SISTEMA EXPERIMENTAL DE HUMEDAL CONSTRUIDO DE TIPO VERTICAL ALIMENTADO POR PULSOS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS DE LAVADO – CERVECERÍA ATRAPANIEBLA – PROYECTO CORFO 24BP-273014E

INFORME 2: DEFINICIÓN DEL DISEÑO

ELABORADO POR

ISMAEL LEONARDO VERA PUERTO

GIANFRANCO MORIS

IGNACIO RODRÍGUEZ

VALERIA BRIONES

CLAUDIO VASQUEZ

CORFO BIENES PÚBLICOS

DICIEMBRE 2025

1. Introducción

Los humedales construidos (HC) son sistemas de ingeniería diseñados y construidos para embalsar el agua bajo diferentes condiciones operativas, aprovechando así los procesos naturales que involucran vegetación, suelos y bacterias, para tratar diferentes tipos de residuos líquidos (Vymazal, 2007). De acuerdo a la dirección de flujo y a la posición del nivel de agua, los humedales construidos se clasifican en los tres tipos que se conocen principalmente: a) flujo horizontal superficial (FS), b) flujo horizontal subsuperficial (FH), y c) flujo vertical subsuperficial (FV) (Fonder y Headly, 2013). La Figura 1 presenta los tres tipos de HC descritos y sus componentes principales. Esta tecnología de tratamiento ha mostrado un crecimiento importante a nivel mundial a partir de la década del 90. Por tanto, los HC representan una variante interesante de explorar para países en vías de desarrollo en el manejo de diferentes residuos líquidos (Zurita et al., 2011).

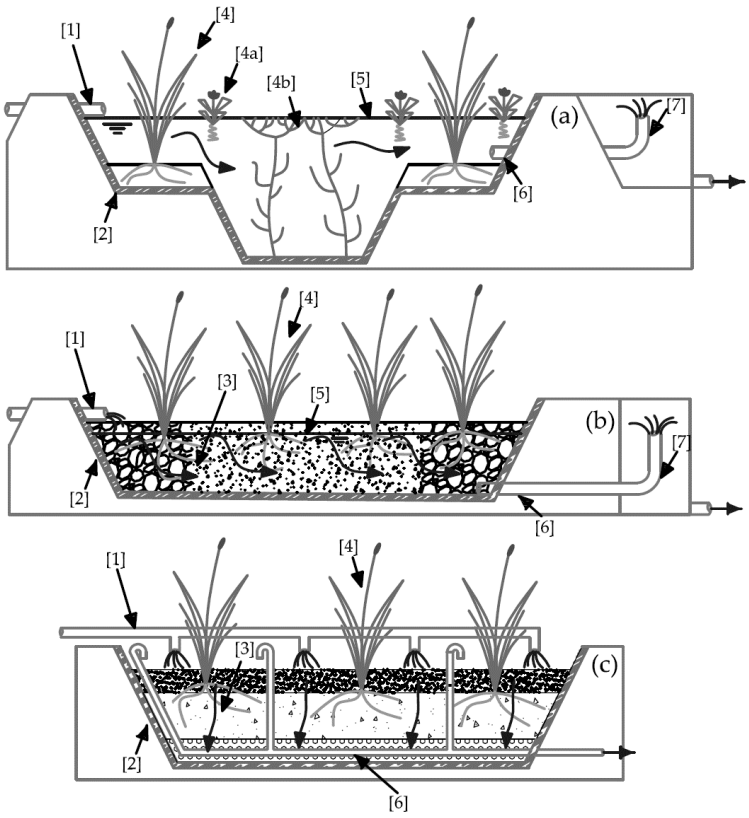


Figura 1. Tipos de HC y componentes. (a) HC de flujo horizontal superficial (FS); (b) HC de flujo horizontal subsuperficial (FH); (c) HC de flujo vertical (FV). [1] Tubería influente, [2] Impermeabilización, [3] Medio de soporte, [4] Vegetación emergente, [4a] Vegetación flotante, [4b] Vegetación sumergida, [5] Nivel de agua, [6] Tubería de recolección, [7] Estructura de drenaje para mantenimiento de nivel de agua. Tomado de: Vera et al. (2016).

Tomando en cuenta lo anterior, y especialmente, considerando que los humedales construidos son una Solución basada en la naturaleza (SBN), que presenta una fácil operación, una integración con el paisaje circundante, y que es capaz de procesar materia

orgánica, sólidos y nutrientes, cuando tratan residuos líquidos de diferentes industrias (Dotro et al., 2017), esta memoria busca presentar el diseño para la implementación de una planta experimental basada en un humedal construido de tipo vertical para el tratamiento de las aguas de lavado de los procesos de elaboración de cerveza en la Cervecería artesanal Atrapaniebla, localizada en el sector de Peñablanca de la Región de Coquimbo.

2. Condiciones base para el diseño

La definición del área necesaria para el tratamiento de los residuos líquidos del lavado de la Cervecería Atrapaniebla, mediante un HC-FV alimentado por pulsos y sin saturación del fondo, se hizo tomando en cuenta las características de cantidad de agua establecidas a partir la experiencia comentada por parte de su propietario en terreno del miércoles 26 de marzo del año en curso. En la visita se estableció un caudal a tratar de aproximadamente 1600 L/d. Sin embargo, considerando una potencial expansión futura, el sistema será diseñado para 2000 L/d. Además, se consideró el reporte de calidad del agua resumido en la Tabla 1. Las muestras de agua fueron tomadas del tanque almacenador existente que poseía la cervecería. Tomando en cuenta el reporte de la Tabla 1, los cálculos de materia orgánica se realizaron con un valor de 200 mg/L de DQO afluentes al sistema de HC-FV, y considerándolo como un valor efluente a un proceso de decantación. Además, se diseña para un valor de NTK de 50 mg/L.

Tabla 1. Reporte de calidad del agua considerando el agua de lavado

RESULTADOS:

Parámetro	Resultado	Unidades
pH	7,23	-
Conductividad	2017	uS/cm
Oxígeno Disuelto	7,33	mg O/cm
Turbidez	11,2	NTU
Fósforo total	0,44	mg P/L
Nitrógeno total Kjeldahl	40,9	mg NKT/L
Demanda Química de oxígeno (DQO)	170	
Sólidos suspendidos totales	43	mg/L
Nitrógeno Amoniacal	0,05	mg NH_4^+
Sulfatos	87,6	mg SO_4^{-2}/L
Boro	0,24	mg B/L
Surfactantes Aniónicos (SAAM)	26,4	mg SAAM/L

3. Diseño del sistema

3.1 Definición de las necesidades de oxígeno y área para el Humedal Construido

El diseño de un HC-FV alimentado por pulsos sin saturación del fondo, está basado en la igualación entre el cálculo de la demanda teórica de oxígeno y la capacidad de oxigenación del sistema (Arias, 2016). Una alternativa de cálculo es el modelo propuesto por Platzer (1999). Este modelo se basa en calcular la demanda de oxígeno para efectuar los procesos aerobios (oxidación de la DQO y nitrificación). El criterio de diseño consiste en que el aporte de oxígeno (OI) debe ser mayor que la demanda de oxígeno (OD) (Dotro et al., 2017):

$$OI[g/d] - OD[g/d] > 0 \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

$$OD[g/d] = OD_{DQO} + OD_{Nitrificación} - OD_{Desnitrificación} \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

$$OI[g/d] = OI_{Difusión} + OI_{Convección} \qquad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

OI = aporte total de oxígeno, g/d

OD = demanda total de oxígeno, g/d

OD_{DQO} = demanda de oxígeno debido a la descomposición de la materia orgánica, g/d

$OD_{Nitrificación}$ = demanda de oxígeno debido a la nitrificación, g/d

$OD_{Denitrificación}$= reducción de la demanda de oxígeno por efecto de desnitrificación parcial, g/d

$OI_{Difusión}$ = aporte de oxígeno debido de la difusión, g/d

$OI_{Convección}$ = aporte de oxígeno debido a la convección, g/d

De acuerdo con Platzer (1999), la demanda de oxígeno en un HC-FV debido a la descomposición de material orgánico se calcula con 0,7 gO_2/g DQO y una eliminación promedio del 85% para DQO. La demanda de oxígeno por nitrificación se calcula con 4,3 gO_2/g nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) y el oxígeno recuperado por el proceso de desnitrificación es de 2,9 g O_2/g NTK. Si se asume una nitrificación completa y cerca del 10% de desnitrificación en humedales de FV, la demanda de oxígeno se puede calcular como se muestra a continuación (Dotro et al., 2017):

$$OD_{DQO} = 0{,}85 \times 0{,}7 \ \frac{g\ O_2}{gDQO} \times DQO\ _{IN}$$ (Ecuación 4)

$$OD_{Nitrificación} = 4{,}3 \ \frac{g\ O_2}{g\ TKN} \times NTK_{IN}$$ (Ecuación 5)

$$OD_{Desnitrificación} = 0{,}1 \times 2{,}9 \ \frac{g\ O_2}{g\ NTK} \times NTK_{IN}$$ (Ecuación 6)

Donde:

OD_{DQO}= demanda de oxígeno debido a la descomposición de la materia orgánica, g/d

$OD_{Nitrificación}$= demanda de oxígeno debido a la nitrificación, g/d

$OD_{Desnitrificación}$= reducción de la demanda de oxígeno por desnitrificación parcial, g/d

$DQO\ _{IN}$ = carga de DQO en el afluente, g/d

NTK_{IN}= carga de NTK en el afluente, g/d

El aporte de oxígeno por difusión está calculado a razón de 1 g O_2/h·m². El tiempo de saturación, después de cada descarga de agua debe ser descontado del tiempo entre descargas. Platzer (1999) afirma que el aporte de oxígeno por difusión no se presenta antes de un tiempo de 1,5 h posterior a cada descarga. El aporte de oxígeno por difusión se puede calcular como se muestra a continuación:

$$OI_{Difusión} = 1\left[\frac{g\ O_2}{h \times m^2}\right] \times A[m^2] \times \frac{24[h] - 1{,}5[h] \times n_{cargas}}{1[d]}$$ (Ecuación 7)

Donde:

$OI_{Difusión}$ = aporte de oxígeno por efecto de la difusión, g/d

A = área superficial, m²

n_{cargas} = número de cargas diarias, adimensional

Para calcular el aporte de oxígeno por convección, Platzer (1999) afirma que la convección es proporcional a la carga hidráulica. Como el aire contiene 300 mg O_2/L de oxígeno el aporte se puede calcular como:

$$OI_{Conveción} = 0{,}3\left[\frac{g\ O_2}{L}\right] \times V_{cargado}\left[\frac{m^3}{d}\right] \times 1000\left[\frac{L}{m^3}\right]$$ (Ecuación 8)

Donde:

$OI_{Convección}$= aporte de oxígeno por convección, g/d

$V_{cargado}$ = caudal de agua diario, m³/d

El modelo de diseño, basado en la demanda de oxígeno, se ha usado con frecuencia en América Latina, y a la fecha hay bastante experiencia, lo que demuestra su robustez para el dimensionamiento de este humedal.

Además, en el dimensionamiento se han realizado los siguientes supuestos/verificaciones (Dotro et al., 2016):

a) Aporte – Consumo, > 0

b) Carga orgánica superficial (COS), < 35 gDQO/(m2-d)

c) Carga Hidráulica aplicada, < 200 mm/d

La Tabla 2 presenta un resumen del diseño definido para el HC-FV para tratar las aguas residuales del lavado de los procesos de producción de la cervecería atrapaniebla. En síntesis, el valor de área definido fue de 12 m^2.

Tabla 2. Resumen para diseño del HC de tipo vertical y alimentación por pulsos para aguas de lavado, Cervecería Atrapaniebla.

Cuadro de Diseño - Cerveza Atrapaniebla	
Producción aguas residuales	Valor
Producción media diaria de aguas residuales (L/d)	2000
Concentraciones afluentes	
DQO (mg/L)	250,0
DBO5 (mg/L)	125,00
NTK (mg/L)	50,0
Concentraciones diseño (efluente sedimentación por fosa séptica) – Reducción 20% de DQO y de DBO5	
DQO (mg/L)	200,0
DBO5 (mg/L)	100,0
NTK (mg/L)	50,0
Concentraciones efluentes (esperadas)	
Concentración efluente - DBO5 (mg/L)	< 35
Cargas Totales Aplicadas	
DQO (g/d))	400
DBO5 (g/d)	200
NTK (g/d)	100
Diseño por Consumo de Oxígeno (Modelo Platzer)	
Consumo de oxígeno	
Consumo oxígeno DQO (g/d)	238
Consumo oxígeno NTK (g/d)	430
Consumo oxígeno Total (g/d)	668
Aporte de oxígeno	
Aporte oxígeno por convección (g/d)	600
Área Requerida (m2)	12
Numero Cargas (n)	8
Aporte oxígeno por difusión (g/d)	144
Aporte total de oxígeno (g/d)	744
Verificaciones	
Aporte-Consumo (g/d)	79
Carga hidráulica calculada (mm/d)	167
COS (gDQO/(m2-d))	33,20
CN (gNTK/(m2-d))	8,30

3.2 Análisis de cumplimiento normativo

La Tabla 3 resume varios requerimientos hoy día para Chile: la Guía SAG (SAG, 2010), la NCh3456 (INN, 2022), norma para reutilización en riego, y el DS 90 (BCN, 2000), que establece la descarga a cuerpos hídricos superficiales. Con las calidades solicitadas para DQO y NTK, actualmente se cumple la norma SAG. Esto porque los valores de DBO_5 que señala dicha norma, son de 600 mg/L, y ya la DQO es de sólo 170 mg/L, por lo que, para el caso que la DBO5 considerando una relación DBO_5/DQO de 0,5, sería de alrededor de 85 mg/L, valor bastante inferior a lo solicitado por dicha normativa. Sin embargo, el cumplimiento de la NCh3456 y del DS90, se lograría con la implementación del HC-FV, considerando una eficiencia de eliminación del 80% (Dotro et al., 2017), por lo que, los valores de DQO efluente deberían ser inferiores a 34 mg/L, y por ende, considerando que es un RIL (Residuo Industrial Líquido) principalmente biológico, se puede establecer una relación DBO_5/DQO de alrededor de 0,5, con lo que la DBO_5 debería ser inferior a 20 mg/L.

Tabla 3. Valores máximos recomendados en la guía del SAG y NCh3456

Parámetro	**Valor máx recomendado** **Guía SAG**	**NCh3456 (Categoría D – Agua regenerada de mediana calidad)**	**DS90 – Tabla 1**
DBO_5 (mg/l)	600	35	35
Fenoles (mg/l)	41	-	0,5
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	80	80	80
pH	6-9	-	6,0 – 8,5
Temperatura °c	35	-	35
Conductividad Eléctrica (us/cm)	≤ 750*	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (mg N/L)	-	-	50

3.4 Descripción de elementos del sistema experimental

El modelo experimental estará compuesto de tres partes: a) alimentación, b) tratamiento y c) medición y entrega de efluente para uso posterior.

a) Alimentación. Se realizará mediante tubería PVC de 110 mm enterrada desde la cámara final de las aguas de lavado localizada dentro de la instalación de cervecería atrapaniebla y hasta la fosa séptica inicial establecida para decantar los sólidos y punto de partida de la planta de tratamiento.

b) Tratamiento. Cuando el agua llega a la planta de tratamiento, lo hace a un estanque sedimentador vertical de 3400 L. El objetivo de esta fosa séptica es eliminar sólidos gruesos. Posterior a esto, el agua a tratar se llevará a un tanque de 300 L que actuará como sifón hidráulico para la alimentación del humedal por pulsos. Posterior a ello, el agua se traslada al tratamiento principal que se realizará en un HC-FV. El sistema de HC-FV presenta una altura total de 1,20 m dividida así (arriba hacia abajo): 0,20 m de borde libre y 1,00 m de cama de humedal. La cama del humedal es dividida en tres capas (arriba hacia abajo): a) alimentación de 0,20 m, compuesta por gravilla de 19 mm y una capa superficial de cuarzo, b) medio principal de 0,6 m, compuesto por una mezla de arena gruesa y cuarzo, habiendose introducido el cuarzo para mejorar la granulometria y permeabilidad de la capa, y c) drenaje de 0,20 m, compuesto por gravilla de 19 mm. La alimentación se realizará mediante una red abierta de distribución en tubería PVC de 50 mm presurizada conectada al sifón hidráulico de 300 L. Esta se instalará en la parte superior con profundidad de 0,5 m desde la superficie de gravilla. Posteriormente, el agua drenará de forma libre por 0,1 m hasta encontrar el medio principal y la capa de drenaje. El sistema de drenaje estará compuesto por una red abierta de tubería de PVC de 75 mm instalada a 0,1 m desde el fondo del humedal con una pendiente del 1%.

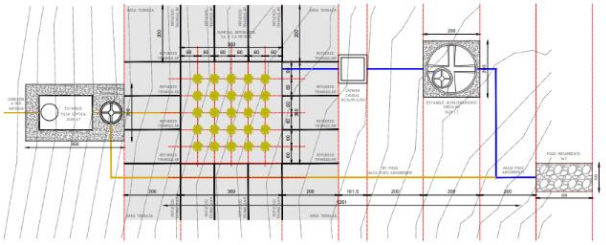
Cómo especie de planta se propone el uso de una combinación de especies compuesta por *Thypa spp. Equisetum spp. Cyperu spp.* Se propone una distribución de 2,2 individuos/m^2. Los individuos fueron comprados en viveros cercanos y replantados en la celda de humedal. En total se plantaron 26 individuos.

c) Medición final, almacenamiento y entrega final. El efluente del HC-FV será recogido en una cámara efluente sin regulación de nivel. En esta misma cámara se aforará el caudal efluente empleando un vertedero de pared delgada construido con lámina de acero y donde se instalará un sensor de nivel para medición del caudal. Las dimensiones interiores de esta cámara serán 1,0 m x 1,0 m x 0,8 m (Largo x Ancho x Alto) construida en concreto reforzado (paredes de 0,1 m) e impermeabilizada en su interior. Finalmente y posterior a la cámara aforadora, se instalará un tanque de 2,5 m3 de tipo vertical prefabricado en HDPE, que servirá como pozo de almacenamiento para evacuar mediante bombeo, el agua para para un uso posterior, pero con la posibilidad de recircular al tanque de 300 L que actúa como sifón hidráulico. La recirculación se deja como alternativa para mejorar la calidad del agua en caso de ser necesario, recomendado esta recirculación a realizarse solo en las tardes, momento en que no se producen aguas de lavado.

En el anexo 1 se entregan los detalles de los planos elaborados para la instalación del sistema experimental.



ESQUEMA DE EMPLAZAMIENTO SOBRE IMÁGEN SATELITAL
S/E

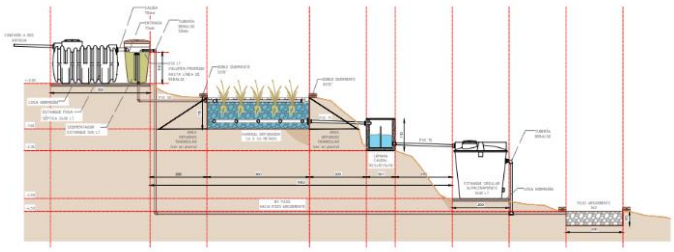


PLANTA GENERAL SISTEMA HDR
ESCALA 1/50

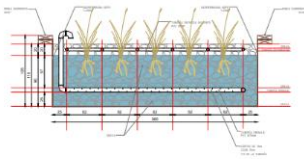


UBICACIÓN
S/ESCALA

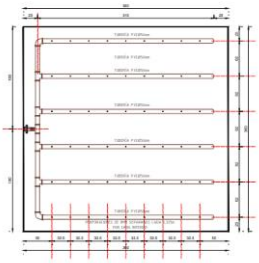
CEAZA
CENTRO DE ESTUDIOS AVANZADOS EN ZONAS ÁRIDAS
HDR CERVECERÍA ATRAPAMIELA
GUAMFRANCO MORIS
KARINA RODRÍGUEZ O.
EMPLAZAMIENTO PLANTA GENERAL UBICACIÓN
INDICADAS
JULIO 2025
A 01



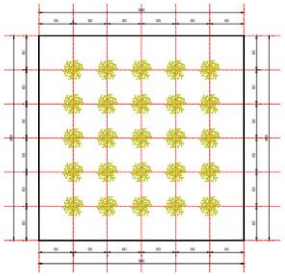
ESQUEMA TRANSVERSAL INSTALACIÓN HUMEDAL DEPURADOR
ESCALA 1/50



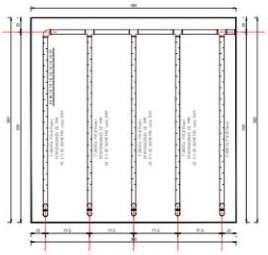
CORTE LONGITUDINAL HUMEDAL DEPURADOR
ESCALA 1/25



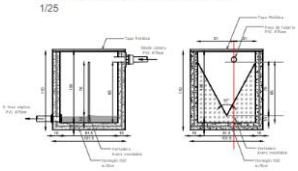
VISTA SUPERIOR TUBERÍAS
DISTRIBUCIÓN HUMEDAL DEPURADOR
1/25



VISTA SUPERIOR
PLANTACIÓN HUMEDAL DEPURADOR
1/25



VISTA SUPERIOR TUBERÍA
DRENAJE HUMEDAL DEPURADOR
ESCALA 1/25



DETALLE CÁMARA DE CAUDAL
ESCALA 1/20

CEAZA
CENTRO DE ESTUDIOS AVANZADOS EN ZONAS ÁRIDAS
HDR CERVECERÍA ATRAPAMIELA
GUAMFRANCO MORIS
KARINA RODRÍGUEZ O.
ESQUEMA TRANSVERSAL CORTE Y DETALLES
INDICADAS
JULIO 2025
A 02

Referencias

Arias C. (2016). Memorias de Curso de Verano “Humedales construidos para el control de la contaminación acuática”. Organizado por Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción. Concepción (Chile), 5-15 de enero.

Biblioteca del Congreso Nacional (BCN). Decreto Supremo 90 de 2000. Establece Norma de Emisión Para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales; Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: Valparaíso, Chile, 2000. https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=182637

Dotro, G., Langergraber, O., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., Von Sperling, M. (Carlos Arias e Ismael L. Vera-Puerto Editores versión castellana) (2017). Humedales para tratamiento. IWA Publishing. Londres, Inglaterra. eISBN 9781789062526.

Fonder, N., Headly, T. (2013). The taxonomy of treatment wetlands: A proposed classification and nomenclature system. Ecological Engineering, 51, 203-211.

Instituto Nacional de Normalización (INN). Norma Chilena (NCh) 3456 Directrices Para el uso de Aguas Residuales Tratadas en Proyectos de Riego. Partes 1, 2, 3 y 4 (Versiones Comité); Instituto Nacional de Normalización: Santiago de Chile, Chile, 2021. https://www.inn.cl/ (accessed on 5 July 2021). (In Spanish)

Platzer, C. (1999). Design recommendations for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification. Water Sci. Technol. 40, 257–263.

Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), Ministerio de Agricultura, Chile. (2010). Guía de evaluación ambiental. Aplicación de efluentes al suelo. Extraido de: https://www.sag.cl/sites/default/files/G-PR-GA-001%20v2.pdf. Consultado: 20 septiembre 2023.

Vera, I., Jorquera, C., López, D., Vidal, G. (2016). Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: reflexiones. Tecnología y Ciencias del Agua 7, 19–35.

Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. Science of the Total Environment, 380, 48-65.

Zurita, F., Belmont, M., De Anda, J., White, J. (2011). Seeking a way to promote the use of constructed wetlands for domestic wastewater treatment in developing countries. Water Science and Technology 63, 654–659.