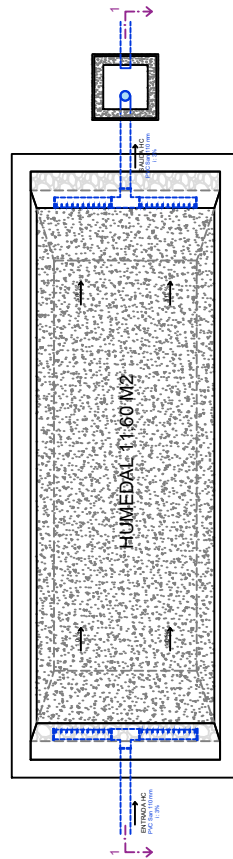
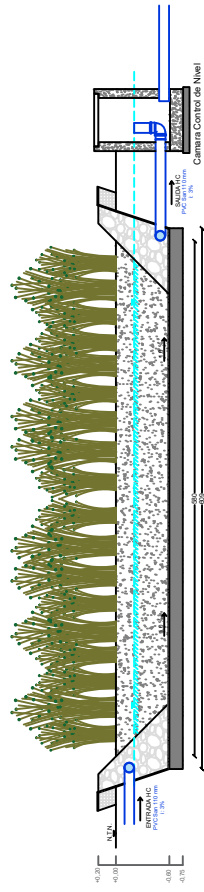
DETALLE CAMARA DISIPADORA DE ENERGIA Y DISTRIBUCION  
ESC. 1:10



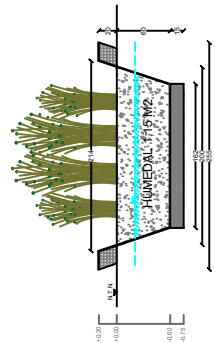
DETALLE CAMARA DISIPADORA DE ENERGIA DE IMPULSION  
ESC. 1:10



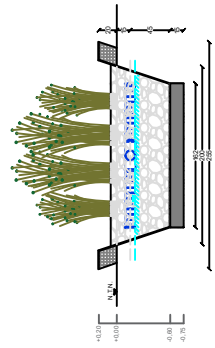
CORTE 1 - PERFIL LONGITUDINAL HC  
ESC. 1:20



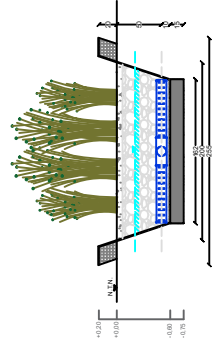
PLANTA HUMEDAL CONSTRUIDO  
ESC. 1:20



CORTE A - PERFIL TRANSVERSAL HC  
ESC. 1:20



CORTE B - SISTEMA DISTRIBUCION  
ESC. 1:20



CORTE C - SISTEMA RECOGIDA  
ESC. 1:20

VERSION:

PROYECTO EDIFICIO  
INSTITUTO DE MUSICA

ANEXO C - HUMEDAL CONSTRUIDO

PROYECTO INFORMATIVO - CASO PRACTICO  
MEMORIA DE TITULO

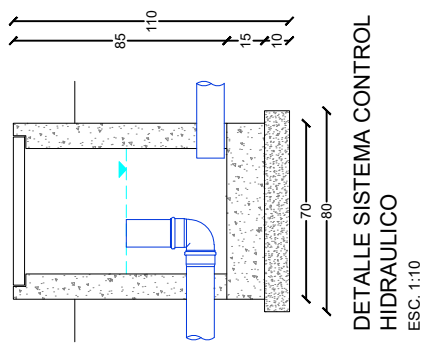
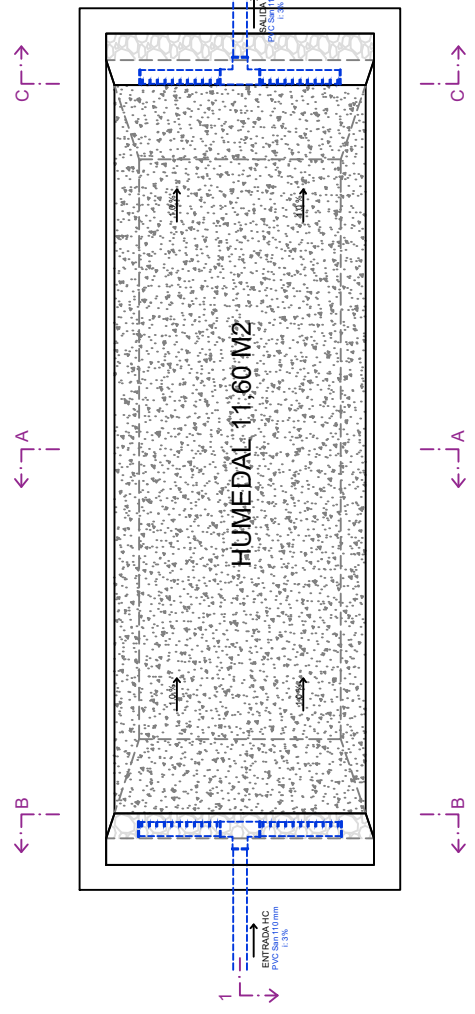
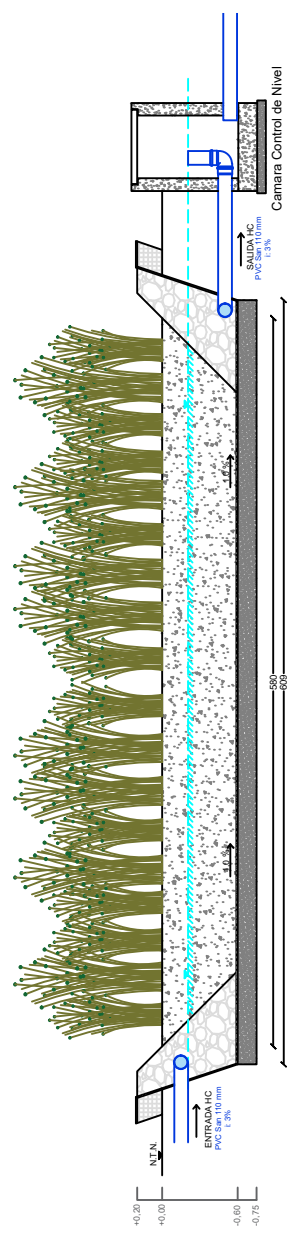
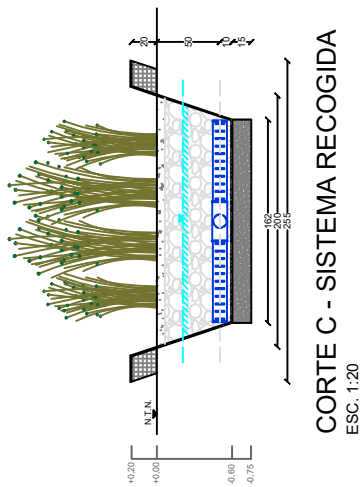
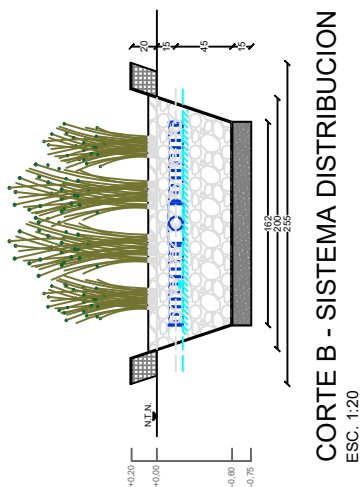
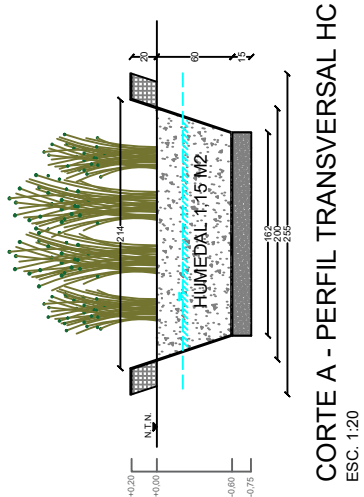
LAMINA  
N° 2 DE 4



CALLE O PASAJE : AV. ALCAUDE JUAN LUIS TREJO  
N° MUNICIPAL : S/N  
ROL AVALUO : 257-03  
LOTRO O POBLACION : LOTE 1-C  
COMUNA : VIRA DEL MAR

UBICACION

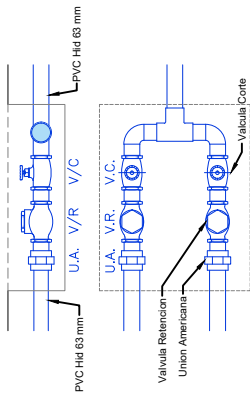


PRIMAS	
Alberto Dünner Turner 18.824.558-1	
ELABORACION PROPIA	

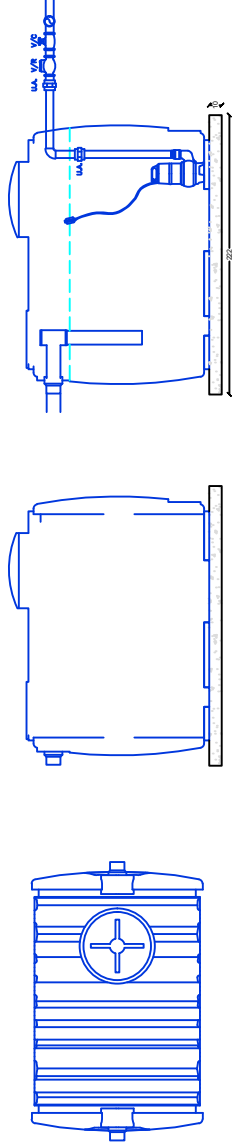


VERSION:	 <b>PROYECTO EDIFICIO INSTITUTO DE MÚSICA</b>		
PROYECTO INFORMATIVO - CASO PRACTICO	<b>ANEXO C - HUMEDAL CONSTRUIDO</b>		
MEMORIA DE TITULO	LAMINA	N°	DE
		3	4
<b>CALLE O PASAJE : AV. ALCALDE JUAN LUIS TREJO</b> <b>N° MUNICIPAL : S/N</b> <b>ROL AVALUO : 257-03</b> <b>LOTEO O POBLACION : LOTE 1-C</b> <b>COMUNA : VIÑA DEL MAR</b>			
<b>UBICACION</b> 			
<b>PTIMAS</b> Alberto Dinner Turner 19.624.959-1			
ELABORACIÓN PROPIA			

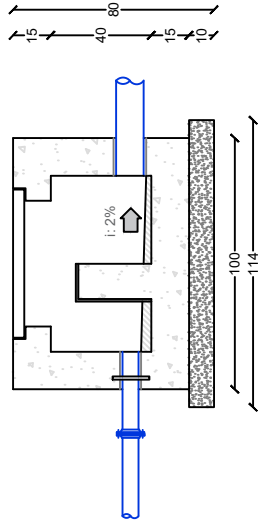
DETALLE CAJA DE VALVULAS  
ESC. 1:10



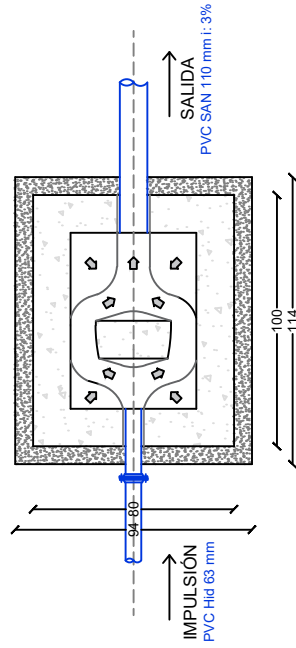
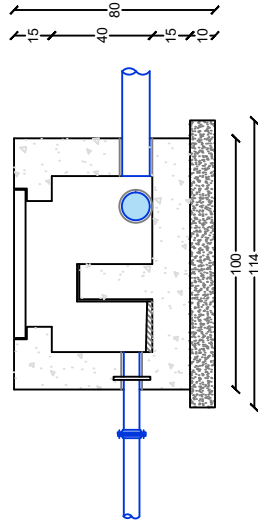
DETALLE ESTANQUE DE ACUMULACION 3250 LTS  
ESC. 1:20



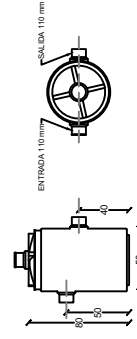
DETALLE CAMARA DISIPADORA DE ENERGIA DE IMPULSION  
ESC. 1:10



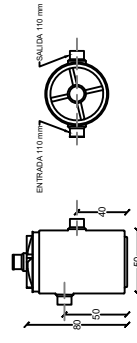
DETALLE CAMARA DISIPADORA DE ENERGIA Y DISTRIBUCION  
ESC. 1:10



DETALLE CAMARA CLORADORA 170 LTS  
ESC. 1:10

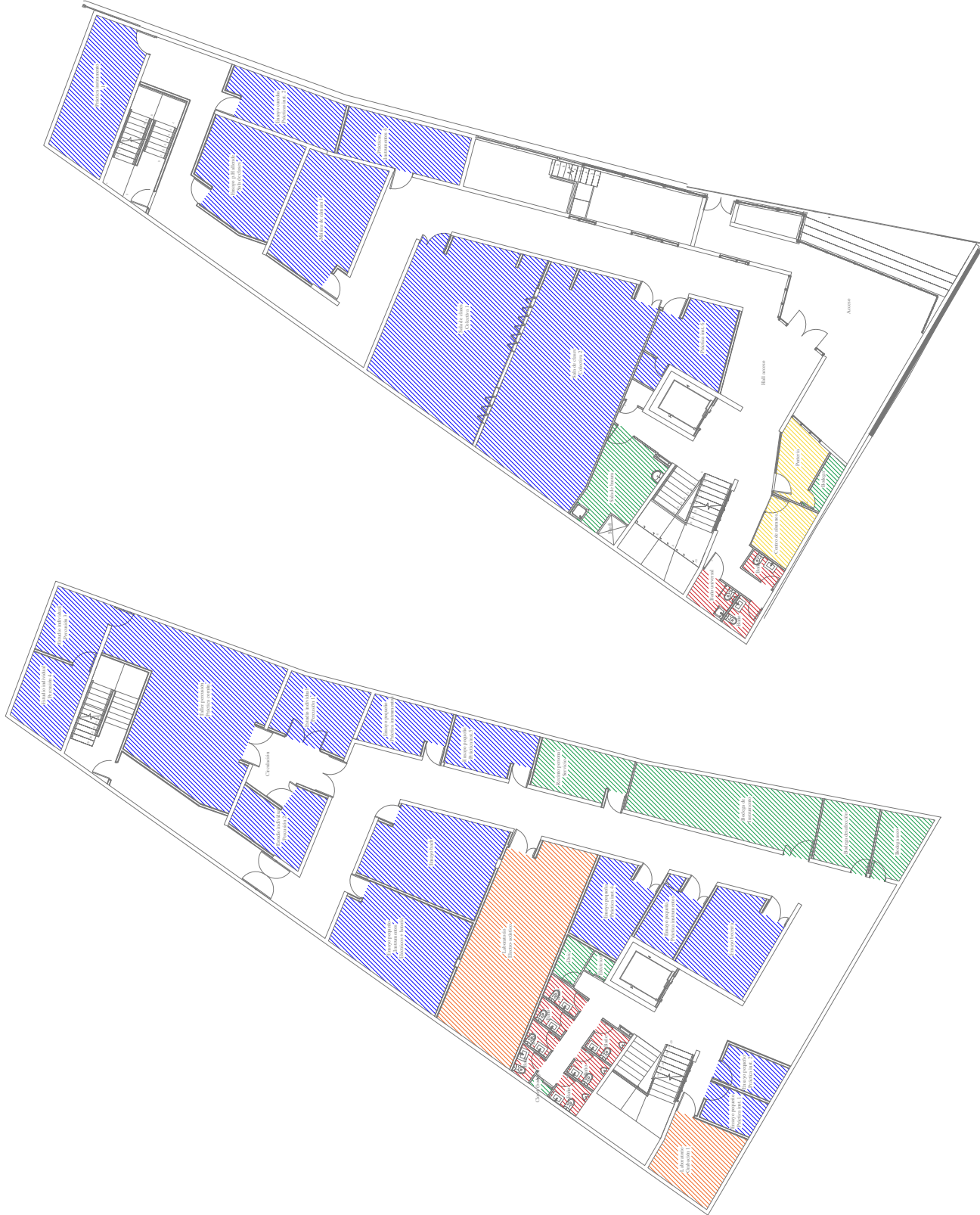


DETALLE CAMARA DECLORADORA 170 LTS  
ESC. 1:10



RESUMEN CAMARA CLORADORA/DECLORADORA	
Dotacion por habitante	13,5 lts/Hr
Caril. usuarios	260 Hhd
Uso concentrado	13 Hr
Volumen camara	135 Lts
Volumen comercial	170 Lts

VERSION:			
PROYECTO EDIFICIO	INSTITUTO DE MUSICA		
ANEXO C -- HUMEDAL CONSTRUIDO			
PROYECTO INFORMATIVO -- CASO PRACTICO	LAMINA	N°	4 DE 4
MEMORIA DE TITULO			
CALLE O PASAJE	: AV. ALCALDE JUAN LUIS TREJO		
N° MUNICIPAL	: S/N		
ROL AVALUO	: 257-03		
LOTEO O POBLACION	: LOTE 1-C		
COMUNA	: VIÑA DEL MAR		
UBICACION			
PTEMAS			
Alberto Dinner Turner 19.624.959-1			
ELABORACION PROPIA			



**SIMBOLOGIA**

- Salas de clases, talleres, ensayos, etc.
- Laboratorios
- Oficinas
- Baños
- Bodegas y salas de servicio
- Kitchenette

VERONIA

**PROYECTO EDIFICIO  
INSTITUTO DE MUSICA**

**ANEXO B – PLANTA SUPERFICIES**

PROYECTO INFORMATIVO – CASO PRACTICO	LAMINA
MEMORIA DE TITULO	N° 1 DE 4

CALLE O PASADJE : AV. ALCALDE JUAN LUIS TREJO  
 N° MUNICIPAL : S/N  
 ROL AVALUO : 257-03  
 LOTE O POBLACION : LOTE 1-C  
 COMUNA : VINA DEL MAR



PRIMAS	
Alberto Dimer Turner 1924-199-1	
	ELABORACION PROPIA

PLANTA SUPERFICIES PISO 1°  
SUPERFICIE TOTAL: 530,70 M2

PLANTA SUPERFICIES PISO -1°  
SUPERFICIE TOTAL: 656,20 M2

**SIMBOLOGIA**

Salas de clases, talleres, ensayos, etc.

Laboratorios

Oficinas

Baños

Botegas y salas de servicio

Kitchenette



VISION:



**PROYECTO EDIFICIO  
INSTITUTO DE MUSICA**

**ANEXO B – PLANTA SUPERFICIES**

PROYECTO INFORMATIVO – CASO PRACTICO LAMINA N° 2 DE 4  
 MEMORIA DE TITULO  
 CALLE O PASAJE : AV. ALCALDE JUAN LUIS TREJO  
 N° MUNICIPAL : S/N  
 ROL AVALUO : 257-03  
 LOTE O POBLACION : LOTE 1-C  
 COMUNA : VIÑA DEL MAR



FIRMAS	
Alberto Dibner Turner R-664.689-1	
	ELABORACION PROPIA



PLANTA SUPERFICIES PISO 2°  
 SUPERFICIE TOTAL: 387,90 M2

PLANTA SUPERFICIES PISO 3°  
 SUPERFICIE TOTAL: 385,30 M2



PLANTA SUPERFICIES PISO 4°  
SUPERFICIE TOTAL: 331,00 M2

PLANTA SUPERFICIES PISO 5°  
SUPERFICIE TOTAL: 36,00 M2

**SIMBOLOGIA**

Salas de clases, talleres, ensayos, etc.



Laboratorios

Oficinas

Baños

Bodegas y salas de servicio

Kitchenette

	
<b>PROYECTO EDIFICIO</b> <b>INSTITUTO DE MUSICA</b>	
<b>ANEXO B – PLANTA SUPERFICIES</b>	
PROYECTO INFORMATIVO – CASO PRACTICO	LAMINA
MEMORIA DE TITULO	N° 3 DE 4
CALLE O PASAJE : AV. ALCALDE JUAN LUIS TREJO N° MUNICIPAL : S/N ROL AVALUO : 257-03 LOTE O POBLACION : LOTE 1-C COMUNA : VINA DEL MAR	
	
UBICACION	
FIRMA	
Alberto Dibner Turner R.C. 489-1	
ELABORACION PROPIA	

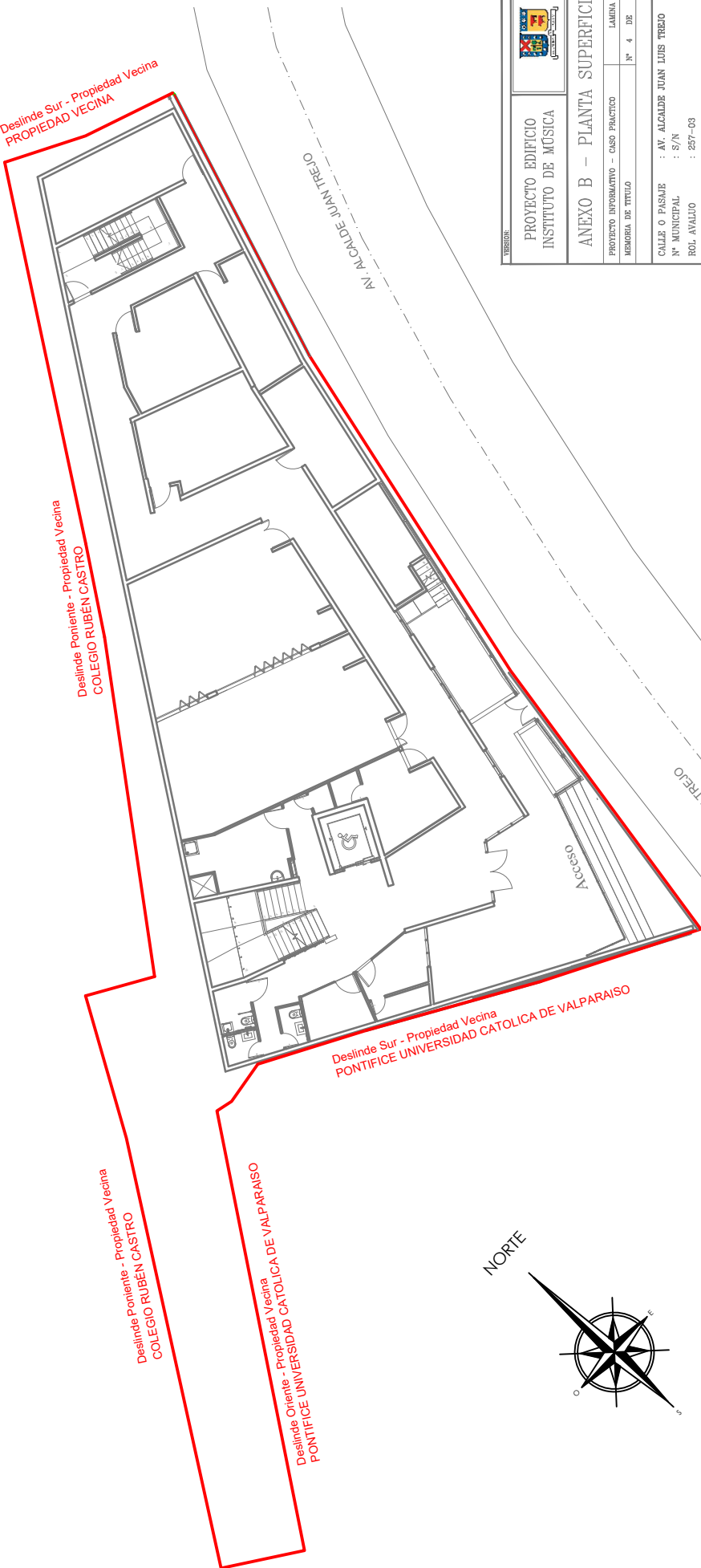
Deslinda Sur - Propiedad Vecina  
PROPIEDAD VECINA

Deslinda Poniente - Propiedad Vecina  
COLEGIO RUBÉN CASTRO

Deslinda Poniente - Propiedad Vecina  
COLEGIO RUBÉN CASTRO

Deslinda Oriente - Propiedad Vecina  
PONTIFICE UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO

Deslinda Sur - Propiedad Vecina  
PONTIFICE UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO



VERSION: 

PROYECTO EDIFICIO  
INSTITUTO DE MUSICA

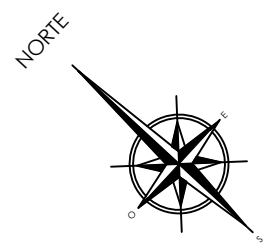
ANEXO B - PLANTA SUPERFICIES

PROYECTO INFORMATIVO - CASO PRACTICO LAMINA N° 4 DE 4  
MEMORIA DE TITULO

CALLE O PASAJE : AV. ALCALDE JUAN LUIS TREJO  
N° MUNICIPAL : S/N  
ROL AVALUO : 257-03  
LOTEO O POBLACION : LOTE 1-C  
COMUNA : VIÑA DEL MAR

UBICACION 

FIRMA	
Alberto Dibner Turner R.664.489-1	ELABORACIÓN PROPIA



## Anexo D – Planta de Tratamiento Bioplastic

Actualmente existen en el mercado de tratamiento de aguas servidas varias tecnologías y empresas que se dedican al diseño y construcción de sistemas para la disposición y tratamiento de estas aguas contaminadas. Una de las soluciones más sencillas y económicas al momento de tratar las aguas residuales domiciliarias de forma particular es la implementación de una planta de tratamiento prefabricada, también llamadas paquetes o plantas compactas. De acuerdo con las características del proyecto al que se necesite conectar el paquete, se escoge la planta de tratamiento que mejor se adapte y cumpla con las condiciones y requerimientos del tratamiento.

Estas plantas de tratamiento funcionan en torno a una serie de procesos físicos, químicos y biológicos capaces de degradar la materia orgánica presente en las aguas servidas. Por lo general constan de un decantador primario, para sedimentar los sólidos de mayor tamaño, un reactor biológico de lodos activados, que funciona mediante bacterias aeróbicas, un clarificador, que disminuye la turbidez del agua y finalmente algún proceso de desinfección. En algunos casos a estas plantas compactas se les deben agregar procesos adicionales para su correcto funcionamiento. De ser necesario antes del tratamiento se deben incorporar cámaras desgrasadoras o cámaras cortadoras de jabones. Además, estos paquetes no incorporan el almacenamiento y disposición de las aguas tratadas.

Cuando se trata del tratamiento de aguas servidas de forma particular, las plantas de tratamiento prefabricado se consideran como una de las mejores alternativas disponibles. Consisten en sistemas relativamente sencillos de instalar, operar y mantener, además de estar entre las alternativas más económicas. Sin embargo, el atractivo de estos sistemas es su formato compacto y eficiente, por lo tanto, cuando se piensa tratar mayores caudales o volúmenes de aguas servidas esta alternativa ya no es viable.

Para el caso práctico estudiando en este trabajo, el edificio “Instituto de Música” de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), se propone instalar una planta compacta para el tratamiento de las aguas grises. Se recurre a la empresa *Bioplastic*, empresa dedicada a la fabricación y comercialización de productos de polietileno, y a su serie de plantas de tratamiento RTB. Específicamente para el edificio “Instituto de Música” se selecciona la planta RTB 24 de 9.300 [L] que está diseñada para un caudal de 3,50 [m<sup>3</sup>/día], cumpliendo así con el caudal medio diario del edificio de 3,46 [m<sup>3</sup>/día].



Figura 1: Planta de tratamiento de aguas servidas de Bioplastic - Modelo RTB 24.

El paquete lo conforma la planta de tratamiento en sí, compuesta por el decantador primario, aireación y clarificación, y el módulo de desinfección, compuesto por una cámara cloradora y decloradora.

En la planta de tratamiento se distinguen tres etapas principales:

1. Sedimentador primario: Se reducen los sólidos suspendidos a través de procesos de sedimentación, es decir, bajo la acción de la gravedad. Parte de los sólidos, que están constituidos por materia orgánica, quedan en el sedimentador y son digeridos por bacterias anaeróbicas.
2. Reactor biológico: El tratamiento biológico elegido para degradar la materia orgánica presente en las aguas servidas se denomina Lodos Activados en modalidad de operación continua. Las aguas entran en contacto con los lodos activados y se inyecta suficiente aire para satisfacer el requerimiento de oxígeno. En esta etapa la materia orgánica es degradada por la acción de bacterias aeróbicas.
3. Clarificación: En esta etapa las aguas servidas se mantienen en calma, sin turbulencias, para que las partículas suspendidas sedimenten y sean retornadas al reactor biológico. El agua clarificada posteriormente pasa a la etapa de desinfección.

El módulo de desinfección lo componen una cámara cloradora seguido de una decloradora:

1. Cloración: En esta cámara se garantiza un tiempo de retención hidráulico de 30 minutos en contacto con pastillas de hipoclorito de calcio para eliminar bacterias y agentes patógenos.
2. Declaración: Posteriormente se elimina el exceso de cloro en el agua mediante la adición de pastillas de bisulfito de sodio.

Como ya se mencionó, esta planta compacta no incluye cámara desgrasadora ni cámara cortadora de jabones, ninguna de las dos es necesaria debido a las características del agua gris del edificio (no hay descarga importante de aceites, grasas ni detergentes al sistema). Para la disposición de las aguas tratadas se instala un estanque de almacenamiento a la salida de la planta de tratamiento.

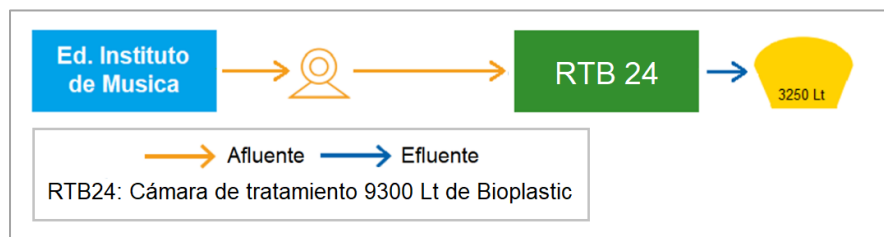


Figura 2: Esquema del sistema de tratamiento con planta de tratamiento para el Instituto de Música PUCV.

Esta línea de plantas de tratamiento esta certificada, es decir, el efluente entregado cumple con el DS 90/2001, puntualmente la tabla 1: Límites máximos permitidos para descarga de residuos líquidos a cuerpos de aguas fluviales sin capacidad de dilución del cuerpo receptor. Además, estará en condiciones de ser usado para riego cumpliendo la normativa vigente, correspondiente a la NCh 1333/78 que indica los requisitos de calidad del agua para diferentes usos.

Valores de salida (posterior a la desinfección):

Parámetro	Magnitud	Unidad
Ph	6 - 8,5	Adimensional
DBO <sub>5</sub>	<35	mg/L
SST	<40	mg/L
Coliformes Fecales	<1.000	NMP/100mL

Figura 3: Características del efluente de la planta prefabricada RTB 24.



En la tabla 1 se presenta el presupuesto detallado de los costos de inversión necesarios para llevar a cabo la propuesta de instalar la planta de tratamiento RTB 24. El presupuesto contempla la instalación de la planta de tratamiento, la construcción de las obras civiles requeridas y el sistema de almacenamiento de las aguas tratadas. El total neto del presupuesto alcanza los \$ 6.847.501 considerando materiales, maquinaria para las excavaciones y movimiento de tierra por 16 horas maquina y la mano de obra necesaria por 10 días de trabajo.

Tabla 1: Presupuesto del sistema con planta de tratamiento prefabricada para el Instituto de Música PUCV.

Ítem	Unidad	Cantidad	PU	Total
<b>Excavación y Movimiento Tierra</b>				
Excavación	H/Maq	8,00	20.000	160.000
<b>Tuberías y Fittings</b>				
PVC Sanitario				
PVC Sanitario 110 mm	ML	3,00	2.017	6.050
Fittings y Otros	GL	1,00	7.000	7.000
<b>Cámaras y Estanques</b>				
Estanques Acumulación				
Estanque Acumulación 3250 Lt	UN	1,00	521.662	521.662
Hormigón Emplantillado	M3	0,78	64.500	50.442
Cámara Disipadora de energía				
Emplantillado Cámara Disipadora	M3	0,11	64.500	6.912
Hormigón Cámara Disipadora	M3	0,40	79.800	31.601
Tapa Cámara 60x60 cm	UN	1,00	9.151	9.151
<b>Planta de Tratamiento</b>				
Planta de Tratamiento 9300 Lt RTB24 Bioplastic	UN	1,00	2.719.387	2.719.387
Hormigón Emplantillado	M3	1,15	64.500	74.175
<b>Mano de Obra</b>				
Albañil	DIA	10,00	29.545	295.455
Jornal (x3)	DIA	10,00	20.455	613.636
<b>Subtotal</b>				<b>4.495.471</b>
Utilidades			10,00%	449.547
Gastos Generales			18,00%	809.185
Total Neto				5.754.203
IVA			19,00%	1.093.298
<b>Total Presupuesto</b>				<b>6.847.501</b>