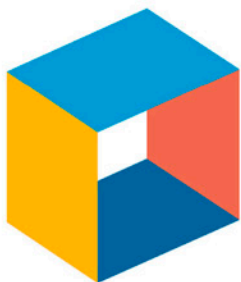




CONCURSO DE TESIS DE INTERÉS REGIONAL **2023**



CRUV
CONSEJO DE RECTORES
DE VALPARAÍSO



CRUV
CONSEJO DE RECTORES
DE VALPARAÍSO

El Consejo de Rectores de Valparaíso (CRUV) es una institución con impronta regional para el mundo global, con reconocido prestigio nacional e internacional, con Universidades globalmente competitivas y localmente comprometidas. Líder y referente principal en la coordinación e integración universitaria en ciencia, tecnología, innovación, patrimonio y cultura.

El Consejo de Rectores de Valparaíso es un referente universitario regional que coordina y articula acciones entre las universidades que representa y con actores públicos y privados, procurando el desarrollo y la innovación en los ámbitos económico, social, científico, tecnológico y cultural, de la región de Valparaíso con alcance regional, nacional e internacional.

Creado el 10 de septiembre de 1969 por acuerdo de los Rectores de la Universidad Católica de Valparaíso y de la Universidad Santa María, Raúl Allard y Jaime Chiang, y el Vicerrector de la Universidad de Chile, Juan Araya, como Consejo Coordinador Universitario de Valparaíso. El año 1990 los rectores de las universidades Católica de Valparaíso, de Playa Ancha, de Valparaíso y Técnica Federico Santa María, Bernardo Donoso, Norman Cortés, Agustín Squella y Gustavo Chiang, deciden cambiar el nombre al Consejo por Consejo de Rectores de Valparaíso, e inscriben el nombre y logo en el Registro de Propiedad

(continúa en solapa 4).

CONCURSO DE
**TESIS DE INTERÉS
REGIONAL 2023**



CRUV
CONSEJO DE RECTORES
DE VALPARAÍSO

CONSEJO DE RECTORES DE VALPARAÍSO, COMPILADOR.

1era edición 2022-2023.

VALPARAÍSO, 2023

AUTORES:

JAVIERA ARQUERO CARRASCO

MATÍAS NICOLÁS SALGADO ZAPATA

FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ QUIROZ

CONSTANZA ALVARADO

Prohibida la reproducción total o parcial, de los contenidos de cada tesis sin el permiso de cada uno de sus autores.

Imprenta: DIMACOFI S.A.

Diseñador: Andrés Valladares | valladares.andres@gmail.com

PRESENTACIÓN

El Consejo de Rectores de Valparaíso es un referente universitario regional que coordina y articula acciones entre las universidades que representa y con actores públicos y privados, procurando el desarrollo y la innovación en los ámbitos económico, social, científico, tecnológico y cultural, de la región de Valparaíso con alcance ante el país y el mundo.

El presente concurso tiene como objetivo general, fortalecer en los jóvenes el compromiso con el desarrollo regional y con el estudio de los problemas que afectan a la región de Valparaíso, por medio de la elaboración de tesis de pregrado que tengan interés regional.

En esta octava versión del concurso de tesis de interés regional, el Consejo plantea como lineamiento principal para el año 2023, los temas que se han sido relevados en la futura Estrategia de Desarrollo Regional de Valparaíso:

- Medio Ambiente, cambio climático y escasez hídrica.
- Habitabilidad, vivienda y asentamientos irregulares.
- Movilidad, transporte y conectividad.
- Desarrollo económico socialmente justo y ambientalmente sostenible.

COMISIÓN MACRO
CONSEJO DE RECTORES DE VALPARAÍSO



**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE SUBPRODUCTOS PROVENIENTES
DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS ELABORADOS A PARTIR
DE ORUJOS DE VARIEDADES BLANCAS Y TINTAS Y SU
UTILIZACIÓN COMO BIOFERTILIZANTES.**

Francisco Javier González Quiroz
Agronomía
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Profesor Guía:
Dr. Alejandro Cáceres Mella

MARCO TEÓRICO

La industria vitivinícola es una de las más importantes a nivel mundial que conlleva procesos muy industrializados, con un importante rol en el mercado internacional, relevante en varios países. La superficie mundial es de 7,5 millones de hectáreas según la Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV), con una demanda de cerca de 23,4 mil millones de litros de vino al año (Buzetti, 2018). En Chile la producción de vinos tiene gran relevancia, donde la producción del año 2021 subió cerca de un 29% en comparación al año 2020, produciendo más de 13,4 millones de hectolitros (hL) declarados, cifra récord junto con las exportaciones, donde 8,7 millones de hL fueron exportados, representado cerca del 65% de la producción (SAG, 2022). Esto fue debido a las favorables condiciones climáticas, dado el incremento de las precipitaciones en comparación a las sequías de años anteriores, junto con la baja influencia de los fenómenos climáticos como “El Niño”.

En contraste a las grandes producciones, la industria vitivinícola requiere de grandes cantidades de agua involucradas en procesos destinados a la limpieza de equipos, además de ser una de las industrias que genera más residuos, con cerca de 8,5 millones de toneladas por año, contribuyendo a la acumulación de estos residuos sólidos y líquidos los cuales tradicionalmente no son valorizados y terminan desechados en pilas, pudiendo generar un gran impacto ambiental si no son debidamente tratados. Estos residuos son susceptibles a la descomposición por microorganismos los cuales metabolizan gases de efecto invernadero, malos olores y contaminación en los suelos y fuentes hídricas (Rodrigues *et al.*, 2020).

En contexto nacional, el plan de estrategias y desafíos para el 2025 propone el consolidarse y posicionarse como unos de los primeros productores de vinos premium, sustentables y diversos en el mundo, enfocado en el desarrollo de la industria en materias ambientales como el buen manejo de los recursos naturales, donde el crecimiento a partir de estos recursos genera la oportunidad de implementar tecnologías nuevas (Cárdenas, 2020).

La gestión de residuos ha comenzado a tomar más protagonismo, dado los cuestionamientos al modelo tradicional de gestión de residuos, la concientización de los consumidores, los cuales se han vuelto más exigentes frente a la huella de carbono generada por la industria y criticada en el ámbito social. Esto ha propiciado la necesidad de buscar alternativas para la valorización y gestión de residuos, lo cual se ha vuelto uno de los desafíos a solucionar dentro del sector, donde la correcta gestión de residuos implica el mitigar el impacto ambiental y fomentar una intervención más armoniosa con el ecosistema, junto a un buen manejo de los recursos naturales (Pires & Sueli, 2020).

Existe un alto potencial de valorización para los residuos, en especial los orujos, donde en la actualidad son fuente de extracción de compuestos químicos importantes no solo dentro de la industria vitivinícola, también en áreas del cuidado personal y salud como cosméticos, medicina, entre otros. Actualmente estos residuos generados, principalmente orujos, son valorizados mediante tratamiento químicos y biológicos (Hungria, 2019).

Con base a la valorización de residuos, existen varios métodos para la extracción de compuestos químicos, donde en general constituyen prácticas de gestiones lineales, estas extracciones no aprovechan en su totalidad la biomasa residual generada,

por ende conceptos como la “biorrefinería” tiene como objetivo un enfoque hacia la producción de cero residuos, siendo estos utilizados como materia prima a partir de procesos que involucran la producción de combustibles y energía, siendo una de las soluciones para lograr un enfoque circular en el marco económico y de reutilización de residuos (Rodríguez *et al.*, 2020). En nuestro país, actualmente existen varias plantas destinadas a la producción de biogás, a través residuos de origen ganadero y urbano, donde solo una se encuentra dedicada a la producción de biogás con residuos agrícolas, como lo es la Viña San Pedro, la cual abastece cerca del 60% de la energía demandada por el viñedo (Fernández, 2018).

Pese a que la producción de biogás tiene como objetivo principal la generación de metano (CH_4) con fines energéticos, este genera otros subproductos denominados digestatos o digeridos, los cuales son resultante de la materia orgánica (líquida y/o sólida) la cual no se ha degradado por completo en los procesos de digestión anaeróbica, lo que constituye una fracción no menor de residuos. Estas fracciones a través de diversos estudios y aplicaciones se ha determinado un gran potencial para poder ser incorporados en el suelo, debido a los contenidos de microorganismos beneficiosos (involucrados en la mineralización de nutrientes), nutrientes minerales de utilidad y su fracción de agua. Estudios realizados en maíz señalan que el uso de digestatos tuvo efectos positivos en la disponibilidad de Fósforo (P) así como también en el rendimiento y sin llegar a modificar las propiedades del suelo como el pH y la conductividad eléctrica (CE) en el corto plazo (Marcos *et al.*, 2019). Este estudio permite evidenciar el potencial de los digestatos incorporados en suelos agrícolas, además de generar un ahorro en recursos no renovables como lo es el gas y el P, obtenidos de la producción de biogás y digestatos respecti-

vamente. Otros estudios enfocados en la respuesta del suelo ante la aplicación de digestatos en plantaciones de Álamos, señalan un aumento en la diversidad e intensidad de genes implicados en los ciclos de nutrientes esenciales como N, P y K, aumentando el microbioma del suelo de forma favorable (Rena *et al.*, 2020).

Existen factores importantes que están implicados en la calidad de los digestatos como biofertilizantes, como la composición nutricional, el contenido de materia orgánica y la estabilidad microbiológica (Baryga *et al.*, 2021). Los residuos de la industria vitícola, especialmente los orujos, varían en su composición general según múltiples factores, ya sea de acuerdo con el tipo de uva y variedad, como las condiciones edafoclimáticas y el proceso enológico realizado. Estos podrían ser clasificados de acuerdo con sus procesos de vinificación empleados para aquellos orujos fermentados (tintos) y no fermentados (blancos) (Fernández, 2020), ya que esto implica una composición macromolecular diferente.

La disponibilidad de los orujos, dependen del tipo y cepa de vino a elaborar (blanco o tinto), variando en la disponibilidad de los digestatos obtenidos para su incorporación en suelos, teniendo en cuenta el tiempo para su estabilización, almacenamiento o uso directo (Fernández, 2018). Por ende, el almacenamiento de estos digestatos debe estar relacionado al programa de fertirriego óptimo para su aplicación en el cultivo.

Actualmente la utilidad de los digestatos en la vitivinicultura es poco estudiado, referente a la composición química de estos, los cuales varían según las características fisicoquímicas del sustrato a digerir y los parámetros establecidos durante el proceso de producción de biogás. Por lo cual, la realización de

estudios para establecer la composición y caracterización de estos digeridos, proveniente del tipo de orujos, significaría una alternativa frente a los fertilizantes tradicionales.

Hipótesis

- Dada la composición química de los orujos provenientes de variedades tintas como Cabernet Sauvignon, los digestatos obtenidos tendrán mayor concentración de compuestos nitrogenados, fosforados y materia orgánica en comparación a los digestatos obtenidos de variedades blancas como Chardonnay.

Objetivo General

- Determinar y comparar el potencial nutricional de los digestatos obtenidos de la digestión anaeróbica, a partir de orujos provenientes de variedades blancas y/o tintas en relación con sus características como biofertilizante.

Objetivos Específicos

- Establecer los parámetros determinantes como pH, temperatura y potencial redox ideales para la producción de biogás en base a orujos blancos y/o tintos, por medio de una revisión bibliográfica.
- Comparar la composición nutricional, contenido de materia orgánica y estabilidad microbiológica entre los digestatos provenientes de orujos blancos var. Chardonnay y tintos var. Cabernet Sauvignon para su uso como biofertilizantes.
- Analizar el comportamiento de la composición nutricional de los digestatos almacenados.

METODOLOGÍA

1. Lugar de estudio

La investigación se realizará en un predio vitivinícola de 100 Ha, con variedades de Chardonnay (50 ha) y Cabernet Sauvignon (50 ha), ubicado en la Región de O'Higgins en la zona vitivinícola del Valle Central. La obtención de los orujos será realizada posterior a la fermentación alcohólica en el caso de la elaboración de vinos tintos y posterior a las labores de prensado en el caso de la elaboración de vinos blancos.

2. Diseño Experimental

El diseño experimental para la producción de biogás y obtención de los digestatos se basará en dos tratamientos T1: Orujos de Cabernet Sauvignon y T2: Orujos de Chardonnay, los cuales tendrán una distribución completamente al azar. Cada tratamiento tendrá un sistema a escala (Figura 1) que constará de biodigestores de tipo Batch con salida de biogás y una cámara de descarga donde será depositado los digestatos obtenidos.

La dosificación para incorporar en cada biodigestor será de 22,5 Kg de orujos correspondiente al 25% de materia orgánica y 67,5 L de agua, para una capacidad útil del biodigestor de 75% del volumen (Escobar, 2015), además se deberá agregar una dosis de cal agrícola para ajustar el pH (6.0 – 8.0) a concentraciones adecuadas para la correcta eficiencia de los biodigestores. Estos sistemas a escala estarán ubicados al azar (Figura 2) bajo una estructura de galpón con medidas 8 x 15 x 6,8 metros, la cual permitirá disminuir la temperatura en donde se instalarán los biodigestores y tanques de almacenamiento de los digestatos, que corresponden a bidones herméticos de 200 L para ser analizados posteriormente en las etapas de fertilización de *Vitis vinifera*.

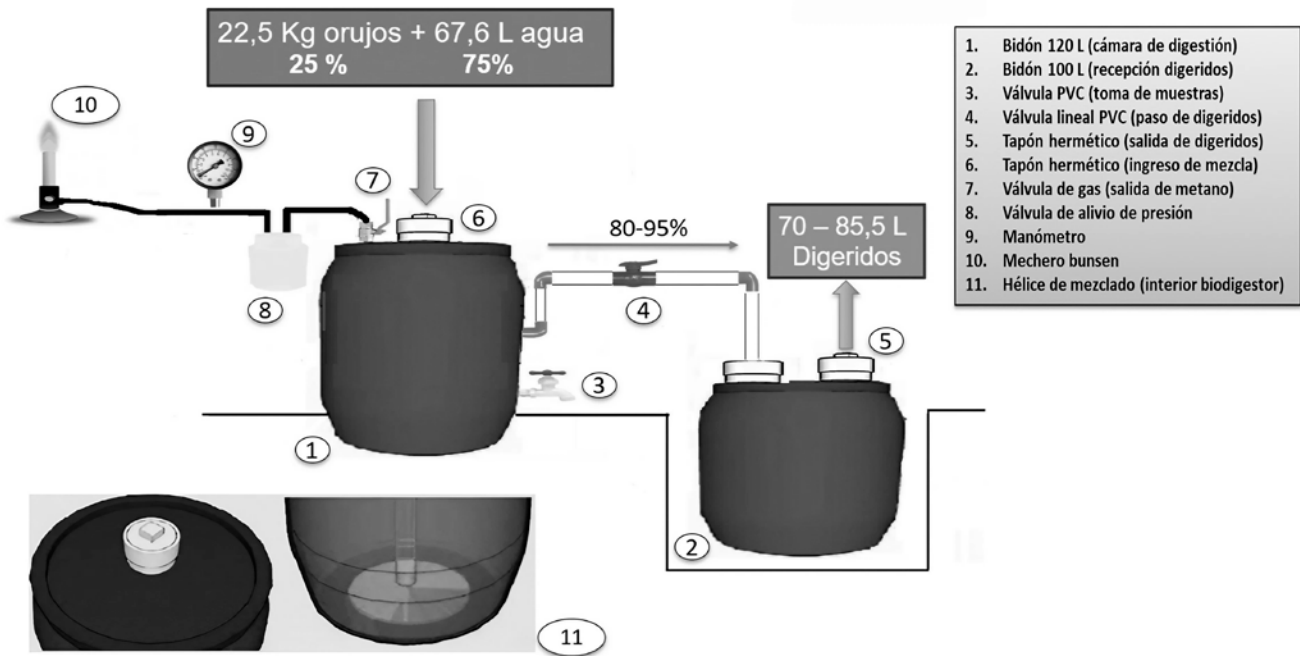


Figura 1. Esquema del sistema continuo a escala de tipo Batch.
Fuente. Elaboración propia, 2022.

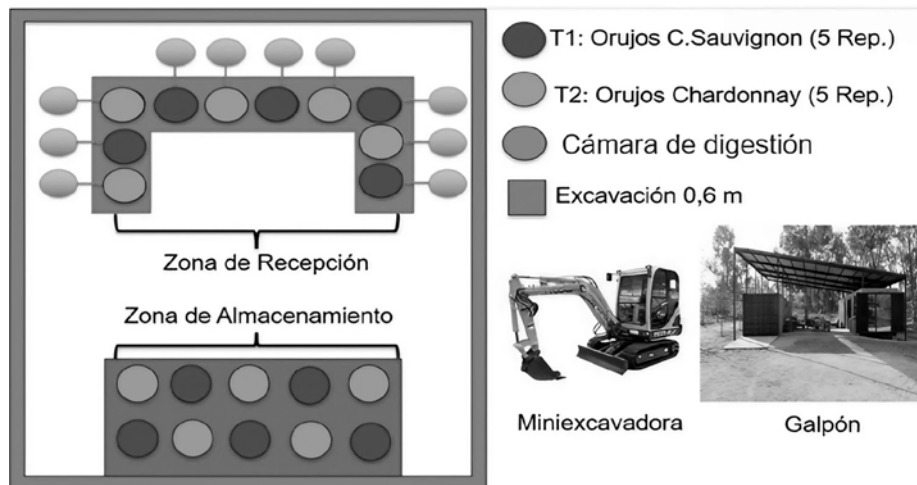


Figura 2: Esquema del diseño experimental.
Fuente: Elaboración propia, 2022.

Se realizarán 5 repeticiones por tratamiento, donde cada repetición corresponderá a un bidón, teniendo en cuenta la obtención de 2 rondas de digestatos durante la época de vendimia, esto en relación con el tiempo de retención hidráulico de cada modelo a escala, basado en la relación entre la temperatura media registrada en la zona de ubicación, donde se da la temperatura media de 20°C el tiempo de retención será de 30 días (Fernández, 2018).

3. Incorporación de mezcla orgánica a los biodigestores

La cantidad de materia orgánica a incorporar en los biodigestores se obtuvo de Sailer, el cual señala que la velocidad de carga de materia orgánica esta dado por la capacidad útil de los biodigestores en relación con el

tiempo de retención. Se incorporarán una cantidad de 1,5 Kg de orujos junto con 5 L de agua cada dos días, basado en la Velocidad de Carga Orgánica (VCO) y según las proporciones entregadas (Escobar, 2015), junto a la mezcla se aplicarán dosis de cal agrícola para mantener los parámetros óptimos de pH en los biodigestores.

4. Control de parámetros de los biodigestores

Se realizará un control de los parámetros cada dos días en conjunto con la incorporación de mezcla a los biodigestores, estos análisis constarán de mediciones de pH, humedad, temperatura y potencial Redox mediante el uso de un pH-metro, termohigrómetros y medidor de ORP, respectivamente; con la finalidad de mantener el control de los parámetros al interior de los biodigestores (Tabla 1).

Tabla 1: Parámetros fisicoquímicos óptimos para la correcta digestión anaeróbica.

Parámetros Fisicoquímicos	Rangos óptimos	Características
pH	7.0 – 7.8	Control periódico, factor determinante, dependiente en la generación de biogás.
Potencial Redox	-370 y -220 Mv	Medio reductor necesario para la formación de microorganismos metanogénicas.
Temperatura	15°C – 55°C Psicrófilos: 15°C-25°C Mesófilicos 25°C- 40°C Termófilicos: 40°C – 55°C	Control periódico, factor determinante, dependen del tipo de bacteria y su tolerancia a las temperaturas. Donde entre más temperatura mayor la degradación.
Relación C/N	20:1 – 30:1 Se puede añadir codigestores para suplir.	Elementos claves para el desarrollo de microorganismos donde el Carbono (C) es fuente de energía y el Nitrógeno (N) usado para regeneración y crecimiento.
Relación Ácidos orgánicos y Carbonatos inorgánicos.	0,4 – 0,3 (mg CaCO ₃ /L)	Parámetros preventivos para detectar problemas biológicos en los biodigestores.
Materia Seca (MS)	Biodigestión Húmeda: 1% < MS < 16% Biodigestión Líquida: MS < 1% Biodigestión Seca o Semiseca: MS > 20%.	Relacionado con las tecnologías a aplicar en los biodigestores, principalmente en procesos de agitación para la homogenización de la mezcla.
Sólidos Volátiles (SV)	Resultado de la MS llevada a 550°C durante 6 horas.	Usado para llevar a cabo el tipo de tecnología utilizada.

Fuente: Elaborado de datos obtenidos de FAO, 2019.

Con relación a los análisis de los digeridos, serán enviados al laboratorio AgroLab ubicado en la Región Metropolitana para su respectivo análisis de fertilizantes orgánicos que entregara datos referentes a pH, humedad, cantidad de materia orgánica, compuestos nitrogenados, compuestos fosforados y estabilidad microbiológica. Estos análisis de fertilizantes serán realizados durante las etapas de fertilización en *Vitis vinifera*, la cual será en primera instancia antes de que el cultivo ingrese a fase de receso (digestatos frescos), posteriormente al comienzo de la brotación, cuando los brotes tengan más de 15 cm de longitud (digestatos almacenados) y, por último, el tercer análisis se realizará posterior a la floración y antes del envero (digestatos almacenados) (Figura 3). Estos análisis tienen la finalidad de comparar el contenido de los biofertilizantes al ser almacenados en relación con los programas de fertirriego del cultivo.

5. Análisis Estadístico

Para el análisis de datos se ocupará el método estadístico t-Student, el cual permite la comparación

entre dos muestras independientes con una distribución normal y varianza similares, donde en este caso serán los tratamientos T1 y T2, con un nivel de significancia del 95% ($p \leq 0,05$).

6. Plan de Trabajo

El plan de trabajo tendrá una duración de 1 año comenzando desde diciembre del 2023 hasta diciembre del 2024. Este contara con 6 etapas descritas en la Tabla 2.

7. Presupuesto del proyecto

El presupuesto del proyecto tendrá un costo total, contabilizando el 5% de imprevistos, de \$50.892.267, este costo estará asociado en primera instancia a los Recursos Humanos contabilizando la contratación del ingeniero agrónomo a cargo del proyecto junto a un ayudante el cual será capacitado para labores de control de parámetros e ingreso de mezcla en los biodigestores. Los recursos humanos corresponden al 33,0% del presupuesto del proyecto.

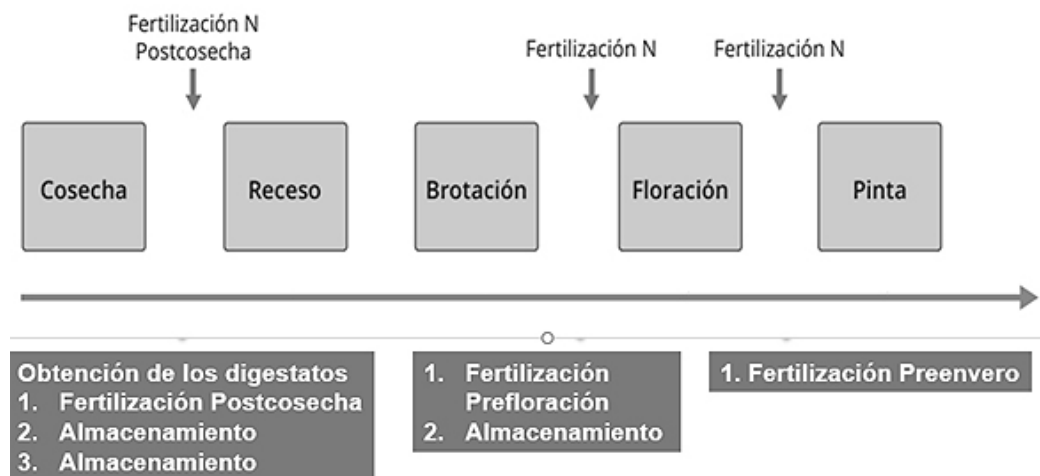


Figura 3. Fertilización nitrogenada con relación al estado fenológico y obtención de digestatos. Fuente. Elaboración propia con datos obtenidos de Bordeu & Brossard, 2020.

Tabla 2: Carta Gantt de actividades a realizar.

Plan de trabajo	2024												
Años	2024												
Meses	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Etapa 0 : Planificación del proyecto y establecimiento de la infraestructura													
0.1 Acuerdo y firma con el predio vitivinícola													
0.2 Arriendo de vehículo													
0.3 Cotización de servicios, herramientas y materiales													
0.4 Cotización de insumos y equipos de análisis y control de parámetros													
0.5 Selección del personal (entrevistas)													
0.6 Contratación de servicios de maquinaria y construcción													
0.7 Compra de materiales, insumos, herramientas y equipos													
0.8 Excavaciones y montaje de estanques de almacenamiento													
0.9 Construcción del galpón													
Etapa 1: Montaje de biodigestores y capacitaciones del personal													
1.0 Recepción de materiales													
1.1 Recepción de herramientas, equipos e insumos													
1.2 Contrucción y montaje de biodigestores													
1.3 Capacitación del personal en control de parámetros e incorporación de mezclas													
Etapa 2 : Inicio del proceso de biodigestión anaeróbica													
2.1 Obtención de muestras de orujos de Chardonnay													
2.2 Incorporación de mezcla de orujos Chardonnay													
2.3 Control de parámetros biodigestores tratamientos Chardonnay													
2.4 Obtención de muestras de orujos de Cabernet Sauvignon													
2.5 Incorporación de mezcla de orujos Cabernet Sauvignon													
2.6 Control de parámetros biodigestores tratamientos Cabernet Sauvignon													
Etapa 3 : Almacenamiento y obtención de los digeridos													
3.1 Obtención de digeridos de Chardonnay													
3.2 Almacenamiento de digeridos de Chardonnay													
3.3 Obtención de digeridos de Cabernet Sauvignon													
3.4 Almacenamiento de digeridos de Cabernet Sauvignon													
Etapa 4 : Analisis de digeridos													
4.1 Preparación y envió de muestras frescas de digeridos de Chardonnay y Cabernet Sauvignon													
4.2 Preparación y envió de muestras almacenadas de digeridos de Chardonnay y Cabernet Sauvignon													
Etapa 5: Obtención y análisis de resultados													
5.1 Obtención de datos de digeridos frescos de Chardonnay y Cabernet Sauvignon													
5.2 Obtención de datos de almacenados de Chardonnay y Cabernet Sauvignon													
5.3 Análisis y comparación de resultados obtenidos													

Fuente. Elaboración propia, 2023.

En el proyecto se requerirá la contratación de empresas externas, para principalmente la construcción del galpón junto con el arriendo de maquinaria y vehiculó para la movilización de muestras, además de los costos asociado al análisis de laboratorio. Los subcontratos representaran el 46.6% del presupuesto del proyecto.

Por último, la adquisición de los materiales, insumos y equipos requeridos para la realización de la investigación tanto en la construcción del modelo a escala de los biodigestores como los insumos y materiales asociados control de parámetros e ingreso de mezcla junto con equipo de seguridad para el personal, tendrá un costo asociado a 20,4% del total del presupuesto del proyecto de investigación.

CONCLUSIONES

En relación con los objetivos planteados en el proyecto de investigación y la hipótesis, se espera lograr cumplir los objetivos establecidos, manteniendo controlados los parámetros al interior de los biodigestores durante la digestión anaeróbica para lograr tener digeridos libre de microorganismos para ambos tratamientos (T1-T2), logrando una estabilidad microbiológica.

Dada la hipótesis planteada el tratamiento T1 debería tener mayor concentración de compuestos nutricionales en comparación con el tratamiento T2 (Figura 4), aunque en ambos casos se espera una disminución de los compuestos específicamente nitrogenados por perdidas por volatilización durante los meses almacenados.

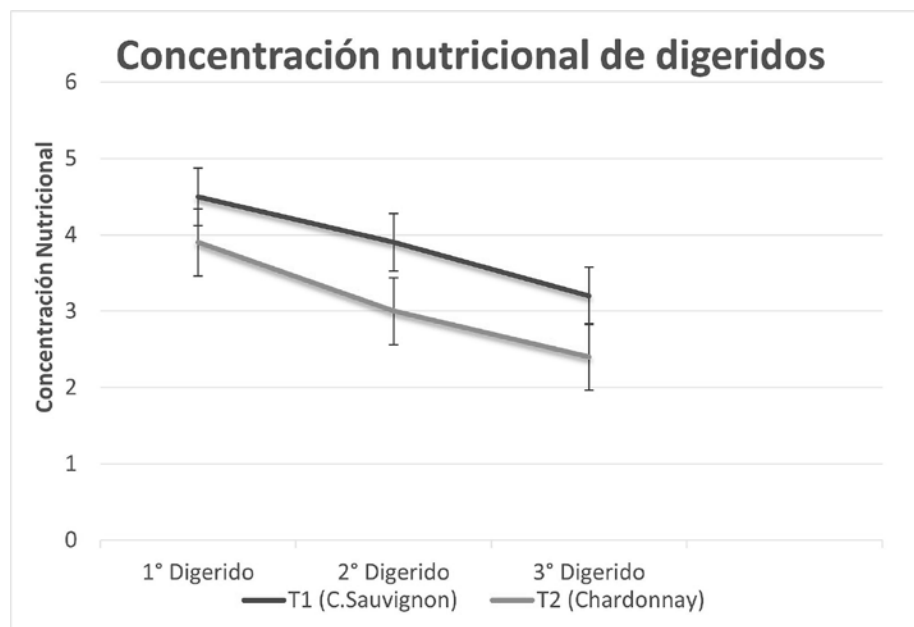


Figura 4. Concentración nutricional esperada para los tratamientos.
Fuente. Elaboración propia, 2023.

REFERENCIAS

- Baryga, A., Polec, B., & Klasa, A. (2021). The effects of soil application of digestate enriched with P, K, Mg and B on yield and processing value of sugar beets. *Fermentation*, 7(241), 1-17 pp.
- Bordeu, E., & Brossard, N. (2020). Acciones para una vitivinicultura sustentable e inocua. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile, 152 pp.
- Buzetti, C. (2018). Una mirada al mercado vitivinícola nacional e internacional, ODEPA, Chile.
- Cárdenas, D. (2020). Análisis Evolutivo de la Industria Vitivinícola en Chile. Universidad de Chile, Santiago.
- Escobar, D. (2015). Diseño y factibilidad de planta de biogás en una vitivinícola. Universidad del Bio-Bio, Concepción, Chile.
- FAO. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. Colección de documentos técnicos, 12, Buenos Aires, 104 pp.
- Fernández, A. (2020). Orujo de uva: Rico en compuestos fenólicos con "actividad antioxidante" para producir carne y leche saludable. CERBAS, 9 p.
- Fernández, C. (2018). Análisis técnico económico para instalación de planta de biogás utilizando residuos vitivinícolas para generación de energía en la Región del Maule. Universidad Técnico Federico Santa María.
- Hungría, J. (2019). Reciclaje de residuos y subproductos derivados de la industria vitivinícola. Universidad de Córdoba.
- Marcos, B., Rosana, M., & Amí, S. (2019). Uso de digestatos como biofertilizante derivado de la generación de biogás. Congreso Argentino de la ciencia del Suelo. Córdoba, Argentina.
- Pires, C., & Sueli, E. (2020). Winemaking, Environmental Impacts and Sustainability: New Pathways from Vineyard to Glass? Federal University of Santa Catarina.
- Rena, T., Yua, X., Liao, J., Dua, Y., Zhua, Y., Jina, L., Wanga, B., Xua, H., Xiaob, W., Chenb, H., Jina, F., & Ruana, H. (2020). Application of biogas slurry rather than biochar increases soil microbial functional gene signal intensity and diversity in a poplar plantation. *Soil Biology and Biochemistry*, 146.
- Rodrigues, R., Gando-Ferreira, L., & Quina, M. (2020). Increasing Value of Winery Residues through Integrated Biorefinery Processes: A Review. *Molecules*, 2-4 pp.
- Servicio Agrícola y Ganadero (2022). Informe Final Producción de Vinos 2022. ODEPA, Chile.



CRUV
CONSEJO DE RECTORES
DE VALPARAÍSO



Universidad de
Playa Ancha

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA GENERADA EN
UN HUMEDAL CONSTRUIDO A ESCALA PILOTO PARA
EL TRATAMIENTO DE AGUAS GRISES EN LA ZONA DE
COLLIGUAY**

Javiera Ignacia Arquero Carrasco
Ingeniería Civil Ambiental
Universidad de Playa Ancha

Profesor guía
Marisol Belmonte Soto

Profesor Co-Guía
Dr. Ismael Leonardo Vera Puerto

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la calidad del agua generada en un humedal construido de flujo vertical (HFV) a escala piloto, empleado para el tratamiento de aguas grises (AG) de una vivienda unifamiliar integrada por 4 personas, para su potencial reúso en el riego de árboles frutales. Esto como alternativa de solución basada en la naturaleza para afrontar el problema de la sequía en las zonas rurales (ZR) de Chile. Para ello se monitoreó la calidad de agua (influyente y efluente) de un HFV (instalado en la localidad rural de Colliguay, Comuna de Quilpué) que trata las AG provenientes de la cocina, ducha, lavadora y lavamanos. El HFV está constituido por material de soporte (grava/arena/grava) y *Typha* spp (macrófita), cuya dimensión es de 1 m x 2 m x 1 m. Este sistema estaba constituido además por tratamiento primario, secundario (HFV), y una etapa de desinfección, para finalmente el agua generada ser almacenada en un tanque para su posterior uso en el riego de árboles frutales. El monitoreo del HFV se realizó cada tres semanas evaluando parámetros como: temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, turbidez, demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (NT), amonio (NH_4^{+}), nitrito (NO_2^{-}), nitrato (NO_3^{-}), fosfato y coliformes fecales, entre otros. Los resultados obtenidos demuestran que la composición del AG está de acuerdo con lo encontrado en literatura, a excepción de la DQO (~800 mg/L promedio afluente) y compuestos nitrogenados (~20 mg/L promedio afluente), cuya concentración fue mayor en comparación con los valores de diseño del HFV (DQO: 200 mg/L, NT: 7 mg/L). Esto se debe a que, en el hogar, reutilizan el agua del lavaplatos y de la lavadora, antes de eliminarla por el alcantarillado. En cuanto a la calidad del efluente, los resultados muestran que el HFV es eficiente para la eliminación de compuestos como

DQO (>80%), NH_4^{+} (>70%), entre otros, cumpliendo con la NCh1333, sugiriendo que estos sistemas pueden tratar las AG, y ser una alternativa para recuperar agua para riego mitigando la sequía en las zonas rurales de Chile.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población, junto con el uso intensivo de los recursos naturales sumado a los efectos del calentamiento global, han ejercido una presión importante sobre el recurso hídrico disponible para el desarrollo de las diversas actividades humanas. El plan de sequía publicado por el gobierno de Chile en el año 2015, indican que en la actualidad se atraviesa por una escasez hídrica imponente, viéndose reflejado en el déficit de precipitaciones entre un 60 y 80% del promedio histórico, comprendido entre las regiones de Atacama y La Araucanía (<https://www.gob.cl/noticias/las-medidas-que-componen-el-plan-nacional-para-la-sequia/>). En ellas las zonas rurales (ZR) han tenido el mayor impacto de la sequía, debido a que, tanto pozos como napas se han secado, afectando a los sistemas de Agua Potable Rural (APR), los cuales son un importante medio para el abastecimiento de agua potable para estas zonas (Garreaud et al., 2020). Debido a esto, algunas localidades se han visto obligadas a ser abastecidas por camiones aljibes, e incluso han llegado a racionar dicho recurso.

Esto ha traído consigo la búsqueda de nuevas fuentes de agua que permitan el desarrollo humano y la conservación de los ecosistemas cada vez más vulnerables. Ante este escenario, el uso de las aguas residuales domésticas (ARD) como nueva fuente de recurso cobra relevancia.

Las ARD se caracterizan por presentar una serie de contaminantes que afectan a la salud humana y al

medio ambiente. Dentro de las ARD se encuentran las aguas negras que presentan una carga importante de materia orgánica (sólidos) y patógenos y que se originan en los retretes; mientras que, las aguas grises (AG) corresponden aquellas que son generadas principalmente en las cocinas, lavamanos, lavavajillas y lavandería, y que se caracterizan por presentar grasas y aceites, materia orgánica, microorganismos, entre otros (AIDIS, 2017; Vera-Puerto et al., 2017).

Los principales contaminantes presentes en las ARD son los sólidos suspendidos, materia orgánica, microorganismos patógenos, nutrientes, compuestos tóxicos, metales pesados, detergentes, grasas y aceites, entre otros (Ramalho, 1996).

Una alternativa que ha surgido ante la problemática hídrica es el reúso de las AR como una fuente de agua, principalmente para el riego en zonas rurales (ZR). Para ello existen una serie de tecnologías para tratar las AR y así satisfacer ciertas necesidades. Dentro de estas tecnologías se encuentran los sistemas convencionales de lodos activos (LA), que han sido utilizadas en zonas urbanas con una alta eficiencia en la eliminación de los contaminantes (materia orgánica sobre el 70%) (Ramalho, 1996; SISS, 2022).

Sin embargo, estos sistemas centralizados aplicados en las zonas rurales no han sido eficientes en el tratamiento por diversas razones, como falta de acceso a un sistema de recolección de las AR, elevados costos de inversión para este tipo de tecnologías, así como la dificultad en el manejo operacional del uso de esta tecnología, entre otros (Toledo, 2017; Vera-Puerto et al., 2016). De este modo la aplicación de sistemas descentralizados basados en el uso de tecnología que tienen como fundamento ecosistemas naturales como son los humedales, emergen

como una potencial solución para hacer frente al tratamiento, en este caso de las aguas grises, así como también en la obtención de un agua tratada con potencial calidad para ser reutilizada en la agricultura.

Los humedales como ecosistemas naturales, cumplen la función en los sistemas de cuencas hidrográficas como un gran sistema renal, capaz de depurar las aguas, asociando diversidad biológica y favoreciendo la conservación de la flora y fauna, albergando una gran cantidad de especies. Son considerados ecosistemas productivos de innumerables géneros de animales y plantas, las que dependen de éste para subsistir. Por otro lado, son sustentables en calidad hídrica, siendo capaces de depurar, filtrar, absorber, acumular y eliminar (Vera-Puerto et al., 2017).

Estos ecosistemas han sido emulados en el ámbito ingenieril y tecnológico, constituyendo los humedales construidos (HC). Esta tecnología usada para el tratamiento de AR es basada en la naturaleza, su principal función es depurar AR mediante la combinación de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren de manera natural en los humedales, logrando transformar los contaminantes presentes en las AR en compuestos inocuos, convirtiéndose en una tecnología más sustentable ambientalmente (Vera Puerto et al., 2017).

Dentro de la tecnología de HC existen diferentes configuraciones de acuerdo por ejemplo al tipo de flujo que han sido aplicados para el tratamiento de diversos tipos de AR. A destacar están los humedales de flujo superficiales (HFS) y los humedales de flujos subsuperficiales (HFSS), los cuales se subdividen en humedales de flujo vertical (HFV) y flujo horizontal (HFH) (Vera Puerto et al., 2017; 2016; CE-HUM, 2022) (Figura 1).

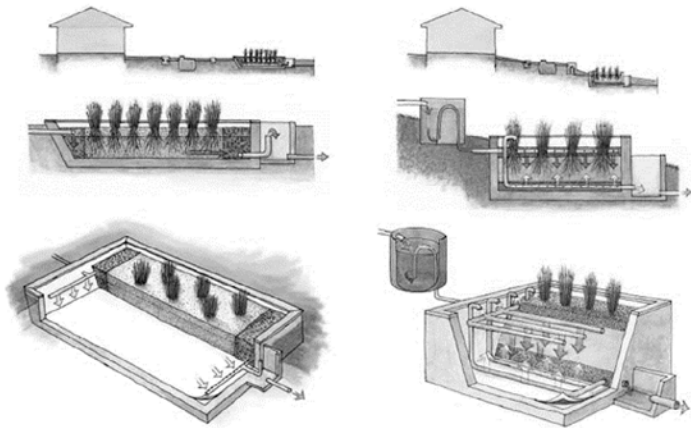


Figura 1. Esquema de sistema de humedales de flujo subsuperficial, izquierda de la imagen de flujo horizontal, derecha de la imagen de flujo vertical (Proyecto FSEQ210015).

(extraído de: <https://cehum.org/proyecto-anid/>).

Los HFV son utilizados como tecnología de tratamiento para etapas secundarias (eliminación de materia orgánica) y/o terciarias (eliminación de compuestos específicos, por ejemplo: compuestos nitrogenados), además trabajan en condiciones aeróbicas, por lo que son bastante eficientes para la remoción de nutrientes.

Estructuralmente los humedales están compuestos por plantas, microorganismos, material de soporte y el agua residual como sustrato. Las AR actúan como sustrato, el cuál es transformado por acción biológica de los microorganismos y las raíces de las plantas en contacto con el material de soporte, filtrando y trasladando los contaminantes, obteniendo un agua tratada con menor concentración de contaminantes, mediante los procesos físico, químicos y biológicos (Vera-Puerto et al., 2017).

El material de soporte de un HC consta generalmente de un medio poroso de arena, grava y/o gra-

villa, que se encuentran en contacto con las raíces y rizomas de las plantas, y actúa como medio para lograr los procesos como adsorción y precipitación. Además, los HC deben contar con un material aislante, que tiene como función confinar, prevenir la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas que se encuentran en el área a utilizar durante el periodo de permanencia de las AR en el humedal, es decir evitar la lixiviación del AR (Vera-Puerto et al., 2017).

La vegetación en consorcio con los microorganismos presentes en el soporte tiene como principal función degradar la materia orgánica y asimilar los nutrientes presentes en el agua residual, a través de los rizomas. Los microorganismos son los encargados de realizar el tratamiento biológico, como transformar compuestos a sustancias, un ejemplo es el traspaso de fósforo a formas solubles para poder ser asimiladas por las plantas (Vera-Puerto et al., 2017).

Para llevar a cabo la purificación en el humedal se cuentan con procesos físicos, químicos y biológicos, por ende, cada eliminación de contaminantes se hace con distintos procesos. Para mejorar la eficiencia del HC y evitar con ello la obstrucción del sistema se requiere de etapas previas de eliminación de la fracción sólida gruesa o de grasas y aceites presentes en el AR. En los humedales la retención de los sólidos suspendidos (SS) (principalmente material coloidal) se da cerca de la zona principal del sustrato y a medida que se va filtrando, la capacidad de retención va disminuyendo. Mientras ocurre esto, a su vez los SS se generan por la fragmentación de desechos de vegetación, formación de precipitados químicos, entre otros. El porcentaje de remoción de los SS suele ser del 90% y su concentración normalmente borde los 20 mg/L (Vera-Puerto et al., 2013; Eriksson et al., 2009). En el caso de la eliminación

de la materia orgánica (MO), este es retenida en la primera parte del soporte mediante filtración, por lo que solo pasan las partículas más pequeñas, las que son hidrolizadas por enzimas expulsadas por bacterias heterótrofas aeróbicas y fermentativas facultativas en consorcio con el sistema radicular de las plantas. Estas partículas pueden ser retenidas por adsorción, degradación o quedar allí.

El nitrógeno, otro componente principal de las AR, es transformado en el HC de acuerdo al ciclo bioquímico, en donde actúan transformaciones bióticas/abióticas que favorecen distintas reacciones de oxidación y reducción, en donde los microorganismos cumplen un rol clave. Ejemplo de ello son los procesos tales como la amonificación, nitrificación y desnitrificación. La mayor parte del nitrógeno se presenta en forma de nitrógeno orgánico, amonio, nitrito y nitrato. De esta forma, el principal mecanismo de eliminación de nitrógeno es de origen microbiano, además también contribuyen la adsorción de amonio por el medio granular y la asimilación realizada por las plantas (Sánchez-Celis et al., 2018).

Para eliminar el fósforo es en condiciones bióticas, siendo asimiladas por las plantas y microorganismos y en condiciones abióticas, las cuales pueden ser absorbidas por el sustrato. El fósforo suele presentarse como fosfato en compuestos orgánicos e inorgánicos indiferentemente. Generalmente la eliminación suele ser compleja, ya que al principio tiene una buena eficiencia, pero se reduce rápidamente en poco tiempo, esto se debe a que el medio granular pierde su capacidad de adsorción (Durán, 2016) La eliminación de fósforo tiene un rendimiento aproximado de 10-20%, y no presenta grandes diferencias entre el uso de humedales verticales y horizontales (Vera-Puerto et al., 2013; 2016; 2017).

Las plantas utilizadas en los humedales son un factor importante, tanto en el diseño como en la operación. Estas son capaces de estabilizar el sustrato o material de soporte, limitar la canalización del agua servida, llevan a cabo la captación de materiales suspendidos, toman compuestos como el carbono, nutrientes y elementos traza para posteriormente incorporarlos en sus tejidos, transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos. Además, el tallo y los sistemas de la raíz generan circunstancias para que los microorganismos se fijen, y por otro lado previenen la colmatación del material de soporte.

Para que dichas plantas sean óptimas para la utilización en HC, deben tener ciertas características, como ser tolerantes a altas cargas orgánicas, proporcionar cuantiosas raíces y rizomas, por último y no menos importante, poseer biomasa aérea alta para asimilar nutrientes.

El conjunto de estos procesos en el HC favorece la obtención de un agua tratada con calidad suficiente para ser empleada para el desarrollo, por ejemplo, de la agricultura. Sin embargo, la aplicación de sistemas de HC de configuración de flujo vertical han sido poco estudiados para el tratamiento de AG, a diferencia de los HC de flujo horizontal o HC superficiales.

Al respecto, Vera et al. (2016) indican que estos sistemas pueden ser empleados no sólo para el tratamiento de las AR sino como potencial fuente de agua tratada para su uso en riego. Por lo que el determinar la calidad de este efluente resulta importante para el presente estudio.

En Chile los requisitos de calidad de agua para el uso en riego están definidos en la Norma Chilena (NCh) 1333 - Requisitos de calidad de agua del año 1978 (INN, 1978), mientras que, la NCh 409, estable-

ce las exigencias para la calidad de agua potable (INN, 1984), y en el caso del uso de las AG de origen doméstico, se rige por la NCh 3582, que establece los requisitos para su uso en el riego de áreas verdes (INN, 2018).

De acuerdo a lo anterior, el presente estudio se encuentra situado geográficamente en la Región de Valparaíso, Comuna de Quilpué, localidad de Colliguay. Debido a la situación actual de extrema sequía en la Región de Valparaíso, principalmente en las zonas rurales como Colliguay, es que se busca dar una solución para abatir la escasez mediante la utilización de AR, específicamente las AG que provienen de un hogar integrado por 4 personas, para su potencial uso en la agricultura. Esto mediante la aplicación de un HC de flujo vertical para el tratamiento de las AG.

Al respecto, la presente investigación tiene como pregunta científica: ¿el agua generada en un humedal construido de flujo vertical tiene la calidad adecuada para ser reutilizada en el riego de árboles frutales? Es decir, cumple con la NCh 1333.

El objetivo del presente estudio fue evaluar la calidad del agua generada en un humedal construido de flujo vertical a escala piloto, empleado para el tratamiento de aguas grises de una vivienda unifamiliar integrada por 4 personas, para su potencial reúso en el riego de árboles frutales.

METODOLOGÍA

Sistema de HFV a escala piloto para el tratamiento de AG

Para la realización de este estudio se utilizó un HFV construido por el PRODESAL (Programa de Desarrollo Local del INDAP de la Comuna de Quilpué) a

escala piloto, en el terreno de una familia campesina compuesto por cuatro integrantes. Este sistema se encuentra ubicado en la localidad rural de Colliguay, Comuna de Quilpué, Región de Valparaíso (33,19°S; 71,10°O), a unos 700 m.s.n.m.

Los materiales de construcción del HFV es en base a madera, impermeabilizado en su interior con una capa de plástico de alta densidad para evitar la lixiviación del agua hacia el suelo. El lecho del HFV está constituido por una capa que alterna grava, arena y grava. Las dimensiones del humedal son 1,0 m × 2,0 m × 1,0 m (ancho × largo × profundidad). De esto, solo un 0,8 m es utilizado para llevar a cabo el tratamiento.

Este sistema de tratamiento (Figura 2) está constituido por distintas etapas. El AG proveniente del lavaplatos de la cocina, lavamanos del baño, ducha y desagüe de la lavadora, son recolectadas, y conducidas hasta un tanque desgrasador y sedimentadores en serie, para eliminar la fracción sólida gruesa presente en el AG antes de ingresar al HFV. Mediante pulsos de descarga el AG alimenta al HFV, sistema que fue diseñado para la producción promedio de un AG de 300 L/d, equivalente al 80% de la producción total de ARD (Eriksson et al., 2009). Debido a la falta de información en cuanto a la composición del AG en la localidad, este sistema contempló en su diseño una concentración de materia orgánica expresada como demanda química de oxígeno (DQO) de 200 mg/L, y una de nitrógeno de 7 mg/L, según lo descrito por Eriksson et al. (2009) para sistemas de HFV. La unidad del HFV tiene como fin depurar la materia orgánica presente en el AG, junto con los nutrientes. Posteriormente, el efluente que sale del HFV pasa a un sedimentador secundario, para luego ingresar a la etapa de desinfección y finalmente a un tanque acumulador, para ser dispuesto para el riego de árboles frutales existentes en el lugar.

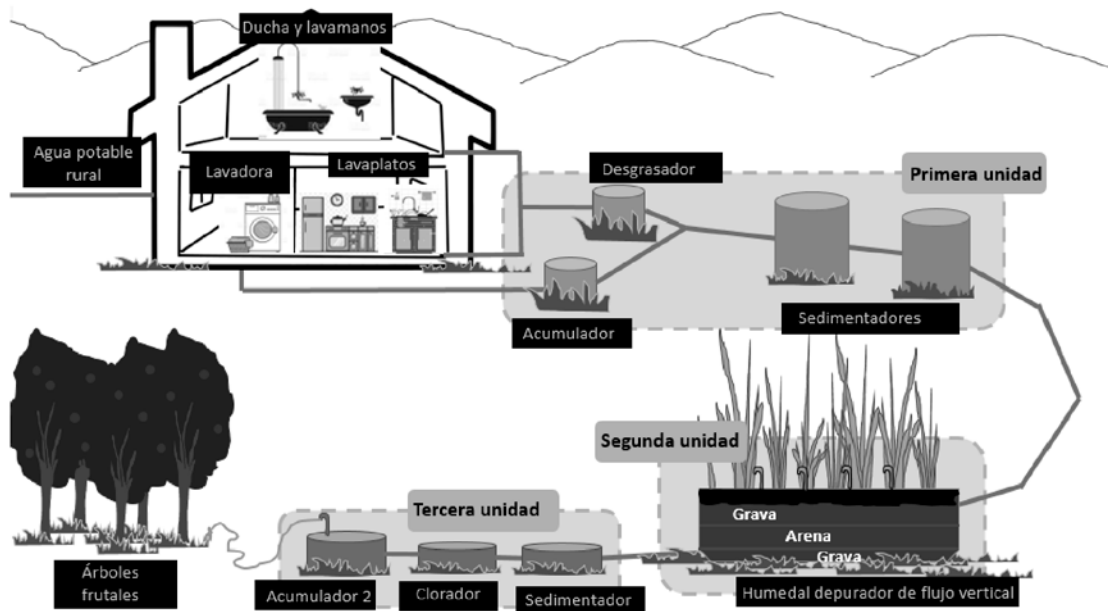


Figura 2. Esquema general del sistema de tratamiento de AG instalado en la localidad de Colliguay.

Como especie dominante se utilizó *Typha spp.* (Totorá) debido a su potencial como vegetación para sistemas de depuración basado en humedales, además, de ser una especie predominante en la zona de Colliguay, por lo que su adaptación al medio no fue un problema. Otro factor por el cual se utilizó, es que la especie se encontraba en el predio de la instalación del humedal, por lo que en el ámbito económico fue favorable. De esta forma la *Typha spp.* fue extraída del lugar, adaptándose de inmediato en el humedal. Se plantaron 4 individuos de totora por m² de humedal.

Monitoreo del sistema de HFV

Para evaluar la calidad del agua, se realizaron monitoreos cada tres semanas aproximadamente, recolectando muestras de agua a la entrada del humedal, a la salida inmediata de este, y en el tanque de almacenamiento. Esto desde marzo a noviembre

del 2022, es decir, en las estaciones de otoño, invierno y primavera.

Durante los monitoreos se realizaron mediciones de parámetros físico-químicos *in situ*, tales como: pH, oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), potencial redox (ORP), turbiedad (TU), salinidad y temperatura. A su vez se extrajeron muestras de agua para el análisis físico-químico y microbiológico en el laboratorio. Estas muestras una vez extraídas fueron transportadas manteniendo una temperatura de 4°C hasta el Laboratorio de Biotecnología, Medio Ambiente e Ingeniería (LABMAI) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Playa Ancha, para su análisis respectivo. Además, se extrajeron 3 muestras del tanque acumulador en los meses de Julio, Septiembre y Octubre para verificar el cumplimiento de la NCh 1333. Este análisis fue realizado por el Laboratorio del HUB-AMBIENTAL de la Universidad de Playa Ancha.

Métodos analíticos

Para las mediciones de los parámetros *in situ* (pH, OD, CE, ORP, turbiedad, salinidad y temperatura) se usó un equipo multiparamétrico portátil marca Hanna modelo HI9829-01042. Los análisis realizados en el laboratorio, tales como: nitrógeno de nitrito (N-NO_2^-), nitrógeno de nitrato (N-NO_3^-), nitrógeno de amonio (N-NH_4^+), fosfato (PO_4^{3-}), nitrógeno total (NT), fósforo Total (PT), DQO, demanda biológica de oxígeno (DBO5), y sólidos suspendidos totales (SST) fueron realizados de acuerdo a los procedimientos descrito por Standard Methods (2001) para la examinación del agua. En el caso del análisis microbiológico, se evaluó como indicador la presencia de coliformes fecales (CF), mediante la metodología del número más probable (NMP), teniendo de referencia la NCh 2313/22 Of.95 (INN, 1995).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las AG y funcionamiento del HFV

En las tablas 1, 2 y 3 se pueden observar los resultados obtenidos en relación a la caracterización fisicoquímica y microbiológica del AG, tanto a la entrada del HFV como a la salida, así como también la caracterización del agua que es acumulada en el tanque final, la que es empleada para el riego de árboles frutales. Lo anterior, considerando las distintas estaciones del año en los cuáles se realizó el monitoreo. En general, se observa que independiente de la época del año el AG presenta concentraciones de sólidos similares a lo encontrado para este tipo de agua (Boano et al., 2020). Sin embargo, la concentración de materia orgánica y nutrientes encontradas en este estudio, resultan elevadas (otoño e invierno con valores > 900 mg/L, y en

primavera >600 mg/L) al considerar que el diseño del HFV fueron de 200 mg/L de DQO y de 7 mg/L de nitrógeno total (Eriksson et al., 2009). Esto estaría explicado por el comportamiento que tiene la familia en cuanto al consumo del agua, ya que antes de descargar el agua de la cocina (lavaplatos) y del desagüe de la lavadora, ellos reutilizan esta agua. En cuanto a la presencia de microorganismos patógenos en el AG, se observó niveles bajo el límite de detección para coliformes fecales durante todos los monitoreos. En relación al comportamiento de los parámetros físico-químicos en el humedal, parámetros como el pH se mantienen cercanos a la neutralidad. El AG a la entrada del HFV mantiene un pH que fluctúa entre 6,69 y 6,78; para luego a la salida del humedal variar entre valores de 6,93 y 7,07. En el tanque acumulador el pH fluctúa entre 6,95 a 7,33, manteniendo valores cercanos a la neutralidad. La TU del AG disminuye por sobre el 97% a la salida del HFV, lo que refleja que este sistema es óptimo para reducir la fracción coloidal presente en el AG. Lo mismo ocurre con los SST, en donde los valores están bajo el nivel de detección. La materia orgánica expresada como DQO y DBO5 muestran una reducción entre el 81-86% para la DQO, mientras que para la DBO5 del casi 100%. Esto implica que el sistema de HFV es eficiente para eliminar la materia orgánica presente en el AG, considerando que presenta concentraciones elevadas a la entrada del sistema debido a la acción familiar. Un factor importante para la degradación biológica de la materia orgánica bajo condiciones aeróbicas es la concentración de OD, la cual aumenta a la salida del HFV. Esto debido a que el sistema a escala piloto tiene ductos que favorecerían el intercambio gaseoso al interior del humedal, para así realizar la degradación de la materia orgánica, como también la oxidación de los compuestos nitrogenados (amonio). En este aspecto, los nutrientes como el fosfato presente

en el AG fueron eliminados por el HFV por sobre el 70% durante invierno y primavera, ya que, en otoño, el sistema funcionó sin la recolección del desagüe de la lavadora. En cuanto al nitrógeno, el sistema presentó una eliminación del amonio pre-

sente en el AG por sobre el 92%, observando un incremento a la salida del humedal del nitrato, característico del proceso de nitrificación. En cuanto a la presencia de coliformes fecales, al igual que a la entrada del HFV a la salida no se detectan.

Tabla 1: Caracterización físico química y microbiológica del AG, a la entrada, salida del HFV y tanque acumulador final, durante la época de otoño.

Parámetros	Unidad	Valores promedios ± SD		
		Entrada del HFV	Salida del HFV	Tanque final
pH	-	6,71 ± 0,25	7,07 ± 0,14	7,14 ± 0,35
TU	NTU	143,75 ± 51,80	1,13 ± 0,70	0,60 ± 0,76
T	°C	14,88 ± 2,57	13,09 ± 2,84	11,95 ± 2,23
ORP	mV	S/I	S/I	S/I
OD	mg/L	1,04 ± 0,33	6,66 ± 1,18	7,19 ± 0,64
Nitrito	mg/L	S/I	S/I	S/I
Nitrato	mg/L	2,63 ± 1,12	9,13 ± 2,61	11,25 ± 1,91
Amonio	mg/L	17,22 ± 20,34	N/D	N/D
Fósforo	mg/L	S/I	S/I	S/I
Fosfato	mg/L	3,29 ± 1,17	1,71 ± 0,01	2,10 ± 0,94
Nitrógeno Total	mg/L	36,67 ± 21,22	15,00 ± 2,83	17,00 ± 0,00
Sulfato	mg/L	85,67 ± 22,81	86,33 ± 55,16	63,75 ± 13,82
SST	mg/L	0,19 ± 0,08	0,15 ± 0,00	0,00 ± 0,00
DQO	mg/L	950,67 ± 272,07	130,00 ± 0,00	92,00 ± 0,00
DBO ₅	mg/L	65,73 ± 65,68	0,92 ± 1,18	N/D
CF	NMP/100ml	<1,8 ± 0,00	<1,8 ± 0,00	<1,8 ± 0,00

N/D: No detectado; S/I: Sin información

Tabla 2: Caracterización físico química y microbiológica del AG, a la entrada, salida del HFV y tanque acumulador final, durante la época de invierno.

Parámetros	Unidad	Valores promedios ± SD		
		Entrada del HFV	Salida del HFV	Tanque final
pH	-	6,69 ± 0,21	6,93 ± 0,22	6,95 ± 0,25
TU	NTU	170,75 ± 33,54	5,03 ± 3,33	5,00 ± 4,77
T	°C	12,21 ± 1,64	9,36 ± 1,51	9,12 ± 1,45
ORP	mV	-185,50 ± 12,92	259,93 ± 126,20	244,33 ± 69,28
OD	mg/L	2,33 ± 0,28	7,11 ± 0,51	7,95 ± 0,21
Nitrito	mg/L	2,50 ± 0,71	N/D	N/D
Nitrato	mg/L	3,17 ± 1,03	5,00 ± 1,32	8,50 ± 1,41
Amonio	mg/L	16,28 ± 11,37	1,37 ± 2,43	0,35 ± 0,47
Fósforo	mg/L	3,57 ± 1,52	0,23 ± 0,27	0,09 ± 0,10
Fosfato	mg/L	23,85 ± 12,30	3,20 ± 0,97	3,35 ± 0,73
Nitrógeno total	mg/L	23,00 ± 1,34	14,40 ± 4,45	10,85 ± 1,06
Sulfato	mg/L	95,33 ± 25,11	92,67 ± 12,70	91,33 ± 30,57
SST	mg/L	0,08 ± 0,03	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,00
DQO	mg/L	927,67 ± 136,74	148,00 ± 31,61	125,67 ± 16,07
DBO ₅	mg/L	120,80 ± 0,00	N/D	N/D
CF	NMP/100ml	<1,8 ± 0,00	<1,8 ± 0,00	<1,8 ± 0,00

N/D: No detectado; S/I: Sin información

Tabla 3: Caracterización físico química y microbiológica del AG, a la entrada, salida del HFV y tanque acumulador final, durante la época de primavera.

Parámetros	Unidad	Valores promedios ± SD		
		Entrada del HFV	Salida del HFV	Tanque final
pH	-	6,78 ± 0,15	7,03 ± 0,59	7,33 ± 0,48
TU	NTU	161,50 ± 47,38	1,80 ± 1,56	0,85 ± 0,92
T	°C	15,23 ± 1,69	12,28 ± 0,23	11,37 ± 0,03
ORP	mV	-65,55 ± 143,33	96,95 ± 56,21	130,60 ± 61,09
OD	mg/L	3,38 ± 0,07	5,41 ± 0,45	8,41 ± 0,44
Nitrito	mg/L	1,50 ± 2,12	N/D	N/D
Nitrato	mg/L	4,40 ± 0,00	9,70 ± 0,00	9,10 ± 0,00
Amonio	mg/L	11,10 ± 10,32	N/D	N/D
Fósforo	mg/L	0,90 ± 0,00	0,50 ± 0,42	0,20 ± 0,00
Fosfato	mg/L	11,60 ± 13,01	2,70 ± 0,00	2,60 ± 0,28
Nitrógeno total	mg/L	25,00 ± 0,00	19,10 ± 0,00	12,70 ± 0,00
Sulfato	mg/L	150,00 ± 0,00	140,00 ± 0,00	125,00 ± 0,00
SST	mg/L	0,05 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,01
DQO	mg/L	638,00 ± 106,77	124,00 ± 0,00	120,00 ± 0,00
DBO ₅	mg/L	129,40 ± 0,00	N/D	N/D
CF	NMP/100ml	<1,8 ± 0,00	<1,8 ± 0,00	<1,8 ± 0,00

N/D: No detectado; S/I: Sin información

En la Figura 3 se muestra el aspecto organoléptico del AG a la entrada y salida del HFV como del tanque acumulador final. En esta imagen se puede apreciar que

el agua obtenida del HFV, sale traslúcida, además no se verifica olor durante los distintos terrenos, lo que podría ser una señal de buen funcionamiento del HFV.



Figura 3. Fotografías de muestras de AG de las tres etapas analizadas. De derecha a izquierda, botellas con agua extraída desde el sedimentador primario justo antes de entrar al HFV, la siguiente tomada desde el sedimentador de salida del HFV y la tercera desde el tanque de acumulador final.

El potencial redox en la entrada del humedal tiene valores promedio de $-185,50$ mV en invierno y de $-65,55$ mV en primavera, mientras que a la salida el potencial aumenta a valores promedio de $244,33$ mV y $130,60$ mV. Este incremento en el potencial redox se debe al tipo de humedal empleado en este estudio que es de tipo aeróbico, favoreciendo la oxidación en el sistema.

Además del monitoreo del agua, también durante el estudio se contabilizó el número de individuos de totora presentes en el HFV. Este sistema fue iniciado con una densidad de 4 individuos/ m^2 de humedal en diciembre del 2021. Durante el otoño, esta densidad aumentó a 15 individuos/ m^2 , mientras que en la época de invierno incrementó a 22 individuos/ m^2 lo cual, indica que la especie no tuvo problemas para adaptarse al humedal, por consiguiente, ocurrió lo mismo para la estación de primavera, sin embargo, fue mucho más complejo poder realizar

un conteo de las especies, por los excesivos brotes (sobre 40 individuos/ m^2).

El estado del humedal estuvo relacionado con las estaciones. En la estación de otoño, la especie *Typha spp.* se observó en un estado fitosanitario sano, lo que indica que el crecimiento de dicha especie es exponencial, considerando que éstas duplicaron su cantidad, además, de la altura, que aumentó de $1,00$ m promedio a $1,50$ m. En invierno el estado fitosanitario fue regular, estas situaciones se deben principalmente por las bajas temperaturas y heladas que se presentan en el lugar, pese a estos factores, el crecimiento con respecto a la altura, siguió aumentando. Y en primavera, en el último monitoreo el crecimiento de la *Typha spp.* fue tanto en altura, como en densidad. La altura promedio fue de $2,25$ m. y en el caso del número de individuos fue imposible poder realizar un conteo, por la densidad de los brotes, como se puede observar en la Figura 4.



Figura 4. Fotografías del humedal durante las épocas del año. De izquierda a derecha: en otoño, invierno y primavera en cuanto a las plantas.

Calidad del agua generada por un HFV a escala piloto

En la Tabla 4 podemos observar el comportamiento de los valores promedio entre las tres estaciones del año para cada parámetro (físico, químico y biológico) del efluente generado por el sistema para ser utilizado en riego. Esto en comparación con las principales normas vigentes en Chile para potenciar el uso en riego. Estas son la NCh 1333 correspondiente a Requisitos de calidad del agua

para diferentes usos (INN, 1978), y NCh 3582 relacionada al uso del agua residual de origen doméstico para la irrigación de áreas (INN, 2018). Además, también se comparan estos resultados con la NCh 409 de calidad del agua potable (INN, 1984). El presente estudio se realizó para verificar el potencial uso en riego, pero de igual forma se aplica esta alternativa, para una visión futura de poder demostrar la calidad de agua obtenida ante un eventual uso potable.

Tabla 4: Comparación de la calidad del agua tratada por el HFV con la normativa vigente en Chile: NCh 409 de agua potable; NCh 1333 para su uso en riego, y NCh 3582 para el riego de áreas verdes.

Parámetros	Unidad	Valor promedio de este estudio	Límite Máximo		
			NCh 409	NCh 1333	NCh 3582
pH	--	7,14 ± 0,19	6,5 – 8,5	6,0 – 9,0	6,0 – 9,0
CF	NMP/100ml	1,80 ± 0,00	Ausencia	1000	≤200 - ≤1000
DBO ₅	mg/L	0,00 ± 0,00	--	--	≤10 - ≤20
DQO	mg/L	112,56 ± 18,03	--	<20	--
CE	µs/cm	786,05 ± 223,35	<750	< 750 c ≤ 1500	≤1400 - ≤1800
SST	g/l	0,00 ± 0,00	--	--	≤10 - ≤25
T	°C	10,81 ± 1,50	--	30	--
TU	NTU	2,15 ± 2,47	≤ 2	50	--
OD	mg/L	7,85 ± 0,62	--	Mínimo 5	--
Nitrito	mg/L	0,00 ± 0,00	≤ 3	--	--
Nitrato	mg/L	9,62 ± 1,45	≤ 50	--	--
Amonio	mg/L	0,00 ± 0,58	≤ 1,5	--	--
Fósforo	mg/L	0,20 ± 0,14	0,1	--	≤5 - ≤7
Fosfato	mg/L	2,60 ± 2,55	0,1	--	--
Nitrógeno	mg/l	12,70 ± 12,85	--	--	≤25 - ≤35
Sulfato	mg/l	94,69 ± 16,68	≤ 500	250	≤250

Visualizando los valores promedio del efluente, se puede observar que el valor promedio del pH, cumple con la principal NCh 1333: Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Para las CF los valores promedio obtenidos también cumplen con la principal norma (NCh 1333). En el caso de la DBO5 la NCh 1333 no exige un límite máximo, por lo que en este caso se aplica la NCh 3582: Reutilización de agua residual de origen doméstico –Calidad estándar del agua regenerada para irrigación de áreas cumpliendo con esta ya que el promedio total es de 0,00 mg/L. Para la DQO los valores promedio no cumplirían con la normativa vigente, ya que el promedio general es de 112,56 mg/L, pero se debe destacar que si bien, el valor está por sobre el límite, esto se debe a que el agua gris de esta casa contiene concentraciones muy elevadas por el uso que se le da al agua (por ejemplo: reutilización del agua del lavaplatos y de la lavadora). Para la CE los valores se encuentran dentro del límite, de esta forma si cumpliría con la principal normativa. Los SST no cuentan con un límite máximo para la NCh 1333, por lo que se aplica la NCh 3582, cumpliendo con la máxima. La T también se encuentra por debajo de la máxima, cumpliendo con la normativa. Para la TU la NCh 1333 si cuenta con un rango, por lo que, los valores obtenidos si cumplen. En el caso del OD también cumple con la NCh 1333, ya que está por sobre la mínima. De igual manera ocurre con el amonio, cumpliendo con dicha normativa. Para el nitrito no se tiene un límite máximo en ninguna de las dos normativas para uso de riego, por lo que aplicamos las NCh 409 correspondiente a agua potable, cumpliendo con esta, de esta forma, este parámetro cumple para el potencial uso bebestible. En el caso del nitrato ocurre exactamente lo mismo, no cuenta con límites máximos para el uso de riego, pero si se aplica la NCh 409, si cumple con su límite. El fósforo no cuenta con un rango en la NCh1333, pero se aplica la NCh 3582, cumpliendo con está,

ya que su valor se encuentra entre $\leq 5 \leq 7$ mg/L, ya que el efluente tiene un promedio general de 0,20 mg/L, por lo que a estas concentraciones es apta para riego. Para el fosfato no hay límite máximo en ninguna de las dos normativas para uso de riego, de esta forma se aplica la NCh 409, pero para este parámetro no cumpliría la normativa, ya que se encuentra por sobre el valor máximo. En el caso del nitrógeno, la NCh 1333 no cuenta con un rango, por lo que se aplica la NCh 3582, cumpliendo con el valor entre $\leq 25 \leq 35$ mg/L. Por último, para el sulfato los valores promedio cumplen con la NCh 1333.

Como bien se observa, todos los parámetros analizados cumplen con la NCh 1333: Requisitos de calidad del agua para diferentes usos, sin embargo, en el monitoreo de dicha norma con un laboratorio externo (HUB AMBIENTAL UPLA), se encontró que los resultados obtenidos para la época de otoño, los valores de sulfato están por sobre los 250,00 mg/L, lo que es alto. Sin embargo, los valores obtenidos en los monitoreos habituales las concentraciones de sulfatos están bajo los 250 mg/L (promedio 63,75 mg/L) por lo que se requiere verificar este parámetro con más monitoreos externos.

Por otro lado, es importante mencionar que Chile tiene carencias en cuanto a normativas para el reúso del agua tratada, por lo que sería muy importante mejorar las ya existentes (NCh 1333 es del año 1978) así como también incorporar nuevas normativas focalizadas a los nuevos desafíos en cuanto a utilizar nuevas fuentes de agua, como las aguas residuales.

CONCLUSIÓN

A través del presente estudio se logró evaluar la calidad del agua generada en un HFV a escala piloto, empleado para el tratamiento de AG de una vivien-

da unifamiliar. Concluyendo que el agua tratada cumple en gran parte con la NCh 1333: Requisitos de calidad del agua para diferentes usos, siendo el sistema de HFV eficiente para la remoción de materia orgánica, sólidos y nutrientes. Cabe destacar que además de la utilización de dicha normativa se utilizó la NCh 3582: Reutilización de agua residual de origen doméstico –Calidad estándar del agua regenerada para irrigación de áreas y la NCh 409: Calidad del agua potable, esta última con el fin de demostrar que el AG tratada en este mismo sistema pudiese utilizarse para el consumo, y así satisfacer la necesidad hídrica que con el tiempo aumenta. Los resultados en cuanto al análisis de estas normativas demuestran que el agua generada cumpliría de manera preliminar con dichos parámetros. De esta manera el uso de HFV como tecnología basada en la naturaleza, a pesar de tratar un AG con elevada concentración de materia orgánica y nutrientes, es eficiente para disminuir el impacto de estos contaminantes, generando un agua que cumple la mayoría de los parámetros de calidad de agua para su uso en riego.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el financiamiento del Fondo de Investigación Estratégica en Sequía de la ANID (Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo), a través del Proyecto FSEQ210015: “*Treatment wetlands to mitigate the water scarcity emergency in Chile: nature-based solutions as innovation to for wastewater treatment, reclamation and reuse*” en donde participan un consorcio de universidades dentro de las cuales están la Universidad de Playa Ancha, y la Universidad Católica del Norte (UCN). Proyecto que ha permitido esta colaboración con el Dr. Ismael Vera Puerto de la UCN. Los autores agradecen al PRODESAL de Quilpué, así como al Sr. Ricardo Tobar y la Sra. Nury Delgado por facilitar el acceso

a su hogar y al humedal, para realizar este estudio. También los agradecimientos al Laboratorio de Biotecnología, Medio Ambiente e Ingeniería de la Facultad de Ingeniería, así como al HUN AMBIENTAL, ambos de la Universidad de Playa Ancha.

BIBLIOGRAFÍA

- AIDIS. (2017). REVISTA-AIDIS. *Aguas grises: un recurso latente*, 7. Disponible en: <https://www.aidis.cl/wp-content/uploads/2016/10/REVISTA-AIDIS-2017-.pdf> (último acceso enero del 2023)
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., Galvão, A., Piseiro, J., Rizzo, A., Masi, F., 2020. A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of the Total Environment* 711, 134731.
- CEHUM (2022). Centro de Humedales del Río Cruces. Disponible en: <https://cehum.org/> (último acceso enero del 2023).
- Durán, M. N. (2016). *Evaluación de la incidencia del medio granular en un humedal subsuperficial en el proceso de remoción de nutrientes*. Concepción.
- Eriksson, E., Andersen, H.R., Madsen, T.S., Ledin, A., 2009. Greywater pollution variability and loadings. *Ecological Engineering* 35, 661–669.
- Garreaud, R.D., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H.H., Velloso Aguilá, D., 2020. The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology* 40, 421–439.
- Gobierno de Chile (2015). Plan de Sequía. Disponible en: <https://www.gob.cl/noticias/las-medidas-que-componen-el-plan-nacional-para-la-sequia/> (último acceso enero del 2023)
- INN (1987). NCh 1333 Of. 1978. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos.
- INN (1995). NCh 2313/22 Of.95, 1995. Aguas residuales. Métodos de análisis Parte 22: determinación de coliformes fecales en medio EC. Instituto Nacional de Normalización.

INN (2005). NCh 409/1 Of. 2005. Agua potable - Parte 1: Requisito de calidad para agua potable.

INN (2018). NCh 3582:2018. Reutilización de agua residual de origen doméstico - Calidad estándar del agua regenerada para irrigación de áreas verdes.

Ramalho, R., Beltrán, D. (1996) Tratamiento de aguas residuales. Barcelona, Reverté

Sánchez Celis, G., Miglio Toledo, R., Vela Cardich, R., & Cadillo LA Torre, E. (2018). *Libro de Memorias: IV conferencia Panamericana de Sistemas de humedales*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.

SISS. (2022). *Superintendencia de Servicios Sanitarios*. Disponible en: <https://www.siss.gob.cl/586/w3-propertyname-729.html>

Toledo, A. E. (2017). *Evaluación del potencial reúso de aguas servidas en la agricultura, tratadas mediante lodos activados y humedales construidos bajo diferentes procesos de desinfección*. Concepción.

Vera Puerto, I., Arias, C., Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., . . . Von Sperling, M. (2017). *Humedales para tratamientos*. London: IWA Publishing. Obtenido de <http://iwaponline.com/ebooks/book-pdf/871664/wio9781789062526.pdf>

Vera Puerto, I., Vidal, G., López, D., & Morales, G. (2013). *Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas*. Concepción.

Vera Puerto, I., Jorquera, C., López, D., & Vidal, G. (2016). *Scielo*. Obtenido de Humedales construidos para tratamiento de reúso de aguas servidas en Chile: reflexiones: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000300019



**EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL PARA
LA RECONVERSIÓN DE LAS ACTUALES INSTALACIONES
DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA BOCAMINA (PRIMERA
UNIDAD), PARA LA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE.**

Constanza Alvarado
Ingeniería Civil Ambiental
Universidad de Valparaíso

Profesora Guía:
Hector Andrade Caroca

MARCO TEÓRICO

El cierre de las centrales termoeléctricas a carbón constituye uno de los principales objetivos de la política energética en el marco del Acuerdo de París de las Naciones Unidas. De acuerdo a lo mencionado, Chile adquirió como compromiso descarbonizar la matriz energética, que incluye principalmente los sectores de electricidad, transporte, industria, minería y hogares, es decir, aquellos sectores donde se concentran mayormente las emisiones.

Un pilar importante de la estrategia para descarbonizar la matriz energética, corresponde a la inyección de proyectos de energía renovable junto al acuerdo voluntario para el retiro y/o reconversión gradual de centrales a carbón. La reconversión de las centrales es considerada como la de mayor impacto en la reducción de emisiones, debido a que da pie para una mayor penetración de proyectos de energía renovable, reduciendo con ello el factor de emisión del sistema eléctrico, lo que habilita otras acciones en electrificación, por ejemplo, electromovilidad, electrificación de usos motrices en industria y minería, calefacción eléctrica y el hidrógeno.

La estrategia de descarbonización de la matriz energética comprende tres ejes: retiro de unidades a carbón al 2040 (31% de la capacidad total), cese de generación a carbón antes del 2040 y alcanzar la carbono neutralidad al año 2050 (MINENERGIA, 2020). Además, la estrategia se pretende complementar con la aplicación de instrumentos económicos, como certificados de energías renovables y de eficiencia energética, compensaciones y/o reducciones de emisión provenientes del Acuerdo de París y los permisos de emisión transables.

Respecto de la Política Energética Nacional de Chile, Energía 2050, señala en su pilar *“energía compatible*

con el Medio Ambiente”, donde se fomenta el compromiso de apoyar decididamente una transición hacia una economía y una matriz energética significativamente más baja en carbono hacia el 2050. A raíz de lo mencionado es que, durante los próximos años, las centrales termoeléctricas a carbón iniciarán un proceso de cierre y de cese de operaciones. Desde el punto de vista ambiental, los beneficios asociados al cierre de las centrales se traducen en la reducción de emisiones atmosféricas de contaminantes locales y globales, además de la disminución en el impacto a la biota marina, eliminación del riesgo de vertimiento de carbón, recuperación de espacio para otros usos, disminución de ruido, etc. Siendo el mayor de los beneficios, la recuperación socio-ambiental de las zonas afectadas a causa de la actividad industrial.

Al año 2020, en Chile existían diez complejos de generación termoeléctrica a carbón, distribuidas en seis comunas, que en conjunto agrupaban un total de 28 unidades de generación. En el año 2019, el Estado de Chile, por medio del Ministerio de Energía, estableció un acuerdo para cerrar todas las centrales a carbón a más tardar el año 2040, además de definir la aspiración de lograr la carbono neutralidad al 2050. En cuanto a las fases del acuerdo de cierre de las centrales, la primera consiste en comprometer el cierre de ocho unidades equivalentes a 1.047 MW. Siguiendo la línea y como parte de las actividades asociadas a la COP25, se comprometió el cierre de 334 MW adicionales. En resumen, once unidades cerrarán al año 2024, representando el 31% de la capacidad instalada a carbón en Chile.

Por las razones antes mencionadas, Enel Chile, el 31 de diciembre de 2020 desconectó la primera unidad de la Central Termoeléctrica Bocamina, complejo de generación térmica integral, compuesta por dos unidades térmicas generadoras de energía

eléctrica a base de carbón, ubicada en el sector Lo Rojas, Comuna de Coronel, a 30 kilómetros al sur de Concepción, Provincia de Concepción, Región del Biobío.

Ambas unidades se conformaban por un sistema conjunto de caldera, turbina y generador, sistema de abatimiento de emisiones conformado por filtro de mangas y desulfurizador, sistema de refrigeración y sistema de manejo de carbón, éste último común a ambas unidades. Ambas unidades se encuentran enplazadas en dos predios, conocidos como Predio Norte y Predio Sur, en el Predio Norte, se encuentra ubicado el sistema de caldera, turbina, generador y sistema de abatimiento de emisiones (uno por unidad generadora). En el Predio Sur, existen diferentes instalaciones de la Central, como sala eléctrica, sala de bombas de mar, sala de transformadores, etc. Entre ambos predios se encuentran los sistemas de refrigeración y manejo de carbón.

Respecto de la Primera Unidad de la Central, consistía en una turbina a vapor que operaba a base de carbón pulverizado, cuya potencia fue de aproximadamente 128 MW. La Central se encontraba en funcionamiento desde el año 1970, previo a la entrada en vigencia del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). No obstante, aspectos relevantes del funcionamiento de la Central están reglados en la Resolución Exenta N°206/2007 que aprueba el proyecto “Ampliación Central Termoeléctrica Bocamina Segunda Unidad” de la Comisión Regional del Medio Ambiente Región del Biobío y Resolución Exenta N°128/2015 dictada por la Comisión de Evaluación Ambiental Región del Biobío, que aprueba el proyecto “Optimización Central Bocamina Segunda Unidad”. Si bien las Resoluciones de Calificación Ambiental se emiten bajo el contexto de la aprobación y funcionamiento de la Segunda Unidad de la Central, aquellas regulan los aspectos más relevan-

tes asociados a los efectos ambientales tanto de Bocamina I, como Bocamina II. Lo anterior, aplica para límites de emisión para su funcionamiento, monitoreo de variables del medio marino que permiten evaluar el comportamiento de las descargas al mar (sistema de succión), regulación de las canchas de carbón, emisiones de ruido, entre otros componentes de uso común.

En relación a lo mencionado, es que se inició el proceso de planificación de la fase de abandono para ambas unidades, considerando diferentes opciones de nuevos usos, propios de la compañía o de terceros y el desmantelamiento parcial de las instalaciones. Razón por la cual, en este trabajo de título se evalúa la reconversión de la Central Termoeléctrica Bocamina I para la generación de Hidrógeno verde, mediante una evaluación técnica, económica, ambiental y legal para determinar si la planta de hidrógeno cumple con las condiciones para utilizar las instalaciones de la primera unidad de la Central.

METODOLOGÍA

Lo primero a realizar fue la revisión de la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N°206/2007 “Ampliación Central Termoeléctrica Bocamina (Segunda Unidad)” y la revisión de la RCA N°128/2015 “Optimización Central Termoeléctrica Bocamina Segunda Unidad”, esto, para identificar las actividades en etapa de cierre y/o abandono, la normativa aplicable referente al proceso de cierre de la primera unidad y para realizar un levantamiento de permisos necesarios asociados al proceso de cierre. Acerca de la revisión de las RCA, tal como se menciona en la introducción, la primera unidad de la Central opera desde el año 1970, razón por la cual no cuenta con una Resolución de Calificación Ambiental ni con un cierre establecido. Sin embargo, en las RCA correspondientes a la ampliación y optimización de la se-

gunda unidad, se señala que la etapa de cierre y/o abandono es igual para ambas unidades.

Obtenida la información sobre el proceso de cierre, se revisaron los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT), correspondientes al Plan Regulador Metropolitano de Concepción (PRMC), aprobado por la Resolución N°171/2002 Gobierno Regional del Biobío, publicada en el Diario Oficial (D.O.) el 28 de enero de 2003 y el Plan Regulador Comunal de Coronel (PRCC), aprobado por el Decreto Alcaldicio N° 2.645/2013, publicado en el D.O. el 22 de abril de 2013. La revisión de ambos Planes Reguladores consistió en identificar la regulación particular de cada IPT en cuanto a los usos de suelo, esto, para determinar si el área donde se emplaza la CT Bocamina I se encuentra permitido el uso de suelo para las actividades productivas y/o infraestructura energética de tipo renovable, con el fin de saber si se puede llevar a cabo la reconversión de la central para la generación de hidrógeno verde.

Posteriormente, se llevó a cabo una prefactibilidad técnica y económica de la producción de hidrógeno verde a través de electrólisis del agua. La información fue obtenida mediante revisión bibliográfica tanto a nivel nacional como en el extranjero. Para la planta de electrólisis, se llevó a cabo una comparación entre tecnologías de electrolizadores (AEL, PEM y SOEC), para luego señalar las ventajas y desventajas de cada uno. La selección del tipo de electrolizador fue mediante diferentes aspectos, sea la etapa de desarrollo comercial en la que se encuentran, tipo de tecnología adecuada para el proyecto de hidrógeno verde, horas de funcionamiento, vida útil, límites operacionales, duración y degradación de sus componentes principales, además, de costos asociados.

Teniendo la selección de la tecnología para el proceso de electrólisis, se buscó entre los principales

fabricantes un electrolizador que cumpla con la potencia requerida para el proyecto de hidrógeno, es decir, una planta de 14 MW.

Determinado el fabricante del electrolizador, se realizó el balance de materia y energía. Para obtener la eficiencia del electrolizador, se utilizó la Ley de Faraday, que relaciona la cantidad de hidrógeno producido y la cantidad de corriente asociada al proceso electroquímico, de manera de obtener los caudales del hidrógeno en el electrolizador. Luego, teniendo los caudales del hidrógeno y la cantidad de agua requerida para llevar a cabo el proceso de electrólisis, se consideraron dos variables para el abastecimiento de agua, una mediante agua de pozo, pasando por un pretratamiento antes de ingresar al electrolizador y otro a través de agua de mar, considerando también un pretratamiento.

La Central Termoeléctrica Bocamina cuenta con derechos de agua y con captación y desmineralización, por lo que, para determinar la opción más adecuada (obtención de agua mediante pozo o mar), se consideró el caudal necesario para el electrolizador (tomando la producción máxima con la eficiencia obtenida) y el caudal necesario para el sistema de compresión/licuefacción del hidrógeno. Teniendo los dos caudales necesarios para el funcionamiento de la planta, se estableció un sistema para no tener pérdidas por agua, en otras palabras, el agua de rechazo proveniente del electrolizador se devuelve hacia un intercambiador de calor y el agua de rechazo proveniente del ciclo termodinámico es llevado a una torre de enfriamiento que traslada el agua hacia el estanque de agua desmineralizada. Por ende, la selección de alternativa en cuanto a abastecimiento de agua, dependerá principalmente de la estimación de potenciales afectaciones e impactos ambientales asociados, además de la cantidad de agua requerida por el sistema completo.

Con la producción de hidrógeno obtenida, se selecciona el ciclo termodinámico adecuado para el almacenamiento. Respecto del proceso de compresión y licuefacción, se tomaron en consideración dos factores: la energía primaria consumida en el proceso junto con el consumo eléctrico y la cantidad de hidrógeno a almacenar. Para estimar los cálculos tanto del ciclo termodinámico como del almacenamiento, se utilizó el software EES "Engineering Equation Solver", programa que funciona definiendo las variables iniciales y finales. Corresponde a un software que entrega fórmulas por defecto y toma valores por defecto. Los cálculos se realizaron considerando una transformación politrópica para el ciclo termodinámico, donde la presión y el volumen específico del gas se relacionan.

Sobre el almacenamiento de hidrógeno, se determinó la cantidad de unidades (estanques) necesarios para un almacenamiento semanal, con un funcionamiento de la planta de hidrógeno de 24 horas. Las ecuaciones utilizadas corresponden a obtención de volumen, radio y área.

Teniendo el ciclo termodinámico y almacenamiento del hidrógeno, se procedió a la estimación de potenciales impactos ambientales y afectaciones, utilizando un método cuantitativo, el cual se basa en medir la gravedad de un impacto considerando la cantidad, calidad, grado y forma en la que es alterado, concretándolo en términos de magnitud e incidencia. El resultado del método, corresponde a una expresión numérica que se compara con una escala determinada. La metodología consistió principalmente en la identificación de las obras y actividades del proyecto susceptibles de causar impacto ambiental, la identificación de elementos y componentes ambientales que pueden ser impactados por las actividades del proyecto, identificación de los impactos sobre el medio ambiente, definición

de los impactos, caracterización y finalmente valoración. La valoración fue obtenida desde el libro "Fundamentos de la Evaluación de Impacto Ambiental" (Espinoza, 2001).

Obtenida la valoración de los impactos ambientales asociados a la fase de construcción y operación, se contempla la evaluación ambiental asociada a la RCA N°206/2007 "Ampliación Central Termoeléctrica Bocamina (segunda unidad)" y la RCA N°128/2015 "Optimización Central Termoeléctrica Bocamina Segunda Unidad", para comparar los impactos ambientales asociados a las fases de ambos proyectos, esto, para determinar la viabilidad de la reconversión a una planta de hidrógeno verde.

En cuanto a aspectos económicos, el análisis se basó en la revisión de diferentes informes tanto a nivel nacional como en el extranjero, de manera de establecer los rangos en los que se encuentran los costos asociados a la producción de hidrógeno verde, considerando costos operacionales e infraestructura. Teniendo el rango de costos, se obtuvo el $LCOE_{H_2}$ (Costo Nivelado de Hidrógeno) para determinar la viabilidad del proyecto comparando con los distintos estudios revisados. Además, se utilizó el programa elaborado por GIZ (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*), que corresponde a una herramienta para evaluar proyectos de hidrógeno verde en Chile, la herramienta entrega valores por defecto (tasas) y ecuaciones por defecto. El programa fue utilizado para comparar el valor obtenido del Costo Nivelado de Hidrógeno, con las fórmulas entregadas por bibliografía y el valor obtenido por la herramienta. De esa manera, se determina la viabilidad del proyecto en términos económicos.

Finalmente, a partir de revisión bibliográfica tanto a nivel nacional como en el extranjero, se aborda el plan regulatorio del hidrógeno, el posible ingreso al Sistema

de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) según tipología, origen del hidrógeno verde, producción y almacenamiento. Además, se señalan los Permisos Ambientales Sectoriales (PAS) y riesgos asociados al proyecto.

DESARROLLO

ETAPA DE CIERRE Y/O ABANDONO DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA BOCAMINA (PRIMERA UNIDAD)

Sobre la revisión de la Resolución de Calificación Ambiental "AMPLIACIÓN CENTRAL TERMOELÉCTRICA BOCAMINA (SEGUNDA UNIDAD)" y "Optimización Central Termoeléctrica Bocamina Segunda Unidad" se pueden apreciar las siguientes actividades en etapa de abandono: modernización de la Central cuyo fin es alargar la vida útil o adaptar a una tecnología más eficiente y limpia y abandono o desmantelamiento de las instalaciones en caso de que el costo de mantener o actualizar la planta fuese excesivo. De la revisión de la RCA "Optimización Central Termoeléctrica Bocamina Segunda Unidad" señala en su etapa de cierre: *"Una vez que las nuevas obras construidas cumplan su vida útil o por razones comerciales, se procederá a desmantelar y restituir las condiciones del lugar, lo más similar posible a la del terreno actual"; "Las actividades identificadas para la fase de cierre no se modifican respecto a las actividades indicadas en el proyecto aprobado"*.

Respecto de los IPT, actualmente, los Instrumentos de Planificación Territorial vigentes que regulan urbanísticamente el área donde se emplaza la Central Termoeléctrica Bocamina, son: Plan Regulador Metropolitano de Concepción (PRMC), aprobado por la Resolución N° 171/2002, Gobierno Regional del Biobío, publicada en el Diario Oficial (D.O.) el 28 de enero de 2003 y Plan Regulador Comunal de Coronel (PRCC), aprobado por el Decreto Alcaldicio N° 2.465/2013, publicado en el D.O. el 22 de abril de 2013.

Según lo señalado por el PRMC vigente y el PRCC sobre las áreas de interés donde se emplazan las Unidades I y II de la Central Termoeléctrica Bocamina, se admiten edificaciones o instalaciones que produzcan hidrógeno verde, en tanto sean calificadas como inofensivas o molestas. Aunque, si se emplazara una central generadora de energía a base de hidrógeno verde en el área, aquella actividad no se encuentra admitida, puesto que se trataría de una central de generación, destino que se encuentra prohibido según los usos de suelo establecidos.

PLANTA DE ELECTRÓLISIS DEL AGUA

La determinación de la planta de electrólisis de agua es a partir de la elección de un electrolizador adecuado para la producción de hidrógeno verde. Los aspectos tomados en consideración consistieron en las ventajas y desventajas de cada electrolizador, vida útil, horas de funcionamiento, etapa de desarrollo comercial en la que se encontraban, costos asociados a infraestructura, operación, mantenimiento, límites operacionales, etc.

La comparación se llevó a cabo entre los electrolizadores AEL, PEM y SOEC, según los parámetros de operación y valores. De las tecnologías, se obtuvo que la tecnología alcalina (AEL) y de intercambio de protones (PEM) se encuentran en una etapa de desarrollo comercial mayor, mientras que el electrolizador SOEC se encuentra en una etapa inferior. Esto conllevó a que el CAPEX y OPEX de la tecnología alcalina y de intercambio de protones sea inferior, además, pese a que los tres electrolizadores utilizan elevadas temperaturas, los electrolizadores SOEC se deben someter a una temperatura mucho más elevada, por lo tanto, requieren de un mayor costo energético. De la comparación entre el electrolizador AEL y PEM, se determinó que ambas tecnologías presentan desarrollos similares. Sin embargo, la tecnología PEM es óptima

cuando se trata de proyectos con intermitencia, es decir, cuando no se encuentran conectados a la red y su abastecimiento de energía proviene directamente de una energía renovable. Dado que el proyecto se encontrará conectado a la red 24 horas (*on-grid*), debido a que el uso de suelo está prohibido para proyectos de generación de energía, la tecnología alcalina (AEL) fue seleccionada para este proyecto, puesto que, funciona correctamente en proyectos conectados a la red de distribución. Además, la tecnología alcalina presentaba menor CAPEX, la vida útil del stack es mayor y es una tecnología que comercialmente es más madura y desarrollada que la PEM, lo que conlleva a que ha sido mejorada y presenta mayor eficiencia en comparación con años anteriores.

Bajo los aspectos mencionados y al analizar las diferentes tecnologías de electrolizadores, se termina que la tecnología alcalina es la adecuada para el proyecto de hidrógeno verde.

ELECTROLIZADOR

Respecto del electrolizador seleccionado, se trata de la empresa *Nel Hydrogen* que ofrece el modelo A-3880, modelo que presenta un consumo de energía de pila de celdas de entre 3,8-4,4 kWh/Nm³ de gas hidrógeno producido (hasta 2,2 MW por pila). Su producción es equivalente a 2.400-3.880 Nm³/h de hidrógeno o poco más de ocho toneladas por día.

La selección del electrolizador fue principalmente al acceso de información a las especificaciones técnicas y a que es un electrolizador con alta tecnología, además, un factor importante es que el proveedor incluye el sistema de compresión.

BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

En términos de balance de materia y energía (considerando que no se dispone de información sobre rendimiento), se analizó el caso con la máxima producción de hidrógeno para una planta equivalente a 14 MW. Se escogió un electrolizador de 14 MW tomando en consideración que por cada kg de hidrógeno se utilizan 39,4 kWh, sin embargo, la energía es mayor para aquellos electrolizadores comercializados actualmente, por ende, el costo energético corresponde a 52,5 kWh por cada kg de hidrógeno (WORLD ENERGY TRADE, 2022). Escogido el input del electrolizador (que coincida con la cantidad producida de hidrógeno que se requiere) y utilizando la eficiencia de Faraday, se determinó la eficiencia del electrolizador con los cálculos correspondientes para el balance de materia.

Se presenta en la Tabla 1 los requerimientos de entrada para el electrolizador (a partir de *Nel Hydrogen, 2018*) y en la Tabla 2 los caudales del hidrógeno en el electrolizador. En la Figura 1 se puede observar el balance de materia y energía del electrolizador considerando un 100% de eficiencia.

Tabla 1: Requerimientos de entrada para el electrolizador (a partir de *Nel Hydrogen, 2018*)

Requerimientos de entrada	
Electricidad (14 MW)	3,8-4,4 kWh/Nm ³ H ₂
H ₂ O	0,9 L/Nm ³

Tabla 2: Caudales del hidrógeno en el electrolizador

Hidrógeno	Caudales de salida		
	Por hora	Operando 24 horas	Operando semanalmente
"Nel Hydrogen A-3880" en kg	348,812 kg H ₂ /h	8.371,488 kg H ₂ /día	58.600 kgH ₂ /semana
"Nel Hydrogen A-3880" en gas	3.880 Nm ³ H ₂ /h	93.120 Nm ³ H ₂ /día	651.840 Nm ³ H ₂ /semana

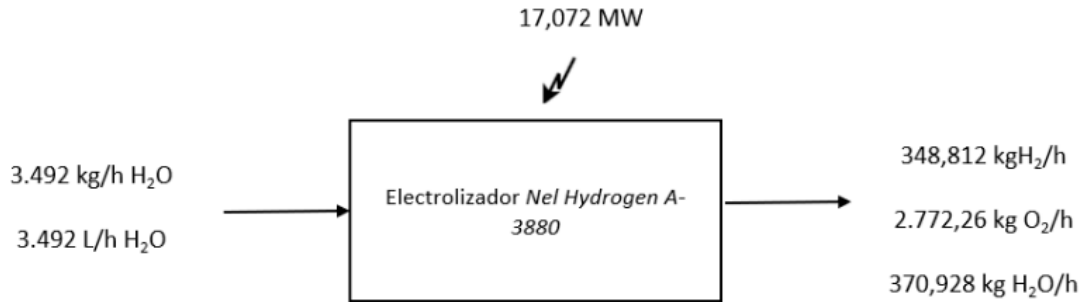


Figura 4. Fotografías del humedal durante las épocas del año. De izquierda a derecha: en otoño, invierno y primavera en cuanto a las plantas.

Para obtener la eficiencia del electrolizador, se utilizó la Ley de Faraday, la que se puede entender como la relación existente entre la producción de hidrógeno real y la máxima cantidad susceptible de producirse en función de la intensidad consumida. De los cálculos, se obtuvo que la eficiencia del electrolizador es equivalente a un 80%, por lo tanto, se debe considerar que el balance de masa correspondiente al agua de entrada en el proceso de electrólisis y la producción de oxígeno e hidrógeno producido no son iguales. En la Figura 2 se puede observar el balance de materia y energía del electrolizador considerando un 80% de eficiencia.

El proveedor señala que por cada Nm³ de hidrógeno se aportan 0,9 l/Nm³ de H₂O, al multiplicar por

la densidad del agua se obtiene el caudal másico. Sobre la pureza del oxígeno y el hidrógeno, es alrededor del 99,99%, por ende, se hace el supuesto (como aproximación) que las dos corrientes son puras. El número de metros cúbicos normales de oxígeno corresponde a la mitad del hidrógeno, al multiplicar cada uno por sus pesos moleculares, se obtiene el caudal másico de salida. Para el cálculo energético, el proveedor señala que, por cada Nm³ de hidrógeno generado, se debe aportar 4,4 kWh/Nm³ de potencia eléctrica. Al tomar el caso de mayor producción (3,880 Nm³ /h) y multiplicarlo por la potencia eléctrica, se obtiene el valor de energía eléctrica aportada. En la Tabla 3 se presentan los caudales del hidrógeno en el electrolizador con el 80% de eficiencia.

Tabla 3: Caudales del hidrógeno en el electrolizador (con 80% de eficiencia)

Hidrógeno	Caudales de salida		
	Por hora	Operando 24 horas	Operando semanalmente
"Nel Hydrogen A-3880" en kg	279,05 kg H ₂ /h	6.697,2 kg H ₂ /día	46.880,4 kg H ₂ /semana
"Nel Hydrogen A-3880" en gas	3.104 Nm ³ H ₂ /h	74.496 Nm ³ H ₂ /día	521.472 Nm ³ H ₂ /semana

ANÁLISIS DEL RECURSO HÍDRICO:

Para el recurso hídrico se evaluaron dos opciones, la primera consiste en abastecimiento a partir de agua remineralizada u osmotizada (proveniente de agua de mar) y la segunda corresponde a fuente de agua dulce. Los sistemas de electrólisis mediante tecnología AEL requieren de valores de aproximadamente 1-5 $\mu\text{S cm}^{-1}$ para su correcto funcionamiento, por lo tanto, se debe llevar a cabo un proceso de tratamiento para el agua. Asimismo, se debe reducir la presencia de materia orgánica y las partículas en suspensión que puedan promover la sedimentación en las celdas y reducir el área activa del electrolizador.

La Central Termoeléctrica Bocamina cuenta con una planta de agua desmineralizada constituida por una etapa de pretratamiento (prefiltrado y ósmosis inversa) y una etapa de remoción química por medio de filtros catiónicos, aniónicos y de lecho mixto. En cuanto a la planta de ósmosis inversa, es un sistema que contempla dos módulos de 25 m³/h de capacidad, considerando un flujo de retorno y uno de rechazo. El flujo de retorno recircula el caudal para optimizar la remoción de elementos químicos, para luego ser enviada a la planta de agua desmineralizada. Sobre la planta de prefiltrado, son una serie de filtros intermediarios que se ubican entre el estanque de agua cruda y el sistema de ósmosis inversa. Su objetivo es remover el contenido

de manganeso y hierro presente naturalmente en el agua de pozo, de manera que se pueda cumplir con la calidad necesaria para la desmineralización.

Mencionado anteriormente, la Central cuenta con dos tipos de abastecimiento de agua, mediante captación de agua de mar y con una fuente de agua dulce constituida por el actual sistema de pozo, cuyos derechos fueron adquiridos por Endesa Chile y cuya capacidad nominal de bombeo es de 40 l/s, limitado a un máximo de 60l/s. El agua industrial es conducida hacia un estanque de almacenamiento de 2.500 m³ (1.200 m³ para proceso y 1.300 m³ para incendio), que se ubica en las inmediaciones de la planta de tratamiento de agua. Posteriormente, el agua es conducida a la planta de tratamiento de agua desmineralizada. En cuanto al agua de mar, el caudal máximo es de 50.000 m³/h. Respecto del abastecimiento de agua para la planta de electrólisis, los caudales tanto de agua de mar como de pozo cumplen con lo necesario para el electrolizador (3,492 m³ /h), escoger una de las dos alternativas depende principalmente de la estimación de impactos ambientales y de la cantidad de agua necesaria para el proceso de compresión y/o licuefacción.

COMPRESIÓN Y LICUEFACCIÓN DEL HIDRÓGENO

Para determinar el ciclo termodinámico, se consideró que el almacenamiento del hidrógeno como gas

requiere de tanques de alta presión (350-700 bar), mientras que, para un almacenamiento líquido, se requieren de temperaturas criogénicas, puesto que el punto de ebullición del hidrógeno a presión atmosférica corresponde a $-252,8^{\circ}\text{C}$ (Morante et al., 2020).

La compresión del hidrógeno se aplica principalmente en almacenamiento a bordo de vehículos, cabe destacar que la energía utilizada en la compresión es significativamente alta (aproximadamente un 7% del contenido energético del hidrógeno). En cambio, la licuefacción aumenta considerablemente la densidad de la energía almacenada, por lo que permite el transporte a gran escala, siendo atractivo para grandes distancias, donde las tuberías no son económicamente factibles. Además, el consumo energético del almacenamiento líquido, es superior al de compresión.

Considerando que el consumo energético del proceso de licuefacción es mucho mayor que el proceso de compresión y que la cantidad obtenida de hidrógeno a la salida del electrolizador no es en función de una planta a gran escala (por ejemplo, 100 MW), además, tomando en cuenta que para términos del trabajo de título no se aborda la distribución y transporte del hidrógeno, se determina que se selecciona el proceso de compresión, descartando la licuefacción.

CICLO TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE COMPRESIÓN

Para el ciclo termodinámico se va a elevar la presión de forma progresiva, llevando la presión desde 100 bar (proveniente de la salida de la planta de electrólisis) hasta 350 bar. Para la definición del ciclo, se va a contemplar una compresión por etapas, para alcanzar una presión final de más de 85 bar, se requiere de cuatro etapas (Applied Thermodynamics, 2020).

Definido el ciclo termodinámico, se realizan los balances de materia y energía correspondientes. El caudal de hidrógeno gaseoso que proviene de la planta de electrólisis ingresa al primer compresor. Cabe señalar que el caudal se mantiene constante en todo el proceso de compresión, por ende, se asume que no hay pérdidas. La mayoría de los compresores operan según una transformación politrópica, en la que tanto la presión como el volumen específico del gas se relacionan.

Mencionado anteriormente, para obtener los cálculos a partir de las ecuaciones mencionadas, se utilizó el software EES, cuyos resultados se pueden observar en la Tabla 4 y Figura 3.

Tabla 4: Resultados ciclo de compresión

Compresor	P entrada (bar)	P salida (bar)	T entrada (K)	T salida (K)	Factor de compresión (z)	Densidad entrada (kg/m^3)	Densidad salida (kg/m^3)	Potencia (kW)
1	100	136,8	278,15	350,3	1,068	8,201	8,821	49,58
2	131,8	182,5	302,6	377,1	1,086	9,788	10,74	56,56
3	175,5	247,8	322,1	398,5	1,111	12	13,46	65,07
4	237,8	350	330,4	407,6	1,151	15,37	17,85	77,83

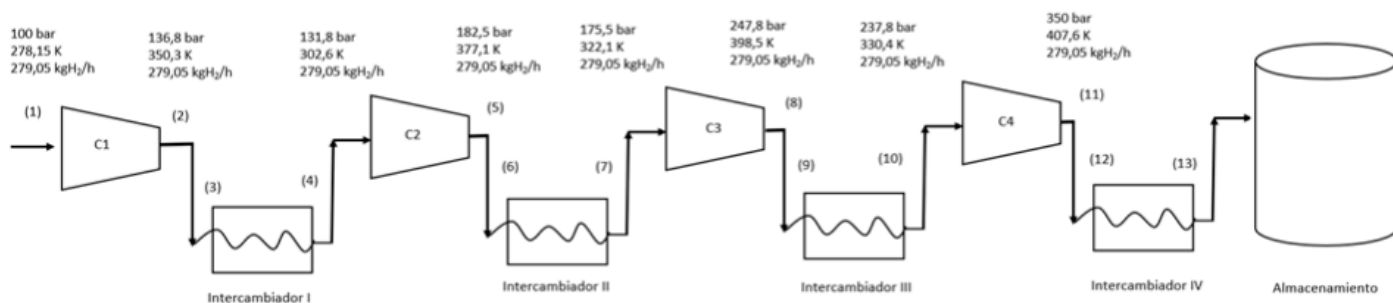


Figura 3: Diagrama proceso de compresión

Es importante mencionar que, *Nel-Hydrogen* (proveedor de electrolizadores), considera el sistema de compresión para almacenamiento de hidrógeno, sin embargo, una limitante para obtener las especificaciones técnicas de los compresores, es la falta de información. A causa de que no se encuentra disponible la información, es que se consideraron compresores que cumplieran con los parámetros necesarios para llevar la presión desde 100 bar hasta 350 bar.

INTERCAMBIADORES DE CALOR

Para el suministro de entrada al electrolizador, se requiere elevar la temperatura desde 20 °C hasta 80°C, por lo que, se determinó utilizar un intercambiador

de calor. Los resultados y cálculos se obtuvieron utilizando el software EES.

Sobre los intercambiadores de calor en el ciclo de compresión, el caudal se obtiene del estanque de agua desmineralizada, a una temperatura de 20°C. A la salida de los intercambiadores la temperatura es de 80°C, el agua es conducida hasta una torre de enfriamiento, para posteriormente ser enviada nuevamente al estanque de agua desmineralizada, lo mismo ocurre con el agua de rechazo que sale de la planta de electrólisis, caudal que equivale a 0,298 m³ /h.

Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultados intercambiadores de calor en proceso de compresión

Intercambiador de calor	Temperatura inicial (K)	Temperatura final (K)	Flujo másico (m ³ /h)	Q (kJ/h)
I	293,15	353,15	1,171	293.341
II	293,15	353,15	1,217	304.667
III	293,15	353,15	1,251	313.761
IV	293,15	353,15	1,272	318.458

TORRE DE ENFRIAMIENTO

El agua de rechazo que sale de la planta de electrolisis y el flujo que sale de los cuatro intercambiadores de calor son enviados hasta una torre de enfriamiento. Las torres de enfriamiento son equipos que tienen por objetivo quitar el calor de una corriente de agua caliente, a través de aire seco y frío que circula por la torre. El agua caliente puede caer en forma de lluvia y al intercambiar calor con el aire frío, vaporiza una parte de ella, eliminándose de la torre en forma de vapor de agua (Mendoza et al, 2016). Según los cálculos obtenidos, se obtuvo una eficiencia de 92% para la torre de enfriamiento.

ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

Para el almacenamiento del hidrógeno se consideró un estanque de capacidad de 300 m³, con un almacenamiento semanal y con un tiempo de producción de 24 horas. Al contar con certificación ASME, tolera presiones hasta 1.000 bar, además, el material es de acero Q345R (conveniente, ya que soporta altas presiones). De los cálculos, se obtiene que el caudal total a almacenar semanalmente es de 2.626,35 m³. Considerando la capacidad máxima del estanque, se van a necesitar 9 unidades para almacenar el hidrógeno producido en una semana.

ESTIMACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

Mencionado anteriormente, la Central Termoeléctrica Bocamina (primera unidad) no cuenta con RCA, razón por la cual, se consideraron las RCA de la ampliación y optimización del proyecto que contempla la segunda unidad y para la cual se establecieron cambios aplicados para la primera unidad. El objetivo de tomar en consideración la evaluación ambiental de ambas RCA, es para establecer un “antes” y “después” en cuanto a los

impactos asociados al proyecto y para analizar la viabilidad de la instalación de una planta de hidrógeno verde para la reconversión de la central. Para la caracterización y valoración de los impactos ambientales asociados a la RCA N°206/2007 “AMPLIACIÓN CENTRAL TERMOELÉCTRICA BOCAMINA (SEGUNDA UNIDAD)” y la RCA N°128/2015 “Optimización Central Termoeléctrica Bocamina Segunda Unidad” tomaron una apreciación conjunta del carácter, relevancia del componente, intensidad, extensión del desarrollo, duración y reversibilidad. A partir de esos criterios, calcularon la significancia del impacto para posteriormente clasificar los impactos según los valores que obtuvieron.

Al realizar la comparación de las evaluaciones ambientales de ambas RCA y la evaluación ambiental realizada para la planta de hidrógeno verde, se determina que la reconversión de la Central Termoeléctrica Bocamina (primera unidad), tiene asociado impactos negativos (categorizados como compatibles y moderados) e impactos positivos (categorizados como medianos). Considerando los impactos negativos, los de tipo reversible se deben principalmente a emisiones en la etapa de construcción, mientras que, los de carácter irreversible son a causa de la extracción de agua de mar o de pozo en etapa de operación, bajo este criterio, se debe tomar en cuenta que el sitio ya se encuentra intervenido, por lo que, no sería adecuado sacar las instalaciones asociadas a la captación de agua, ya que conllevaría otros impactos. Si se hace una relación entre las evaluaciones ambientales, la reconversión a una planta de hidrógeno verde es viable, puesto que no conlleva la generación de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que es beneficioso para la población y es beneficioso para el Plan de Descarbonización.

ANÁLISIS ECONÓMICO-ESTIMACIÓN DE COSTOS

Para estimar los costos para la producción de hidrógeno por compresión (considerando planta de electrólisis, proceso de compresión y almacenamiento), se buscaron diferentes estudios tanto a nivel nacional como en el extranjero, esto para realizar una comparación con los valores obtenidos y de manera de utilizar como referencia algunos costos asociados a la inversión (infraestructura, operación, mantenimiento, etc.). Existe una falta de acceso a información sobre los precios de los equipos (compresores, intercambiadores de calor y estanques de almacenamiento), por lo que los valores encontrados en los informes y estudios son de referencia. Además, cabe señalar que, para el proceso de compresión y posterior almacenamiento, hay proveedores que entregan el electrolizador con el sistema de compresión incluido (así se menciona en *Nel Hydrogen*), sin embargo, no entregan información respecto de los costos asociados. Una de las razones es porque hay equipos que deben ser fabricados con características específicas, por ejemplo, los intercambiadores de calor. Para el caso de los compresores, los costos se asocian a la cantidad de trabajo realizado, que depende principalmente de las condiciones (presión

de entrada, salida y caudal). A raíz de la dificultad de obtener valores específicos, es que se consideraron las referencias bibliográficas.

El análisis económico se realizó en función de los costos asociados a electrolizadores alcalinos, según CAPEX, OPEX, eficiencia y horas de operación del electrolizador; costos asociados al almacenamiento del hidrógeno en USD/kg; costos operacionales asociados a la energía para comprimir el hidrógeno, costos de electricidad para proyectos *on-grid* y costos asociados a la instalación, operación y mantenimiento de equipos.

Respecto del Costo Nivelado del Hidrógeno, Levelized Cost of Energy (LCOE) corresponde al costo total actual de construir y operar una instalación generadora de energía a lo largo de toda su vida útil. De esa forma, se miden los costos totales que la instalación tendrá a lo largo de toda su vida, dividiéndolo por la producción de energía que realizará durante todos los años de operación. Con la información obtenida de las referencias bibliográficas, se obtuvo un LCOEH₂ equivalente a 5,57 USD/kgH₂ utilizando la Ecuación 1 y utilizando la Ecuación 2 se obtuvo un Costo Nivelado de Hidrógeno igual a 6,21 USD/kg₂.

Ecuación 1: Cálculo para LCOEH₂

$$LCOE_{H_2} = P_{inst} * I * \frac{FRC + M (f_p)}{h * f_p * Q_{H_2}} + Q_{H_2O} * P_{H_2O} + Q_e * P_e - Q_{O_2} * P_{O_2}$$

Ecuación 2: Cálculo para LCOEH₂

$$LCOH \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) = \frac{CAPEX + OPEX \text{ actualizado por año}}{\text{kg de hidrógeno actualizados por año}}$$

Acerca de la diferencia entre ambas ecuaciones, es que la primera se obtuvo desde el informe “Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile”, elaborado por *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) en el año 2019. Donde, entregan valores por defecto, por ejemplo, el factor de planta para proyectos *on-grid*.

GIZ en septiembre de 2022 diseñó una herramienta que corresponde a un modelo de evaluación económica de proyectos de producción de hidrógeno verde (HV), la cual permite dimensionar y evaluar este tipo de proyectos. La herramienta solicita parámetros técnicos y económicos a partir de los cuales entrega resultados en forma gráfica o en tablas.

Se estimó la producción de hidrógeno para una planta cuya vida útil fuese de 20 años (con cambio de stack a los 10 años). El consumo de hidrógeno es in-situ con un período de almacenamiento de siete días. Respecto del período de evaluación, el mes de inicio es enero del año 2024, operando en el año 2025 y finalizando el año 2045. La vida útil se consideró para términos del período de recuperación de la inversión, ya que la vida útil estimada es indefinida.

Se obtuvo como resultado un Costo Nivelado de Hidrógeno de 6,2 USD/kgH₂, mismo valor obtenido con la Ecuación 1. De acuerdo a los resultados de VAN y TIR, se obtuvo un VAN >0 y TIR > k, por lo que, el proyecto es favorable. Cabe mencionar que, en términos de CAPEX, el sistema de almacenamiento del hidrógeno es equivalente a un 69%, electrolizador 20%, sistema de compresión 1% e ingeniería y obras civiles equivalente a un 10%, según los resultados entregados por la herramienta de hidrógeno verde.

LEGISLACIÓN APLICABLE A LA GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO VERDE

En este capítulo se abordó la normativa y estándares para la producción-generación de hidrógeno verde, origen del hidrógeno verde y tipologías y análisis de ingreso al SEIA.

Sobre la normativa aplicable, el hidrógeno en Chile está clasificado como una sustancia peligrosa y según la NCh382.Of98:2003, pertenece a la clase 2.1 (gases inflamables). Esto quiere decir que la reglamentación que regula su uso es aquella que trata el almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas y que rigen la higiene y seguridad en los lugares de trabajo. El uso de sustancias peligrosas se encuentra permitido en zonas industriales, por lo que, el ingreso al SEIA dependerá principalmente de las modificaciones establecidas para el proyecto, si existen modificaciones, el proyecto deberá ingresar según art. 2 letra g del D.S 40. En cambio, si se considera un proyecto nuevo y que corresponda a alguna tipología del art. 10 de la Ley 19.300 Sobre Bases Generales del Medio ambiente, el proyecto debe ingresar según el art. 3 del D.S 40. Se debe tener en consideración que existen otros literales que deben ser evaluados según el desmantelamiento de algunas instalaciones y construcción de instalaciones para el proyecto de hidrógeno verde, sin embargo, para términos del informe se consideran las tipologías mencionadas, puesto que son las que aplicarían para este caso.

CONCLUSIÓN

Con el fin de cumplir con el compromiso del Plan de Descarbonización, el hidrógeno verde se puede convertir en un suministro que contribuya a la disminución de gases de efecto invernadero, potenciando de esa forma el crecimiento económico del país

a través de la descarbonización de la matriz energética. Se estableció que el proceso de cierre de la Central Termoeléctrica Bocamina contempla la modernización de la central, es decir, se puede adaptar a una nueva tecnología más eficiente y limpia. De la revisión de la RCA N° 206/2007 y N°128/2015 se logra identificar que, aunque la primera unidad de la central no cuenta con una RCA, el cierre y/o abandono establecido para la segunda unidad considera también la primera unidad, lo que permite establecer la reconversión a una planta de hidrógeno verde. En lo que respecta a la revisión de instrumentos de planificación territorial, el PRMC vigente y el PRCC que rigen el predio de la primera unidad de la central, señala que se admiten edificaciones o instalaciones que generen hidrógeno verde, siempre y cuando sean calificadas como inofensivas o molestas, sin embargo, el uso de suelo para la generación de energía eléctrica se encuentra prohibido, de esto se establece que la planta de hidrógeno sea un proyecto "on-grid", conectado a la red eléctrica. Para corroborar que la energía que abastece a la planta de hidrógeno proviene de energías renovables, la empresa debe emitir un certificado verde que acredite que el 100% de la energía consumida ha sido inyectada al Sistema Eléctrico Nacional a partir de la generación de energías renovables. En cuanto al análisis y descripción de tecnología AEL, PEM y SOEC para la electrólisis, a partir de las ventajas y desventajas de cada uno, se determina que la tecnología alcalina (AEL) es la más adecuada para un proyecto "on-grid", puesto que funciona bien cuando no se presentan intermitencias en el sistema. El equipo seleccionado para la electrólisis de agua cumple con todas las condiciones requeridas para la planta de hidrógeno, es decir, un input de 14 MW, tomando la producción máxima de hidrógeno que es equivalente a 3.880 Nm³ /h, la que al considerar la eficiencia del electrolizador se obtiene una producción de 279,05 kgH₂/h.

Respecto de la selección del ciclo termodinámico, la compresión del hidrógeno es favorable para la producción establecida (producción máxima del electrolizador Nel Hydrogen A-3880). Para términos del informe, el ciclo de compresión se realizó tomando las especificaciones técnicas de equipos (compresores e intercambiadores de calor), determinando condiciones iniciales y finales de temperatura y presión. A partir de las condiciones dadas (presión de salida del electrolizador a 100 bar; temperatura de salida del último compresor a 350 bar y temperatura de salida del electrolizador a 278,15 K), se resuelven las operaciones para el almacenamiento de hidrógeno verde en 9 unidades de almacenamiento, cuyo volumen es equivalente a 2.626,35 m³. En cuanto a la estimación de impactos ambientales asociados a la construcción y operación del proyecto, se establece que los impactos de carácter negativo son compatibles y moderados, siendo los impactos positivos medianos, lo que se traduce en que los impactos afectarán a la población de manera local a causa de las emisiones atmosféricas por el recorrido de camiones y vehículos en la etapa de construcción y operación. En cuanto al abastecimiento de agua para la planta de hidrógeno, se señala que existe una afectación al ecosistema marino, sin embargo, se menciona en la discusión que la central cuenta con un plan de seguimiento y que la opción seleccionada para el abastecimiento es a partir de la minimización de impactos ambientales que puede causar la construcción y ejecución de la planta. Sobre la evaluación económica, a partir de los diferentes resultados obtenidos del costo nivelado del hidrógeno, se selecciona el valor equivalente a 6,2 USD/kgH₂, el cual, al compararlo con la revisión bibliográfica, se encuentra dentro del rango de magnitud pese a que el costo de la inversión es alto. Asimismo, con la obtención de VAN y TIR, se determina que el proyecto es viable, aunque de ejecutar el proyecto, algunos valores estimados po-

drían cambiar, ya que hay costos asociados que fueron estimados a partir de la revisión bibliográfica. De la revisión sobre normativa aplicable, no existe un literal específico para proyectos que generen hidrógeno verde en el catálogo de tipologías de proyectos que deben ingresar al SEIA, por lo que se puede enviar la consulta de pertinencia ambiental y sometimiento voluntario de ingreso según el D.S 40, artículo 164° o según otras características del proyecto podría ingresar o no. A partir de la revisión bibliográfica se establece que el proyecto debería ingresar como una modificación de proyecto existente (D.S 40, artículo 2, letra g).

Finalmente, la construcción y operación de una planta de hidrógeno verde para reconvertir las actuales instalaciones de la primera unidad de la Central Termoeléctrica Bocamina, cumple con las condiciones para contribuir a la crisis climática y para potenciar el desarrollo económico y social del país, beneficiando principalmente a la población aledaña al predio donde se encuentra la central y al medio ambiente, la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero contribuye al Plan de Descarbonización y a la generación de una matriz energética a partir de fuentes renovables libre de emisiones.



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE SISTEMA TRANQUES DE ACOPIO DE AGUAS LLUVIAS EN LAS QUEBRADAS DE VALPARAÍSO

Matías Nicolás Salgado Zapata
Ingeniería Civil Ambiental
Universidad Técnica Federico Santa María

Profesor Guía:
Daniel Ramírez Livingston

MARCO TEÓRICO

ECOSISTEMA DE QUEBRADAS

El puerto de Valparaíso se ubica en la región de Valparaíso, Chile. La geografía de esta ciudad está dominada por al menos 39 quebradas que drenan los 44 cerros que rodean la ciudad (Magrini & Pedraza, Territorio y Paisaje H30 Infiltración, 2016)¹. Los arroyos por estudiar se formaron por la abrasión natural del terreno debido a las precipitaciones y a la calidad del suelo. El desorganizado crecimiento urbano que se ha producido en las últimas décadas solo agrava la situación. **Asentamientos ilegales y campamentos, contaminación, incendios y, sobre todo, erosión**, son las características negativas que han acompañado al ecosistema de quebradas porteñas que albergan cientos de especies entre flora y fauna además del preciado recurso hídrico generado por aguas lluvias que escurren libremente por los fondos de quebrada, transportando los nutrientes y minerales del suelo hasta su deposición final, nutriendo los fondos marinos.

Sólo en quebrada Francia, principal quebrada de este estudio, **escurren anualmente más de 572.000 [m3]**. Por lo que surge inmediatamente la idea de poder captar una fracción de estas aguas pluviales para su utilización en algún ámbito, pudiendo descomprimir un poco la demanda de agua de distintos sectores.

ESTRÉS HÍDRICO REGIONAL Y ESCENARIOS HÍDRICOS 2030

Hasta fines de marzo del año 2022, un **76% de la superficie chilena** estaría afectada por la sequía, desertificación y suelo degradado (Chile, 2021)².

1 Álvarez, L.: Origen de los Espacios Públicos en Valparaíso. UCH, Santiago.

2 Fundación Chile, noticia web, FCH.cl. 2021

El modelo económico nacional adquirió en el tiempo un sesgo muy duro hacia las afectaciones medioambientales de los proyectos industriales, la extracción desesperada de recursos a logrado elevar la economía chilena los últimos años, pero el costo medioambiental es alto y recién lo estamos empezando a percibir. Panorama que se extiende por distintas regiones en distintos rubros y recursos.

En términos prácticos, y según el Informe Anual de Medioambiente 2020, las deficiencias hídricas de la región pueden evidenciarse en el curso natural del agua, es decir, precipitaciones, caudales y cuerpos de agua. **Las precipitaciones en 2019** en el territorio regional **disminuyeron un 63,24%** con respecto a 2018 **y un 81,64%** con respecto a 2017. Lo mismo ocurre con ríos y embalses confirmando la creciente escases.

La crisis regional en torno a la falta de agua posee **distintas aristas que contribuyen al deterioro medioambiental** y, por ende, disminución en la calidad de vida ya que no sólo las fuentes de aguas naturales se ven afectadas sino también calidades y cantidades de agua potable y riego. El documento *Escenarios Hídricos 2030 Chile*, llevado a cabo por una gran cantidad de entidades privadas y públicas competentes al diagnóstico medioambiental y económico, analiza 7 cuencas a lo largo de Chile y les clasifica las distintas áreas donde estamos contribuyendo a esta crisis, entregando Medidas, Acciones y Soluciones (MAS) enfocadas en 4 ejes:

- 1.- Costo de inversión referencial:** Para la determinación del costo de inversión referencial se considera una base de cálculo normalizada que contempla la producción, ahorro o recuperación de 1 m³/s de agua.
- 2.- Plazo de implementación:** Considerando cortos, medianos y largos plazos dependiendo de

la complejidad del proyecto y/o la burocracia implicada.

3.- Aporte valor ambiental: Dado por la contribución en la recuperación de vegetación, hábitat, especies endémicas, procesos hidrológicos, mejoras de calidad de agua y conservación del recurso.

4.- Nivel de complejidad social: Se entiende como las complejidades derivadas a impactos negativos, conflictos sociales, rechazo por parte de las comunidades y beneficios limitados.

5.- Volumen de cobertura de Brecha Hídrica: Definiendo brecha hídrica como la relación entre la demanda de agua del conjunto de actividades socioeconómicas y la oferta hídrica disponible para abastecerlas, el volumen de cobertura refiere a la capacidad de reducir esta brecha.

A estos ejes se le asignaron valores de 1 a 3 (bajo, medio y alto) según el **nivel de gratificación correspondiente** a cada índice, por ejemplo, un costo de inversión bajo entrega una alta gratificación económica (3), un plazo de implementación alto entrega baja gratificación en situaciones de urgencia (1), un volumen de cobertura de brecha hídrica medio genera niveles medios (2) de gratificación en cuanto a generación/recuperación del recurso, etc. En base a esto se genera una escala evaluativa donde se puede observar que, bajo estos criterios profesionales, las implementaciones de **acopios y captaciones de aguas lluvias logran enfrentar la problemática de escases de manera adecuada** con una calificación de 10 puntos sobre 15 (**66,67%**) (Fundación Chile, 2021). El promedio de todas las MAS tabuladas es de 9,14 de 15 (**60,93%**).

Al considerar entonces el panorama general de escases de agua y el historial de funcionamiento de las quebradas, se concluye que existe una urgente necesidad de tomar acción y obra para mitigar este

problema socio-ambiental. Y, como se describe previamente, existe una gran cantidad del recurso que recorre las quebradas del cual **se puede aprovechar una fracción para mitigar más de un problema.**

TRANQUES DE ACOPIO DE AGUAS LLUVIAS EN QUEBRADAS

Esta recopilación de antecedentes generales, y su respectivo análisis, **concluye con la elección de estructura hídrica** para la recolección, acopio y cosecha del recurso. Conservando la lógica de acumulación por irrupción de cauces y considerando la calidad del agua a recopilar, se propone la construcción de estructuras similares a los ya existentes tranques desarenadores pero que **su** utilidad sea la conservación del agua y no sólo de sus sedimentos. Tranques de acopio de aguas lluvias que puedan **ayudar a la revitalización del ecosistema en más de un aspecto.**

Considerando las debilidades socio-ambientales de la zona, se propone que la utilización del agua captada tenga como fin:

- Suplir la demanda de riego urbano de plazas y parques.
- Mantener volúmenes de agua para revitalización de zonas erosionadas.
- Mantener volúmenes de agua para el combate de incendios.
- Generación de espacios de recreación y áreas verdes públicas.

A continuación, se exponen las características y justificaciones de la elección en base a los objetivos propuestos:

1.- Disminuir el estrés hídrico de la ciudad y sus ecosistemas circundantes:

- Volumen adaptable y suficiente:
Contextualizando este requerimiento, el

año 2020 se utilizaron en total **19.894 [m3] de agua para riego urbano** (Enos, 2021)³ utilizados en 41 sectores diferentes de un total de 51, se extrapola entonces, que este sistema de tranques de acopio de aguas debe suplir al menos 24.746 [m3] anualmente (considerando un total de 51 zonas de riego). Bajo este mismo principio de suficiencia, el **volumen de retención total del tranque es una variable modificable** a la voluntad de los requerimientos y condiciones del entorno.

- Capacidad de cosecha del recurso:

Para la recuperación del agua acumulada en estos tranques **es necesario extracción por gravedad o bombeo desde la superficie**, la cual es bastante amplia, pudiendo generar más de un punto de recolección o la implementación de sistemas más efectivos.

- Multiplicidad:

En conjunción con las características anteriores, la replicación de estas estructuras a lo largo de las quebradas no sólo es posible, **sino que optimiza la gestión del recurso**⁴. Se puede extrapolar entonces la necesidad de acopios y la disposición del estado para la implementación de estructuras hídricas, lo que incrementa la factibilidad de disponer de varios tranques de agua agrupados y organizados en un sistema de gestión eficiente.

2.- Brindar ayuda al combate de incendios:

- Capacidad de cosecha del recurso:

El acceso al agua acopiada en estas estructu-

ras debe considerar también las necesidades de los cuerpos de bomberos en su combate contra incendios, ya que se está proponiendo un sistema con múltiples propósitos. Por ende, hay que disponer de una superficie suficiente que permita maniobrar a los helicópteros de las operaciones aéreas de la CONAF. Sumando este aspecto a la multiplicidad descrita en el punto anterior, **existe una configuración de tranques que maximiza el rango de acción** a través de posicionamiento estratégico.

3.- Complejidad de realización:

- Intervención del terreno:

El acopio es vital para cualquier sistema de estructuras y/o gestión del recurso acuoso. Es por esto que la intervención al terreno **requiere de superficies relativamente amplias**. Al mismo tiempo que puede aportar a la biodiversidad de la quebrada al poner a disposición parte de sus aguas trancadas, esto es, la alimentación de vegetación y organismos en torno al recurso hídrico, mayormente a través de la **infiltración de cauces en el suelo y subsuelo**. La infiltración de aguas logra mantener mejor la humedad del terreno y, a pesar de que Valparaíso no posee napas subterráneas, también logra abastecer la capa de granito meteorizado (predominante en el subsuelo) que puede retener agua durante años⁵.

4.- Capacidad de Evolución:

- Mejoramiento:

Un modelamiento teórico podría generar, por ejemplo, un filtro de sedimentos para la boca de la manguera que extrae el agua del tran-

3 Entrevista con Enos, P. (2021). Encargado del Departamento de Parques y Jardines de IMV.

4 C. Magrini, P. Pedraza: "Territorio y Paisaje, H30: Incendio de Valparaíso". 2014.

5 C. Magrini, P. Pedraza: "Territorio y Paisaje, H30: Infiltración". 2016.

que, logrando mejor eficiencia de recolección. En cuanto a la información empírica, que suele adquirirse una vez que ya está en curso la situación a analizar, se ha logrado comprobar que el crecimiento de vegetación aguas arriba de los tranques sirve de filtro de basura y sólidos de tamaño considerable y evita la erosión del suelo (desprendimiento de sedimento) (Rispoli, 2020)⁶. Así mismo, varios aspectos del proyecto de creación de tranques de aguas de quebradas pueden ser complementados y/o mejorados gracias a la importancia que ha adquirido la **creación, recuperación y mantenimiento de cuerpos hídricos, generando espacios de discusión y encuentro de ideas.**

- Acoplamiento:

A la capacidad de mejoramiento hay que añadirle las acciones e ideas cuyo objetivo no es sólo la optimización del sistema, sino también aquellos proyectos que logran **generar beneficios en otros ámbitos**, como la utilización del contorno del tranque como espacio recreativo, natural y público; instalación de atrapanieblas para aumentar la humedad de la cuenca, disminuyendo factores de riesgo de incendio y erosión; entre otros proyectos que se encuentran en los documentos referenciados.

METODOLOGÍA

LOCALIZACIÓN DE ESTUDIO

Como se describió previamente en **Marco Teórico**, la terraza alta y media de Valparaíso (entre 200-400

6 Entrevista con M. Rispoli. (2020). Gestor territorial de emergencias, Departamento de Gestión de Riesgos y Desastres de la IMV.

[msnm]) posee una gran cantidad de escorrentías por fondos de quebradas además de que un gran porcentaje de su área total sufrió los efectos del gran incendio de 2014, específicamente, quebrada Las Zorras y quebrada Francia. Generando entonces el ambiente propicio para el emplazamiento de estas estructuras hídricas en estas zonas siniestradas, pero con gran disposición del recurso. Como muestra la ilustración 1 anexada, la zona objetivo comprende la mayoría de las quebradas y laderas del gran Valparaíso que no se encuentren comprometidas (aún) con viviendas y edificaciones. Con una superficie total de 15,32 [km²]⁷ aproximados y, como se puede observar, estas quebradas representan lo último de espacio verde natural dentro de la capital regional.

ANÁLISIS DEL TERRENO Y SELECCIÓN DE PUNTOS ESTRATÉGICOS

Ahora, la instalación de tranques para acopio de aguas de quebradas posee un mínimo requerimiento relacionado a las demandas antes presentadas. Sólo con esta condición de borde no se puede filtrar y determinar **dónde ni cuántas** de estas estructuras hídricas serán necesarias de construir, considerando además que en esta zona **existen más de 30 cauces** merecedores de estudio.

A su vez, gran porcentaje de estos 15,32 [km²] de área total poseen pendientes superiores al 25% (en su mayoría un 60%) (Herrera, Lepe, Morales, & Pinto, 2016)⁸. Es por esto que, se aplica un primer filtro referente a las pendientes de las laderas: **se necesitan terrenos de baja pendiente** para mejorar el acceso

7 Cálculo entregado por imaginería satelital de Google Earth.

8 M. Herrera, C. Lepe, J. Morales, C. Pinto: "Plan R: Reconocer – Restaurar – Reducir". 2016

a las obras, reducir riesgos y costos de construcción y, sobre todo, **lograr un volumen de acopio importante sin tener que levantar grandes estructuras** que puedan generar un impacto mayor para la trama ecológica de las quebradas.

ELEVACIÓN Y CURVAS DE NIVEL

Para este propósito se utiliza el software Landserf es un software gratuito basado en java de información geográfica para **edición, procesamiento y visualización de datos espaciales**, particularmente especializado en modelamiento digital de elevaciones (DEM por sus siglas en inglés), lo que hace idóneo su uso para los propósitos de este análisis. Con el cual se pueden obtener las curvas de nivel de una zona determinada. En la ilustración 2 anexada, se acreditan las modelaciones resultantes.

Conseguido el perfil de elevaciones (curvas de nivel), se necesita **complementar la información de elevación de terreno con datos de la zona** para poder discernir entre las distintas utilizaciones del suelo de las quebradas (vegetación, caminos, viviendas, edificios, etc.). Para esto, Landserf puede **comprimir el archivo** en formato .kml (Lenguaje de marcación de punto clave en inglés) que permite expresar estos datos geográficos de 3 dimensiones en cualquier visor que soporte el formato. **Google Earth lee y exporta este formato**, por tanto, se puede ingresar esta información en la zona delimitada previamente donde se pudo dar con **15 ubicaciones distintas que poseen las características para levantar 1 o más tranques** (Ilustración 3). Ahora con estos sectores definidos, es posible empezar a proyectar los volúmenes que pueden capturarse. Para esto, se debe crear un perfil 3D de cada sector y analizar su morfología. Logrando determinar también el alto del tranque a construir para estimación de costos.

LEVANTAMIENTO INFORMACIÓN 3D

Una herramienta capaz de leer los archivos de vectores de Landserf y Google Earth es **SketchUp**, un software de diseño gráfico y modelamiento 3D basado en caras⁹. Se exportan entonces los archivos .kml de Google Earth y de Landserf hacia SketchUp para poder crear un perfil de quebrada más manejable y que permita la modelación y dimensionamiento de los tranques. Con esto, **se buscan concavidades naturales** en cada cause de cada zona para disminuir la cantidad de terreno removido para la realización del tranque, disminuyendo la intervención a la quebrada y también los costos de obras.

Este método logró identificar **23** puntos en total donde pueden capturarse volúmenes significativos considerando murallas de 3 metros de alto. La altura de la muralla se define en base a la similitud con los tranques desarenadores, intentando capturar la mayor cantidad de agua **sin desestimar la seguridad de su implementación**. Esta altura es una variable modificable a las ventajas y desventajas del terreno, su fijación en 3 [m] sirve como **base de cálculo** para la valoración de los tranques.

ESTRUCTURA

Para hacer que estas estructuras hídricas sean una solución de gestión y abastecimiento del recurso en más de un ámbito, **es necesario establecer las capacidades** de las que deben disponer para sus distintos usos, así como también establecer la limitación progresiva de la acumulación de sedimentos. Con este fin es que se propone la siguiente repartición de volúmenes por niveles según propósitos. A continuación, se describen estos niveles, en la ilustración 4 se aprecian mejor las distribuciones:

9 Disponible en: <https://www.sketchup.com/es>

● **Volumen Efectivo:**

Este es el **volumen que logra ser extraído** y destinado a cumplir con la demanda de riego urbano de plazas y avenidas. Corresponde a los 2 metros superiores que posee el tranque, más específicamente, **desde donde se encuentre el punto de extracción hasta la altura del vertedero**, lo que se aproxima a 2 metros de agua utilizable. Esto podría variar en pos de la construcción y seguridad del sistema de muros.

● **Volumen Remanente:**

Luego de utilizar todo el volumen efectivo de un tranque, existirán volúmenes de agua que no alcanzarán la bocatoma, es decir, **que no podrán ser extraídos**. Esto al contrario de ser un problema, permite una mejor gestión del recurso al imponer un límite de extracción y permite también la **disposición de agua que mantengan los ecosistemas circundantes** y además poder depender de estos para combatir incendios, a través de

su acción pasiva nutriendo el suelo y subsuelo, y a través de ayuda directa al poder abastecer helicópteros que carguen buckets de agua.

● **Volumen de Sedimentos:**

Todo caudal que escurra por las quebradas arrastrará una fracción de suelo erosionado. Es por esto por lo que se hace importante considerar que la acumulación en el tiempo de aguas **lluvias trae consigo la pérdida paulatina del volumen de acopio** debido a la acumulación paralela de sedimentos. Entonces, se debe considerar durante todo el uso de estos tranques que existirán volúmenes de acopio de agua perdidos por sedimentación y dependerán del rendimiento (o capacidad de generación) de cada quebrada.

La siguiente tabla pone en perspectiva los niveles de los distintos tranques comparando no sólo las capacidades volumétricas sino también añadiendo la estructura y requerimiento recién propuestos:

Tabla 1. Volúmenes parciales por niveles acumulados y su respectiva relación Agua/muro. Elaboración propia. 2022.

Tranque	Volumen acumulado por nivel [m3]								Volumen total	Relación Agua/muro
	(-6)-(-5)	(-5)-(-4)	(-4)-(-3)	(-3)-(-2)	(-2)-(-1)	(-1)-(0)	(0)-(1)	(1)-(2)		
A alto					540,90	1.778,48	4.620,00	8.594,63		25,12
A bajo						349,54	1.867,62	4.258,62		8,62
B alto						698,24	2.330,13	4.850,86		12,15
B bajo						587,26	2.168,97	4.937,11		17,34
C			353,27	1.513,56	4.170,24	8.423,32	14.090,78	21.115,34		46,76
D alto						1.514,88	5.129,86	10.231,29		18,97
D bajo				463,14	1.476,52	3.292,07	6.344,07	10.373,63		30,14
E1 alto						511,45	2.192,45	4.681,49		13,52
E1 bajo					577,95	1.757,58	3.988,36	7.374,37		22,22
F2 alto				415,86	1.823,18	5.997,58	13.870,22	24.707,36		76,31
F2 bajo						1.273,98	4.893,27	10.006,67		25,54
F1		1.421,63	4.332,87	9.885,01	18.286,30	29.530,96	43.819,37	60.827,99		159,58
E2 alto					565,16	2.136,59	5.780,63	11.056,35		22,65
E2 bajo					516,08	1.950,04	4.575,97	8.138,48		16,72
H alto							1.160,42	4.104,65		9,73
H bajo					676,64	2.734,96	6.795,04	12.514,31		29,54
G					1.051,12	4.644,64	10.967,43	19.147,26		38,47
I							864,44	2.927,69		7,62
J2	361,59	1.272,32	3.203,62	6.105,75	10.104,43	15.358,48	22.076,20	30.369,17		57,43
J						1.555,51	6.271,27	14.578,25		21,25
K1 alto					371,82	1.267,35	3.085,06	5.427,39		15,62
K1 bajo					436,03	1.561,61	3.763,91	6.916,65		23,31
K2						761,33	2.883,10	6.272,03		14,17

Se muestran entonces los volúmenes acumulados por niveles. De izquierda a derecha se componen los volúmenes según la profundidad del tranque hasta llegar al volumen total. En AZUL, los niveles de extracción. En VERDE, los niveles de agua remanente y en AMARILLO el nivel más profundo del tranque que será el primero en perder efectividad por sedimentación. Se considera el nivel 0 como la base del muro y último punto, o última posibilidad, de extracción.

Esta organización por niveles se muestra junto a los volúmenes totales y relación agua muro para poder **seleccionar qué tranques son propicios para gene-**

rar un sistema de riego urbano sustentable. Así es como queda demostrado que los tranques con mejor retorno de $[m^3]$ de agua por cada $[m^3]$ de muro construido son aquellos fondos de quebrada cóncavos que permiten una acumulación importante por debajo del nivel del muro. Posterior a esto, fue necesario analizar el **estado de las áreas aportantes** de las zonas candidatas a tranques para identificar posibles contaminantes de los efluentes de quebradas, encontrando algunas con usos industriales (acopio de sedimentos) que podrían afectar el funcionamiento esperado del tranque. Es por esto, que se propone el sistema de tranques creando muros en las siguientes quebradas:

Tabla 2. Resumen de los aspectos generales de los tranques seleccionados.
Elaboración propia. 2022.

Quebrada	Tranque	Volumen total $[m^3]$	Superficie lleno $[m^2]$	Área Aportante $[m^2]$	Volumen efectivo $[m^3]$
Francia	C	21.115,3	8.032,9	573.878	12.692,0
Argentina	F1	60.828,0	19.326,1	402.249	31.297,0
Santos Ossa	J2	30.369,2	9.485,4	273.223	15.010,7

Esta tabla resumen logra definir las características generales de los tranques, y se puede observar que el volumen extraíble o volumen efectivo es **aproximadamente un 50% del volumen total de cada tranque.** El volumen efectivo total entre los 3 tranques es de **58.999,8 $[m^3]$** , lo que es más del doble de la demanda anual de riego urbano, lo que da señales de lograr suplir esta demanda preliminarmente. Para asegurar y proyectar que se cumplirán estos volúmenes es necesario entender las entradas y salidas de agua del sistema propuesto.

BALANCE HÍDRICO GENERAL

Para poder evaluar los recursos hídricos de una cuenca, subcuenca o quebrada, requiere de la esti-

mación correcta del ciclo hidrológico, es decir, **comprender las fases del agua**, desde que se recibe por precipitación y se reparte por escorrentía e infiltración para luego devolverse a la atmósfera con la evapotranspiración. Para esto existe la **ecuación de Balance Hidrológico**, expresión simple de entender, aunque en **la cuantificación de sus términos se suelen encontrar dificultades** y diferencias por la falta de medidas directas de factores ambientales y la sensibilidad a ellos. Conceptualmente:

- Del agua que cae en un determinado sitio (Precipitación = P),
- Parte de esta vuelve a la atmósfera por evaporación directa o transpiración de vegetación (Evapotranspiración = ET),

- Otra parte escurre por la superficie debido a la gravedad (Escorrentía superficial = Esc),
- Y una última fracción nutre las aguas subterráneas o acuíferos colándose por la superficie (Infiltración = I).

Entonces la expresión sería:

$$P=ET+Esc+I$$

BALANCE HÍDRICO PARA SISTEMA DE TRANQUES

El balance hídrico para los tranques necesita agregar nuevos factores además de los ya mencionados. Una vez ocurren las precipitaciones hay varias desviaciones de caudal que considerar antes de acumularlas en los tranques:

•Captación en vegetación

Según el artículo “Pérdidas por intercepción de la vegetación” de López-Lambraño (López-Lambraño, Fuentes, González-Sosa, & López-Ramos, 2017) se estima que un 19,85% de la precipitación caída es **interceptada por la vegetación sin lograr llegar al suelo**. Esto fue cuantificado para vegetación semiárida herbácea y arbórea, lo que describe de buena manera el comportamiento de las quebradas.

•Infiltración de escorrentía en suelos

Luego, del agua que logra llegar al suelo, un porcentaje es infiltrado y el resto se transforma en escorrentía. Este porcentaje fue estimado de las tablas de coeficiente de escorrentía de Prevert (1986), la composición del suelo de los sectores inspeccionados es prácticamente arcilloso y de pendientes predominantes de valor mayor a 25%. Por lo que se utilizará un factor de escorrentía $C=0,68$.

Esto significa que del 100% del agua que logra tocar el suelo, **un 32% es captada hacia el subsuelo** y el resto, un 68%, es convertido en escorrentía.

En términos generales, por cada evento lluvioso, **un 54,51% del agua caída se convierte en escorrentía en los fondos de quebrada**. Es esta la base de cálculo para el único ingreso de agua al sistema de tranques de acopio.

•Sedimentos

Según el estudio realizado por Arcadis en conjunto con la DOH denominado “Estudio de Factibilidad y Diseño del sistema de tranques desarenadores de Valparaíso” existe una tasa aproximada de **rendimiento o generación de sedimentos** según las características geomorfológicas del terreno de cada subcuenca.

Tabla 3. Generación de sedimentos en función del área aportante y en función directa de cada [mm] precipitado. Elaboración propia. 2022.

Quebrada	[m ³ Sed./m ² Área]	Tranque	[m ³ Sed./mm]
Francia	0,00063	C	1,1588
Argentina	0,00043	F1	0,5580
Santos Ossa	0,0007	J2	0,6522

Modelado con una precipitación total anual de 310 [mm] que fue la reportada en 2015 para la ciudad de Valparaíso (Directemar)¹⁰. Con estos datos se puede **cuánto sedimento se puede llegar a generar** en presencia de precipitaciones.

¹⁰ “Pluviometría Histórica de Valparaíso”, Directemar, 2021.

•Evapotranspiración

La evapotranspiración es la cantidad de agua que retorna a la atmósfera, tanto por transpiración de la vegetación como por la evaporación del suelo. **Su magnitud depende del agua realmente disponible**, es decir, la que el suelo a logrado retener para consumo de vegetación, así como la que ha sido interceptada por esta y la presente en los cuerpos de agua, todo principalmente determinado por las entalpías de los estados del agua presentes y calores específicos de los materiales contenedores y/o circundantes.

Bajo esta premisa, la temperatura de la ciudad, y sobre todo de las cotas altas de los cerros, **no ha variado en los últimos años**, gracias a la cercanía al mar que regulariza las temperaturas y a los fuertes vientos que caracterizan el comportamiento de la zona. Es por esto por lo que se decide que para los años venideros **se mantendrá constante la evaporación de la lámina de agua de los tranques**. Esta evaporación ocurre sólo en la superficie del cuerpo de agua, más específicamente en la **lámina de agua**, esto es una unidad de medida que permite expresar volúmenes en función de su superficie, haciendo el símil de que 1[mm] es equivalente a 1[L] de agua por cada [m²]. Esta lámina de agua dependerá entonces del **área superficial del**

cuerpo de agua que, a su vez, depende de la altura del agua del tranque. Todas estas situaciones son consideradas en la modelación para una mejor aproximación del balance hídrico.

•Infiltración de agua en Tranque

La infiltración de agua ocurre en los bordes inundados del tranque. Por toda esta área se filtrará agua al subsuelo paulatinamente. En uno de sus estudios, la FAO, organización de la ONU por la alimentación y la agricultura, considera que **para suelos arcillosos como el de los cerros porteños**, la tasa de infiltración diaria ronda la unidad 1[mm/día], o que es lo mismo, 30[mm/día] a lo largo de toda la superficie inundada. Valor que se asume constante para todo cálculo, sólo variando el área inundada, análogo al cálculo de evaporación y su lámina de agua.

•Demanda de riego para plazas y jardines

El riego urbano se realiza con camiones aljibe que transportan el agua a las distintas locaciones en el plan de Valparaíso y sus cerros. La cantidad de agua utilizada aproximadamente y las locaciones de riego fueron facilitadas por Pablo Enos del departamento de Parques y Jardines IMV, quien entrega una plantilla con la demanda mensual por parque o jardín regado.

Demanda Riego [m3]	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	TOTAL [m3]
	3032,6	3475,5	2982,9	2360,9	1686,7	1911,9	
Demanda Riego [m3]	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	24746,2
	1015,0	949,1	1552,4	1377,0	1915,6	2486,6	

Estos casi 25 mil [m³] son repartidos entre Valparaíso centro (Plan y Cerro Placeres principalmente), Playa Ancha y Placilla, concentrando la mayor parte del riego en plazas, parques y avenidas del gran Valparaíso. Se puede observar el **aumento en la demanda en la época estival**, más específicamente, desde las últimas lluvias importantes en Agosto hasta las primeras de Abril.

•Ayuda en combate de Incendios

Para estimar el uso de agua para el combate de incendios existen varias fórmulas que proponen cierto volumen por cantidad de metros cuadrados de amenaza. Pero la complejidad de este cálculo radica en que **las características del suelo, clima y vegetación involucrada hacen variar mucho esta relación**, y ante la falta de más información al respecto, se va a considerar lo proyectado por el **Plan de inversiones** presentado previamente y que propuso la instalación de estanques australianos. 12 de 18 estanques fueron (o serían) instalados dentro de la zona a estudiar, lo que significa que debería haber una disponibilidad de agua de 12x250 [m³], es decir, 3000 [m³] en toda la zona, que se hace necesaria sobretodo en la temporada seca de noviembre a marzo generalmente. Si bien esta no es una demanda mensual exacta, **si es un mínimo ineludible (condición de borde) si se quiere cumplir con un apoyo al combate de incendios.**

•Precipitaciones

La principal entrada de agua dentro del ciclo hidrológico, y varía tanto espacial como temporalmente en una cuenca y subcuenca. Es el agua que cae en una zona determinada y que puede ocurrir como lluvia, neblina, nieve, rocío, etc. La

proyección histórica de las cantidades caídas anualmente **posee un declive considerable**, aún así, las lluvias no son del todo predecibles, tanto en cantidad como en intensidad. Al entender lo complejo que es modelar una proyección de precipitaciones, se analizará el declive de estas a través de una **regresión lineal simple que proyecta los promedios calculados para los 4 periodos de 30 años** anteriores en un 5to periodo de 2020 a 2050.

Tabla 4. Tabla de precipitaciones anuales promedio según periodo y proyección para el 5to periodo. Servicio meteorológico de la Armada, Elaboración propia. 2021.

Inicio Periodo	Final periodo	Prom [mm]	Acc [mm]
1901	1930	507,8	15.218
1931	1960	380,4	11.399
1961	1990	371,7	11.040
1991	2020	363,1	10.837
2021	2050	291,6	8.748

Teniendo ya un promedio sobre el cual trabajar, se calcula el porcentaje de aporte individual de cada [mm] anual a su respectivo total del periodo (Acc[mm]) y, al igual que el cálculo de la evapotranspiración, se reparten estos 8.748[mm] proporcionalmente en los 30 años del periodo. Generando **el caso BASE**. Adicional a esto, es necesario **establecer un grado de incertidumbre** en el valor de las precipitaciones para un análisis de sensibilidad. Para esto se calcula el promedio de los 3 años con menores precipitaciones y los 3 años con el mayor valor, ambos valores serán el nuevo promedio para años secos y años húmedos, respectivamente. Generando los casos **Proyección Mínima y Proyección Máxima**. En la Ilustración 5 queda mejor graficada la diferencia entre los 3 escenarios propuestos.

DESARROLLO

MATRIZ DE FUNCIONAMIENTO

Con todos los datos ya presentados y organizados, se elabora una herramienta capaz de simular el comportamiento de los tranques basado en el balance hídrico antes presentado. Se utilizan las planillas de Excel para realizar este desarrollo que implica la acción conjunta de todos los factores, un análisis de base de datos. A continuación, el desglose de estos índices utilizados en la matriz de funcionamiento:

- **Precipitación valor Anual:** Valor extraído de la proyección de precipitaciones anuales realizado anteriormente.
- **Evapotranspiración valor Anual:** Valor extraído de la proyección de evapotranspiraciones anuales realizado anteriormente, donde se estima constante.
- **Precipitaciones, valores mensuales y valor acumulado:** Según el aporte mensual calculado, se estiman las fracciones que corresponde a cada mes, entregando una precipitación mensual. Además, se va registrando el acumulado de precipitaciones hasta la fecha como variable auxiliar.
- **Evapotranspiración, valores mensuales:** Según el aporte mensual calculado, se estiman las fracciones que corresponde a cada mes, entregando una evapotranspiración mensual.
- **Valores de riego mensual:** Extraídos directamente del valor entregado por la IMV.
- **Datos del Tranque:** Nombre, volumen total, volumen efectivo y volumen remanente.
- **Factores del Balance Hídrico y variantes auxiliares:** Corresponde a todas las entradas y salidas de agua y sedimento que posee el tranque más las respectivas variables auxiliares creadas para el funcionamiento de esta herramienta.

Para ejemplificar esta matriz, se muestra en la ilustración 6 anexada, una miniatura de la planilla de cálculo para un tranque.

FACTORES DEL BALANCE HÍDRICO

Estos son los factores que influyen en el balance hídrico y están cuantificados mes a mes. Están divididos por los flujos que representan:

- **Flujo de agua**
- **Flujo de sedimentos**
- **Pérdidas naturales**
- **Salida de agua**

A continuación, se detallan estos flujos y el cálculo asociado en la planilla Excel:

Escorrentía
Agua acumulada
Sedimentos captados
Sedimentos acumulados
Volumen total inicio mes
Volumen de Agua inicio mes
Nivel tranque
Agua Evaporada
Agua Infiltrada
Volumen Efectivo final mes
Demanda Riego
Nivel Sedimentos
Exceso escorrentía
Volumen de Agua final mes

Flujo de agua:

- **Escorrentía:** Fracción de agua caída que logra escurrir por los fondos de quebrada y llega al tranque. Su cálculo se basa en los [mm] caídos en el área aportante correspondiente [m²], restándole la intercepción por vegetación y la fracción infiltrada. Representado en la planilla como:

$$\frac{(PP \text{ del mes}) \left[\frac{L}{m^2} \right] \cdot \left(1 - \frac{\% \text{Captación veg.}}{100} \right) \cdot \% \text{Esc.}}{1000 \left[\frac{L}{m^3} \right]} \cdot \text{Área aportante} [m^2]$$

Entregando el volumen [m3] que llega al tranque al inicio de mes

- **Agua acumulada:** Variable auxiliar que representa el volumen de agua disponible para almacenamiento, esto es, la suma de la escorrentía generada el mes actual más el volumen de agua final el mes anterior.

$$\text{Escorrentía}_{(i)} [m^3] + \text{Volumen agua final mes}_{(i-1)} [m^3]$$

Definiendo (i) como el valor para el mes actual e (i-1) como mes anterior, entrega el volumen total en [m3].

- **Volumen total Inicio mes:** Volumen del tranque después del evento lluvioso al inicio del mes. Considera el caudal de escorrentía y el respectivo arrastre de sedimentos. Sirve para la determinación del nivel del tranque.

$$\text{Agua acumulada}_{(i)} [m^3] + \text{Sedimentos acumulados}_{(i)} [m^3]$$

Esta suma queda limitada con el comando if(x) de Excel que permite fijar el valor máximo que puede retener el tranque (capacidad máxima de cada tranque en [m3]).

- **Volumen agua inicio mes:** Representa la fracción del volumen total del tranque que es sólo agua. Separando de la otra fracción del volumen total del tranque ocupada por los sedimentos acumulados.

$$\text{Volumen total inicio mes}_{(i)} [m^3] - \text{Sedimentos acumulados}_{(i)} [m^3]$$

A este volumen se le aplican las pérdidas del mes.

- **Volumen efectivo final mes:** Volumen de agua que se encuentra por sobre los puntos de extracción después de las pérdidas naturales ocurridas durante el mes, es decir, este es el volumen almacenado en los 2 niveles más superficiales del tranque.

$$\text{Volumen de agua inicio mes}_{(i)} [m^3] - \text{Pérdidas naturales}_{(i)} [m^3]$$

Entregando el volumen [m³] disponible para la extracción en el mes i.

- **Volumen agua final mes:** Volumen total de agua al final del mes, luego de las pérdidas naturales y la extracción/consumo.

$$\text{Vol. agua inicio}_{(i)} - \text{Pérdidas naturales}_{(i)} - \text{Demanda}_{(i)}$$

Este valor [m³] considera el volumen efectivo que pueda quedar después de la extracción y el volumen de agua por debajo del nivel del muro o volumen remanente.

- **Exceso escorrentía:** Volumen de agua que escapa del tranque por rebalsamiento, de suceder.

$$\text{Agua acumulada}_{(i)} [m^3] - \text{Vol. agua inicio}_{(i)} [m^3]$$

Flujo de sedimentos:

- **Sedimentos captados:** Volumen de suelo erosionado y material particulado que es arrastrado por la escorrentía del mes. El cálculo es simple considerando la tasa de producción de sedimentos de cada tranque en función de los [mm] precipitados, calculada en el inciso de Sedimentos.

$$\text{Tasa rendimiento} \left[\frac{m^3 \text{ sedimentos}}{L} \right] \cdot (PP \text{ del mes}) \left[\frac{L}{m^2} \right]$$

• **Sedimentos acumulados:** Volumen total de sedimentos acumulados en el tranque hasta el mes actual. Como no existe un flujo de salida natural de sedimentos, sólo se considera su acumulación.

$$\text{Sedimentos captados}_{(t)}[m^3] + \text{Sedimentos acumulados}_{(t)}[m^3]$$

• **Nivel sedimentos:** Variable auxiliar que indica el nivel que ha alcanzado la acumulación de sedimentos en el tranque. Verifica la altura de sedimento para gestionar limpieza y poder visualizar el efecto que tiene el cúmulo de sólidos en el funcionamiento del tranque.

Con el comando if(x) de Excel, se compara el volumen acumulado de sedimentos con el volumen necesario para llenar cada nivel de cada tranque. Se establece también una distinción por colores a modo de alarma, resaltando en Amarillo cuando se alcanza un nivel importante, pero no compromete los puntos de extracción; y en Rojo cuando el nivel de sedimentos ya alcanza y tapa los puntos de extracción.

Pérdidas naturales de agua:

• **Nivel tranque:** Variable auxiliar que indica la altura del volumen total del tranque. Lo que sirve para ubicar la extensión de la lámina superficial de agua y el área inundada. Con la fórmula if(x) se comprueba el *Volumen total inicio mes* y se le asigna un valor natural según el nivel del tranque.

• **Agua evaporada:** Volumen de agua que se evapora naturalmente cada mes. Para su cálculo se utiliza el valor mensual de evapotranspiración en [mm] (lámina de agua).

$$\frac{(\text{EVA del mes}) \left[\frac{L}{m^2} \right] \cdot \text{Superficie tranque} [m^2]}{1000 \left[\frac{L}{m^3} \right]}$$

• **Agua infiltrada:** Volumen de agua que se filtra naturalmente cada mes. Para su cálculo se utiliza el valor previamente reportado para suelo arcilloso saturado [mm] y se asume constante.

$$\frac{\text{Infiltración mensual} \left[\frac{L}{m^2} \right] \cdot \text{Superficie tranque} [m^2]}{1000 \left[\frac{L}{m^3} \right]}$$

Salida de agua:

• **Demanda de riego:** Volumen de agua que es extraído para el riego de plazas y jardines mensualmente. Con el comando if(x) se comprueba el *Volumen efectivo final mes* alcanza para suplir la fracción de demanda correspondiente a cada tranque (un tercio de esta). De no poder suplir su parte, es decir, que el *Volumen efectivo final mes* sea menor a un tercio de la demanda de riego mensual, retornará el valor máximo que permita este volumen. También comprueba si los otros tranques logran aportar su fracción de demanda, de no ser así, se reparte la demanda entre los tranques que puedan con los volúmenes que puedan.

Todo esto para poder robustecer la simulación en pos de una disposición del recurso adecuada.

RESULTADOS: RESUMEN ANUAL

La metodología presentada permite entregar distintos escenarios en función sólo de la precipitación anual, logrando analizar las variantes de cada caso

y el comportamiento de los tranques. Debido a la extensión de cada simulación, **los 14 valores mensuales por cada tranque por 30 años se resumirán a valores anuales** (valores mensuales en hoja de cálculo). Estos indicadores principales de control corresponden a las condiciones de borde de funcionamiento. **El sistema de tranques se valida a través del cumplimiento de:**

- **Demanda:** Indica si aporta los volúmenes que se esperan conseguir para suplir la demanda de riego, de no ser así, marcará en año en rojo. En otras palabras, indica si aporta menos de 8.249[m³] anuales.
- **Sedimentos:** Indica el nivel de que van adquiriendo el cúmulo de sedimentos en cada tranque, con el propósito de poder predecir y coordinar las limpiezas de ser necesarias. Amarillo indica advertencia ante la acumulación superior a 15% e inferior al 50% del volumen efectivo.
- **Volumen Efectivo:** Corroborar que los tranques estén aportando al sistema. En rojo aparecen los meses en el año en que algún tranque no tuvo extracción de aguas debido a un nivel bajo o acumulación de sedimentos.

La ilustración 7, 8 y 9 anexadas, muestra la efectividad de los tranques en los 3 escenarios: **Mínimo, Máximo y BASE** respectivamente. Las observaciones realizables son:

• **Escenario con mínimo de precipitaciones (años secos)**

En el escenario con menor promedio de precipitaciones, los tranques **demuestran poder cumplir a la perfección con la demanda de riego la mayoría de los años**, incluso en el mínimo registrado para el periodo con 72[mm] anuales. Debido a la disminución en la cantidad precipitada, los tranques demoran más

es llenarse y alcanzar un volumen suficiente para empezar a cumplir la demanda. Para el Tranque C, pasó de 1 a 2 meses de llenado inicial; Para el tranque F1 la situación varió bastante, demora 13 meses en lograr que el nivel de agua llegue a la altura del muro; Para el Tranque J2,11 meses en lograr tener volumen extraíble. Esta baja en las precipitaciones también significa un **menor arrastre de sedimentos**, lo que atrasa hasta para un próximo periodo la limpieza del único tranque que lo necesitaría, el Tranque C.

• **Escenario con máximo de precipitaciones (años húmedos)**

Este escenario con abundancia de precipitaciones asegura aún más los volúmenes extraíbles de cada tranque, **reduciendo a la mitad el tiempo de llenado inicial** de cada uno, en relación al caso BASE. Una mayor presencia de lluvias también significa un **mayor transporte de sedimentos y suelo erosionado** desde las áreas aportantes al tranque. Lo que se ve reflejado en la acumulación de sedimentos del Tranque C, que los últimos 10 años opera con capacidad reducida y probable aumento de sedimentos suspendidos en las aguas retiradas, deteriorando la calidad del agua y adelantando la urgencia de un retiro de sedimentos en este Tranque de menor profundidad y mayor área aportante.

• **Escenario Base**

El análisis de los escenarios extremos (mín, máx) revela que el sistema de tranques es bastante robusto en cuanto a aseguramiento del recurso hídrico y que la acumulación de sedimentos tarda varios años en alcanzar un nivel que entorpezca el funcionamiento y extracción del agua acumulada.

Considerando entonces la importancia de realizar retiros de sedimentos es que al escenario principal, el caso BASE, **se le proyecta al menos una limpieza durante todo el periodo** para evitar una acumulación importante. Esta limpieza para el Tranque C está proyectada para el 16° año después de la puesta en marcha y retiraría 3511[m³] de sedimento cuando existía un cúmulo de 5024[m³], prolongando el buen funcionamiento del tranque. Retirar los sedimentos cuando estos **ya hayan llegado a la base del muro**, significaría un volumen aproximado de 8423[m³] para

el tranque C, 29.530[m³] para el Tranque F1 y 15.358[m³] para el Tranque J2. Aunque estos 2 últimos no alcanzan estos niveles en el periodo proyectado (2020-2050).

En resumen, considerando los escenarios presentados, se puede concluir que **este sistema de tranques logra suplir completamente la demanda de riego** y con remanentes importantes. Al consolidar la información entregada por esta matriz de funcionamiento, se pueden promediar los flujos de agua de los tranques en las siguientes tablas:

Tabla 5. Desglose de los promedios de los volúmenes utilizables por tranque. Elaboración propia. 2022.

Tranque	Vol máximo extraíble mensual [m ³]			Vol máximo extraíble anual [m ³]		
	Caso BASE	Caso Mín	Caso Máx	Caso BASE	Caso Mín	Caso Máx
C	1.800	1.700	2.000	21.600	20.400	24.000
F1	3.000	1.500	3.800	36.000	18.000	45.600
J2	1.800	1.200	2.000	21.600	14.400	24.000
Total	6.600	4.400	7.800	79.200	52.800	93.600

Se observa que cada mes se puede extraer entre 4.400 y 7.800 [m³], **se considerarán los 6.600 [m³] del caso BASE.**

Tabla 6. Valores anuales para salidas de agua de cada tranque Agua para riego VS Volumen utilizable. Elaboración propia. 2022.

Tranque	Agua para riego urbano [m ³]	Pérdidas Naturales [m ³]		Vol utilizable restante [m ³]
		Eva	Inf	
C	8.249	4.161	2.880	13.351
F1	8.249	9.952	6.888	27.751
J2	8.249	4.906	3.394	13.351
Total	24.746	19.019	13.162	54.454

Este sistema de tranques logra otorgar anualmente un volumen de agua equivalente a 79.200[m³], de los cuales 24.746[m³] corresponden a cubrir el riego urba-

no de plazas y jardines y permitiendo una infiltración anual de 13.162 [m³] en el subsuelo, dejando a disposición un total de **54.454[m³] utilizables anualmente.**

CONCLUSIONES

RESUMEN ECONÓMICO: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La tabla 24 muestra los factores económicos considerados en el balance de caja, los ingresos representados por la valorización del agua extraída y los costos de utilización y mantención. **La depreciación de los activos fijos sólo corresponde a la depreciación de los camiones** adquiridos para darle autosuficiencia al proyecto, los cuales, según el Servicio de Impuestos Internos (SII), sucede en 7 años con un valor residual estimado en un 35% del valor inicial. Las construcciones de hormigón y fierro poseen una vida útil de 80 años, pero también se especifica que los tranques y obras de captación de agua son de duración indefinida, por lo tanto, **indepreciables** (SII, 2003)¹¹.

Suponiendo que el lector está familiarizado con algunos de los criterios de decisión de inversión, como el valor actual neto (VAN), el periodo de recuperación de la inversión (PAYBACK) y la tasa interna de retorno (TIR), se procede a **validar el flujo de caja con el análisis de sensibilidad de la tasa de interés que otorgue la entidad financiera** y análisis de la variación en el valor del agua cosechada.

El análisis de sensibilidad del agua recolectada muestra a qué valores puede estar sometido el recurso hídrico recolectado y cómo influye en la viabilidad del proyecto presentado. Valores menores al considerado inicialmente arrojan un VAN y TIR negativos, proponiendo no invertir por los bajos retornos.

Tabla 7. Índices de flujo de caja. Elaboración propia. 2022.

Índice
Ingreso
Venta agua
Demanda Riego urbano
Total INGRESOS
Costos
Salarios
Limpiezas
Interés Préstamo
Depreciación Activos Fijos
Total COSTOS
Utilidad Operacional
Amortización Préstamo
Depreciación Activos Fijos
Inversión Inicial
FLUJO NETO
Flujo acumulado

Tabla 28. Análisis de sensibilidad al valor de venta del agua recolectada a 80 años. Elaboración propia. 2022.

ANÁLISIS SENSIBILIDAD VALOR AGUA RECOLECTADA					
Variación	Precio por m3	VAN	TIR	PAYBACK	
-50%	CLP 241,68	CLP (544.955.765)	-	-	-
-20%	CLP 386,69	CLP (208.707.431)	1,13%		65
0%	CLP 542,37	CLP 0	3,00%		24
+20%	CLP 656,99	CLP 265.774.918	4,80%		15
+50%	CLP 725,04	CLP 646.635.147	9,06%		14

Por lo tanto, se establece que para levantar y mantener el sistema de tranques de acopio de aguas lluvias el valor del agua recolectada debe ser mínimo de **547,49 [CLP/m³]**. Y así lograr percibir retornos al 24º año y permitiendo a los indicadores de inversión **mostrar el mínimo aconsejable para la inversión**. Se comprobó, a través del portal de transparencia, que actualmente el Departamento de Parques y Jardines invierte anualmente **CLP 22.040.741 en 24.117 [m³]**, significando que el valor del m³ es de 931,9 [CLP/m³].

¹¹ Servicio de Impuestos Internos, Vida útil de los bienes físicos del activo inmobiliario. 2003.

Este proyecto permite la cosecha de agua desde fuentes pluviales como solución basada en la naturaleza para el ahorro máximo de 371.53 [CLP/m³], lo que se traduce en un ahorro CLP 8.960.189 anuales.

PLAN MAESTRO

Consolidando la información entregada y los resultados obtenidos, ***se recomienda la instalación de un sistema de estructuras hídricas*** que permitan el acopio de aguas lluvias generando importantes volúmenes que pueden ser utilizados para las demandas de la zona. En este caso, los 3 tranques de acopio permiten el volumen capturado nominal total de **112.312,51 [m³]** de aguas lluvias y permitiendo el aprovechamiento anual de **54.454[m3]**, que al ser traducido al valor actual del agua de riego (931,9 [CLP/m³]) ***significan un total de CLP 50.745.682 anuales.***

Si bien la evaluación económica de este estudio puede parecer poco llamativa para la inversión, no hay que olvidar que la razón principal del proyecto es ***poder aprovechar algo de las aguas lluvias que escurren por las quebradas***, generando nuevas fuentes de agua utilizable directamente para riego urbano aliviando la cartera municipal y la creciente sequía que afecta la región.

Según los estudios de Fundación Chile presentados en **Antecedentes**, dentro de los objetivos para proyectos que permitan disminuir la brecha hídrica en Chile, están la generación de nuevas fuentes de agua y una correcta gestión del recurso. Lo cual se propone con la implementación del sistema de tranques.

Este proyecto es conveniente no sólo por su valor económico y capacidad de generar agua para dis-

tintas utilizaciones, sino también porque los ***cuerpos de agua logran nutrir el terreno circundante mejorando las condiciones del medio*** para la proliferación de vegetación con una infiltración de **12.676,75 [m3] anual**. La humedad que comparten estos cuerpos de agua con el entorno permite que los suelos se erosionen a una menor tasa y eleva la humedad de terrenos que en más de algún momento han sufrido siniestros incendiarios. Como se menciona en antecedentes previos, aumentar la humedad e infiltración de los suelos de las quebradas ***es un factor clave para la prevención de riesgos y resguardo del entorno*** (Magrini & Pedraza, Territorio y Paisaje H30 Infiltración, 2016).

La utilidad de generar cuerpos de agua en las quebradas impacta positivamente en más de un ámbito, incluyendo también la ***capacidad de proyectar un uso participativo y comunitario de espacios públicos***, aumentando la plusvalía del terreno circundante y calidad de vida de los habitantes.

PROYECCIONES Y PLUSVALÍAS

La capacidad de transformar este sistema de tranques en espacios públicos les agregaría plusvalía a los terrenos ya que el turismo y espacios recreativos son lo que está haciendo falta en Valparaíso. Con una tasa de **1,25 [m² de área verde / habitante] cuando la OMS recomienda valores entre 10-15**, la ciudad de Valparaíso se encuentra de las últimas en la lista de ciudades con menos áreas verdes por habitante según el Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2019)¹². Estos tranques presentan la oportunidad para que los planes reguladores consideren la generación de espacios públicos que aporten en la calidad de vida porteña.

12 INE, "INE presenta mapas que muestran comunas con mejor y peor acceso a áreas verdes en el país". 2019.

Además, este tipo de proyecto permite el acoplamiento de acciones o medidas que permitan la eficiencia del proceso de captación o extracción. **Como la instalación de atrapanieblas** que puedan aumentar el caudal de cada evento lluvioso, permitiendo tener disponible una mayor cantidad de agua a través de un mejor sistema de captación.

En definitiva, este proyecto permite la generación de nuevas fuentes de agua para la ciudad de Valparaíso, afectando positivamente al desarrollo sostenible de la comunidad.

RECOMENDACIONES PERTINENTES

El precio estimado de venta del recurso hídrico recolectado está basado en los documentos entregados por Depto. Parques y Jardines, los cuales estaban incompletos y poco precisos. Es necesario un levantamiento de información más allá del portal de Transparencia, **además de métodos, recorridos y tiempo empleado**. Todo esto para mejorar el perfil de riego presentado en este documento. Así también es recomendable establecer las propiedades, de existir, de los terrenos donde los tranques estarán instalados. La página del SII posee herramientas para la determinación de propiedades, más los mapas que ahí se encuentran no entregan información de estos terrenos prácticamente baldíos.

Por último se deja estipulado que la intención de levantar estas estructuras hídricas va más allá del retorno económico generado, sino del aumento en la calidad de vida de los porteños y porteñas, por lo que cualquier medida, acción o solución que pueda agregar funcionalidad al sistema de tranques, es merecedor de análisis. **Por lo que esperamos este documento sea sólo el primer paso** para la creación de corredores ecológicos y paisajes productivos.

CONCURSO DE
**TESIS DE INTERÉS
REGIONAL 2023**



CRUV
CONSEJO DE RECTORES
DE VALPARAÍSO

El Consejo de Rectores de Valparaíso efectúa sesiones mensuales y ha creado diversas comisiones para coordinar actividades conjuntas, como son Alerta (Prevención de VIH Sida), Relaciones Internacionales, Vida Sana, Inclusión, Patrimonio, Consciente.

Hoy además de las anteriores se han integrado las Comisiones de Salud Mental, Género, Cambio Climático, junto a la Fundación Interuniversitaria para la Sustentabilidad Territorial.

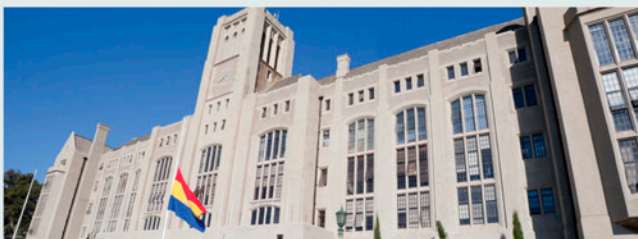
En mayo de 2007 se aprueba la conformación de la Comisión MACRO, de acuerdo con lo propuesto en el Plan Estratégico, para proponer la integración de las diversas comisiones y grupos de trabajo, y presentar al Consejo los presupuestos de las actividades anuales, designándose a un representante por cada Universidad.

Valparaíso, diciembre 2023.

Comisión MACRO Consejo de Rectores de Valparaíso 2023.
UTFSM. Daniel Ramírez Livingston
PUCV. Gianni Rivera Foo
UPLA. Leandro Vivanco Huerta
UV. Omar Jara Aravena
Secretaría Ejecutiva: Andrea Mora Zamorano



El Gobierno Regional de Valparaíso se encuentra elaborando la Estrategia Regional de Desarrollo, la que, en la etapa de diagnóstico levantó insumos a partir de instancias participativas realizadas en los diferentes territorios, además de entrevistas a informantes claves.



Los insumos levantados corresponden a información sobre atributos regionales y principales problemáticas de la región de Valparaíso.



El Consejo de Rectores de Valparaíso seleccionó algunas de las principales problemáticas para orientar las tesis de pregrado de este presente concurso, las que son:

- Medio Ambiente, Cambio Climático y Escasez Hídrica.
- Habitabilidad, vivienda y asentamientos irregulares.
- Movilidad, Transporte y Conectividad.
- Desarrollo Económico socialmente justo y ambientalmente sostenible.



Estas orientaciones entregadas a los tesis de las universidades del CRUV representan parte de los esfuerzos que la academia aporta a entender y apoyar la solución de estos problemas regionales.