SISTEMA EXPERIMENTAL DE HUMEDAL CONSTRUIDO DE TIPO VERTICAL CON AIREACIÓN MECÁNICA PARA TRATAMIENTO DE AGUAS DE LAVADO – FUNDO LOS NICHOS – PROYECTO CORFO 24BP-273014E

INFORME 1: DEFINICIÓN DEL DISEÑO

ELABORADO POR

ISMAEL LEONARDO VERA PUERTO

GIANFRANCO MORIS

IGNACIO RODRÍGUEZ

VALERIA BRIONES

CLAUDIO VASQUEZ

CEAZA

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 (FHS), b) flujo horizontal subsuperficial (FHSS), y c) flujo vertical subsuperficial (FVS) (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).

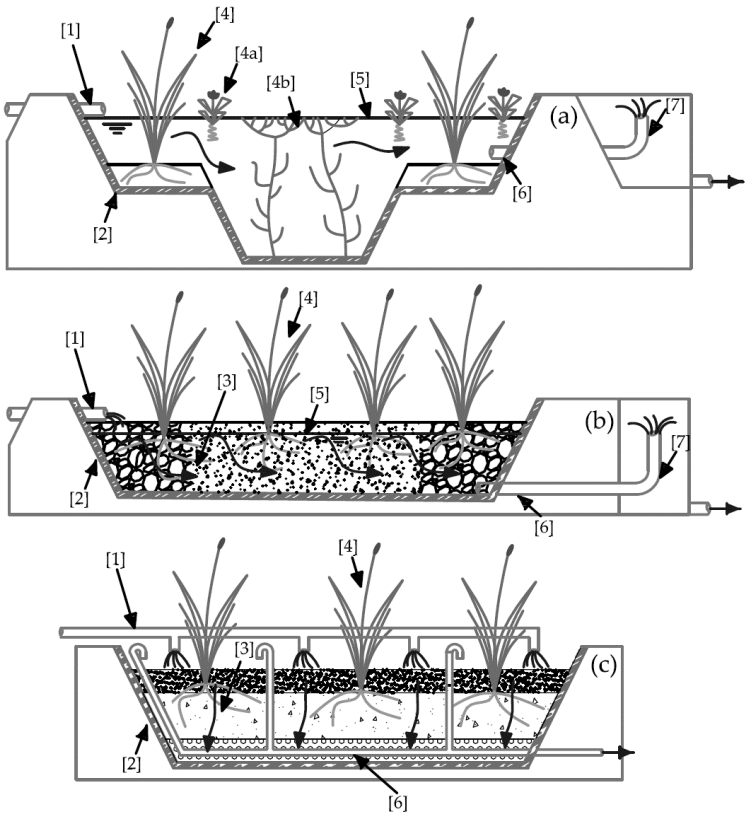


Figura 1. Tipos de HC y componentes. (a) HC de flujo horizontal superficial (FS); (b) HC de flujo horizontal subsuperficial (FH); (c) HC de flujo vertical (FV). [1] Tubería influente, [2] Impermeabilización, [3] Medio de soporte, [4] Vegetación emergente, [4a] Vegetación flotante, [4b] Vegetación sumergida,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

Aunque la tecnología de humedales construidos se utiliza como una solución basada en la naturaleza (SBN), en los últimos años se han propuesto una serie de modificaciones a los modelos básicos, que buscan “intensificar” la capacidad depurativa de los diferentes tipos de humedales construidos, con el fin de tener una tecnología que: a) reduzca el uso de área, b) posea una capacidad plena de trabajo en el menor tiempo posible, c) garantice concentraciones efluentes confiables, d) prevenga la aparición de problemas operacionales como el taponamiento (en humedales subsuperficiales), e) sea capaz de eliminar de forma simultánea la mayor cantidad de compuestos y, f) compense las variaciones de caudal en procesos con cambios importantes en el año (Vera, 2018). Entre las intensificaciones propuestas, la aireación mecánica o forzada ha sido introducida con éxito en todo tipo de aplicaciones (incluyendo el manejo de residuos líquidos para la industria láctea), ya que actualmente operan más de 500 sistemas alrededor del mundo para todo tipo de residuos líquidos (Nivala et al., 2020). La aireación del medio de soporte en el humedal consiste en la instalación de dispositivos de aireación mecánica o forzada dentro de la masa líquida, para proveer oxígeno disuelto, que es entregado al sistema mediante sopladores, para de esta forma, modificar las condiciones de oxidación-reducción. La aplicación del aire se ha realizado de forma continua y en ciclos, especialmente en humedales construidos de flujo horizontal y vertical (Vera, 2018). La Figura 2 muestra la configuración típica de un sistema de humedal construido que incluye aireación mecánica.

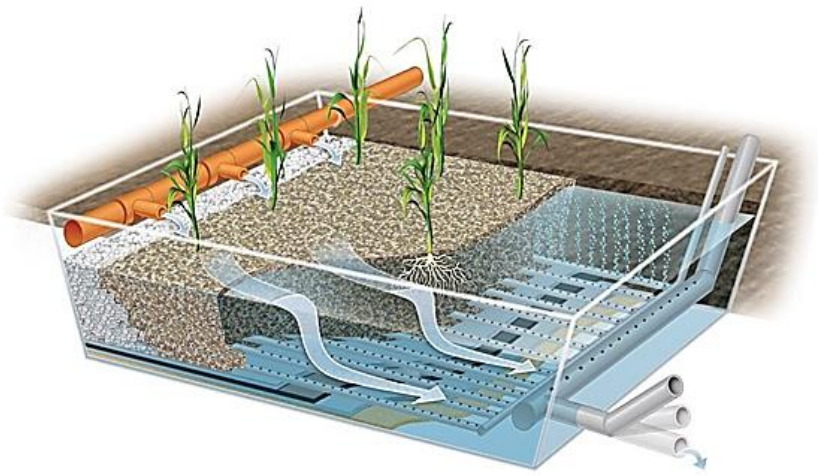


Figura 2. Forced Bed Aeration System (ARM, 2018). Ejemplo de humedal construido de tipo subsuperficial con aireación mecánica.

Tomando en cuenta lo anterior, y especialmente, considerando que los humedales construidos son una 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 con aireación mecánica para tratar las aguas de lavado de la industria del pisco en pequeños productores, a ser construida en Fundo Los Nichos.

2. Condiciones base para el diseño

La definición del área necesaria para el tratamiento de los residuos líquidos del lavado de la Pisquera Los Nichos, se hizo tomando en cuenta las características de cantidad comentadas en terreno los meses de enero y marzo, y resumidas en la Figura 1, junto con el reporte de calidad del agua resumido en la Tabla 1. Es importante señalar, que la muestra de agua se tomó por los operadores de Fundo Los Nichos y corresponde al lavado de los tanques únicamente.

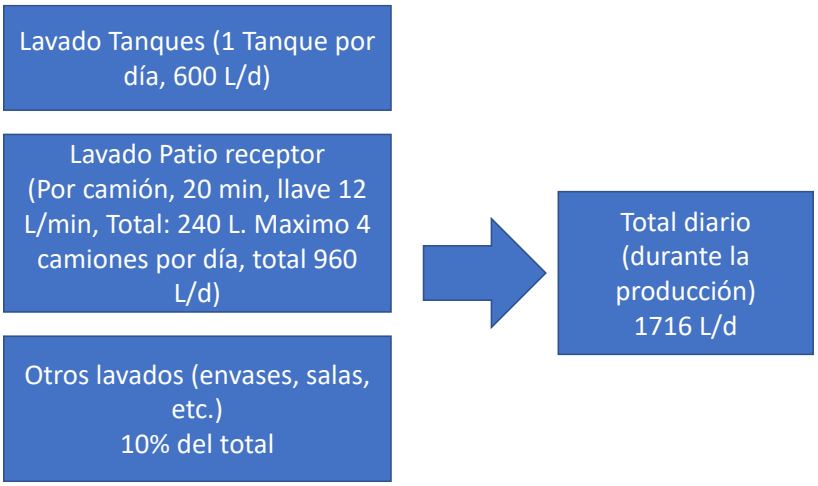


Figura 1. Estimación de aguas de lavado para Pisquera Fundo Los Nichos

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

Parámetro	Resultado	Unidades
pH	4,97	-
Conductividad	725	uS/cm
Oxígeno Disuelto	3,45	mg O/cm
Turbidez	82,5	NTU
Fósforo total	0,24	mg P/L
Nitrógeno total Kjeldahl	609	mg NKT/L
Demanda Química de oxígeno (DQO)	905	
Sólidos suspendidos totales	137	mg/L
Nitrógeno Amoniacal	0,06	mg NH_4^+
Sulfatos	26,9	mg SO_4^{-2}/L
Boro	0,23	mg B/L
Surfactantes Aniónicos (SAAM)	29,4	mg SAAM/L

3. Diseño del sistema

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

La definición de las necesidades o demandas de oxígeno (OD), se hizo con base a lo definido en Dotro et al. (2017). La demanda de oxígeno se estima como la necesaria para la descomposición del material orgánico y la nitrificación. Para la degradación del material orgánico se utiliza un factor de 0,7 gO2/g DQO. De otro lado, para la demanda de oxígeno por nitrificación se utiliza 4,3 gO2/gNTK. No se considera recuperación de oxígeno por denitrificación. Además, se utilizó un factor de eliminación, entendido como la cantidad a remover por el sistema (Por ejemplo, para DQO es común trabajar con 85%, lo mismo que para el NTK). Por tanto, la estimación de las necesidades o demandas de oxígeno se realiza con las ecuaciones 1 y 2:

$$OD_DQO = 0{,}7(g\ O2/gDQO) \times (DQO_IN) \times FE \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

$$OD_Nitrificación = 4{,}3\ (g\ O2/gNTK) \times (NTK_IN) \times FE \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

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

DQO_IN = carga de DQO en el afluente, g/d

NTK_IN= carga de NTK en el afluente, g/d

FE= factor de eliminación, adimensional

Para poder calcular el aporte del nuevo sistema, se emplea la tasa de transferencia mínima posible por un sistema aireado: 150 gO2/m2-d (Van Oirschot et al., 2025). Así, y estimando una eliminación del 85% para ambos parámetros que demandan oxígeno (DQO y NTK), los resultados del diseño se resumen en la Tabla 2. Es importante indicar que, se diseñó el sistema para un caudal de 1000 L/d, ya que la caracterización se corresponde con el agua de lavado de los tanques, que tiene un aporte aproximado de 600 L/d (Figura 1). Otra de las aguas aportante provendría del lavado del patio receptor de los camiones con la Uva, pero se estima que la carga contaminante sería muy inferior a la caracterizada para el lavado de los tanques.

Tabla 2. Resumen para diseño del HC aireado para Destileria Fundo los Nichos.

Características Iniciales		
Característica	Unidad	Valor
Caudal	L/d	1000
DQO	mg/L	905
NTK	mg/L	609
Factor Oxígeno DQO	gO2/gDQO	0,7
Factor Oxígeno NTK	gO2/gNTk	4,3
Eliminaciones estimadas		
DQO	%	85
NTK	%	85
Demanda de Oxigeno		
Necesidades OD-DQO	gO2/d	538,48
Necesidades OD-NTK	gO2/d	2225,90
Total Necesidad OD	gO2/d	2764,37
Aporte de Oxígeno		
Tasa Transferencia OD-HC-FV-Pasivo	gO2/(m2-d)	40
Tasa Transferencia OD-HC-FV-Aireado	gO2/(m2-d)	150
Áreas Estimadas		
Área Pasiva	m2	69,11
Área Aireado	m2	18,43
Área definida	m2	20
Cargas superficiales estimadas		
DQO	g/(m2-d)	45,25
NTK	g/(m2-d)	30,45
Carga Hidráulica	mm/d	50
Calidades de agua esperadas		
DQO	mg/L	135,75
NTK	mg/L	91,35

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 esperadas para DQO y NTK, podría no cumplirse los requerimientos normativos de la NCh3456 y el DS90, pero con certeza se cumpliría la normativa SAG. Esto sería un avance significativo respecto al manejo actual dado a este residuo.

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

3.3 Modificación de pH

Dada la caracterización presentada en la Tabla 1, por los valores de pH (4,9), se necesita hacer una enmienda del mismo. Para esto se realizó el siguiente cálculo considerando la modificación de pH para 1 m3 de agua (1000 L):

pH Inicial considerado= 5,0 $[H+] = 10^{-5}$ mol/L

pH final considerado= 7,0 $[H+] = 10^{-7}$ mol/L

$\Delta H+ = 9,9 \times 10^{-6}$ mol/L

$N (H+) = 9,9 \times 10^{-6}$ mol/L x (1000 L) $= 9,9 \times 10^{-3}$ mol

Se estima que se va a trabajar con bicarbonato de sodio (NaHCO3 = 84 g/mol)

$M = 9,9 \times 10^{-3}$ mol x 84 g/mol

M= 0,831 g

Así, se obtiene que se necesita dosificar 1 L que serían aproximadamente 1000 g de lo solución bicarbonato para neutralizar el 1 m3 de agua tratada.

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.

Alimentación. Se realizará mediante tubería PVC de 110 mm enterrada desde la cámara final de las aguas de lavado localizada aguas debajo de las cubas. De ahí se derivará el RIL hasta la cámara 1 o cámara inicial del sistema experimental propuesto. El agua de lavado será impulsada por gravedad entre la cámara final de lavado y la cámara inicial de tratamiento.

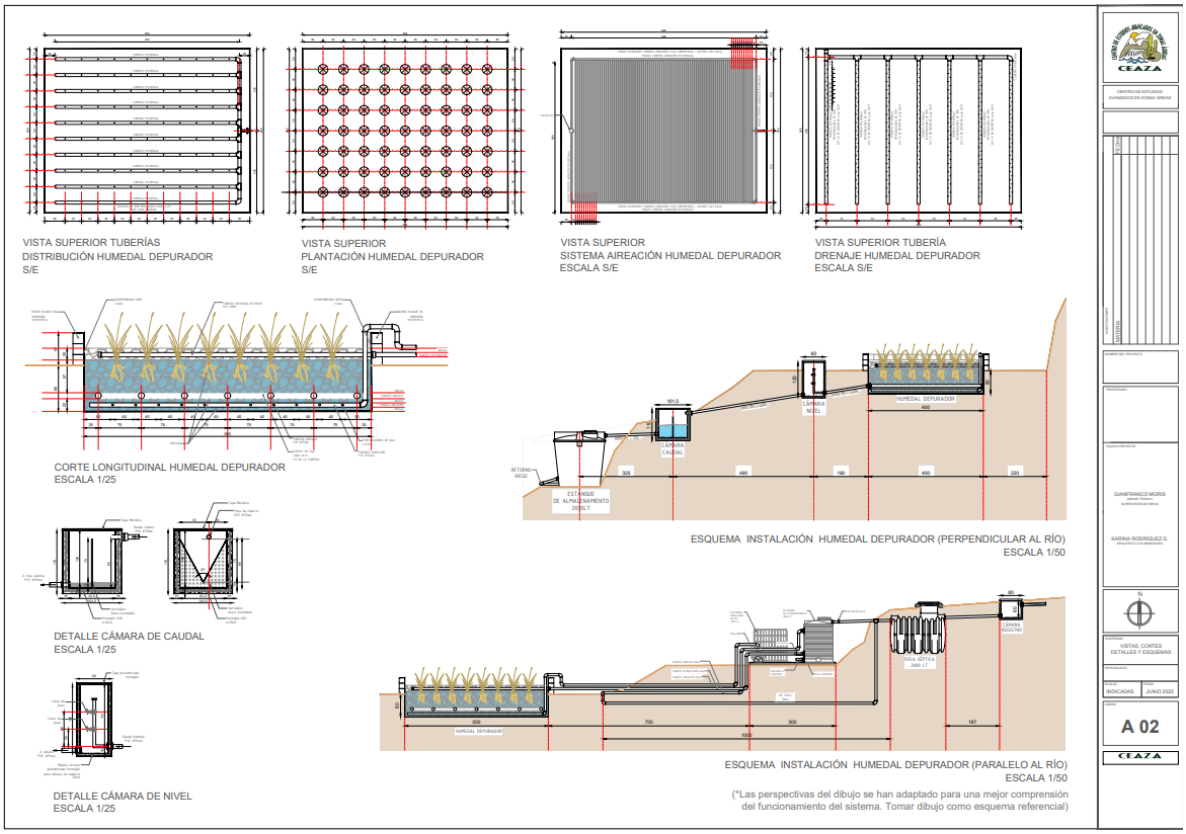
Tratamiento. Posterior a la cámara inicial de tratamiento, el agua de lavado es conducida a una fosa séptica prefabricada de 2.500 L. El objetivo de esta fosa séptica es eliminar sólidos gruesos, especialmente enfocada en el agua de lavado del patio de descarga de la uva. Posterior a esto, el agua a tratar se llevará a un tanque de almacenamiento de 1.000 L. Allí se instalará un medidor de pH conectado a un sistema automático para incrementar el pH. Para esta enmienda, se utiliza una solución madre que se almacena en otro tanque de 1000 L. Del tanque con la solución madre al tanque de almacenamiento para alimentación del humedal, la dosificación se realiza con una bomba dosificadora. Es importante recordar que, del tanque que contiene la solución madre, se traspasan 1 L al tanque de almacenamiento, para hacer una enmienda de pH en 2 unidades. Posterior a ello, el agua se traslada al tratamiento principal que se realizará en un humedal construido de flujo vertical con aireación mecánica (HC-FV-AM). Este sistema presenta una altura total de 1,30 m dividida así (arriba hacia abajo): 0,10 m de borde libre y 1,20 m de medio principal. Cómo medio de soporte principal del HC-FV-AM se utilizará únicamente grava de 12 mm. Provenientes de una planta de áridos de la zona, La alimentación se realizará mediante una red abierta de distribución en tubería PVC de 50 mm presurizada. Esta se instalará en la parte superior con profundidad de 0,1 m desde la superficie de gravilla. Posteriormente, el agua drenará de forma libre por 0,05 m hasta encontrar el nivel de saturación definido en 1,00 m medidos desde el fondo del humedal. El sistema de drenaje estará compuesto por una red abierta de tubería de PVC de 75 mm instalada a 0,01 m desde el fondo del humedal con una pendiente del 1%.

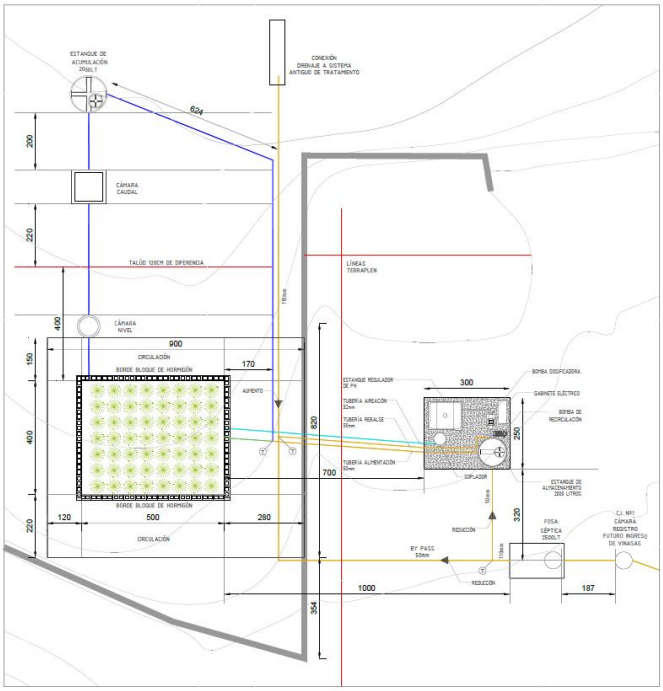
La red de distribución de la aireación mecánica será instalada bajo la tubería de drenaje a 0,05 m medidos desde el fondo. El sistema de distribución consta de un anillo perimetral de tubería de PVC de 32 mm y líneas de aireación cada 0,05 m una de otra a las que se conectan tuberías de HDPE de 16 mm para distribución uniforme del aire. El aire se suministrará al humedal usando un soplador modelo 148200 VORTEX PUMP 1HP con una potencia máxima de 210 mbar y un flujo de 120 m^3/h que será instalado en la caseta de operación contigua al humedal construido.

Cómo especie de planta se propone el uso de *Thypa spp.* en combinación con la especie *Equisetum spp.*. Se propone una distribución de 4/m^2. Los individuos fueron extraídos de humedales naturales cercanos y replantados en la celda de humedal. En total se plantaron 56 individuos de Typha spp. y 24 individuos de *Equisetum spp.*

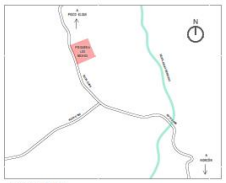
c) Medición y devolución al sistema de tratamiento de riles principal. El efluente del HC-FV-AM será recogido en una cámara reguladora de nivel. Las dimensiones exteriores de esta cámara serán 0,6 m de diámetro interior y 1,2 m de altura construida en concreto reforzado (paredes de 0,1 m) e impermeabilizada en su interior. Posterior a ella, el efluente tratado será enviado a una cámara aforadora de 1 x 0,81 m x 0,85 m (Largo X Ancho X Alto). Esta cámara construida en concreto e impermeabilizada en su interior (paredes de 0,19 m), poseerá un vertedero de pared delgada construido con lámina de acero y donde se instalará un sensor de nivel para medición del caudal. Finalmente, y posterior a la cámara aforadora, se instalará un tanque de 3,4 m3 de tipo vertical prefabricado en HDPE, que servirá como pozo de bombeo para evacuar el agua para su uso posterior y recirculación al humedal.

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

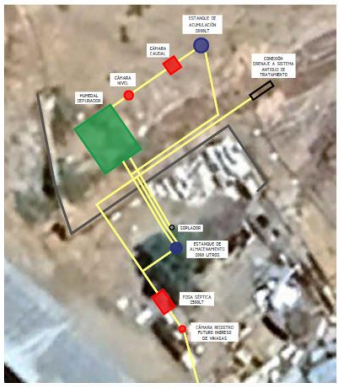




PLANTA DE EMPLAZAMIENTO
ESCALA 1/50



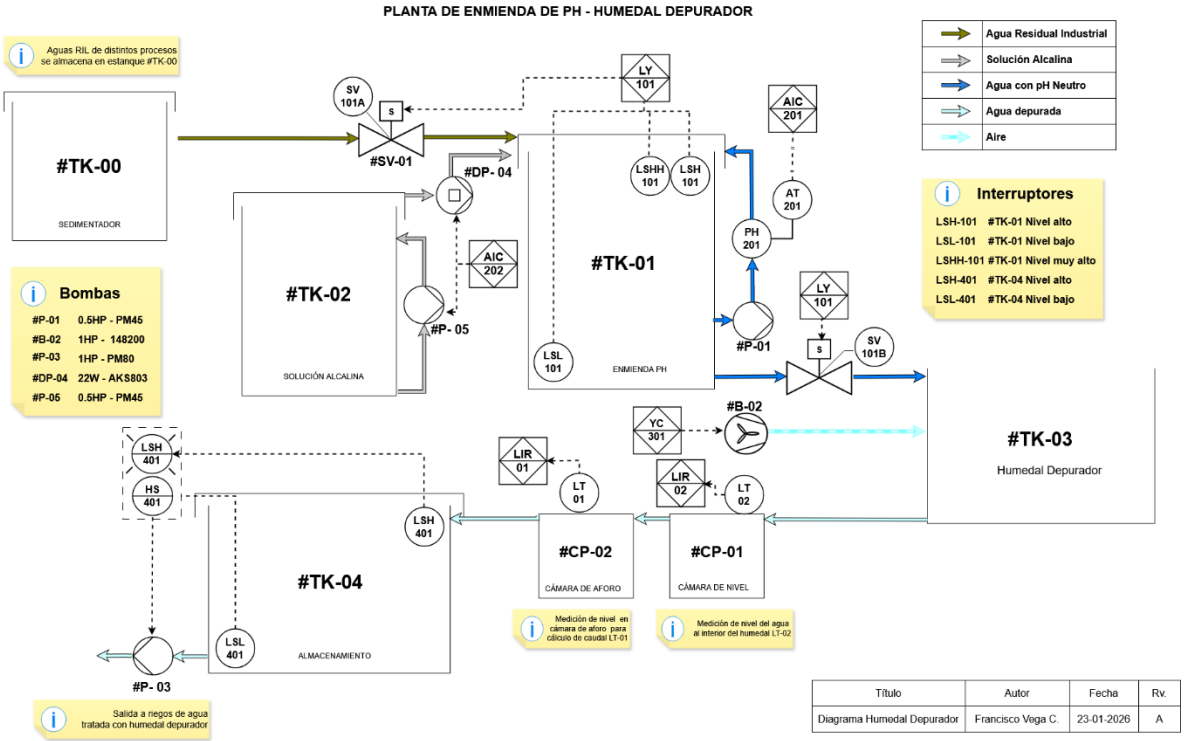
UBICACIÓN
S/E



ESQUEMA DE EMPLAZAMIENTO SOBRE IMÁGEN SATELITAL
S/E

GIANFRANCO MORIS
KARINA RODRÍGUEZ D.
EMPLAZAMIENTO, UBICACIÓN
INDICADAS
JUNIO 2025
A 01

En el anexo 2 se entregan detalles del diseño de operación y automatización de sistema experimental



Referencias

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.

Nivala, J., Murphy, C., Freeman, A. (2020). Recent Advances in the Application, Design, and Operations & Maintenance of Aerated Treatment Wetlands. Water, 12(4), 1188.

Van Oirschot, D., Wallace, S., Freeman, A., Murphy, C., Bresciani, R., Troesch, S., Petitjean, A. (2025). Chapter 22: Emerging development in application, design, and operations & maintenance of aerated treatment wetlands. In: Emerging developments in Constructed Wetlands. Edited by: Kumar, A., Vymazal, J., Zhang, Y., Srivastava, P. Editorial Elsevier, 800 pp.

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.

Vera, I. (2018). Capítulo 7: Estrategias para intensificar los procesos depurativos en los humedales construidos. En: Humedales de tratamiento, Editado por: Alarcón. M-T.; Zurita, F., Lara-Borrero, J.; Vidal, G. Editorial Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Col. 270 pp.

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.