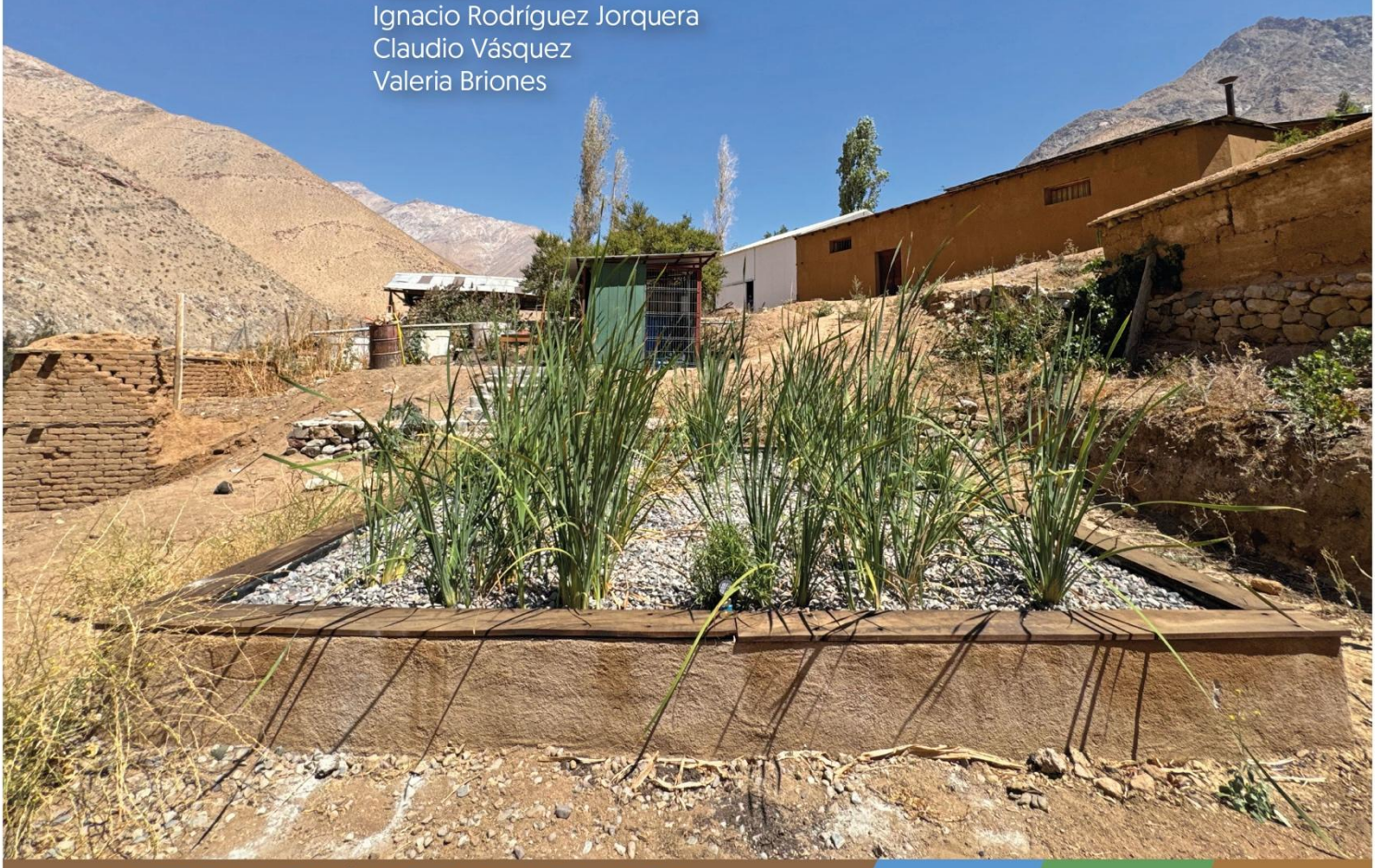
Tratamiento para residuos líquidos industriales – Evaluación previa a la inversión de un sistema

ACTIVIDADES NECESARIAS PARA REALIZAR EVALUACIÓN DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO

SECCIÓN 1: ENFOQUE EN HUMEDALES CONSTRUIDOS

Preparado por: Ismael Leonardo Vera Puerto
Gianfranco Moris
Ignacio Rodríguez Jorquera
Claudio Vásquez
Valeria Briones



LA SERENA / REGIÓN DE COQUIMBO / 2026

Ejecutado: CEAZA · Facultad de Ciencias de la Ingeniería · Centro de Humedales Río Cruces · Universidad Austral de Chile
Institución mandante: CRDP
Aliados estratégicos: Fundo Los Nichos
Financia: CORFO · Programa Desarrollo Productivo Sostenible

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

1. Introducción 2
1.1 Sobre esta Sección 2
1.2 Generalidades 2
2. Procesos industriales y caracterización 3
2.1 Origen del RIL 3
2.2 Dinámica y Variabilidad – Cantidad de RIL 4
2.3 Dinámica y Variabilidad – Caracterización fisicoquímica del RIL 5
2.4 Evaluación de Tratabilidad del RIL 8
3. Humedales construidos y sus tipos 10
5. Condiciones climáticas 14
6. Disponibilidad de recursos para construcción 15
7. Marco Normativo aplicable 16
8. Ingeniería básica: resultado a entregar 17
9. Estimación de los costos para una preinversión 19
9.1 Estructura de costos 19
9.2. Consideraciones sobre la estimación de costos 20
9.3 Estructura referencial de costos 21
Referencias 22

1. Introducción

1.1 Sobre esta Sección

Este documento ha sido preparado por el equipo del proyecto CORFO 24BP-273014 “Aplicación y adaptación de tecnologías en el reúso de agua a través de humedales depuradores, como solución basada en la naturaleza”, liderado por CEAZA y co ejecutado por el Centro de Humedales Río Cruces de la Universidad Austral de Chile y la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Católica del Maule.

El objetivo del documento es entregar de forma resumida las recomendaciones necesarias para la etapa de pre-inversión. En este apartado del documento se pretenden resumir los requerimientos necesarios que la CRDP debe tomar en consideración para poder apoyar en la implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales (más conocidas como RILES), pero con un enfoque principal en la implementación de la tecnología de humedales construidos.

1.2 Generalidades

El tratamiento de aguas residuales industriales experimenta una transformación en las últimas décadas, transitando desde soluciones puramente mecánicas y químicas hacia sistemas basados en la naturaleza (SBN). En este contexto, los humedales construidos (HC) emergen como una tecnología de ingeniería diseñada para aprovechar los procesos naturales de depuración —biológicos, físicos y químicos— de manera controlada y optimizada para efluentes de alta complejidad. Estos sistemas no solo representan una alternativa de bajo costo operativo y energético, sino que también ofrecen una resiliencia superior ante la variabilidad de las cargas contaminantes típicas de la actividad industrial, además de mejoras estéticas por el uso de vegetación.

En este contexto el presente documento busca establecer una guía para intentar responder a preguntas que un ente que ofrezca apoyo técnico, como por ejemplo la CRDP, a una industria específica, deba realizar para poder avanzar en la implementación de sistemas de tratamiento basados en HC, que fue la tecnología implementada en la ejecución del proyecto CORFO 24BP-273014:

1. ¿Cuál es la actividad industrial a la que se le requiere tratar residuos líquidos?

2. ¿Existe una definición de la tipología del proceso industrial para conocer los puntos donde se genera RIL?

3. ¿Se han caracterizado los RILES producidos, es decir, existe un registro histórico de calidad del agua de dichos RILES?

4. ¿Es conocida por parte de la industria la tecnología de HC?

5. ¿Cómo es el sitio en que se planea implementar el HC?¿Existe suficiente espacio?

6. ¿Cómo es la conformación del terreno donde se planea implementar el HC?

7. ¿Cómo es la disponibilidad de materiales de construcción cercanos al sitio de implementación del HC?

8. ¿Se quiere descargar el RIL tratado o se pretende reutilizar?

9. ¿Se comprende que previa a la implementación existe un trabajo de ingeniería a desarrollar para tener un proyecto exitoso?

2. Procesos industriales y caracterización

Comprender un proceso productivo es el primer paso para cualquier estrategia de gestión ambiental responsable, lo que incluye el manejo de los residuos líquidos. Un proceso no es solo una secuencia de transformación de materias primas en productos de valor, sino también es un sistema de flujos donde el uso del agua se transforma en un subproducto sin valor para la actividad industrial que se denomina RIL (Residuo Industrial Líquido). Al comprender cada etapa operativa —desde la entrada de insumos hasta las operaciones unitarias de transformación— es posible identificar los puntos de origen de los RILES y de los potenciales contaminantes a encontrar en ellos.

La relación directa entre conocimiento del proceso productivo y la caracterización de los residuos líquidos es, por tanto, indisociable. La carga orgánica, la presencia de metales pesados, la variabilidad del pH y los caudales de descarga son reflejos fieles de las decisiones técnicas tomadas en la línea de producción. Sin un conocimiento técnico de estas dinámicas, cualquier sistema de tratamiento posterior corre el riesgo de ser sobredimensionado o, peor aún, de resultar ineficaz ante fluctuaciones no previstas. Así, la integración del análisis de procesos con el monitoreo de efluentes no solo garantizará el cumplimiento normativo, sino que se convierte en una herramienta estratégica para la optimización del uso de recursos (incluida el agua) y la sostenibilidad a largo plazo de la actividad industrial.

2.1 Origen del RIL

Antes de medir caudales o calidad del agua, hay que saber de dónde viene el RIL o RILES. El primer paso consiste en identificar las partes del proceso productivo que generan residuos líquidos. Así, es importante diferenciar entre distintos tipos de corrientes. A continuación se mencionan puntos de generación que se deben identificar en una primera evaluación para prospectar el tratamiento de RILES:

a) Aguas de proceso: residuos líquidos generados por el contacto directo con materias primas o reactivos.

b) Aguas de servicios: residuos líquidos derivados de la utilización en elementos empleados en la actividad industrial pero sin contacto con materias primas o reactivos. Ejemplos, aguas de purgas de calderas, aguas empleadas en torres de enfriamiento.

c) Aguas de lavado: residuos líquidos generados en la limpieza de equipos, pisos y reactores.

d) Escurrimientos pluviales: residuos líquidos generados cuando existe mezcla de aguas lluvia con zonas de descarga de materiales, parte del proceso productivo o zonas de acopio de residuos.

Este paso es importante para poder definir si se requiere medir cada uno de los orígenes de los distintos tipo de origen residual, o por el contrario, si las diferentes fuentes se integran y existe un punto único de descarga donde se pueda realizar la medición. La actividad de medición de la cantidad de agua se denomina aforo. La decisión final de donde medir debe ser consensuada con la actividad industrial generadora, ya que puede ser importante para definir si se quiere hacer tratamiento por separado de cada fuente o el tratamiento de todas las fuentes combinadas.

2.2 Dinámica y Variabilidad – Cantidad de RIL

Los RILES rara vez son constantes, es decir, no se producen de forma homogénea a través del tiempo. Es vital establecer cómo se generan y donde se descargan. El paso previo indicaba la identificación de los tipos y puntos de descarga para ir programando actividades de aforo. Si bien, se recomienda siempre aforar directamente, también existe la posibilidad que los administradores de la actividad industrial cuenten con registros de la generación de caudales. Si éstos registros existen, hay que analizarlos estadísticamente con el fin de encontrar valores representativos para el diseño como medias, medianas, peaks de generación, y cualquier otro dato representativo de la forma en que se originan los RILES.

Así, en este paso resulta fundamental identificar si existen períodos en el día, mes o año, donde la descarga en volumen sea más alta. Así mismo, es importante identificar si existen momentos de nula descarga. Esta variabilidad normalmente se define con los propietarios y operarios de la actividad industrial generadora del RIL. Lo que sí es importante es definir si esta variabilidad es realmente importante, ya que puede ser necesario incorporar unidades de regulación o almacenamiento, como estanques de ecualización, con el fin de evitar sobrecargas hidráulicas o contaminantes en el sistema de humedal. La Figura 1 muestra mediciones diarias de caudal durante 3 años en una planta de tratamiento de aguas residuales, donde se puede evidenciar las variaciones estacionales.

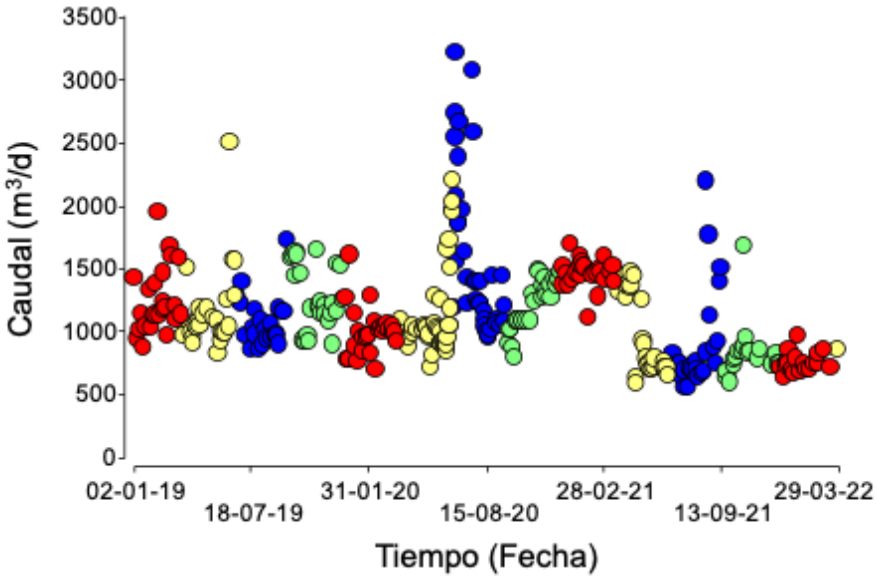


Figura 1. Registros diarios de caudal para una planta de tratamiento de aguas residuales municipales clasificados por estación.(●) Invierno; (●) Primavera; (●) Verano; (●) Otoño.

Cuando no existen registros históricos de producción de los RILES, lo ideal es realizar campañas de aforo en los momentos críticos de producción. Si esto no es posible por alguna razón, se debe establecer de forma teórica la producción del RIL a partir de información secundaria, como los registros de consumo de agua potable, entrevistas al personal operador, entrevistas a los administradores del sistema, visitas a terreno, etc. Se debe establecer de la forma más precisa posible la producción del RIL.

2.3 Dinámica y Variabilidad – Caracterización fisicoquímica del RIL

Dependiendo de la naturaleza del proceso productivo (químico, alimentario, minero, entre otros) se deben seleccionar los parámetros de calidad de agua que se necesitan para proyectar un proceso de tratamiento. El proceso de selección se basará principalmente en la naturaleza del RIL a tratar que trae aparejado los parámetros críticos de interés que se requiere remover del RIL. Además es importante conocer la normativa legal vigente, la que será tratada con mayor profundidad más adelante. Pese a esto, de forma general para poder caracterizar la calidad del agua existe una serie de parámetros que se pueden clasificar así:

1. Físico-químicos básicos. Ejemplos de este tipo de parámetros son el pH, la Temperatura, la conductividad eléctrica, la salinidad y los Sólidos Suspendidos Totales (SST)

2. Materia orgánica. Dos parámetros deberían ser medidos para poder establecer la tratabilidad del RILy que son importantes en el dimensionamiento de un HC: la demanda bioquímica de oxígeno a las cinco días (DBO_5) y la demanda química de oxígeno (DQO).

3. Nutrientes. Los nutrientes suelen dividirse en macro y micro nutrientes. Regularmente es aconsejable medir macronutrientes como diferentes formas del Nitrógeno (amonio, nitrato, nitrito, Kjeldahl, Total) y diferentes formas de Fósforo (total, ortofosfatos). En el caso de los micronutrientes (Potasio, Sodio, entre otros), su medida se define acorde al RIL a tratar.

4. Específicos. Se trata de parámetros específicos a medir de acuerdo al tipo de RIL a tratar. Ejemplos son Aceites y grasas, metales pesados, fenoles, parámetros microbiológicos (coliformes, enterovirus, etc), entre otros.

La Figura 2 muestra un esquema a modo de ejemplo de los diferentes parámetros que pueden ser medidos en el agua residual en general, lo que incluye a los RILes. Por su parte la Tabla 1 resume el objetivo que pretende la evaluación de los diferentes parámetros en un RIL y su proyección para la implementación de un HC.

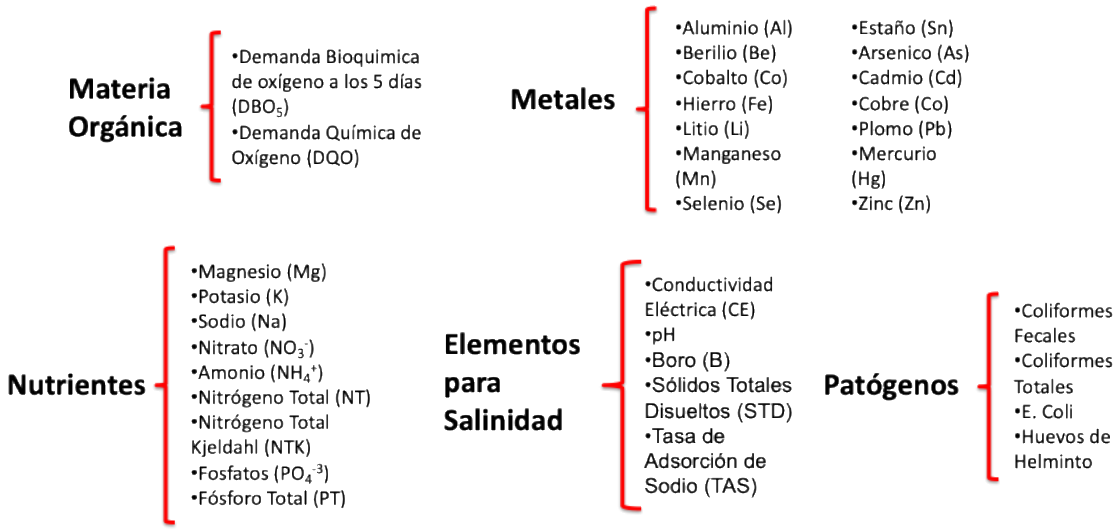


Figura 2. Ejemplos de parámetros fisicoquímicos y biológicos que pueden ser evaluados en aguas residuales incluidos los RILes.

Tabla 1. Parámetros de caracterización de RILES para evaluación de humedales construidos

Categoría	Parámetros	Ejemplos	Objetivo en la evaluación
Físico-químicos básicos	Propiedades generales del agua residual	pH, temperatura, conductividad eléctrica, salinidad, sólidos suspendidos totales (SST)	Permiten una primera caracterización del RIL y detectar condiciones que puedan afectar el funcionamiento del sistema (ej. pH fuera de rango, alta carga de sólidos).
Materia orgánica	Indicadores de carga orgánica biodegradable y total	DBO_5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno), DQO (Demanda Química de Oxígeno)	Determinan la tratabilidad biológica del RIL y son clave para el dimensionamiento del humedal.
Nutrientes	Compuestos asociados principalmente a nitrógeno y fósforo	Nitrógeno (amonio, nitrato, nitrito, NTK, total), fósforo (total, ortofosfatos), otros como potasio y sodio	Permiten evaluar la necesidad de remoción de nutrientes o la adición en caso de ser necesario, y el potencial de reutilización del agua tratada (ej. riego).
Parámetros específicos	Contaminantes particulares según tipo de industria	Aceites y grasas, metales pesados, fenoles, coliformes, enterovirus, entre otros	Identifican riesgos específicos que pueden afectar el tratamiento o requerir pretratamientos adicionales.

La medición de la calidad del agua resulta crítica en la prospección de cualquier sistema de tratamiento, lo que incluye a aquellos que en su secuencia incluyan un HC de cualquier tipo. La selección de que parámetros medir puede estar restringida por los recursos económicos de los administradores de la actividad industrial y la disponibilidad de laboratorios especializados. Se recomienda como mínimo hacer seguimiento de algunos macro parámetros, la materia orgánica y algunos nutrientes. La definición de parámetros específicos depende de la actividad industrial. Siempre se debe consultar con un laboratorio especializado la disponibilidad dentro de su portafolio de los parámetros a medir. Se recomienda el uso de Laboratorios acreditados por el Instituto Nacional de Normalización (INN).

Respecto a la cantidad de muestras, aquí hay que diferenciar dos aspectos: a) si existen datos por parte del generador, o b) si no existen datos por parte del generador.

Cuando existen registros por parte de los administradores industriales, al igual que lo comentado previamente respecto a los registros de caudal, hay que analizarlos estadísticamente con el fin de encontrar valores representativos para el diseño como medias, medianas, peaks de concentración, y cualquier otro dato representativo de la forma en que varía la concentración del RIL.

Cuando no existen registros se debe proceder a programar actividades de muestreo. Para esto se deben programar al menos 3 campañas de muestreo que intenten representar de

la mejor forma posible la distribución de la contaminación generada por el proceso industrial. La actividad de muestreo puede ser puntual y/o compuesta:

1. Muestra puntual: muestra discreta tomada en una masa de agua residual de forma aleatoria (en relación en este caso a la hora de toma de la muestra).

2. Muestra compuesta: dos o más muestras mezcladas en proporciones conocidas adecuadas de donde se obtiene el valor medio de la característica o parámetro de calidad del agua deseado. Las proporciones de muestra se basan principalmente en mediciones del flujo. Lo normal es hacer muestreo compuesto de 24 h.

Mayores detalles sobre la actividad de muestreo pueden ser consultados en la NCh 411/10-2005: “Muestreo de aguas residuales. Recolección y manejo de las muestras”.

2.4 Evaluación de Tratabilidad del RIL

Una vez caracterizado el efluente, se evalúa su potencial de tratamiento. Dada la naturaleza biológica en que se fundamenta un HC, se hace necesario determinar si el RIL es biodegradable o no. Para esto se utiliza la relación entre la DBO_5 y la DQO. Para que un RIL sea biodegradable debe darse que la relación DBO_5/DQO superior a 0,5. De este modo, se considera que el RIL es biodegradable, y por tanto, apropiado para ser tratado por cualquiera de los tipos de HC. Si la relación DBO_5/DQO varía entre 0,3 y 0,5, el RIL presenta una biodegradabilidad moderada, y un sistema basado en HC podría necesitar intensificación. Si la relación es menor a 0,3, no se recomienda el uso de ningún tratamiento biológico incluido el HC, y se debe proceder a evaluar procesos de tratamiento fisicoquímicos.

Otro aspecto importante es el valor de pH. En general para un tratamiento biológico se recomienda valores de pH entre 6,0 y 8,0. Esto porque valores fuera de ese rango afectan a los microorganismos que se desarrollan en los HC y las plantas. Cuando se detecta en la fase inicial de monitoreo valores consistentes fuera del rango mencionado, se debe realizar enmienda del pH. Si el valor es bajo 6,0 se deben adicionar soluciones básicas para aumentar el pH, y si el valor es por encima de 8,0, se deben adicionar soluciones ácidas para disminuir el pH. Este es un punto clave ya que requerirá que la propuesta de tratamiento incluya una etapa previa denominada enmienda de pH, lo que tendrá una influencia a evaluar dentro de los costos de implementación y operación.

También es importante considerar algunos elementos específicos como metales pesados o salinidad, que puedan afectar tanto el crecimiento microbiano como las plantas en los HC. Respecto a los metales pesados, en general no existe problema con ellos, excepto cuando se tratan RILES provenientes de la minería y/o metalúrgicas. Pese a esto existe evidencia científica del uso de HC para este tipo de RILES, por lo que debe evaluarse su concentración respecto a los estudios publicados. Respecto a salinidad, en general valores de conductividad eléctrica de hasta 4.000 μS/cm son soportados para ser procesados por HC. La salinidad puede ser una característica de las aguas en el Norte de Chile, por lo que se recomienda que siempre debe medirse esta característica en actividades industriales de la Región de Coquimbo.

La Tabla 2 resume indicaciones para evaluar la tratabilidad de los RILes.

Tabla 2. Resumen de criterios de evaluación de un RIL para definir la potencial tratabilidad en un HC considerando el fundamento biológico de este proceso.

Criterio	Parámetro	Rango / Condición	Interpretación	Implicancia para el proyecto
Biodegradabilidad	Relación DBO_5/DQO	> 0,5	Alta biodegradabilidad	RIL apto para tratamiento mediante un HC con o sin intensificación.
		0,3 – 0,5	Biodegradabilidad moderada	Posible uso de HC, pero puede requerir intensificación o etapas complementarias.
		< 0,3	Baja biodegradabilidad	No recomendable emplear un HC. Evaluar alternativas fisicoquímicas.
Nivel de acidez o basicidad	pH	6,0 – 8,0	Rango óptimo	Condiciones adecuadas para actividad biológica en un HC
		< 6,0 o > 8,0	Fuera de rango	Requiere etapa de ajuste de pH (enmienda), aumentando costos de implementación y operación.
Salinidad	Conductividad eléctrica	≤ 4.000 µS/cm	Nivel tolerable	Compatible con operación de HCs.
		> 4.000 µS/cm	Alta salinidad	Puede afectar plantas y microorganismos en un HC. Evaluar diseño específico o restricciones.
Compuestos inhibidores	Metales pesados u otros contaminantes específicos	Baja concentración	Sin efectos relevantes	No limita el uso de humedales construidos. Sin embargo, si es muy baja su concentración pueden originar problemas en el crecimiento de las plantas.
		Alta concentración	Potencial toxicidad	Puede inhibir procesos biológicos y crecimiento de plantas. Evaluar pretratamiento o tecnologías alternativas previas para reducir.

3. Humedales construidos y sus tipos

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 3 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). La Tabla 3 resume los diferentes tipos de RIL en donde la tecnología de HC ha sido utilizada dentro del sistema de tratamiento, a diferentes escala de aplicación, desde estudios en laboratorio hasta estudios a gran escala.

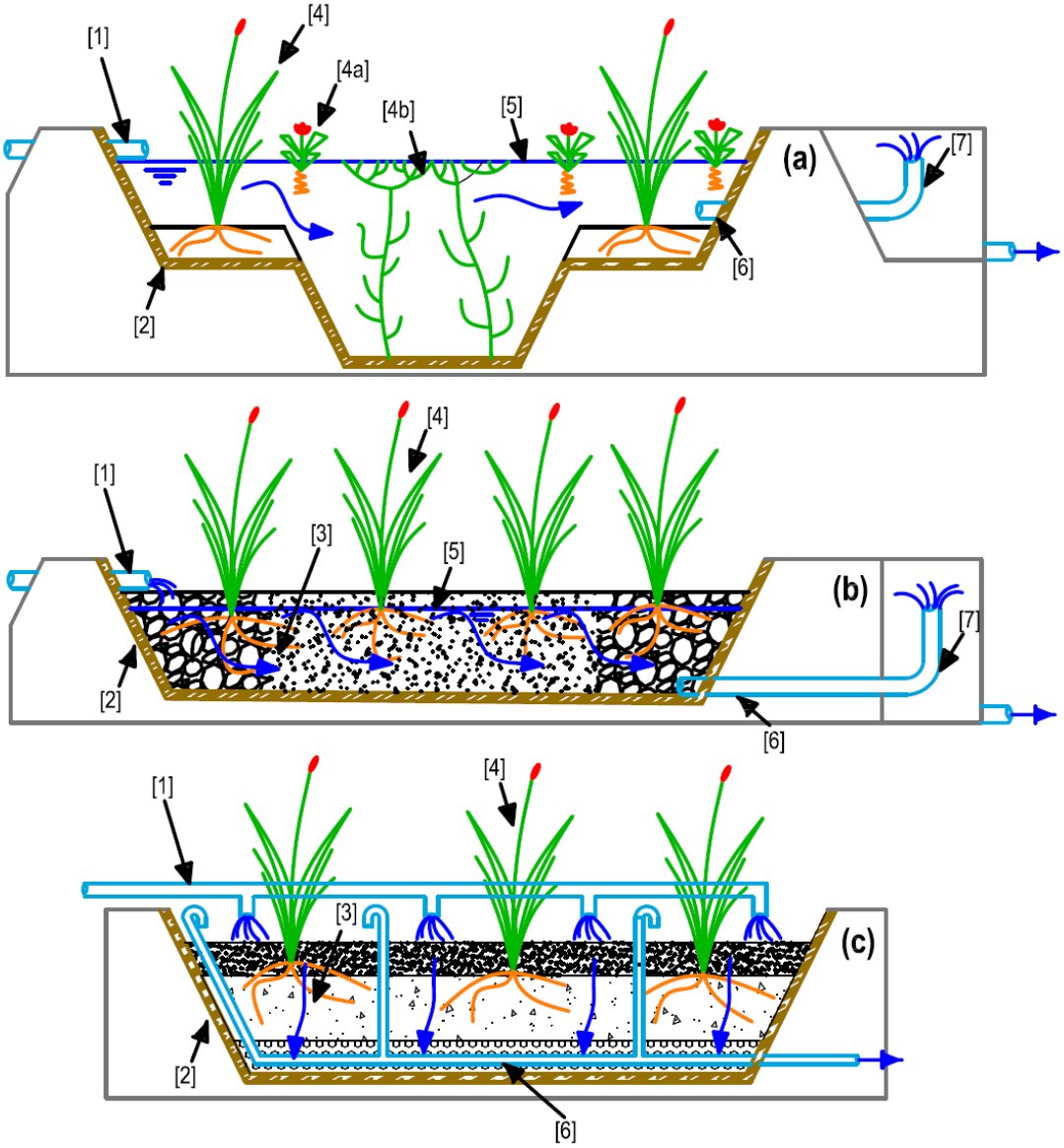


Figura 3. Tipos de HC y componentes. (a) HC de flujo horizontal superficial (FS); (b) HC de flujo horizontal subsuperficial (FH); (c) HC de flujo vertical (FV). [1] Tubería influente, [2] Impermeabilización, [3] Medio de soporte, [4] Vegetación emergente, [4a] Vegetación flotante, [4b] Vegetación sumergida,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

Tabla 3. Industrias donde se han aplicado HC para el manejo de sus RILes (Vymazal, 2014; Stefanakis, 2018)

Tipo de Industria	Tipo de HC empleado o secuencia empleada	Países de implementación
Refinerías de Petróleo	FS; FH; FS+FV	Sudáfrica; USA; China; Hungría; Canadá; Taiwán, Pakistán
Industria de celulosa (pulpa y papel)	FS; FH	USA; China; Kenya; India
Curtiembres	FS; FH; FV+FH+FV	Turquía; Portugal; Tanzania; Bangladesh
Textiles	FH; VF; FV+FH	Australia; Reino Unido; Tanzania; Portugal; Eslovenia; Japón
Acuicultura	FS; FH; FV; FS+FH; FV+FH	USA; Canadá; Taiwán; Alemania; Australia; China; Vietnam
Vitivinícola	FH; FV; FH+FS; FV+FH+FS; FV+FH	USA; Alemania; Francia; Italia; Sudáfrica; España
Producción de diversos tipos de destilados	FH	India; México; Reino Unido
Producción de cerveza	FS; FH	USA; Sudáfrica
Matadero	FS; FH; FV+FH	Australia; Nueva Zelanda; México; Ecuador; Canadá; Lituania; Polonia
Producción de lácteos y quesos	FH; FH+FV; FV+FV+FH; FV+FH	Dinamarca; Nueva Zelanda; USA; Alemania; Italia; Francia; Lituania; Japón
Producción de aceite de oliva	FS; FV	Turquía; Grecia
Procesadora de pescados y mariscos	FS; FH	USA; Tailandia
Producción de azúcar	FS; FV	USA; Kenia; Reino Unido; Tailandia
Industria de la papa	FH; FS+FV+FS; FS; FV+FH+FV	Países Bajos; USA; Japón
Industria de diferentes tipos de alimentos	FH	Eslovenia; Italia; Martinica
Lavandería	FH; FV	Italia; India; Reino Unido; España; Australia; Tailandia
Industria química	FH; FV	Reino Unido; Portugal
Explosivos	FS; FS+FH	USA
Industria del acero	FH; FV	Taiwan; China
Producción de coque	FH	Francia
Industria petroquímica (gasificación de carbón)	FS	USA
Producción de herramientas	FS	Argentina
Producción de flores de corte	FH+FS	Kenia

FS: Flujo Superficial; FH: Flujo horizontal subsuperficial; FV: Flujo vertical

Aunque la tecnología de HC 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).

La Figura 4 resume diferentes tipos de intensificaciones que se han estudiado y aplicado a los diferentes tipos básicos de HC.

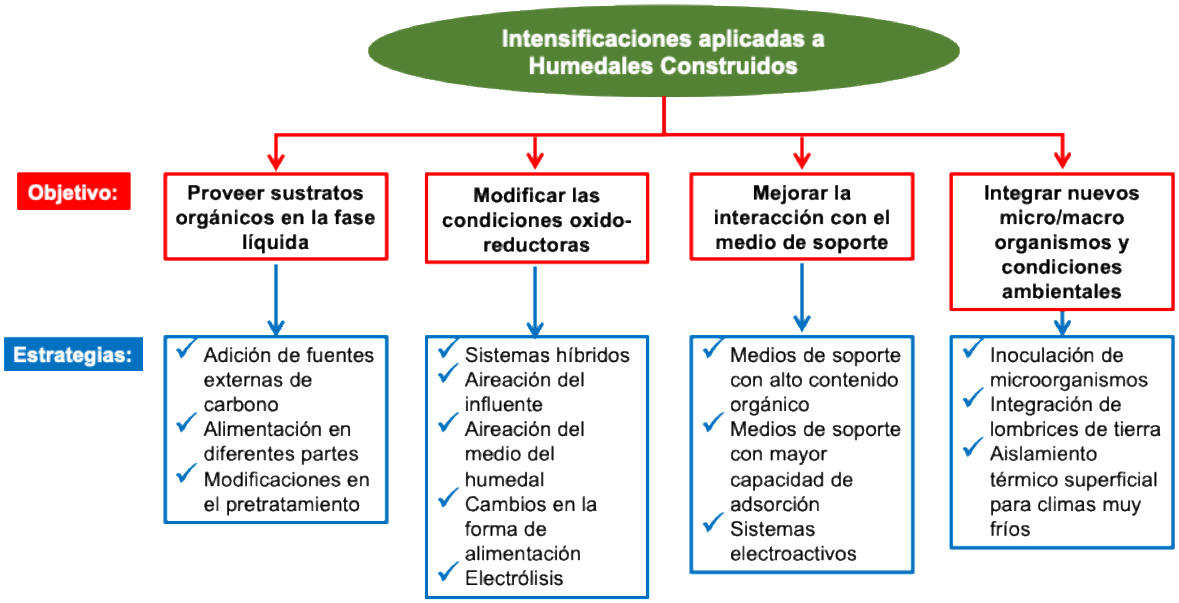


Figura 4. Objetivo y tipo de intensificación propuesta para los tipos básicos de HC (Vera, 2018).

La definición de intensificar o no un modelo básico de HC será un aspecto a evaluar para la propuesta de tratamiento que se pretende entregar durante la etapa de ingeniería básica.

4. Evaluación del sitio de implementación

En comparación con otros sistemas de tratamiento, los HC tienen un mayor requerimiento de terreno, pero menos requerimiento de energía externa junto con menos actividades de operación y mantenimiento. Esto hace que la disponibilidad de terreno para su implementación en el tratamiento de RILES sea un aspecto importante a considerar. La Tabla 4 resume a modo de ejemplo algunas necesidades de área para HC y sistemas convencionales aplicados al tratamiento de aguas servidas, que es la aplicación de tratamiento donde los HC han sido más utilizados.

Tabla 4. Requerimientos de terreno para algunas tecnologías de tratamiento de aguas residuales como tratamiento secundario en climas cálidos a templados (Tomado de: Dotro et al., 2017).

Tecnología de tratamiento	Requerimiento de área (m^2/ Hab-eq)
Laguna facultativa	2,0 – 6,0
Laguna Anaerobia + facultativa	1,2 – 3,0
Reactor UASB	0,03 – 0,10
Lodos activados, SBR	0,12 – 0,30
Filtros percoladores	0,15 – 0,40
Humedales de FH	3,0 – 10,0
Humedales de FV	1,2 – 5,0
Humedales verticales tipo francés [c]	2,0 – 2,5

La topografía representa uno de los aspectos de evaluación del terreno que se debe considerar. Si la pendiente del terreno lo permite, los HC pueden operar sin bombas y, por lo tanto, sin ningún aporte de energía externa. Por el contrario, terrenos planos probablemente necesiten de la utilización de equipos de bombeo. En ambos casos debe evaluarse bien el uso de energía eléctrica en la etapa de ingeniería básica. Si la pendiente del terreno es muy fuerte, se podría dar la necesidad de construcción en terrazas, y debe evaluarse con cuidado el movimiento de tierras durante la ingeniería básica.

Otro aspecto importante se relaciona con el acceso y la disponibilidad de energía y agua para acometer las labores de construcción y operación. Debe evaluarse si es factible su conexión a la instalación industrial existente.

5. Condiciones climáticas

El clima es un factor importante para el desempeño de los HC y el tipo de vegetación que se puede emplear. La temperatura regula los procesos biológicos y fisicoquímicos responsables del tratamiento del RIL. La temperatura, por ejemplo, influye directamente en la actividad metabólica de los microorganismos y en el desarrollo de la vegetación, responsables del procesamiento de los contaminantes contenidos en el RIL. A mayor temperatura, las tasas de eliminación suelen ser más altas y constantes; por el contrario, a temperaturas más bajas, la actividad bacteriana se ralentiza, lo que exige un diseño más robusto o tiempos de retención hidráulica más prolongados para compensar las reducciones cinéticas. Los efectos de la temperatura se ven atenuados especialmente en HC de tipo subsuperficial. Además, para zonas con temperaturas bajas y posibilidad de nieve, se utilizan materiales puestos en la capa superficial de HC de tipo subsuperficial para mejorar su aislación. Ejemplos de estos materiales son virutas de madera, conchas de mar, entre otros. Pese a lo anterior, los HC han sido robustos en su adaptación a casi todos los climas, siendo empleados en países del norte de Europa con inviernos muy fríos, a países del Golfo Pérsico, con veranos muy cálidos.

La temperatura del RIL que en varios casos es influenciada por la temperatura ambiental, tiene un efecto en las velocidades de reacción de degradación de la mayoría de contaminantes en los HC. Los efectos de la temperatura se pueden describir utilizando la ecuación de temperatura de Arrhenius. En la mayoría de los casos, se utilizan las temperaturas medias mensuales del RIL del mes más frío, para estar seguros en el diseño. En otros casos, se utilizan temperaturas mínimas anuales del agua.

Además de la temperatura, el balance hídrico estimado con la precipitación y la evapotranspiración de la potencial zona de implementación, es crítico para mantener la estabilidad operativa del HC. Las lluvias intensas pueden diluir los contaminantes, pero también se corre el riesgo de saturar el humedal, provocando desbordamientos o reduciendo el tiempo de contacto necesario para un tratamiento efectivo. Para prevenir esto, se deben dejar bordes libres que permitan almacenar el exceso de precipitación. Por otro lado, en zonas de alta radiación solar y aridez, la fuerte evaporación puede concentrar las sales y los contaminantes en el efluente, lo que podría afectar la supervivencia de las plantas y la calidad final del agua tratada. Por ello, un diseño exitoso para un RIL debe estar ajustado a las variables meteorológicas locales para garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

En general no existe una recomendación por caudal a tratar o carga contaminante, que repercutirá en el tamaño, de cuando hacer modificaciones al diseño por temperatura o un balance hídrico específico. Mayor información puede ser obtenida en Dotro et al. (2007). Para tamaños pequeños, como los desarrollados en el proyecto CORFO 24BP-273014E de hasta 20 m^2, no se hace necesario desarrollar un balance hídrico detallado, y el modelo de diseño, no incluyó el uso de factores de temperatura, por lo que no fue realizado. En diseños pequeños lo que es importante es dejar un borde libre mayor a 0.1 m que amortigüe procesos de lluvia intensos.

6. Disponibilidad de recursos para construcción

La premisa de un HC es que su construcción debe aprovechar la utilización de recursos locales. Esto aplica especialmente por el bajo o nulo requerimiento de materiales especializados. Existen tres materiales importantes que componen un humedal y que serían los más intensivos en su construcción: a) impermeabilizante, b) materiales filtrantes y c) las plantas.

Respecto a materiales impermeabilizantes se recomienda utilizar membranas principalmente de HDPE. Aunque se pueden utilizar otro tipo de materiales que garanticen estanqueidad. Se sugiere un grosor mínimo de 1 mm para el HDPE. Si bien en la literatura especializada se habla del uso de arcilla compactada, que sería una solución fácil de implementar in-situ dependiendo del tipo de suelo existente, no se recomienda, especialmente por la poca factibilidad de aprobación por parte de las autoridades de gobierno correspondientes. Otro tipo de impermeabilización es construcción con hormigón armado. Esto debe evaluarse en la etapa de ingeniería básica.

El uso de materiales locales para el lecho filtrante es un pilar fundamental en la sostenibilidad económica y ambiental de los HC. Al utilizar áridos de la zona, como gravas, arenas o incluso subproductos volcánicos como la zeolita, se reducen drásticamente los costos de transporte y la huella de carbono asociada. Estos materiales no solo actúan como

soporte físico para la vegetación, sino que su composición mineralógica puede potenciar procesos de adsorción específicos para ciertos contaminantes industriales, como metales pesados o fósforo, optimizando la capacidad de eliminación del sistema sin depender de insumos importados o sintéticos.

Respecto a las plantas, se recomienda utilizar plantas acuáticas disponibles en viveros cercanos a la zona de implementación, priorizando el uso de especies nativas por sobre especies introducidas. Sin embargo, debe evaluarse dentro de la zona de implementación el uso de especies ornamentales que han sido adaptadas con éxito en HC. Se debe evitar el uso de *Phragmites australis* (la especie de planta más utilizada en HC), dado que se considera una especie introducida altamente cosmopolita en las Américas. Particularmente para HC en aplicaciones industriales se recomienda utilizar familias de plantas que han mostrado buena tolerancia a un amplio espectro de residuos líquidos *como Typha ssp., Juncus* spp., *Schoenoplectus ssp., Cyperus spp*., entre otras.

7. Marco Normativo aplicable

El proyecto debe considerar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente, particularmente en relación con la calidad del efluente tratado y su destino final. Como destino final existen dos alternativas: descarga o reutilización. La Figura 5 resume la forma en que se asocia a normativa asociada a la gestión del agua en Chile, con ejemplos de normas de calidad (más conocidas como normas secundarias).

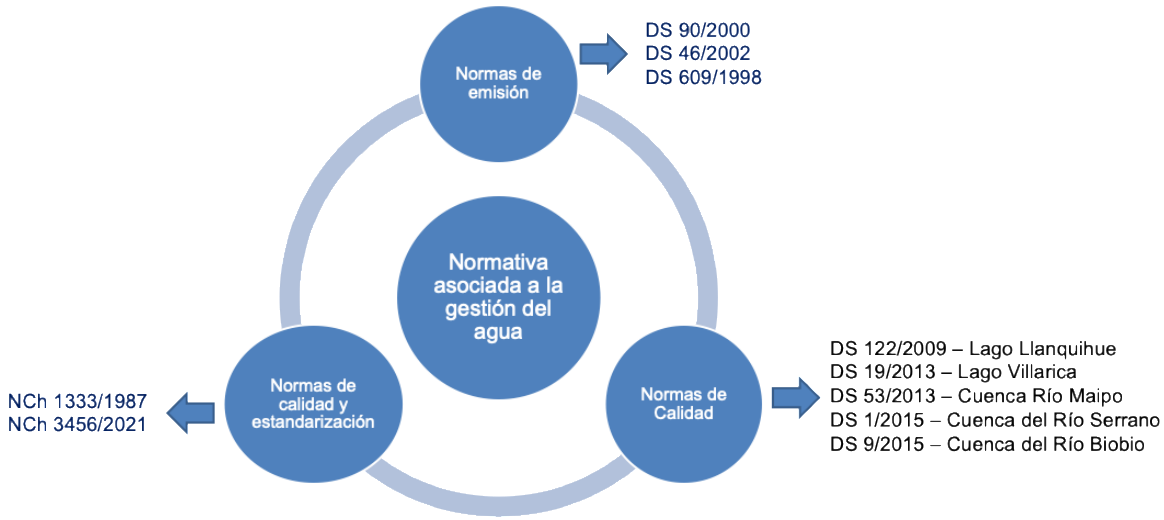


Figura 5. Normativa asociada a la gestión del agua en Chile.

Si el proyecto de tratamiento define descarga, existen tres posibilidades de normativas aplicables:
a) Decreto Supremo 90/2000, que define los límites máximos de concentración de parámetros de calidad del agua para descarga a cuerpos hídricos superficiales
b) Decreto Supremo 46/2002, que define los límites máximos de concentración de parámetros de calidad del agua para descarga a cuerpos hídricos subterráneos

c) Decreto Supremo 609/1998, que define los límites máximos de concentración de parámetros de Calidad del agua para descarga en alcantarillados

El último es solo aplicable cuando la actividad industrial generadora del RIL este ubicada dentro de una zona que posea alcantarillado y se planee la descarga del RIL dentro de él.

Respecto a la normativa de reutilización, es importante partir señalando que Chile no posee normativa específica que hable sobre reutilización de un RIL industrial tratado. Sin embargo, en la práctica de la industria sanitaria encargada del tratamiento de aguas residuales municipales cuando se reutiliza un efluente para riego (que sería la aplicación más recomendada para un RIL tratado por un HC), se ha aplicado extensivamente la NCh 1333/1987, que establece criterios de calidad del agua para diferentes usos, siendo el uso en riego agrícola, uno de los usos que contiene límites para diversos parámetros de calidad del agua. Alternativamente a esta Norma, existe la Norma NCh 3456/2021, que incluye cuatro partes, estableciendo en la Parte 4, límites de diferente parámetros de calidad del agua definidos acordes al tipo de cultivo a regar. También es importante señalar que cuando se hable de un RIL que incluya aguas de lavado con la ausencia de residuos humanos, debe evaluarse si se aplica la Ley 21075 de 2018 y el Decreto 40/2024 (Reglamento de la Ley), que establece límites para algunos parámetros de calidad del agua para diferentes usos o destinos de las aguas grises tratadas. También, en 2023 se ingresó a tramitación en el senado un proyecto de ley que busca regular y fomentar los sistemas de reutilización (Boletín No.15690-33), pero sin un fin claro aún.

Finalmente, el cumplimiento del marco normativo que debe señalarse en el informe para solicitar autorización ambiental, y que es parte integrante de la solicitud de aprobación de funcionamiento, la Institucionalidad también es una variable a considerar. Se debe identificar la necesidad de permisos sectoriales ante la DGA (obras hidráulicas), Seremi de Salud (aprobación de proyecto sanitario) y el Servicio de Evaluación Ambiental (SEIA). La pertinencia de ingreso al SEIA debe hacerse por evaluación bajo el Art. 10 de la Ley 19.300, especialmente si la futura instalación de tratamiento del RIL se ubica en zonas sensibles o protegidas, o si la carga contaminante supera el umbral de 2.500 habitantes equivalentes.

8. Ingeniería básica: resultado a entregar

La ingeniería básica es la fase de diseño donde se definen los parámetros técnicos fundamentales y los componentes principales que conformarán el sistema de tratamiento. En esta etapa se seleccionan los equipos clave y se dimensionan las partes integrante del sistema de tratamiento, entre ellas la o las celdas de los HC con base en el flujo y la carga orgánica o de algún contaminante en específico del RIL. A diferencia de la ingeniería de detalle, aquí el enfoque está en la viabilidad técnica y la configuración del proceso, traduciendo los estudios previos y/o pasos comentados previamente en un esquema funcional que incluye diagramas de flujo de proceso, memorias de diseño básicas y planos de disposición general.

El esquema global de tratamiento normalmente esta divido en tres etapas:

a) Pretratamiento y tratamiento primario
b) Tratamiento secundario
c) Tratamiento terciario

La etapa del pretratamiento y tratamiento primario tiene como fin la eliminación de sólidos gruesos, que podrían originar problemas en las etapas posteriores del tratamiento. Por tanto, se debe evaluar los elementos que se quiere implementar, considerando la naturaleza del RIL y especialmente el tipo de sólidos que puede contener. Se debe evaluar si se necesitan rejillas, el tamaño de paso de la rejilla, un sistema de decantación primaria, y si es necesario, algún tipo de filtración inicial.

La etapa de tratamiento secundario tiene como fin la eliminación de materia orgánica. En esta etapa es donde se propone la utilización de los HC para tratar RIL. Cómo ya se mencionó, uno de los primeros pasos es determinar la tratabilidad del RIL, así como también, si existen modificaciones en pH, algún microelemento que afecte las plantas entre otros.

La etapa de tratamiento terciario tiene como fin la eliminación de contaminantes específicos presentes en el RIL. Por ejemplo, si se hace necesario desinfectar para eliminar patógenos, si se requiere eliminar nitrógeno o fósforo, si se necesita eliminar algún tipo de metal, entre otros. Esta etapa se hace después de la implementación de la etapa secundaria. Aquí se puede evaluar la integración de un segundo HC, bien sea de un modelo básico o intensificado, así como también, la potencial integración con alguna tecnología de tipo fisicoquímico.

La ingeniería básica debería entregar directrices para las tres etapas de tratamiento.

La importancia de una buena ingeniería básica en un proyecto de HC radica en que permite mitigar riesgos técnicos y económicos antes de la ejecución. Al definir el emplazamiento, los materiales para la construcción, las especies vegetales y el cumplimiento con la normativa ambiental vigente, se define la pertinencia del proyecto. Una ingeniería básica sólida evita rediseños costosos durante la ingeniería de detalle y la construcción y garantiza que el HC sea capaz de absorber las variaciones de carga propias de la actividad industrial, optimizando así la inversión inicial y los costos operativos a largo plazo. En lo posible, esta etapa debería evaluar al menos dos tipologías de HC para ser presentada y seleccionada por parte de la actividad industrial generadora del RIL.

Además del aspecto técnico, un resultado de la ingeniería básica debe ser el análisis económico. La estimación de costos necesaria para una definición específica del sistema de tratamiento a implementar basado en HC se divide en dos:

a) Costos de inversión (CAPEX): se refiere al costo para poder ejecutar la obra del sistema de tratamiento. Incluye los costos de inversión directa, como costos de materiales, los costos de ingeniería de detalle, y los gastos de materialización o los trabajos a desarrollar por el contratista a cargo de la obra.

b) Costos de operación (OPEX): se refiere al costo anual que tendría la operación del sistema, lo que incluye la mano de obra dedicada a la operación, los controles y manejo de la vegetación, el mantenimiento y costos de energía en el caso de equipamiento electrómecánico, el uso de reactivos en casos necesarios, y demás en los que se incurra para un correcto funcionamiento del sistema de tratamiento.

9. Estimación de los costos para una preinversión

La etapa de preinversión considera el desarrollo de un conjunto de actividades técnicas orientadas a evaluar la factibilidad de implementar sistemas de tratamiento de RILes mediante humedales construidos. Esta etapa permite reducir incertidumbre, identificar riesgos y estimar preliminarmente los costos asociados a la solución propuesta, como fue comentado previamente. También, como se comentó junto a la ingeniería básica del proyecto, se hace necesario determinar los costos asociados.

Para efectos de este documento, los costos de preinversión se estructuran en tres grandes etapas:

- Etapa 1: Levantamiento técnico en terreno
- Etapa 2: Campañas de muestreo y análisis de agua
- Etapa 3: desarrollo de ingeniería básica y evaluación técnico-económica

Cabe señalar que el presente análisis de costos de preinversión se ha elaborado con base a la experiencia de implementación de humedales construidos para la industria pisquera y cervecera del proyecto CORFO 24BP-273014, y considerando condiciones operacionales y características de RILes similares a las abordadas en el presente proyecto.

Estas aplicaciones, representan para efectos de este análisis, un mayor nivel de estandarización técnica, al igual como podrían ser las aguas residuales domésticas, lo que permite una estimación más acotada de los costos y actividades requeridas. En este sentido, es importante destacar que la evaluación en otras industrias dependiendo de la composición de los RILes, la escala de operación y los niveles de complejidad pueden implicar diferencias importantes en los requerimientos técnicos y, por ende, en los costos de preinversión.

9.1 Estructura de costos

La estimación de costos se basa principalmente en el uso de horas hombre (HH) de profesionales especializados, considerando actividades de levantamiento de información, análisis técnico, y desarrollo de ingeniería básica. Las etapas consideradas son:

a) Etapa 1: Levantamiento técnico en terreno

Corresponde a la recopilación de información base directamente en la instalación industrial. Incluye:

- Visita técnica y entrevistas con la empresa
- Identificación del proceso productivo

- Levantamiento de puntos de generación de RILES
- Análisis preliminar de caudales y condiciones operacionales

Esta etapa es clave para comprender el contexto específico de la industria y definir adecuadamente las etapas posteriores.

b) Etapa 2: Campañas de muestreo y análisis de agua

Considera la caracterización del RIL mediante campañas de muestreo y análisis en laboratorio. Incluye:

- Definición de puntos de muestreo
- Ejecución de campañas (puntuales o compuestas)
- Análisis fisicoquímicos básicos
- Determinación de carga orgánica (DBO_5, DQO)
- Análisis de nutrientes y parámetros específicos según tipo de industria

Esta etapa permite evaluar la tratabilidad del RIL y definir los requerimientos técnicos del sistema de tratamiento.

c) Etapa 3: Desarrollo de ingeniería básica y evaluación técnico-económica

Corresponde al análisis integrado de la información recopilada y al desarrollo de una solución preliminar. Incluye:

- Dimensionamiento preliminar del sistema de tratamiento, incluyendo pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario basado en HC, y definición de la necesidad de tratamiento terciario.
- Evaluación normativa aplicable
- Estimación de costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX)
- Elaboración de informe técnico

Esta etapa permite determinar la factibilidad técnica y económica del proyecto, constituyendo la base para la toma de decisiones.

9.2. Consideraciones sobre la estimación de costos

La estimación de costos de la etapa de preinversión puede variar significativamente dependiendo de las características específicas de cada caso evaluado. Esto se debe a que las actividades requeridas, tanto en terreno como en análisis técnico, están directamente condicionadas por la complejidad del sistema productivo, las características del RIL y el nivel de detalle requerido para la toma de decisiones. Los valores asociados a cada actividad podrían variar en función de:

- Horas hombre requeridas por los profesionales especializados
- Complejidad del proceso industrial
- Número de campañas de muestreo requeridas

- Cantidad de parámetros a analizar
- Nivel de detalle requerido en la ingeniería básica

Es importante señalar que los costos asociados a viáticos, traslados y logística de terreno no se incluyen en esta estimación, dado que presentan una alta variabilidad dependiendo de la ubicación del proyecto y las condiciones de acceso.

9.3 Estructura referencial de costos

No obstante, lo señalado en el punto anterior, resulta relevante presentar una estructura referencial para la estimación de costos de la etapa de preinversión. La Tabla 5 presenta a modo ejemplo una estructura de costos asociada con una etapa de preinversión.

Tabla 5. Estructura de costos propuesta a considerar para la etapa de preinversión. Valores en UF y conversión a pesos.

COSTOS POR ETAPA PREINVERSIÓN HC	Valor Unitario	Unidad	Cantidad	Total
Etapa1: Levantamiento técnico en terreno				**8**
Visita técnica y entrevista empresa	1,25	UF/HH	3	4
Análisis proceso productivo y RILes generados	1,25	UF/HH	3	4
Etapa 2: Campañas de muestreo y Análisis de agua				**21**
Campañas de muestreo (3)	0,50	UF/HH	6	3
Análisis Fisicoquímicos, carga orgánica, nutrientes, parámetros específicos	6	muestra	3	18
Etapa 3: Evaluación técnico-económica y desarrollo de ingeniería básica				**19**
Dimensionamiento preliminar	1,25	UF/HH	9	11
Análisis normativo	1,25	UF/HH	1	1
Estimación Capex y Opex	1,25	UF/HH	5	6
TOTAL ETAPA PREINVERSIÓN (Valor UF)				**47**
TOTAL ETAPA PREINVERSIÓN (Valor $/ 1 de marzo 2026)				**$1.880.376**

Como resumen, es importante señalar que la etapa de preinversión es fundamental para asegurar la viabilidad técnica, económica y normativa de los proyectos, evitando sobrecostos y fallas en etapas posteriores de implementación.

Por ello, la sección presentada busca ser una herramienta de apoyo a la CRDP en su rol de mandante y articulador del proyecto con sectores productivos, facilitando la evaluación de proyectos potenciales, entregar una referencia para la formulación de iniciativas de financiamiento, junto con estandarizar el proceso de evaluación de preinversión en distintos sectores productivos.

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, Reino Unido.

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

Stefanakis, A. (2018). Constructed wetlands for industrial wastewater treatment. Jhon Wiley & Sons. West Sussex, Reino Unido.

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.

Vymazal, J., 2014. Constructed wetlands for treatment of indsutrial wastewaters: A review. Ecological Engineering 73, 724–51.

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.