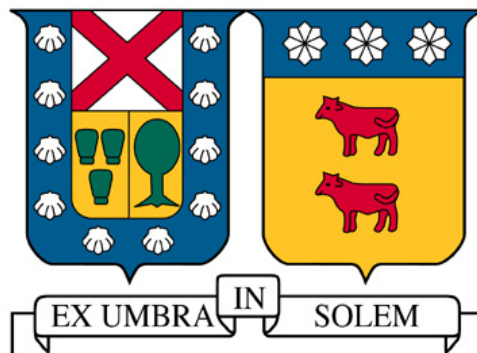


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA  
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS  
SANTIAGO – CHILE



ANÁLISIS COMPARATIVO DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub> EQUIVALENTE  
EN EDIFICACIONES UNIVERSITARIAS: CASO DEL EDIFICIO DE  
CIENCIAS Y EL AULARIO B EN EL CAMPUS CURAUMA DE LA  
PUCV

DANIEL GONZALO RADRIGÁN VALENCIA

TRABAJO FINAL PARA OPTAR AL GRADO DE  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: SRA. MARÍA PILAR GÁRATE

OCTUBRE 2025



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción):  Memoria o trabajo de título;  Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Análisis comparativo de emisiones de CO2 equivalente en edificaciones universitarias: Caso del edificio de ciencias y el aula B en el Campus Curauma de la PUCV

Nombre del candidato(a): Daniel Radrigan Valencia

Carrera / Grado: Magíster en Ingeniería Industrial

Campus: Santiago Vitacura ; Departamento: Industrias

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, María Pilar Gárate, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses;  12 meses;  2 años;  3 años;  5 años;  10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

### 4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 21/10/2025 ; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 16-10-2025

; Firma:

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Quiero expresar, en primer lugar, mi profundo agradecimiento a mi esposa Pía, quien me brindó su apoyo incondicional durante estos casi tres años de estudios para completar el Magíster. Sin su compañía y respaldo, este logro no habría sido posible. Ella fue mi pilar fundamental, permitiéndome asistir a clases, realizar las tareas y finalizar este trabajo de tesina. Su empuje y ánimo hicieron que todo el esfuerzo fuera mucho más llevadero y gratificante.*

*Asimismo, agradezco hacia el futuro a mi hija Antonia, quien representa la inspiración última de todo este esfuerzo realizado.*

*Extiendo una mención especial a quienes me acogieron en sus hogares en más de una ocasión durante mis viajes de fin de semana a Santiago: mi hermano Guillermo junto a Karin y mis sobrinas Sofía y Valentina; mis amigos Víctor y Marina y su familia; y finalmente, mis amigos Paco y Ari y su familia. Finalmente, darle las gracias por el apoyo entregado a mi familia, de parte de mis suegros Gladys y Ernesto.*

# 1 Resumen Ejecutivo

En el marco del Plan de Desarrollo Estratégico Institucional 2023-2029, la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV) se plantea como meta transitoria avanzar hacia la carbono neutralidad al año 2030. Este estudio tiene como propósito comparar las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente generadas por dos edificios del campus Curauma: el Edificio de Ciencias (en operación) y el Aulario B (proyectado para entrar en funcionamiento en marzo de 2026). La metodología empleada combina datos históricos del edificio existente con estimaciones proyectadas del nuevo edificio, evaluando consumos de agua potable, electricidad y Gas Licuado de Petróleo (GLP), y convirtiendo estos consumos en emisiones de gases de efecto invernadero mediante factores estándar de conversión.

Los resultados muestran que el Aulario B logra una reducción global de emisiones equivalente del 21,8% por metro cuadrado construido en comparación con el Edificio de Ciencias. En cuanto al consumo de GLP, se estima una disminución del 77,6%, dada la eliminación del uso de calderas para climatización y su reemplazo por sistemas eléctricos más eficientes. El uso de energía eléctrica también se optimiza, con una baja del 11,2% gracias a la incorporación de climatización en base a Chillers con tecnología Inverter, luminarias LED y controles automáticos. En el ámbito hídrico, las emisiones asociadas al consumo de agua potable se reducen un 31,2% mediante grifería eficiente y la reutilización de aguas grises para riego, y el factor de recuperación del agua disminuye de 0,885 a 0,75 reflejando una menor proporción de agua vertida al alcantarillado.

Estos resultados indican que las mejoras en eficiencia energética, la transición a sistemas eléctricos más avanzados y la gestión responsable del recurso hídrico pueden contribuir de forma sustancial a la reducción de la huella institucional de carbono, alineándose con los objetivos estratégicos de la PUCV. Cabe mencionar, que en el ámbito económico, las mejoras no son rentables asumiendo sólo ahorros de consumos de servicios, pero esta situación podría cambiar considerando otros aspectos como el aumento de la matrícula de alumnos.

## 2 Índice

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>2</b>
<b>1 RESUMEN EJECUTIVO</b> .....	<b>3</b>
<b>2 INDICE</b> .....	<b>4</b>
<b>3 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>7</b>
<b>4 OBJETIVOS</b> .....	<b>9</b>
4.1.1 <i>Objetivo General</i> .....	9
4.1.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	9
<b>5 ALCANCE</b> .....	<b>10</b>
<b>6 METODOLOGÍA PROPUESTA</b> .....	<b>11</b>
<b>7 DESARROLLO DEL TEMA</b> .....	<b>12</b>
7.1 EDIFICIO DE CIENCIAS.....	12
7.1.1 <i>CO2 Equivalente</i> .....	12
7.1.2 <i>Ubicación y contexto</i> .....	15
7.1.3 <i>Levantamiento de Información Edificio de Ciencias</i> .....	16
7.1.4 <i>Descripción de las Instalaciones Existentes</i> .....	16
7.1.5 <i>Análisis de Consumos Eléctricos</i> .....	18
7.1.6 <i>Análisis de Consumos de Agua</i> .....	20
7.1.7 <i>Análisis de Consumos de GLP</i> .....	23
7.1.8 <i>Resumen de Resultados</i> .....	24
7.2 EDIFICIO AULARIO B.....	25
7.2.1 <i>Descripción de las Instalaciones Proyectadas</i> .....	26
7.2.2 <i>Análisis de Consumos de Agua</i> .....	30
7.2.3 <i>Análisis de Consumos Eléctricos</i> .....	36
7.2.4 <i>Análisis de Consumos de GLP</i> .....	37
7.2.5 <i>RESULTADOS FINALES</i> .....	39
<b>8 ANÁLISIS ECONÓMICO</b> .....	<b>41</b>
8.1 CONSUMO DE AGUA POTABLE.....	41
8.1.1 <i>Determinación del precio unitario</i> .....	41
8.1.2 <i>Análisis de las características del consumo</i> .....	41
8.2 CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	42

8.2.1	<i>Determinación del precio unitario</i> .....	42
8.2.2	<i>Análisis de las características del consumo</i> .....	43
8.3	CONSUMO DE GLP .....	44
8.3.1	<i>Determinación del precio unitario</i> .....	44
8.3.2	<i>Análisis de las características del consumo</i> .....	45
8.4	PARÁMETROS DEL FLUJO DE CAJA .....	45
8.4.1	<i>Plazo</i> .....	45
8.4.2	<i>Tasa de descuento</i> .....	46
8.4.3	<i>Venta de bonos de carbono</i> .....	47
8.4.4	<i>Inversión inicial</i> .....	48
8.5	FLUJO DE CAJA .....	48
<b>9</b>	<b>ANÁLISIS GENERAL</b> .....	<b>49</b>
<b>10</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>51</b>
<b>11</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>54</b>

## INDICE DE FIGURAS

Fig. 1:	Plano de Ubicación del Campus Curauma PUCV .....	15
Fig. 2:	Vista aérea Campus Curauma sector poniente .....	16
Fig. 3:	Vista de áreas verdes en Campus Curauma .....	22
Fig. 4:	Render del Edificio Aulario B .....	25
Fig. 5:	Vista referencial de un humedal de flujo subsuperficial .....	27

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Detalle de artefactos sanitarios .....	17
Tabla 2:	Detalle de artefactos eléctricos .....	17
Tabla 3:	Consumos anuales de energía eléctrica edificio Ciencias .....	18
Tabla 4:	Factores de emisión del Sistema Eléctrico Nacional SEN 2017-2023 .....	19
Tabla 5:	Cálculo de emisiones por consumo de energía eléctrica Edificio Ciencias .....	19
Tabla 6:	Cuadro de superficies .....	20
Tabla 7:	Consumos anuales de agua potable Edificio Ciencias .....	20
Tabla 8:	Cálculo de emisiones por consumo de agua potable Edificio Ciencias .....	21
Tabla 9:	Cálculo de emisiones por tratamiento de aguas servidas Edificio Ciencias .....	23

Tabla 10: Consumos anuales de gas GLP Edificio Ciencias .....	24
<b>Tabla 11:</b> Cálculo de emisiones por consumo de gas GLP Edificio Ciencias.....	24
Tabla 12: Resumen de caudal instalado en Edificios Aulario A, Periodismo y Ciencias ...	31
Tabla 13: Consumos anuales de agua potable Edificio Ciencias .....	31
Tabla 14: Resumen de caudal instalado en Edificio Aulario B.....	32
Tabla 15: Relación de caudal total instalado y consumo anual de agua potable Edificio Aulario B .....	33
Tabla 16: Cálculo de consumos por persona Edificio Aulario B .....	34
Tabla 17: Cálculo de emisiones por consumo de agua potable Edificio Aulario B.....	35
Tabla 18: Cálculo de emisiones por tratamiento de aguas servidas Edificio Aulario B .....	35
Tabla 19: Cálculo de emisiones por consumo de energía eléctrica Edificio Aulario B .....	37
Tabla 20: Cálculo de emisiones por consumo de gas GLP Edificio Aulario B .....	39
Tabla 21: Resultados finales del estudio.....	39
Tabla 22: Valor por m <sup>3</sup> de agua potable año 2023 .....	41
Tabla 23: Valor por KW-h de energía eléctrica año 2023.....	43
Tabla 24: Valor por m <sup>3</sup> de GLP año 2023 .....	44
Tabla 25: Referencias para tasa de descuento .....	46
Tabla 26: Flujo de caja.....	48

### 3 Introducción

En las últimas décadas, la preocupación por la sostenibilidad ha adquirido una relevancia creciente debido al impacto que las actividades humanas ejercen sobre el medio ambiente. La explotación de los recursos naturales a ritmos insostenibles, el incremento continuo de las emisiones de gases de efecto invernadero y la creciente evidencia de los efectos del cambio climático han resaltado la necesidad de adoptar estrategias que aseguren un equilibrio entre el desarrollo económico, la equidad social y la conservación ambiental.

La sostenibilidad no se limita al ámbito ambiental, sino que abarca también dimensiones económicas y sociales. La implementación de estrategias como la producción limpia, el uso eficiente de los recursos y la minimización de residuos resulta esencial para garantizar un desarrollo que no comprometa el bienestar de las generaciones futuras. Este enfoque es particularmente relevante en instituciones de educación superior, donde las políticas sostenibles no solo fortalecen la Fig. institucional, sino que también contribuyen a la reducción de costos operativos y al cumplimiento de normativas ambientales más estrictas.

En este contexto, la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), fundada en 1928, ha evolucionado desde sus inicios como una institución enfocada en ciencias aplicadas y comercio, hasta convertirse en una universidad integral con un fuerte compromiso hacia la sostenibilidad. Su "Plan de Desarrollo Estratégico Institucional 2023-2029" incorpora una visión sistémica, integrando principios sostenibles en sus procesos académicos, administrativos y de infraestructura. Uno de sus objetivos más ambiciosos es alcanzar la carbono neutralidad para el año 2030, un desafío que posiciona a la universidad como líder en la promoción de prácticas responsables y sostenibles.

Dentro de este marco, las obras de infraestructura juegan un rol crucial en la operación de la universidad, especialmente por el impacto que estas tienen en las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) asociadas a sus actividades. La eficiencia en el uso de la energía y el agua en los edificios es un factor determinante para reducir la huella ambiental institucional y cumplir con los compromisos de sostenibilidad. En este sentido, resulta fundamental evaluar el desempeño de edificaciones existentes y compararlo con nuevas infraestructuras que incorporan tecnologías más eficientes.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la sostenibilidad de las operaciones de dos edificios clave del Campus Curauma: el Edificio de Ciencias, en funcionamiento desde 2009, y el Aulario B, actualmente en etapa de construcción, cuya apertura está programada para marzo de 2026. Este análisis se basa en la cuantificación de consumos de agua potable, energía eléctrica y Gas Licuado de Petróleo (GLP), con el fin de calcular los ratios de CO<sub>2</sub> equivalente por unidad de superficie construida. Además, se realizarán estimaciones de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el Aulario B, utilizando información proveniente de documentos de diseño, estudios de especialidades, literatura científica y bases de datos confiables.

Los resultados permitirán comparar las emisiones generadas por ambos edificios y determinar si las medidas implementadas en el nuevo proyecto se traducen en una reducción significativa de la huella de carbono. Este estudio busca concluir si las mejoras en eficiencia energética y consumo de recursos reflejan el compromiso institucional de la PUCV con su Plan Estratégico 2023-2029, evaluando el impacto concreto de las decisiones arquitectónicas y operacionales en el logro de sus objetivos de sostenibilidad.

Para incorporar la dimensión financiera del proyecto, se proyectó el flujo de caja anual que considera la diferencia en la inversión de construcción y los ahorros de consumo de servicios durante la vida útil del edificio. Sobre ese flujo se aplicaron herramientas de valoración como el VAN, TIR e IVAN. Estos indicadores financieros permitan contrastar los beneficios proyectados con la inversión requerida y evaluar la viabilidad económica del proyecto de modernización energética y sostenible de los edificios analizados.

Cabe mencionar que la PUCV es parte de varias asociaciones relacionadas a la sustentabilidad, tales como: Red de Campus Sustentable (red que asocia a varias instituciones de educación superior en Chile), y el Acuerdo de Producción Limpia (coordinación de acciones de desarrollo sustentable respaldadas por el Ministerio del Medio Ambiente).

## 4 Objetivos

### 4.1.1 Objetivo General

Analizar la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente en edificaciones universitarias mediante la comparación del desempeño ambiental del Edificio de Ciencias y el Edificio Aulario B en el Campus Curauma de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), en el contexto del Plan de Desarrollo Estratégico Institucional 2023-2029, con el fin de determinar el impacto de las mejoras tecnológicas y de eficiencia energética en el cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad de la institución.

### 4.1.2 Objetivos Específicos

- I. Cuantificar las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente del Edificio de Ciencias.
- II. Estimar las emisiones proyectadas del Edificio Aulario B, considerando las mejoras implementadas.
- III. Analizar el impacto del cambio en fuentes de energía, en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- IV. Determinar la contribución de estrategias de ahorro hídrico en la reducción de la huella de carbono.
- V. Comparar la huella de carbono por metro cuadrado construido entre ambas edificaciones.
- VI. Evaluar la viabilidad de replicar las estrategias de sostenibilidad del Aulario B en futuras construcciones de la PUCV, en línea con el objetivo de carbono neutralidad al 2030.
- VII. Proporcionar recomendaciones basadas en los resultados para la gestión eficiente de los recursos en futuras infraestructuras de la universidad, asegurando el cumplimiento de estándares ambientales y eficiencia operativa.

Este conjunto de objetivos garantiza una evaluación integral del impacto ambiental de las edificaciones analizadas y permite extraer conclusiones relevantes para la planificación de futuras infraestructuras sostenibles en la PUCV.

## 5 Alcance

Este estudio se enmarca en el análisis de sostenibilidad y eficiencia energética en edificaciones universitarias de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), con el propósito de cuantificar y comparar las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente entre el Edificio de Ciencias y el Edificio Aulario B del Campus Curauma. Se considera el contexto del Plan de Desarrollo Estratégico Institucional 2023-2029, en el cual la universidad busca alcanzar la carbono neutralidad al 2030.

El análisis se centra en los siguientes aspectos: evaluación de consumos energéticos y de recursos hídricos, cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, impacto de la optimización del consumo de agua, comparación de tecnologías de climatización y eficiencia energética, y consideraciones en la planificación de futuras infraestructuras:

### Límites del estudio

- No se consideran impactos asociados a la etapa de construcción de los edificios, sino solo las emisiones relacionadas con su operación.
- Las proyecciones del Edificio Aulario B se basan en datos de diseño y simulaciones, por lo que podrían existir diferencias con los consumos reales una vez entre en funcionamiento.
- Los factores de conversión de CO<sub>2</sub> equivalente provienen de fuentes oficiales y estándares internacionales, pero pueden estar sujetos a ajustes en función de metodologías actualizadas.

## **6 Metodología Propuesta**

La metodología utilizada en este estudio tiene como objetivo evaluar, cuantificar y comparar las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente en el Edificio de Ciencias y el Edificio Aulario B del Campus Curauma de la PUCV, con base en su consumo de energía y agua. La metodología se estructura en cinco etapas principales:

### **I. Recopilación de Información**

Se recolectan datos relevantes de ambas edificaciones, diferenciando entre valores históricos y estimaciones proyectadas. Las fuentes de información incluyen: registros institucionales de la PUCV, datos de diseño de los edificios, estándares internacionales y literatura científica.

### **II. Análisis del Consumo Energético y de Agua**

Se cuantifican los consumos en cada edificación y se identifican los sistemas con mayor impacto ambiental: agua potable, energía eléctrica y gas licuado.

### **III. Cálculo de Emisiones de CO<sub>2</sub> Equivalente**

A partir de los datos de consumo obtenidos, se estiman las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, aplicando factores de conversión basado en documentos publicados por el Ministerio de Energía. Estos cálculos permiten estimar el impacto total y las emisiones por metro cuadrado de cada edificio.

### **IV. Comparación de Resultados y Análisis de Impacto**

Los resultados de ambos edificios se comparan en términos de emisiones totales y emisiones por metro cuadrado construido, analizando las siguientes mejoras en el Edificio Aulario B: reducción en consumo de GLP, reducción en consumo eléctrico, optimización del uso del agua. Además, se realiza un análisis económico, en donde se cuantifican los consumos de servicios, estableciendo un flujo de caja que permita establecer la rentabilidad de las mejoras propuestas.

### **V. Conclusiones y Recomendaciones**

Con base en el análisis comparativo, se establecen conclusiones sobre la efectividad de las mejoras implementadas en el Aulario B tanto en el ámbito ambiental como económico, se determinan estrategias replicables para futuras edificaciones de la PUCV y se presentan recomendaciones.

Este enfoque metodológico permite cuantificar de manera precisa las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente asociadas a cada edificio, evaluar el impacto de las mejoras implementadas y

generar recomendaciones alineadas con la meta de carbono neutralidad al 2030 de la PUCV.

## **7 Desarrollo del Tema**

El siguiente trabajo plantea evaluar la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente en edificaciones universitarias mediante la comparación del desempeño ambiental del Edificio de Ciencias y el Edificio Aulario B en el Campus Curauma de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), en el contexto del Plan de Desarrollo Estratégico Institucional 2023-2029, con el fin de determinar el impacto de las mejoras tecnológicas y de eficiencia energética en el cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad de la institución.

### **7.1 EDIFICIO DE CIENCIAS**

#### **7.1.1 CO<sub>2</sub> Equivalente**

El CO<sub>2</sub> equivalente es una medida estándar utilizada para expresar el impacto de diferentes gases de efecto invernadero (GEI) en términos del potencial de calentamiento global (PCG) del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que es el gas de referencia. Su objetivo es simplificar la comparación de los efectos de diversos gases en el cambio climático, teniendo en cuenta que cada gas tiene una capacidad distinta para atrapar el calor en la atmósfera.

Los GEI, como el metano (CH<sub>4</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y los hidrofluorocarbonos (HFC), tienen diferentes potencias de calentamiento y vidas útiles en la atmósfera. Para facilitar su análisis y gestión, se convierte su impacto en términos equivalentes al CO<sub>2</sub>. Esto permite tomar decisiones más informadas al comparar y mitigar las emisiones.

Los procesos productivos, como la generación, transporte y tratamiento de agua, energía eléctrica o gas, pueden conocer su huella de carbono asociada al CO<sub>2</sub> equivalente mediante un análisis sistemático de sus actividades que generan emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Esto se logra a través de las siguientes etapas:

## **I. Identificación de las fuentes de emisiones**

Se deben identificar todas las actividades del proceso productivo que generan emisiones de GEI. Estas se agrupan generalmente en tres alcances, según el estándar del **GHG Protocol** (Protocolo de Gases de Efecto Invernadero):

- **Alcance 1:** Emisiones directas provenientes de fuentes controladas por la organización, como:
  - Combustión en calderas, hornos o vehículos propios.
  - Procesos químicos (por ejemplo, fabricación de cemento).
  - Pérdidas de refrigerantes o gases industriales.
- **Alcance 2:** Emisiones indirectas asociadas al consumo de energía comprada (electricidad, vapor, calefacción o refrigeración).
- **Alcance 3:** Otras emisiones indirectas en toda la cadena de valor, como:
  - Transporte de materias primas o productos.
  - Generación de residuos.
  - Uso y disposición final de productos por parte de los clientes.

## **II. Recolección de datos relevantes**

Para cada fuente de emisión, se deben recopilar datos específicos que permitan calcular las emisiones. Los datos pueden incluir:

- Consumo de combustibles (litros, m<sup>3</sup>, etc.).
- Facturas de electricidad y fuentes energéticas utilizadas.
- Cantidad de materiales empleados en el proceso.
- Residuos generados (toneladas, m<sup>3</sup>).
- Distancias recorridas y medios de transporte.

## **III. Aplicación de factores de emisión**

Se utilizan factores de emisión específicos para convertir los datos recolectados en emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente. Estos factores indican cuánta cantidad de GEI se emite por unidad de actividad. Los factores de emisión suelen estar disponibles en bases de datos internacionales como las de IPCC, DEFRA, o normativas nacionales (en Chile, se puede consultar HuellaChile).

## **IV. Cálculo total del CO<sub>2</sub> equivalente**

- Para cada fuente identificada, se calcula el CO<sub>2</sub> equivalente utilizando los factores de emisión específicos.
- Las emisiones se suman para obtener el total de la huella de carbono.

## **V. Validación y verificación de resultados**

Para garantizar la precisión y transparencia de los cálculos:

- Se puede recurrir a auditorías externas realizadas por organismos acreditados.
- Existen estándares internacionales, como:
  - ISO 14064: Para cuantificación y verificación de emisiones.
  - GHG Protocol: Marco de referencia para contabilizar emisiones.

## **VI. Herramientas y software especializados**

Para facilitar el cálculo, existen herramientas como:

- HuellaChile (Chile): Plataforma oficial para calcular emisiones según la normativa local.
- SIMAPRO: Software de análisis del ciclo de vida, útil para procesos complejos.
- GHG Protocol Calculation Tools: Plantillas estándar para emisiones.

## **VII. Interpretación y uso de los resultados**

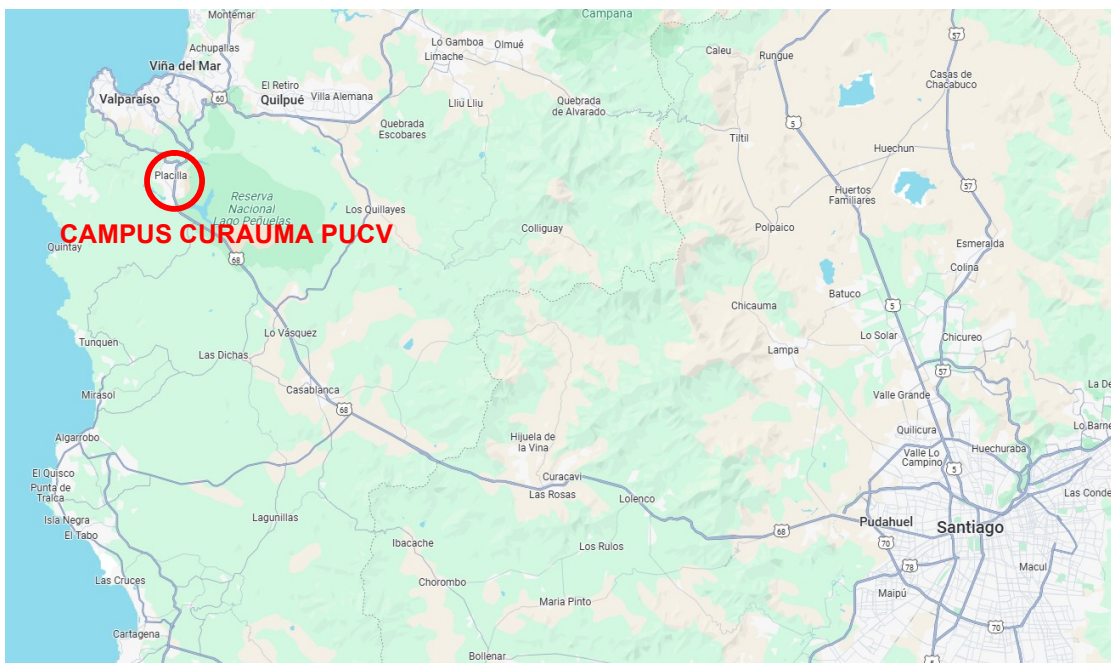
Con los datos obtenidos, el proceso productivo puede:

- Identificar actividades con mayores emisiones (hotspots).
- Diseñar estrategias de reducción, como:
  - Mejora de la eficiencia energética.
  - Cambio a fuentes renovables.
  - Optimización de transporte o logística.
  - Gestión de residuos y reciclaje.
- Establecer metas de reducción de huella de carbono en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) o normativas locales.

En este trabajo, la principal fuente de información para conocer los factores de emisión es el documento “Huella Chile – Programa de Gestión del Carbono”, el cual publica los factores de emisión para el cálculo de la huella de carbono, y que fue actualizado en noviembre de 2024.

### 7.1.2 Ubicación y contexto

El edificio de Ciencias se emplaza en el Campus Curauma de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Este Campus se ubica en la zona sur de Valparaíso, en el sector conocido como Curauma, y que está a unos 105 Km al norponiente de Santiago (ver Fig.1).



**Fig. 1:** Plano de Ubicación del Campus Curauma PUCV

El Campus Curauma fue inaugurado en el año 2009, con la construcción del edificio de Ciencias y Aulario A. El costo de construcción de estos edificios, actualizado a diciembre de 2024 fue de 422 US\$ / m<sup>2</sup>.

Actualmente, dentro del Campus Curauma, se ubican los siguientes edificios que pertenecen en su conjunto a la Facultad de Ciencias: Tecnología Médica, Kinesiología, Ciencias del Mar, y Edificio Ciencias (Decanato, e Instituto de Biología, Química y Física) Además, en el Campus se ubican los siguientes edificios: Aulario A, Periodismo, Biblioteca, Casino, y Capilla.

Finalmente, existen distintos centros de vinculación con empresas privadas para fines de investigación: CREAS 1 y 2 (Centro Regional de Estudios en Alimentos y Salud), NBC 1 y 2 (Núcleo Biotecnología Curauma), Laboratorio de Metalurgia, Laboratorio de Operaciones Unitarias, y Laboratorio de Operaciones Marinas.

Respecto a nuevas edificaciones, a fines del año 2024 se está comenzando la construcción de: Escuela de Educación Física y Campo Deportivo y Aulario B.



**Fig. 2:** Vista aérea Campus Curauma sector poniente

El análisis se centrará en primer término en la información levantada del edificio de Ciencias, para ser usado como línea base respecto al comportamiento del edificio Aulario B. (ver fig. 3)

### **7.1.3 Levantamiento de Información Edificio de Ciencias**

Este edificio alberga al Decanato de Ciencias y a tres Institutos de Ciencias: Química, Física y Biología. El edificio se compone principalmente de laboratorios, salas de profesores, salas de clases, y un sector administrativo correspondiente al Decanato de Ciencias. En su conjunto el edificio tiene una superficie construida de 13.087,24 m<sup>2</sup>.

### **7.1.4 Descripción de las Instalaciones Existentes**

A continuación, se realizan descripciones de las instalaciones existentes en el edificio de Ciencias.

#### 7.1.4.1 Instalaciones de Agua Potable y Alcantarillado Edificio Ciencias

El edificio se abastece de agua potable, desde un arranque de la empresa ESVAL, que permite el llenado de estanques de acumulación, y posterior presurización hacia 3 edificios: Ciencias, Aulario A y Periodismo.

La distribución interior de agua potable del edificio está ejecutada en tubería PEX.

Respecto al alcantarillado, las aguas servidas son trasladadas de forma gravitacional hasta la unión domiciliaria de alcantarillado en calle Avda. Universidad.

En cuanto a los artefactos de uso más importante dentro del edificio se tienen los indicados en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Detalle de artefactos sanitarios

Artefacto	Comentario
Inodoros	Presentan el problema que no cuentan en su mayoría con descargas diferenciadas. Además, dado que no son artefactos de uso masivo, tienen a presentar problemas en las válvulas de corte y gomas de sello, lo que genera filtraciones de agua que se pierden en el WC.
Lavamanos	Cuentan con griferías que, si no se regulan periódicamente, tienden a tiempos de apertura extensos, generando pérdidas de agua. Además, influye el desgaste del resorte interno en los tiempos de apertura, y por ende de la cantidad de agua consumida.
Urinarios	

Fuente: Elaboración propia

#### 7.1.4.2 Instalaciones Eléctricas Edificio Ciencias

El edificio cuenta con empalme de 300 KVA, conectado a la subestación de calle Surcos del Agua. El detalle de los artefactos eléctricos más importantes se presentan en la Tabla 2:

**Tabla 2:** Detalle de artefactos eléctricos

Artefacto	Comentario
Refrigeradores	Refrigeradores de experimentación -80°C, marca NUAIRE de 5A y 1130W.
Estufas	Calefacción de oficinas.
Luminarias	Uso de luminarias del tipo fluorescente en algunos casos, y en otros mediante LED tipo T8.

Fuente: Elaboración propia

En resumen, el edificio presenta las siguientes deficiencias en el área eléctrica:

- Sistemas poco eficientes de calefacción mediante estufas eléctricas en oficinas.
- Luminarias fluorescentes de baja eficiencia en parte del edificio.

Cabe mencionar que en 2024 comenzó a operar un sistema de paneles fotovoltaicos en casi la totalidad de la superficie de la cubierta. Sin embargo, el alcance de este trabajo se restringe hasta el año 2023, por lo que no se incluye dentro del análisis.

#### 7.1.4.3 Instalaciones de Gas (GLP) Edificio Ciencias

El edificio se abastece mediante 5 bombonas enterradas en distintas zonas del área verde del edificio, las cuales pertenecen a la empresa Lipigas.

Los consumos principalmente corresponden a 4 calderas que abastecen de agua caliente para la climatización mediante radiadores de muro en los laboratorios. Estas calderas son de la marca UniClima RECAL modelo TNT 300-P-2, con una potencia de calefacción de 41,8 KW cada una. La data de los equipos es del año 2011.

Una parte menor del consumo corresponde a mecheros tipo Bunsen, ubicados en algunos de los laboratorios del edificio, y en calderas de agua caliente sanitaria para uso eventual de agua caliente en lavamanos de laboratorios.

#### 7.1.5 Análisis de Consumos Eléctricos

El edificio de Ciencias está conectado eléctricamente a la Sub-Estación en calle Surcos del Agua, asociado al número de cliente 656453-4 de Chilquinta.

El registro de consumos se obtuvo a través de las boletas de Chilquinta, desde el año 2017 a 2023, no considerando el año 2020 y 2021 por efectos distorsión de datos por la pandemia de Covid-19. Se considera la potencia activa, la cual es registrada en las boletas para conocer el consumo eléctrico de un edificio porque representa la cantidad real de energía utilizada para realizar trabajo útil, es decir, para operar equipos eléctricos, sistemas de iluminación, calefacción, ventilación, y cualquier otro dispositivo conectado.

El resumen anual de consumos se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3:** Consumos anuales de energía eléctrica edificio Ciencias

<b>Año</b>	<b>Potencia Activa</b>	<b>Unidad</b>
2017	808.000	KW-h
2017	793.200	KW-h
2019	776.000	KW-h
2022	687.600	KW-h
2023	667.200	KW-h
<b>Consumo Total</b>	<b>3.732.000</b>	<b>KW-h</b>

Fuente: Elaboración propia

De manera de realizar un análisis en unidades equivalentes entre todos los consumos de energía, se utilizarán los factores de emisiones publicados por el Ministerio de Energía de Chile, asociados a la Generación de Electricidad del Sistema Eléctrico Nacional y la página Energía Abierta del mismo Ministerio de Energía. (Comisión Nacional de Energía, 2024).

Luego se utilizan los factores de emisión de los años en estudio, que se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4:** Factores de emisión del Sistema Eléctrico Nacional SEN 2017-2023

Año	Factor de Emisión [kg CO2 eq / MWh]
2017	449,73
2018	418,70
2019	405,60
2022	300,60
2023	242,21
<b>Promedio</b>	<b>363,37</b>

Fuente: Ministerio de Energía de Chile

Luego, tomando los datos de consumos y el factor de emisiones promedio se obtienen las emisiones del edificio por consumo eléctrico (ver Tabla 5):

**Tabla 5:** Cálculo de emisiones por consumo de energía eléctrica Edificio Ciencias

<b>Consumo Total</b>	3.732.000	KW-h
<b>Consumo promedio</b>	746.400	KW-h / año
<b>Consumo promedio</b>	746,40	MW-h / año
<b>Factor de emisión</b>	363,37	kg CO2 eq / MWh
<b>Emisión anual</b>	271.218	kg CO2 eq / año
<b>Superficie construida</b>	13.087,24	m2
<b>Emisión por m<sup>2</sup> construido</b>	20,72	kg CO2 eq / año / m <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia

De esta forma se obtiene que la emisión anual del edificio de Ciencias, por concepto de consumo eléctrico es de 20,72 [kg CO2 eq anual / m<sup>2</sup>].

### 7.1.6 Análisis de Consumos de Agua

El edificio de Ciencias está conectado a un empalme de agua de la empresa ESVAL con dirección en Avda. Universidad N°330, asociado al número de cliente 640347-6.

Este empalme abastece también a otros 2 edificios: Aulario A y Periodismo. Por lo tanto, para efectos de cálculo, se consideran las superficies para ponderar el aporte de GEI por m<sup>2</sup> edificado, según la tabla 6.

**Tabla 6:** Cuadro de superficies

Edificio	Superficie construida m2
AULARIO A	4023,80
PERIODISMO	1035,93
CIENCIAS	13087,24
<b>TOTAL</b>	<b>18146,97</b>

Fuente: Elaboración propia

El registro de consumos se obtuvo a través de las boletas de ESVAL, desde el año 2017 a 2023, no considerando el año 2020 y 2021 por efectos distorsión de datos por la pandemia de Covid-19. Se registran los m<sup>3</sup> consumidos durante los periodos indicados en las boletas.

El resumen anual de consumos se observa en la tabla 7.

**Tabla 7:** Consumos anuales de agua potable Edificio Ciencias

Año	Consumo	Unidad
2017	23.826	m3
2018	34.876	m3
2019	27.856	m3
2022	20.632	m3
2023	30.500	m3
<b>Consumo Total</b>	<b>137.690</b>	<b>m3</b>

Fuente: Elaboración propia

Para obtener el factor de emisión, se consulta el documento “Huella Chile – Programa de Gestión del Carbono”, el cual publica los factores de emisión para el cálculo de la huella de carbono, y que fue actualizado en noviembre de 2024.

En este caso, se aplican dos factores:

- Suministro de agua potable: 0,177 [Kg CO2 eq / m<sup>3</sup>]
- Tratamiento de agua: 0,201 [Kg CO2 eq / m<sup>3</sup>]

Luego, tomando los datos de consumos y el factor de emisiones promedio se obtienen las emisiones del edificio por suministro de agua potable que se muestran en la tabla 8.

**Tabla 8:** Cálculo de emisiones por consumo de agua potable Edificio Ciencias

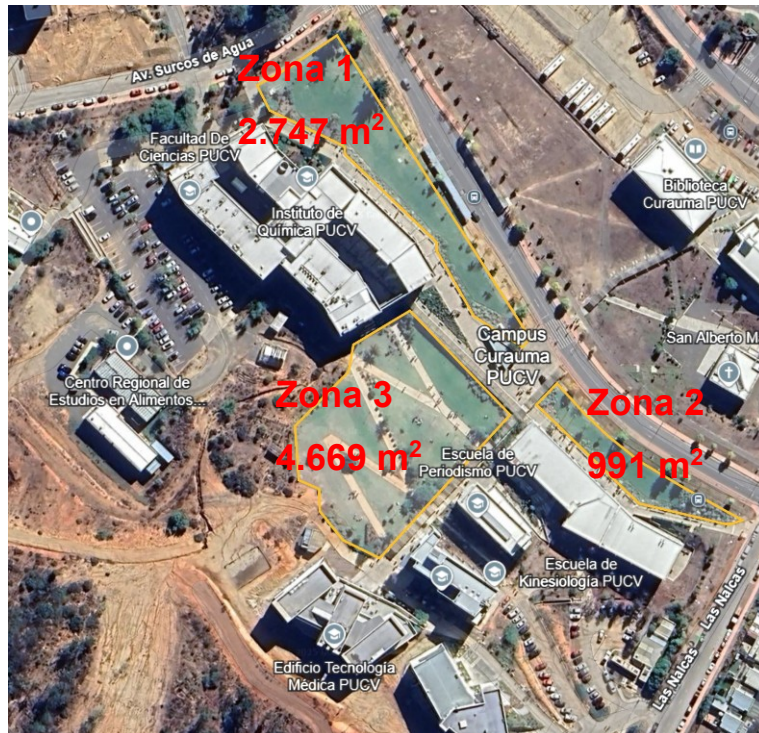
<b>Consumo Total</b>	137.690	m <sup>3</sup>
<b>Consumo promedio</b>	27.538	m <sup>3</sup> / año
<b>Factor de emisión</b>	0,177	kg CO2 eq / m <sup>3</sup>
<b>Emisión anual</b>	4.874	kg CO2 eq / año
<b>Superficie construida</b>	18.146,97	m <sup>2</sup>
<b>Emisión por m<sup>2</sup> construido</b>	0,27	kg CO2 eq / año / m <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia

De esta forma se obtiene que la emisión anual del edificio de Ciencias, Aulario A y Periodismo, por concepto de suministro de agua es de 0,27 [kg CO2 eq anual / m<sup>2</sup>].

Para el caso del tratamiento de agua, es necesario estimar un “factor de recuperación”, el cual es el porcentaje de agua que llega al alcantarillado, respecto al agua total consumida. En este sentido, se entiende que el agua de riego en áreas verdes no llega al sistema de alcantarillado, y determina este factor.

Según la figura 3, se aprecia que existen 3 zonas de áreas verdes, las cuales hasta el año 2023 fueron regadas con agua potable, proveniente del mismo sistema que abastece a los edificios de Ciencias, Aulario A y Periodismo.



**Fig. 3: Vista de áreas verdes en Campus Curauma**

Para determinar la cantidad de agua, se toma en cuenta que en el año 2024 el agua para regar la zona 1 y zona 2 se extrae desde un pozo existente desde la creación del Campus, pero el cual no se había utilizado. Este pozo tiene como función recibir las aguas lluvias y en parte es llenado por la napa subterránea existente en la zona. Cabe mencionar que esta mejora se aplicó en el año 2024, por lo que no entra en el alcance del trabajo.

El registro de agua consumida desde el pozo para el riego de las zonas 1 y zona 2 (superficie de 3.738 m<sup>2</sup>) fue de 766 m<sup>3</sup> en 6,5 meses de operación. Luego se calcula el consumo estimado en un año en las zonas 1 y zona 2, llegando a 1.414 [m<sup>3</sup>].

Si añadimos la zona 3 al cálculo, tenemos que en total se puede estimar el agua de riego de las 3 zonas de áreas verdes, equivalentes a 8.407 [m<sup>2</sup>], en 3.180 [m<sup>3</sup>] al año.

Luego considerando el consumo promedio anual de agua, equivalente a 27.538 [m<sup>3</sup>] por año, se tiene que el factor de recuperación es:

$$R = (27.538 - 3.180) / 27.538 = 0,885$$

*R: Factor de Recuperación (el 88,5% del agua consumida llega al sistema de alcantarillado)*

Con el factor de recuperación obtenido, se procede a calcular cuánta agua llegó a tratamiento en promedio al año:

- Tratamiento de Agua = Consumo promedio x R
- Tratamiento de Agua = 27.538 [m<sup>3</sup>] x 0,885 = 24.371 [m<sup>3</sup>]

Luego, se calculan las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente por concepto de tratamiento de aguas servidas, tal como se muestra en la tabla 9.

**Tabla 9:** Cálculo de emisiones por tratamiento de aguas servidas Edificio Ciencias

<b>Consumo promedio</b>	27.538	m <sup>3</sup> / año
<b>Factor de recuperación</b>	0,885	
<b>Tratamiento de Agua promedio</b>	24.371	m <sup>3</sup> / año
<b>Factor de emisión</b>	0,201	kg CO <sub>2</sub> eq / m <sup>3</sup>
<b>Emisión anual</b>	4.899	kg CO <sub>2</sub> eq / año
<b>Superficie construida</b>	18.146,97	m <sup>2</sup>
<b>Emisión por m<sup>2</sup> construido</b>	0,27	kg CO <sub>2</sub> eq / año / m <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia

De esta forma se obtiene que la emisión anual del edificio de Ciencias, Aulario A y Periodismo, por concepto de tratamiento de agua es de 0,27 [kg CO<sub>2</sub> eq anual / m<sup>2</sup>].

Finalmente, la emisión total por concepto de consumo y tratamiento de agua es de 0,54 [kg CO<sub>2</sub> eq anual / m<sup>2</sup>].

### **7.1.7 Análisis de Consumos de GLP**

El edificio de Ciencias está conectado a dos empalmes de gas de la empresa Lipigas, con dirección en Avda. Universidad N°330, asociado al número de cliente 342222 y 333093.

El registro de consumos se obtuvo a través de las boletas de Lipigas, desde el año 2017 a 2023, no considerando el año 2020 y 2021 por efectos distorsión de datos por la pandemia de Covid-19. En este caso se registran los m<sup>3</sup> consumidos, que se indican en las boletas.

Los consumos registrados, se presentan en la tabla 10.

**Tabla 10:** Consumos anuales de gas GLP Edificio Ciencias

Año	Consumo	Unidad
2017	50	m <sup>3</sup>
2018	62	m <sup>3</sup>
2019	16	m <sup>3</sup>
2022	40	m <sup>3</sup>
2023	44	m <sup>3</sup>
<b>Consumo Total</b>	<b>212</b>	<b>m<sup>3</sup></b>

Fuente: Elaboración propia

Se observa una distorsión en los datos en el año 2019. Para evitar que este dato extremo altere el promedio final, se utilizará la mediana como medida de tendencia central.

El factor de emisión se obtiene del documento “Huella Chile – Programa de Gestión del Carbono” (página 2) del año 2024, en donde se indica un valor de 1,59 [tCO<sub>2</sub> eq / m<sup>3</sup>]. En la tabla 11 se muestra el cálculo de la emisión por m<sup>2</sup> construido.

**Tabla 11:** Cálculo de emisiones por consumo de gas GLP Edificio Ciencias

<b>Consumo Total</b>	212	m <sup>3</sup>
<b>Mediana del consumo</b>	44	m <sup>3</sup> / año
<b>Factor de emisión</b>	1.590	kg CO <sub>2</sub> eq / m <sup>3</sup>
<b>Emisión anual</b>	69.960	kg CO <sub>2</sub> eq / año
<b>Superficie construida</b>	3.087,24	m <sup>2</sup>
<b>Emisión por m<sup>2</sup> construido</b>	<b>3,86</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq / año / m<sup>2</sup></b>

Fuente: Elaboración propia

De esta forma se obtiene que la emisión anual del edificio de Ciencias, por concepto de consumo de GLP es de 3,86 [kg CO<sub>2</sub> eq anual / m<sup>2</sup>].

### 7.1.8 Resumen de Resultados

Finalmente, según los análisis presentados entre el año 2017 y 2023, se tiene el siguiente aporte de GEI por m<sup>2</sup> de construcción:

- Consumo de energía eléctrica: 20,72 [kg CO<sub>2</sub> eq / año / m<sup>2</sup>]
- Consumo y tratamiento de agua: 0,54 [kg CO<sub>2</sub> eq / año / m<sup>2</sup>]
- Consumo de GLP: 3,86 [kg CO<sub>2</sub> eq / año / m<sup>2</sup>]
- TOTAL DE EMISIONES: 25,12 [kg CO<sub>2</sub> eq / año / m<sup>2</sup>]

## 7.2 EDIFICIO AULARIO B

El edificio Aulario B se emplazará en el extremo poniente del Campus Curauma de la PUCV. El costo de construcción de este edificio, actualizado a diciembre de 2024 es de 1.162 US\$/m<sup>2</sup>.

Este edificio tendrá una superficie construida de 4.788 m<sup>2</sup>, y considera los siguientes recintos: Salas de clases, laboratorios, salas de estar de alumnos, baños, cafetería (ver figura 4).



**Fig. 4:** Render del Edificio Aulario B

El edificio tiene como objetivo absorber la creciente demanda de alumnos en este Campus, sumado a que la carrera de Educación Física se trasladará desde el Campus Sausalito en Viña del Mar, hacia Curauma, agregando carga de uso a las salas de clases.

## 7.2.1 Descripción de las Instalaciones Projectadas

### 7.2.1.1 Instalaciones de Agua Potable y Alcantarillado

Para el caso de las instalaciones de agua potable, el edificio cuenta con 2 estanques de acumulación de agua potable de 21 m<sup>3</sup> cada uno. El sistema de presurización consiste en 2 bombas operativas y una de reserva, marca Pedrollo, modelo 2CP 40/180C de 5,5 HP de potencia eléctrica cada una. El sistema cuenta además con un estanque hidroneumático de 500 [L] y sistema de variador de frecuencia.

Sobre los artefactos sanitarios más relevantes, se cuenta con lo siguiente: WC alimentados mediante fluxómetro expuesto de membrana Leren II de Wasser, urinarios con grifería temporizada modelo Hoch de Wasser, y lavamanos con grifería electrónica modelo Fluss de Wasser.

Para el caso del alcantarillado, se cuenta con una mejora en el diseño sostenible de este edificio, que corresponde a la construcción de un “Humedal Construido”, el cual permitirá recuperar las aguas provenientes de los lavamanos de los baños de alumnos y alumnas.

Los humedales contruidos son sistemas de tratamiento de aguas residuales que emulan los procesos naturales de depuración de los humedales. Están diseñados para eliminar contaminantes presentes en las aguas grises, que en este caso son los lavamanos.

Los componentes principales del “Humedal Construido” para el edificio Aulario B, son:

- I. **Estructura impermeable:** Excavación con revestimiento de geomembrana de HDPE de 1mm de espesor.
- II. **Sustrato:** Una mezcla gravilla de 3 a 30mm.
- III. **Vegetación acuática:** Plantas emergentes como juncos, carrizos y espadañas, cuyas raíces y rizomas proporcionan superficies para la adherencia de microorganismos y facilitan la oxigenación del sistema.

El proceso de depuración consiste en:

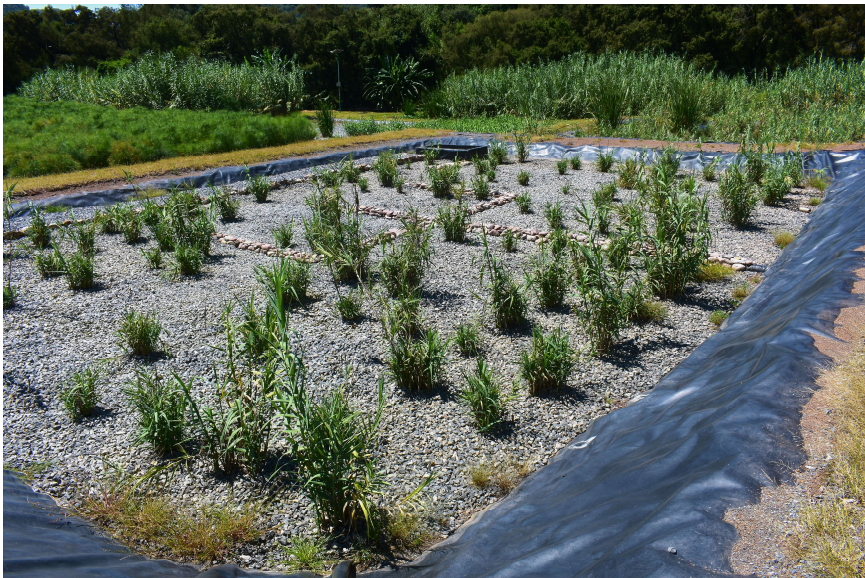
- I. **Pretratamiento:** Antes de ingresar al humedal, las aguas grises suelen pasar por un proceso de pretratamiento para eliminar sólidos gruesos, arenas y grasas, lo que previene obstrucciones en el sistema. En este caso se logra con el paso de las agua por una bi-cámara de decantación y acumulación.
- II. **Flujo del agua:** El agua pretratada se introduce en el humedal, donde fluye de manera controlada a través del sustrato y la vegetación.

- III. **Filtración y sedimentación:** El sustrato actúa como un filtro físico, atrapando partículas suspendidas y permitiendo la sedimentación de sólidos finos.
- IV. **Actividad microbiana:** Los microorganismos que se adhieren a las raíces de las plantas y al sustrato forman biopelículas que descomponen la materia orgánica y transforman los contaminantes presentes en el agua.
- V. **Absorción por plantas:** Las plantas absorben nutrientes como nitrógeno y fósforo, contribuyendo a la eliminación de estos compuestos del agua.
- VI. **Procesos químicos:** Reacciones químicas en el sustrato, como la precipitación y adsorción, ayudan a eliminar metales pesados y otros contaminantes.

Existen 2 tipos de humedales construidos:

- **Flujo superficial:** El agua fluye sobre la superficie del sustrato, en contacto directo con la atmósfera.
- **Flujo subsuperficial:** El agua circula por debajo de la superficie del sustrato, manteniendo una capa de agua por debajo del nivel del sustrato.

El caso del edificio Aulario B, corresponde a un humedal de flujo subsuperficial vertical, similar al mostrado en la figura 5.



**Fig. 5:** Vista referencial de un humedal de flujo subsuperficial

### 7.2.1.2 Instalaciones Eléctricas

El edificio cuenta con un empalme proyectado de 350 KVA (equivalente a 350 KW), banco de condensadores, y sistema de respaldo eléctrico para: fuerza, iluminación y ascensores. Respecto a los artefactos, se proyecta la totalidad de la luminaria LED, marca Phillips o equivalente técnico, con un factor de potencia superior a 0,9.

Los sistemas de mayor consumo eléctrico dentro del edificio son: sistema de climatización (potencia nominal de 133 KW), ascensores (potencia nominal de 42 KW), bombas de agua potable (potencia nominal de 8 KW).

Se espera contar en el futuro con un sistema de paneles fotovoltaicos que proporcionen parte de la energía eléctrica del edificio. Sin embargo, al no ser parte de la implementación inicial del edificio, no se incluye en el análisis de este trabajo.

### 7.2.1.3 Instalaciones de Climatización y Ventilación

El edificio cuenta con un sistema centralizado de climatización mediante Chillers con uso de agua. Los sistemas de climatización centralizada mediante Chillers son ampliamente utilizados en edificios comerciales, industriales y educacionales para proporcionar refrigeración eficiente. Un Chiller es una máquina que enfría un líquido, generalmente agua, que luego se distribuye a través de un sistema de tuberías para climatizar diferentes espacios dentro de un edificio.

Los componentes principales de un sistema de climatización con Chiller:

- I. **Chiller (enfriadora):** Es el equipo principal que enfría el agua mediante un ciclo de refrigeración.
- II. **Sistema de distribución:** Incluye bombas y tuberías que transportan el agua fría desde el chiller hasta las unidades terminales en los distintos espacios del edificio.
- III. **Unidades terminales:** Dispositivos como fan coils o unidades de tratamiento de aire que reciben el agua fría y enfrían el aire del ambiente interior.
- IV. **Sistema de control:** Automatiza y regula la operación del chiller, las bombas y las unidades terminales para mantener las condiciones de confort deseadas.

El proceso de funcionamiento se puede resumir en:

- I. **Enfriamiento del agua:** El chiller enfría el agua mediante un ciclo de refrigeración que involucra la evaporación y condensación de un refrigerante.

- II. **Distribución del agua fría:** El agua enfriada se bombea a través de un sistema de tuberías hacia las unidades terminales ubicadas en diferentes áreas del edificio.
- III. **Intercambio de calor en unidades terminales:** Las unidades terminales, como los fan coils, utilizan el agua fría para enfriar el aire que circula en los espacios interiores, absorbiendo el calor del ambiente.
- IV. **Retorno del agua calentada:** El agua, ahora más caliente después de absorber el calor del ambiente, regresa al chiller para ser enfriada nuevamente, repitiendo el ciclo. El proceso inverso se realiza en el caso que se quiera calentar el ambiente.

En este caso particular, se trata de un sistema de 2 vías, lo cual quiere decir que existe sólo un modo de operación: frío o calor. Una tubería lleva el agua a las unidades terminales y la otra devuelve el agua. A diferencia de los sistemas de 4 vías, en donde pueden moverse indistintamente agua fría y caliente, y así cada usuario elige la temperatura deseada en un rango amplio de temperatura (16°C a 30°C por ejemplo). Sin embargo, debido a temas de costos de construcción de este sistema se descartó, y se diseñó el ya mencionado sistema de 2 vías. En este caso, se cambia el sistema a frío o calor, según la época del año. Esta actividad la realizará personal especializado de mantención.

Otro punto importante es que los equipos Chiller son del tipo "Inverter". La tecnología Inverter aplicada a los equipos Chiller consiste en la incorporación de variadores de frecuencia que permiten ajustar la velocidad de los compresores y otros componentes clave, como los ventiladores, en función de la demanda térmica real del sistema. A diferencia de los sistemas tradicionales de velocidad fija, donde los compresores operan a máxima capacidad o están apagados, los sistemas Inverter modulan continuamente la velocidad del compresor para mantener la temperatura deseada de manera más eficiente.

Las principales ventajas de los Chillers con tecnología Inverter son:

- I. **Eficiencia energética mejorada:** Al ajustar la velocidad del compresor según la demanda, se evita el consumo innecesario de energía, lo que puede traducirse en ahorros significativos en comparación con sistemas convencionales.
- II. **Mayor confort térmico:** La modulación continua permite mantener temperaturas más estables, evitando fluctuaciones bruscas que pueden ocurrir con sistemas de encendido y apagado constantes.

- III. **Reducción del desgaste mecánico:** Al minimizar los ciclos de arranque y parada, se disminuye el estrés mecánico en los componentes, lo que puede prolongar la vida útil del equipo.
- IV. **Operación más silenciosa:** La capacidad de operar a velocidades más bajas reduce el nivel de ruido generado por el equipo, mejorando el confort acústico en el entorno.

En resumen, la integración de la tecnología Inverter en los Chillers permite una operación más eficiente, adaptable y duradera, optimizando el consumo energético y mejorando el rendimiento general del sistema de climatización.

Respecto a la ventilación, se proyectaron sistemas de inyección mediante ventiladores y Unidades Manejadores de Aire (UMA), y también equipos de extracción. Los sistemas de inyección provienen desde la cubierta del edificio, y las extracciones se realizan mediante celosías en fachadas. El control de estos equipos se realiza mediante timers que pueden ser programados en día y horario específico.

#### **7.2.1.4 Instalaciones de GLP**

El requerimiento de gas del edificio proviene de la necesidad de contar con mecheros en 3 laboratorios ubicados en el piso 4 del edificio. Estos laboratorios estarán destinados a las carreras de Ciencias y a la nueva carrera de Medicina.

El uso de los mecheros obligó a diseñar una bombona de gas en el exterior del edificio, y a través de ella abastecer mediante cañería de cobre tipo K a los mecheros en los ya mencionados laboratorios.

### **7.2.2 Análisis de Consumos de Agua**

A continuación, se plantean dos aproximaciones de cálculo para estimar el consumo anual de agua del edificio.

#### **7.2.2.1 Aproximación por caudal instalado**

Para esta aproximación, se utilizan los datos disponibles de los edificios abastecidos por el sistema de estanque y bombas correspondiente al empalme de agua potable analizado previamente, y que alimenta los edificios de: Aulario A, Periodismo y Ciencias. La información se presenta en la Tabla 12:

**Tabla 12:** Resumen de caudal instalado en Edificios Aulario A, Periodismo y Ciencias

Artefacto	Simbología	Cantidad	Caudal Instalado	Caudal Total Instalado
		[un]	[Lts/min]	[Lts/min]
Inodoro	WC	110	10	1100
Lavamanos	L°	113	8	904
Baño tina	B° Tina	4	10	40
Urinario	Ur	29	6	174
Lavacopas	LC	26	12	312
Lavadero	Lv	135	15	2025
Campana	CAMPANA	89	20	1780
Meson	MESON	71	20	1420
Lavaojos	L vo	11	5	55
Autoclave	AUTOCLAVE	5	15	75
Ducha seguridad	Ds	5	10	50
Bebadero	Bb	2	5	10
Biseladora	Os	8	5	40
Llave de jardin	Lij(13)	8	20	160
Llave de jardin	Lij(19)	7	50	350
Lavaplatos	Lp	1	12	12
Lavafondos	Lf	4	15	60
			<b>TOTAL</b>	<b>8.567</b>

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 13, se presentan los consumos de agua potable para los mismos 3 edificios:

**Tabla 13:** Consumos anuales de agua potable Edificio Ciencias

Año	Consumo	Unidad
2017	23.826	m <sup>3</sup>
2018	34.876	m <sup>3</sup>
2019	27.856	m <sup>3</sup>
2022	20.632	m <sup>3</sup>
2023	30.500	m <sup>3</sup>
<b>Consumo Total</b>	<b>137.690</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>Consumo promedio</b>	<b>27.538</b>	<b>m<sup>3</sup> / año</b>

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se establece la relación que para un caudal instalado de 8.567 [Lts/min] existe un consumo anual de 27.538 m<sup>3</sup>/año.

Para el caso de Aulario B, en la tabla 14 se listan los artefactos que permiten realizar un ajuste importante para el cálculo, considerando los caudales instalados individuales de cada artefacto, según las fichas técnicas de las griferías propuestas para este edificio, y con ello se actualizan los consumos que, para el caso anterior, corresponden a griferías con tecnología de los años 2000.

En detalle, los consumos que se modifican son los siguientes:

- WC: la grifería modelo Leren II de Wasser, baja el consumo de 10 [Lts/min] a 4,8 [Lts/min]
- Lavamanos: la grifería modelo Fluss de Wasser, baja el consumo de 8 [Lts/min] a 4,5 [Lts/min]
- Urinarios: la grifería modelo Hoch de Wasser, baja el consumo de 6 [Lts/min] a 4,2 [Lts/min]

**Tabla 14:** Resumen de caudal instalado en Edificio Aulario B

Artefacto	Simbología	Cantidad	Caudal Instalado	Caudal Total
		[un]	[Lts/min]	[Lts/min]
Inodoro	WC	54	4,8	259,2
Lavamanos	L°	48	4,5	216
Baño lluvia	B°LI	2	10	20
Lavaplatos	Lp	4	12	48
Lavacopas	Lc	10	12	120
Urinario	Ur	12	4,2	50,4
Lavadero	Lv	4	15	60
Llave jardín	Llj 25	1	75	75
Bebedero	Bb	1	5	5
<b>TOTAL</b>				<b>854</b>

Fuente: Elaboración propia

Luego, de forma proporcionalmente directa, se obtiene el consumo anual proyectado (ver tabla 15).

**Tabla 15:** Relación de caudal total instalado y consumo anual de agua potable Edificio Aulario B

Edificio	Caudal Instalado [Lts/min]	Consumo Anual [m3]
AULARIO A	8567	27538
PERIODISMO		
CIENCIAS		
AULARIO B	854	<b>2745</b>

Fuente: Elaboración propia

El consumo para el edificio Aulario B, según la aproximación por caudal instalado sería de 2.745 [m<sup>3</sup>/año].

#### 7.2.2.2 Aproximación por dotación

Para esta aproximación se utilizan los datos de cantidad de alumnos, profesores y funcionarios que podrían utilizar el edificio.

Para esto, se utilizan los cálculos que realiza Arquitectura, para la tramitación municipal, y que finalmente determinan el número total de alumnos que puede albergar el edificio: 694 alumnos y 35 trabajadores (profesores y funcionarios de apoyo).

Para el cálculo del consumo existen valores tabulados en el Anexo N°4 del Reglamento de Instalaciones Sanitarias de Agua Potable y Alcantarillado D.S. MOP N°50 (RIDAA), que indican lo siguiente para demanda o consumo máximo diario:

- Establecimientos educacionales: 100 [L/alumno media pensión/día]
- Trabajadores: 150 [L/trabajador/día]

Sin embargo, estos valores están basados en mediciones realizadas en los años '90, cuando las tecnologías de griferías no consideraban todavía la importancia del ahorro de agua, y tampoco se discrimina si es un establecimiento educacional básico, medio o universitario. Para realizar una aproximación más realista se plantea un cálculo con los caudales de las nuevas griferías, y que se indican previamente en este trabajo. La tabla 16 representa de forma estimada, el consumo de una persona tipo durante el día:

**Tabla 16:** Cálculo de consumos por persona Edificio Aulario B

Artefacto	Consumo	Unidad	Tiempo de uso	Unidad	Cantidad de usos	Volumen [Lts/día]
WC	4,8	Lts/min	1	min	2	9,6
Lavamanos	4,5	Lts/min	1	min	5	22,5
Urinaris	4,2	Lts/min	1	min	3	12,6
						44,7

Fuente: Elaboración propia

Luego, tenemos el consumo diario:

- Consumo diario =  $694 \text{ [alumnos]} \times 45 \text{ [Lts/alumno/día]} + 35 \text{ [trab]} \times 45 \text{ [Lts/trab/día]}$
- Consumo diario = 32.805 [Lts/día]

Se consideran 10 meses de operación (descontando enero y febrero), y 22 días al mes. Esto nos deja un total anual de 7.217 [m<sup>3</sup>], en el caso que hubiera ocupación completa de salas, todos los días del año, y durante todas las clases del día. Dado que en la realidad la situación planteada nunca llega a cumplirse, es que se asigna un factor de uso del 75%. Este factor incluye: cursos que no están completos, alumnos que no asisten a clases, no programación de una o más salas de clase dentro del día

Por lo tanto el consumo corregido de agua sería:

- Consumo diario corregido =  $7.217 \text{ [m}^3\text{/año]} \times 0,75 = 5.413 \text{ [m}^3\text{/año]}$

### 7.2.2.3 Conclusión de las aproximaciones de consumo de agua

Al revisar los resultados de los dos cálculos realizados:

- Aproximación por caudal instalado: 2.745 [m<sup>3</sup>/año]
- Aproximación por dotación: 5.413 [m<sup>3</sup>/año]

Se toma el mayor de ambos valores para ser usado en el cálculo de emisiones.

En la tabla 17 se presenta el cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente por consumo de agua potable.

**Tabla 17:** Cálculo de emisiones por consumo de agua potable Edificio Aulario B

<b>Consumo promedio estimado</b>	5.413	m3 / año
<b>Factor de emisión</b>	0,177	kg CO2 eq / m3
<b>Emisión anual</b>	958	kg CO2 eq / año
<b>Superficie construida</b>	4.788,00	m2
<b>Emisión por m2 construido</b>	0,20	kg CO2 eq / año / m2

Fuente: Elaboración propia

De esta forma se obtiene que la emisión anual del edificio de Aulario B, por concepto de consumo de agua potable se estima en 0,20 [kg CO2 eq anual / m<sup>2</sup>].

Para el caso de las emisiones asociadas al tratamiento de las aguas servidas, se debe considerar que el agua de los lavamanos pasará por el humedal construido, y luego será almacenado en un estanque de 5000 [Lts] para ser usado en el riego de áreas verdes.

Por lo tanto, se debe determinar el volumen de aporte diario de los lavamanos de baños del edificio. Para ello, se realizó una prueba de campo, en que dos alumnos de la Escuela de Ingeniería Bioquímica registraron el uso de los baños de alumnos y alumnas durante 1,5 horas en los baños del edificio de Ciencias. De esta medición se obtuvo que en promedio la generación de aguas grises de los lavamanos representa el 25% del consumo total de agua (WC + lavamanos). Tomando en cuenta que los baños son los recintos más ocupados de todo el edificio, en comparación a los camarines, cafetería, etc., es que se asumirá que este 25% de agua no llegará al sistema de alcantarillado, lo cual es equivalente a decir que el factor de recuperación del edificio es de 0,75.

En la tabla 18 se presenta el cálculo la emisión de CO<sub>2</sub> equivalente por concepto de tratamiento de aguas servidas:

**Tabla 18:** Cálculo de emisiones por tratamiento de aguas servidas Edificio Aulario B

<b>Consumo promedio estimado</b>	5.413	m3 / año
<b>Factor de recuperación</b>	0,750	
<b>Tratamiento de Agua promedio</b>	4.060	m3 / año
<b>Factor de emisión</b>	0,201	kg CO2 eq / m3
<b>Emisión anual</b>	816	kg CO2 eq / año
<b>Superficie construida</b>	4.788,00	m2
<b>Emisión por m2 construido</b>	0,17	kg CO2 eq / año / m2

Fuente: Elaboración propia

De esta forma se obtiene que la emisión anual del edificio de Aulario B, por concepto de tratamiento de agua se estima en 0,17 [kg CO<sub>2</sub> eq anual / m<sup>2</sup>].

Por lo tanto, la emisión total por concepto de consumo y tratamiento de aguas se estima en 0,37 [kg CO<sub>2</sub> eq anual / m<sup>2</sup>].

### 7.2.3 Análisis de Consumos Eléctricos

Para el análisis eléctrico se realiza un análisis paramétrico en relación con la medición de consumos reales en edificios de la PUCV. En particular, se tomará como referencia el informe N°026/2023 de la empresa Ingeniería Conval Ltda., la cual realizó mediciones realizada entre el 24/11/23 y 01/12/23, en el Campus Sausalito PUCV, y llegó a las siguientes conclusiones:

*“El objetivo de este estudio de carga es determinar si la subestación eléctrica del campus Sausalito, cuya potencia es de 500 KVA, tiene capacidad para conectar la carga que representa el nuevo edificio de la Escuela de Música.*

*De acuerdo a las mediciones efectuadas la máxima demanda, es de 143 KW, y representa el 28,6 % de la capacidad del transformador. Esto indica que el equipo está sobredimensionado y tiene una potencia disponible de 357 KVA.*

*La mayor demanda registrada por los instrumentos de CGE, es de 225 KW, evento ocurrido en el mes de junio 2023. **Esta carga equivale al 45 % de la capacidad del transformador.** La diferencia entre lo registrado por los equipos de medición de CGE y los registrado por el instrumento para este estudio, radica en que el primero está conectado en el lado de alta tensión y registra las pérdidas del transformador que son del orden de los 20 KW y que se registraron en pleno invierno.*

*Por lo anterior se puede concluir, que este equipo tiene una potencia disponible 275 KVA.”*

Por lo tanto, de los resultados obtenidos, y dada la similitud en la magnitud de tamaño del Campus, se considera un factor de uso del 45% respecto a la capacidad del transformador.

De esta forma el empalme de 350 KW proyectado para el edificio Aulario B, se le aplica el factor de uso para obtener la potencia real de operación.

Otra información que debe ser estimada corresponde a las horas de uso de las instalaciones eléctricas. En este sentido, se asume lo siguiente:

- **Horas al día:** 7 horas (si bien el edificio opera 10 horas al día, se está considerando un peak de consumo para obtener el factor de uso, lo cual no implica que sea un consumo constante por 10 horas, por lo que se rebaja de forma aproximada a 7 horas)
- **Días al mes:** 22 días (no existen actividades los días sábados ni domingos)
- **Meses al año:** 10 meses (durante los meses de enero y febrero no existen actividades lectivas en los edificios destinados a salas de clases).
- Por lo tanto, el total de horas al año de operación eléctrica es de 1.540 [h]

En la tabla 19 se muestra el cálculo de las emisiones por concepto de consumo de energía eléctrica:

**Tabla 19:** Cálculo de emisiones por consumo de energía eléctrica Edificio Aulario B

<b>Potencia nominal</b>	350	KW
<b>Factor de uso</b>	45%	
<b>Potencia corregida</b>	157,50	KW
<b>Horas de uso al año</b>	1.540	h
<b>Consumo estimado</b>	242.550	KW-h / año
<b>Consumo estimado</b>	242,55	MW-h / año
<b>Factor de emisión</b>	363,37	kg CO2 eq / MWh
<b>Emisión anual</b>	88.135	kg CO2 eq / año
<b>Superficie construida</b>	4.788,00	m2
<b>Emisión por m2 construido</b>	18,41	kg CO2 eq / año / m2

Fuente: Elaboración propia

De esta forma se obtiene que la emisión anual del edificio de Aulario B, por concepto de consumo eléctrico se estima en 18,41 [kg CO2 eq anual / m<sup>2</sup>].

#### 7.2.4 Análisis de Consumos de GLP

Para el análisis de consumo de GLP, se utiliza como antecedente, la memoria de cálculo de la instalación de gas para el nuevo edificio de Aulario, la cual abastecerá a los 3 laboratorios del piso 4 del edificio, realizada por la empresa de ingeniería Optiva, y por el proyectista Sr. Cristian Saavedra.

En estos laboratorios se ubican 36 mecheros del tipo Bunsen, los cuales se utilizarán para las distintas actividades de los laboratorios.

El cálculo considera un consumo continuo, con una potencia instalada de 28,94 [Mcal/h] y un factor de uso simultáneo igual a 1 (todos los mecheros operando al mismo tiempo).

Respecto a las horas de operación de los laboratorios, se utiliza un valor de 8 horas/día, lo cual entrega un consumo diario de 231,52 [Mcal/día].

Finalmente, se aplica la ecuación:

$$D = 4,88 \times V / (CD \times n)$$

Donde:

- D: número de días de operación
- 4,88: factor que considera diversos factores de conversión (volumen útil, densidad del gas, poder calorífico superior del gas, factores de seguridad, temperatura, etc).
- V: Volumen del estanque propuesto (2000 [Lts])
- CD: Consumo diario (231,52 [Mcal/h])
- n: cantidad de instalaciones (1)

Luego reemplazando se tiene:

$$D = 4,88 \times 2000 / (231,52 \times 1) = 42 \text{ [días]}$$

Por lo tanto, el estanque proyectado de 2000 [Lts] cubre las necesidades de 42 días de uso de los laboratorios. Para lograr una estimación real, se asume que los laboratorios no estarán el 100% del tiempo ocupados con uso de mecheros, por lo que se aplica una tasa de ocupación del 50%. Por lo tanto, el estanque de 2000 [Lts] alcanzaría para 84 días de clases.

Tomando en cuenta una ocupación anual de 10 meses, y 22 días por mes, se tiene que al año se deberían consumir 2.600 [Lts] de GLP, o 2,6 [m<sup>3</sup>].

En la tabla 20 se muestra el cálculo de la emisión de CO<sub>2</sub> equivalente:

**Tabla 20:** Cálculo de emisiones por consumo de gas GLP Edificio Aulario B

<b>Consumo Estimado</b>	2,6	m3 / año
<b>Factor de emisión</b>	1.590	kg CO2 eq / m3
<b>Emisión anual</b>	4.134	kg CO2 eq / año
<b>Superficie construida</b>	4.788,00	m2
<b>Emisión por m2 construido</b>	0,86	kg CO2 eq / año / m2

Fuente: Elaboración propia

De esta forma se obtiene que la emisión anual del edificio de Aulario B, por concepto de consumo de GLP se estima en 0,86 [kg CO2 eq anual / m<sup>2</sup>].

### 7.2.5 RESULTADOS FINALES

El estudio comparó el impacto ambiental de los edificios Ciencias y Aulario B en el Campus Curauma de la PUCV, centrándose en el consumo de energía, agua y emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente.

Los principales resultados se muestran en la tabla 21.

**Tabla 21:** Resultados finales del estudio

Emisiones	Emisiones [kg CO2 eq anual / m2]			
	Ciencias	Aulario B	Diferencia	Variación %
Consumos de agua potable	0,54	0,37	0,17	-31,2%
Consumos eléctricos	20,72	18,41	2,32	-11,2%
Consumos de GLP	3,86	0,86	2,99	-77,6%
<b>TOTAL</b>	<b>25,12</b>	<b>19,64</b>	<b>5,48</b>	<b>-21,8%</b>

Fuente: Elaboración propia

- I. Reducción de Emisiones de CO<sub>2</sub> Equivalente
  - Emisiones por metro cuadrado:
    - Edificio de Ciencias: 25,12 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>/año
    - Edificio Aulario B: 19,64 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>/año
  - Reducción total de emisiones: 21,8%
- II. Disminución del Consumo de GLP
  - Consumo en Edificio de Ciencias: 100% (base de comparación)
  - Consumo en Edificio Aulario B: 77,6% menos

- Motivo: Eliminación de calderas a gas y reducción del uso de mecheros Bunsen.
- III. Optimización del Consumo de Energía Eléctrica
- Reducción de consumo en Aulario B: 11,2%.
  - Factores clave: Implementación de Chillers Inverter y luminarias LED.
- IV. Uso Eficiente del Agua y Reducción de Emisiones Asociadas
- Disminución de emisiones por consumo de agua: 31,2% en Aulario B.
  - Factor de recuperación del agua:
    - Edificio de Ciencias: 0,885
    - Edificio Aulario B: 0,75 (mayor reutilización en riego).
- V. Consideraciones Finales
- El Aulario B reduce su huella de carbono respecto al Edificio de Ciencias, destacando la disminución en el consumo de GLP, la optimización de energía eléctrica y la reutilización de agua.
  - El esfuerzo económico en diseñar y construir edificios más eficientes pasó de 422 US\$/m<sup>2</sup> en el Edificio de Ciencias, a 1.162 US\$/m<sup>2</sup> en el Edificio Aulario B, lo cual equivale a 2,8 veces la inversión realizada.
  - Las estimaciones de emisiones deberán validarse con mediciones reales una vez en operación, para confirmar la efectividad de las mejoras proyectadas.

Estos resultados reflejan avances en eficiencia energética y reducción de impacto ambiental, alineándose con los objetivos de carbono neutralidad al 2030 de la PUCV.

## 8 Análisis económico

### 8.1 Consumo de agua potable

#### 8.1.1 Determinación del precio unitario

Para la determinación del precio, se analiza el precio por m<sup>3</sup> de agua potable consumida, durante el último año en el edificio de Ciencias. En la tabla 22 se muestra su comportamiento mensual.

**Tabla 22:** Valor por m<sup>3</sup> de agua potable año 2023

Datos año 2023 Agua Potable	
Mes	Valor por m3
Enero	\$ 2.272
Febrero	\$ 2.247
Marzo	\$ 2.289
Abril	\$ 2.185
Mayo	\$ 1.986
Junio	\$ 1.933
Julio	\$ 1.939
Agosto	\$ 1.941
Septiembre	\$ 1.946
Octubre	\$ 1.946
Noviembre	\$ 1.946
Diciembre	\$ 2.008
<b>Promedio</b>	<b>\$ 2.053</b>

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, para efectos de cálculo en el flujo de caja se establece un precio unitario de \$2.053 / m<sup>3</sup> de agua potable consumida.

#### 8.1.2 Análisis de las características del consumo

Según los datos obtenidos de las boletas de consumo, durante el año 2023 el edificio de Aulario A, Periodismo y Ciencias consumieron un total de 30.500 [m<sup>3</sup>] de agua potable. La superficie total de esos edificios es de 18.146,97 [m<sup>2</sup>], lo cual nos entrega un ratio de consumo de 1,68 [m<sup>3</sup>] de agua potable consumida respecto a los m<sup>2</sup> de superficie construida.

Realizando el mismo análisis en Aulario B, se tiene que para un total anual proyectado de 5.413 de agua potable, en un edificio de 4.788 [m<sup>2</sup>] el ratio de consumo proyectado es 1,13 [m<sup>3</sup>] de agua potable consumida respecto a los m<sup>2</sup> de superficie construida.

Luego la diferencia entre ambos ratios, representa el ahorro de agua potable anual en el edificio Aulario B:

- Ahorro unitario agua potable =  $1,68 - 1,13 = 0,55$  [m<sup>3</sup> agua potable / m<sup>2</sup> construido]

Si se aplica la superficie del edificio de Aulario B, se tiene el ahorro total anual:

- Ahorro total agua potable =  $0,55$  [m<sup>3</sup> agua / m<sup>2</sup>] x  $4.788$  [m<sup>2</sup>] =  $2.633$  [m<sup>3</sup> / año]

Finalmente, el ahorro anual, usando el precio unitario y el ahorro total anual, será el siguiente:

- **Ahorro anual agua potable =  $2.633$  [m<sup>3</sup>/año] x  $2.053$  [\$/m<sup>3</sup>] =  $5.405.549$  [\$/año]**

## **8.2 Consumo de energía eléctrica**

### **8.2.1 Determinación del precio unitario**

Para la determinación del precio, se analiza el precio por KW-h de energía eléctrica consumida, durante el último año en el edificio de Ciencias. La tabla 23 muestra el comportamiento mensual.

**Tabla 23: Valor por KW-h de energía eléctrica año 2023**

<b>Datos año 2023 Energía Eléctrica</b>	
<b>Mes</b>	<b>Valor por KW-h</b>
Enero	\$ 142
Febrero	\$ 148
Marzo	\$ 138
Abril	\$ 157
Mayo	\$ 153
Junio	\$ 155
Julio	\$ 149
Agosto	\$ 151
Septiembre	\$ 149
Octubre	\$ 145
Noviembre	\$ 152
Diciembre	\$ 156
<b>Promedio</b>	<b>\$ 150</b>

Fuente: Elaboración propia

### 8.2.2 Análisis de las características del consumo

Según los datos obtenidos de las boletas de consumo, durante el año 2023 el edificio de consumió un total de 667.200 [KW-h] de energía eléctrica. Considerando una superficie del edificio de Ciencias de 13.087,24 [m<sup>2</sup>], lo cual nos entrega un ratio de consumo de 50,98 [KW-h] de energía eléctrica consumida respecto a los m<sup>2</sup> de superficie construida.

Realizando el mismo análisis en Aulario B, se tiene que para un total anual proyectado de 242.550 [KW-h] de energía eléctrica, en un edificio de 4.788 [m<sup>2</sup>] el ratio de consumo proyectado es 50,66 [KW-h] de energía eléctrica consumida respecto a los m<sup>2</sup> de superficie construida.

Luego la diferencia entre ambos ratios, representa el ahorro de energía eléctrica anual en el edificio Aulario B:

- Ahorro unitario energía eléctrica =  $50,98 - 50,66 = 0,32$  [KW-h / m<sup>2</sup> construido]

Si aplicamos la superficie del edificio de Aulario B, se tiene el ahorro total anual:

- Ahorro total energía eléctrica =  $0,32$  [KW-h / m<sup>2</sup>] x  $4.788$  [m<sup>2</sup>] =  $1.532$  [KW-h / año]

Finalmente, el ahorro anual, usando el precio unitario y el ahorro total anual, será el siguiente:

- Ahorro anual energía eléctrica = 1.532 [KW-h/año] x 150 [\$/KW-h]
- **Ahorro anual energía eléctrica = 229.800 [\$/año]**

### 8.3 Consumo de GLP

#### 8.3.1 Determinación del precio unitario

Para la determinación del precio, se analiza el precio por m<sup>3</sup> de GLP consumido, durante el último año en el edificio de Ciencias. La tabla 24 muestra el comportamiento mensual.

**Tabla 24:** Valor por m<sup>3</sup> de GLP año 2023

Datos año 2023 GLP	
Mes	Valor por m3
Enero	\$ 1.024.000
Febrero	\$ 971.000
Marzo	\$ 976.000
Abril	\$ 951.000
Mayo	\$ 947.000
Junio	\$ 941.000
Julio	\$ 1.002.000
Agosto	\$ 985.000
Septiembre	\$ 1.000.000
Octubre	\$ 880.672
Noviembre	\$ 880.672
Diciembre	\$ 1.088.000
<b>Promedio</b>	<b>\$ 970.529</b>

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, para efectos de cálculo en el flujo de caja se establece un precio unitario de \$970.529 / m<sup>3</sup> de GLP consumido.

### 8.3.2 Análisis de las características del consumo

Según los datos obtenidos de las boletas de consumo, durante el año 2023 el edificio de consumió un total de 44 [m<sup>3</sup>] de GLP. Considerando una superficie del edificio de Ciencias de 13.087,24 [m<sup>2</sup>], lo cual nos entrega un ratio de consumo de 0,0034 [m<sup>3</sup>] de GLP consumido respecto a los m<sup>2</sup> de superficie construida.

Realizando el mismo análisis en Aulario B, se tiene que para un total anual proyectado de 2,6 [m<sup>3</sup>] de GLP, en un edificio de 4.788 [m<sup>2</sup>] el ratio de consumo proyectado es 0,0005 [m<sup>3</sup>] de GLP consumido respecto a los m<sup>2</sup> de superficie construida.

Luego la diferencia entre ambos ratios, representa el ahorro de GLP anual en el edificio Aulario B:

- Ahorro unitario GLP = 0,0034 – 0,0005 = 0,0029 [m<sup>3</sup> GLP / m<sup>2</sup> construido]

Si aplicamos la superficie del edificio de Aulario B, se tiene el ahorro total anual:

- Ahorro total GLP = 0,0029 [m<sup>3</sup> GLP / m<sup>2</sup>] x 4.788 [m<sup>2</sup>] = 13,89 [m<sup>3</sup> GLP / año]

Finalmente, el ahorro anual, usando el precio unitario y el ahorro total anual, será el siguiente:

- Ahorro anual GLP = 13,89 [m<sup>3</sup> GLP / año] x 970.529 [\$/m<sup>3</sup> GLP]
- **Ahorro anual energía eléctrica = 13.480.648 [\$/año]**

## 8.4 Parámetros del Flujo de Caja

### 8.4.1 Plazo

Para establecer el horizonte de análisis del flujo de caja, se considera un plazo estimado de operación de edificios educacionales de 25 años. Si bien el Ministerio de Desarrollo Social establece rangos de 10 a 20 años para la evaluación de edificios públicos (incluidos los educacionales), el caso particular de la PUCV establece estándares de construcción superiores, con vidas útiles de edificios similares alrededor de los 25 años.

### 8.4.2 Tasa de descuento

Para establecer la tasa de descuento, se analizan 3 indicadores oficiales en Chile, según lo mostrado en la tabla 25.

**Tabla 25:** Referencias para tasa de descuento

Indicador	Referencia real (%)	Fuente
<b>Tasa Social de Descuento (TSD)</b> – parámetro usado por el Estado para proyectos de infraestructura pública	<b>5,5 %</b> (vigente desde junio 2024)	desarrollosocialyfamilia.gob.cl
<b>Bonos del Banco Central en UF a 20 años</b> – rendimiento libre de riesgo de largo plazo	≈ <b>2,3 % – 2,6 %</b> (promedio 2025)	si3.bcentral.cl
<b>TPM neutral real</b> – tasa base de corto plazo en equilibrio	≈ <b>1 %</b> (rango 0,5 %–1,5 %)	www.bcentral.cl

A continuación, se establecen criterios de ajuste al proyecto:

- **Prima por plazo**

La brecha entre la TPM neutral (1 %) y los bonos BCU 20-30 años (≈ 2,5 %) refleja el premio exigido por inmovilizar capital durante décadas.

- **Prima por riesgo de proyecto privado**

Flujo depende de la demanda educacional y gestión operativa (vacancia, costos).  
Riesgo moderado: ingresos estables con parte de respaldo estatal (aranceles y fondos concursables).

- **Benchmarks privados en infraestructura social**

Estudios de costo de capital para concesiones y servicios regulados sitúan el WACC real entre 5 % y 7 % para activos con riesgo medio.

- **Comparación con la TSD**

Inversores privados exigen rentar por encima de la TSD (costo social del dinero) al asumir riesgo financiero propio.

**Se propone por lo tanto una tasa de descuento del 6%, basado en el siguiente cálculo:**

- Tasa libre de riesgo (bono BC en UF 20 años) = 2,5%
- Prima de riesgo-plazo específica = 3,5%
- **Tasa real = 6%**

La tasa tiene un respaldo en lo siguiente:

- La tasa del 6%, está 0,5% por sobre la TSD, reflejando costo-oportunidad privado sin alejarse del estándar social.
- La tasa se ubica dentro del rango WACC observado para infraestructura social.
- La tasa nominal (con inflación del 3%) está en el orden del 9,2 %, el cual es un valor habitual en finanzas de proyectos chilenos

### **8.4.3 Venta de bonos de carbono**

Los bonos de carbono bajo el mercado regulado son parte de los instrumentos definidos en el Protocolo de Kioto para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Dichas reducciones se miden en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, y se traducen en certificados de emisiones reducidas (CER). Un certificado de emisiones reducidas equivale a una tonelada de CO<sub>2</sub> que se deja de emitir a la atmósfera, y puede ser vendido en el mercado formal de carbono a países Anexo I. Este tipo de bonos de carbono son transados en los mercados de cumplimiento regulado por regímenes obligatorios de reducción de carbono.

El Gobierno de Chile, a través del Sistema Nacional de Inversiones (SNI), publicó recientemente la actualización anual de los Precios Sociales 2025, entre los cuales se destaca la revisión del Precio Social del Carbono (PSC), instrumento clave para incorporar criterios de sostenibilidad ambiental en la evaluación de proyectos de inversión pública.

El nuevo valor del precio social del carbono se fijó en 71,1 USD/t CO<sub>2</sub> para el 2025— equivalentes a 70.540 pesos chilenos por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente— y fue definido tomando como base metodológica el estudio desarrollado por el Ministerio de Desarrollo Social y Familia y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Se debe incluir en el análisis, la certificación energética del edificio que permita sustentar las disminuciones en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Lo anterior se incluye como un gasto cada 10 años, que sería el caso en que el edificio obtenga una buena calificación energética.

Según lo indicado en la tabla 21, la disminución de emisiones anuales de CO<sub>2</sub> eq es 5,48 [kg/m<sup>2</sup>] y tomando en cuenta la superficie del edificio se obtiene una reducción total de 26,2 [Ton CO<sub>2</sub> eq].

Finalmente, se tiene un valor de 1.863 [US\$/año] como ingreso por venta de bonos de carbono, equivalente a \$1.792.203.

#### 8.4.4 Inversión inicial

Tal como se mencionó en 7.1.14, el esfuerzo económico en diseñar y construir edificios más eficientes pasó de 396.680 [\$/m<sup>2</sup>] en el Edificio de Ciencias, a 1.092.280 [\$/m<sup>2</sup>] en el Edificio Aulario B, lo cual equivale a 2,8 veces la inversión realizada. Por lo tanto, la diferencia en la inversión inicial corresponde a 695.600 [\$/m<sup>2</sup>].

Si aplicamos la diferencia indicada a la superficie total del edificio, tendremos la diferencia total de la inversión inicial:

- Diferencia Inversión Inicial = 695.600 [\$/m<sup>2</sup>] x 4.788 [m<sup>2</sup>] = \$3.330.532.800

#### 8.5 Flujo de Caja

Considerando los antecedentes indicados previamente, se muestra un extracto del flujo de caja en la tabla 26.

**Tabla 26:** Flujo de caja

Item	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Diferencia Inv. Inicial [M\$]	\$ -3.330.533									
Certificación energética	\$ -6.000									
Venta bonos Carbono		\$ 1.792	\$ 1.792	\$ 1.792	\$ 1.792	\$ 1.792	\$ 1.792	\$ 1.792	\$ 1.792	\$ 1.792
Ahorro Agua Potable [M\$]		\$ 5.406	\$ 5.406	\$ 5.406	\$ 5.406	\$ 5.406	\$ 5.406	\$ 5.406	\$ 5.406	\$ 5.406
Ahorro energía eléctrica [M\$]		\$ 230	\$ 230	\$ 230	\$ 230	\$ 230	\$ 230	\$ 230	\$ 230	\$ 230
Ahorro GLP [M\$]		\$ 13.481	\$ 13.481	\$ 13.481	\$ 13.481	\$ 13.481	\$ 13.481	\$ 13.481	\$ 13.481	\$ 13.481
<b>TOTAL</b>	<b>\$ -3.336.533</b>	<b>\$ 20.909</b>	<b>\$ 20.909</b>	<b>\$ 20.909</b>	<b>\$ 20.909</b>	<b>\$ 20.909</b>	<b>\$ 20.909</b>	<b>\$ 20.909</b>	<b>\$ 20.909</b>	<b>\$ 20.909</b>
Tasa interés	6%									
VAN	\$-3.071.117									
TIR	-11%									
IVAN	0,92									

Fuente: Elaboración propia

Claramente, el esfuerzo por avanzar en edificios más sustentables, no es viable financieramente:

- El VAN de -3.071 MM\$ confirma que el patrimonio de la PUCV se disminuye en el monto indicado.
- El TIR negativo, refleja que, aún cuando la tasa de interés fuera 0%, el proyecto debe ser financiado para que funcione.
- El IVAN de 0,92 indica que de cada \$100 invertidos, sólo vuelven \$92 en valor presente, y la inversión quema \$8 por cada \$100 invertidos.

Cabe mencionar, que este análisis no profundiza en las proyecciones de ingresos por aumento de matrículas de nuevos alumnos, al contar con mayor y mejor espacio físico disponible. Tales proyecciones de matrícula, así como los ingresos por aranceles, corresponden a información no disponible en canales oficiales para que puedan ser usadas en este trabajo, pero que podrían variar los resultados obtenidos en este estudio.

## **9 Análisis general**

Entrando en un análisis fuera del ámbito financiero, mostrado en el punto 8, existen otros ámbitos que son importantes de mencionar respecto a la inversión de la PUCV en el edificio de Aulario B:

### **Valor académico y pedagógico**

- Los edificios con buena ventilación, luz natural, y confort térmico elevan la concentración y reducen ausencias; en universidades se asocia a mejores resultados de aprendizaje.
- El propio campus se convierte en laboratorio de eficiencia energética, agua y materiales, generando tesis, papers y patentes ligadas a sustentabilidad.

### **Salud y bienestar**

- Un ambiente interior saludable en cuanto a calidad del aire, temperatura y acústica, reduce el estrés, la fatiga y mejora la salud mental.

### **Reputación y posicionamiento**

- La inversión en edificios más sustentables mejora la posición de la universidad en rankings internacionales (Ejm: THE-Impact) que ponderan avances en distintos objetivos de desarrollo sostenible (ODS).
- Los nuevos postulantes a la universidad valoran entornos sostenibles, apoyando la narrativa de universidad responsable y moderna.

### **Cumplimiento regulatorio y políticas públicas**

- La universidad se alinea con la ley N°21.455 que fija la meta de Chile como carbono-neutral para el año 2050.
- Los nuevos criterios 2023 exigen gestión ambiental y vinculación con la sostenibilidad institucional: proyectos verdes suman evidencia para reacreditación.

### **Vínculo con la comunidad**

- El hecho de ser una universidad eminentemente regional, asociado a la región de Valparaíso, genera en esta posición de sustentabilidad un fortalecimiento con las comunidades que son vecinas a los distintos campus, y también con las autoridades comunales.

#### **Acceso a financiamiento blanco**

- El avanzar a futuras certificaciones de sustentabilidad generan mejores condiciones de deuda y donaciones públicas (FNDR verdes, ANID, CORFO).

#### **Gobernanza y cultura**

- Proyectos participativos de eco-campus aumentan sentido de pertenencia y generan cultura de ahorro de recursos.

## **10 Conclusiones**

En función de los objetivos planteados y el análisis realizado en este estudio comparativo entre el **Edificio de Ciencias** y el **Edificio Aulario B** del **Campus Curauma de la PUCV**, se presentan las siguientes conclusiones:

### **Reducción de Emisiones de CO<sub>2</sub> Equivalente**

Se logró una disminución total del 21,8% en las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente en el Edificio Aulario B, en comparación con el Edificio de Ciencias, al considerar los consumos de energía eléctrica, agua potable y gas licuado de petróleo (GLP).

Esta reducción se debe principalmente a la optimización del consumo energético y la eliminación del GLP en calefacción.

### **Impacto de la Eliminación del GLP**

Se registró una reducción del 77,6% en el consumo de GLP en el Edificio Aulario B, debido a la eliminación de calderas de gas y su reemplazo por sistemas eléctricos más eficientes.

La única demanda de GLP en el Aulario B proviene del uso de mecheros Bunsen en laboratorios, lo que representa un consumo mínimo en comparación con el Edificio de Ciencias.

### **Optimización del Consumo de Energía Eléctrica**

La implementación de Chillers Inverter y luminarias LED en el Aulario B permitió una reducción del 11,2% en el consumo eléctrico respecto al Edificio de Ciencias.

Se evidencia una mayor eficiencia en climatización, con sistemas de control que optimizan la demanda de energía, evitando sobreconsumos innecesarios.

### **Mejora en el Uso y Tratamiento del Agua**

Se logró una reducción del 31,2% en las emisiones asociadas al consumo de agua potable en el Edificio Aulario B, gracias a la implementación de tecnologías sanitarias más eficientes y la reutilización de aguas grises.

En el Edificio Aulario B, el factor de recuperación de agua disminuyó a 0,75, en comparación con 0,885 en el Edificio de Ciencias, lo que indica que una mayor cantidad

de agua es reutilizada en riego, reduciendo la carga sobre el alcantarillado y las emisiones asociadas a su tratamiento.

### **Comparación de Emisiones por Metro Cuadrado Construido**

Se cuantificaron las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente en kg/m<sup>2</sup> por año, obteniendo: Edificio de Ciencias 25,12 kg CO<sub>2</sub> eq / m<sup>2</sup> / año y Edificio Aulario B 19,64 kg CO<sub>2</sub> eq / m<sup>2</sup> / año. La reducción del 21,8% valida el impacto positivo de las estrategias implementadas en el Edificio Aulario B.

### **Importancia de la Medición y Monitoreo de Emisiones**

Se recomienda implementar un sistema de medición continua del consumo de energía y agua en el Aulario B, para verificar en la práctica las estimaciones realizadas en este estudio y validar su impacto real.

La medición constante permitirá replicar las mejores prácticas en futuras infraestructuras de la PUCV.

### **Potencial de Replicabilidad en Futuras Construcciones**

El Aulario B representa un modelo sostenible para futuras edificaciones en la PUCV, incorporando tecnologías más eficientes en consumo energético e hídrico.

Se recomienda replicar estrategias como: uso de Chillers Inverter para climatización eficiente, implementación de humedales construidos para el tratamiento y reutilización de aguas grises, eliminación del uso de GLP en calefacción, favoreciendo alternativas eléctricas más eficientes.

### **Contribución a los Objetivos de Carbono Neutralidad de la PUCV**

La reducción de emisiones alcanzada en el Edificio Aulario B está alineada con los compromisos del Plan de Desarrollo Estratégico Institucional 2023-2029.

Este trabajo confirma que las medidas implementadas contribuyen significativamente a la meta de carbono neutralidad al 2030, promoviendo la sostenibilidad en la infraestructura universitaria.

### **Rentabilidad y beneficios no económicos**

El esfuerzo de inversión, desde la mirada financiera no es rentable para la universidad. Es necesario contar con mayor información respecto a matrículas y proyección de crecimiento de alumnos para tener una estimación más certera al respecto.

Los beneficios no económicos de avanzar en la construcción de edificios más sustentables están asociados a mejoras en la reputación, mejoras académicas y sociales de la universidad con su entorno, sus alumnos, profesores y funcionarios.

## 11 Bibliografía

**Abierta, Energía.** : <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>. [En línea] <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>. [En línea]

**Comisión Nacional de Energía. 2024.** Energía Abierta. *Energía Abierta*. [En línea] 1 de Diciembre de 2024. <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>.

**Ministerio de Energía. 2018.** Energía. *Ministerio de Energía*. [En línea] 1 de 12 de 2018. <https://energia.gob.cl/indicadores-ambientales-factor-de-emisiones-gei-del-sistema-electrico-nacional>.