



UCSC

Universidad Católica de la Santísima Concepción
Facultad de Ingeniería

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TECHO VERDE EN EDIFICIO CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN.

Proyecto presentado para optar al título de Ingeniero Civil

Por Francisca Javiera Sanhueza Basualto

Profesor guía: Sofía Javiera Toledo Valdés; Profesor informante: Felipe González Monsalve

RESUMEN

La rápida urbanización está exacerbando el cambio climático, lo que lleva a la búsqueda de soluciones para mejorar la calidad de vida y reducir el impacto ambiental. La construcción contribuye significativamente a las emisiones de CO₂, con un 39% a nivel mundial y un 22% en Chile. Se proyecta que para 2050, el número de edificios se duplicará, incrementando el consumo de energía y las emisiones. Para mitigar esto, se promueve la eficiencia energética y la sostenibilidad, destacando los techos verdes como una solución efectiva. Estos techos ayudan a reducir las emisiones, mejorar la eficiencia energética y alcanzar metas de carbono neutralidad. Su implementación ha crecido un 45% en la última década, mostrando beneficios como la reducción de la temperatura urbana, la mejora en la calidad del aire y la eficiencia energética. Los techos verdes son efectivos en climas fríos y cálidos, reducen las variaciones de temperatura y humedad, y ofrecen beneficios adicionales como la creación de espacios verdes y el tratamiento de la escorrentía de agua de lluvia. El proyecto propuesto analiza cómo los techos verdes pueden fomentar un desarrollo urbano más sostenible, explorando su diseño, instalación y beneficios comunitarios.

ABSTRACT

Rapid urbanization is exacerbating climate change, leading to the search for solutions to improve quality of life and reduce environmental impact. Construction contributes significantly to CO₂ emissions, with 39% globally and 22% in Chile. It is projected that by 2050, the number of buildings will double, increasing energy consumption and emissions. To mitigate this, energy efficiency and sustainability are promoted, highlighting green roofs as an effective solution. These roofs help reduce emissions, improve energy efficiency and achieve carbon neutrality goals. Its implementation has grown by 45% in the last decade, showing benefits such as the reduction of urban temperature, the improvement in air quality and energy efficiency. Green roofs are effective in cold and hot climates, reduce temperature and humidity variations, and offer additional benefits such as creating green spaces and treating rainwater runoff. The proposed project analyzes how green roofs can foster more sustainable urban development, exploring their design, installation, and community benefits.

1. INTRODUCCIÓN

La urbanización rápida y sus efectos en el cambio climático son cada vez más evidentes, impulsando a la sociedad a buscar soluciones para mejorar la calidad de vida y minimizar el impacto ambiental (Nieto, J., & Santamarta, J. (2005)). Según el Ministerio de Energía de Chile (2016), la industria de la construcción es responsable de una gran parte de las emisiones de CO₂, tanto a nivel mundial (39%) como nacional (22%). Se espera que para 2050 la cantidad de edificios construidos se duplique, lo que incrementaría el consumo de energía y las emisiones de CO₂ en un 1% y 2% anualmente. Para revertir esta tendencia, es crucial mejorar la eficiencia energética y fomentar la sostenibilidad en el sector inmobiliario, incluyendo el uso de energías renovables y herramientas que reduzcan el consumo energético, como los Techos Verdes (Ministerio de Energía de Chile, 2021). Estos no solo ayudan a reducir las emisiones, sino que también son fundamentales para alcanzar las metas de carbono neutralidad del país.

En la última década, la implementación de techos verdes ha aumentado en un 45%, destacando sus beneficios en la reducción de la temperatura urbana, la mejora de la eficiencia energética y la calidad del aire (Zielinski, S., Collante, M. A. G., & Paternina, J. C. V. (2012)). Los techos verdes, conocidos desde hace siglos en diversos climas, almacenan el calor en climas fríos y aíslan en climas cálidos, mejorando el clima urbano al purificar el aire y reducir las variaciones de temperatura y humedad (Minke, G. (2004)). Estos sistemas, ligeros y con una fina capa de vegetación, mejoran la eficiencia energética regulando la temperatura, reducen el efecto de "isla de calor" y crean espacios verdes que aportan valor estético y funcional (Canales Gálvez, M. (2014)). Además, los techos verdes son eficaces para tratar, equilibrar y reducir los picos de escorrentía, actuando como una pradera que almacena el agua de lluvia (López Machado, N. A., et al. (2020)).

Según el INE (Instituto Nacional de Estadísticas, s.f.), la población urbana del país se verá aumentada llegando a un 89,1% en el año 2035, lo que considera un aumento de hasta un 50% en el stock de edificios construidos a lo largo de los años.

Esto conlleva un aumento en el consumo de energía de un 22% a nivel nacional, lo cual se quiere revertir de manera que las metas de reducción de emisiones de CO₂ sean de un 17% y así lograr la carbono neutralidad en el país (Ministerio de Energía (2021)).

El proyecto en cuestión busca proporcionar una comprensión integral sobre cómo los techos verdes pueden contribuir al desarrollo urbano sostenible en lugares cotidianos como las universidades, explorando su diseño, instalación y beneficios para la comunidad. El documento desarrolla un marco teórico sobre la historia de los techos verdes y su implementación en el país, y detalla el proceso de recopilación de información y análisis para modelar y simular diferentes escenarios. Finalmente, se presentan los resultados y se analizan las conclusiones, subrayando la importancia de los techos verdes en la sostenibilidad urbana.

1.1. OBJETIVOS

Objetivo General

- Determinar la factibilidad de la elaboración de un techo verde para lograr el confort térmico con un menor consumo energético en el Edificio Central de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Objetivos específicos

- Evaluar características del edificio y su entorno para determinar la viabilidad e instalación de un Techo Verde.
- Proponer un diseño de techo verde considerando aspectos técnicos, estructurales y estéticos.
- Analizar los beneficios térmicos y económicos que la cubierta brindará incluyendo la disminución de la carga solar indirecta y mejoramiento en la resistencia térmica

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Tipos de techos verdes y su estructura

Se dividen en tres principales categorías: Extensivos, intensivos y semi- intensivos. Su principal diferencia está en su peso y espesores, además del tipo de vegetación y requerimientos de mantención. Vera, S., Viecco, M., Rojas, A. y Bustamante, W. (2023) los describen de la siguiente manera:

Extensivos: Son sistemas simples o multicapa, diseñados de forma individual o modular cuya capa de sustrato es menor a los 150 mm. Este sustrato no es necesariamente suelo o mezclas de suelo, sino una mezcla de componentes orgánicos y no orgánicos que otorgan liviandad, drenaje y retención de humedad. Conforman vegetación herbácea y arbustiva de poca altura, y exigen relativamente poco mantenimiento en términos de fertilización, irrigación o humedad.

Intensivos: Sistema multicapa (drenaje, medio de crecimiento o sustrato y plantas) diseñado en forma individual o compuesta (modular), con profundidades de sustrato usualmente superiores a los 300 mm, superficie nivelada o con variabilidad topográfica. Debido a que el espesor del sustrato es mayor, tiene la capacidad de albergar diversas especies vegetales de mayor envergadura (desde plantas herbáceas hasta árboles) y otras estructuras como pavimentos y pérgolas. Para su cuidado es necesaria una frecuente irrigación y mantenimiento, usualmente se hace referencia a ellos como jardines de techo.

Semi-intensivo: Presentan características intermedias entre los techos extensivos e intensivos, donde prima el uso de especies como arbustos y plantas herbáceas.

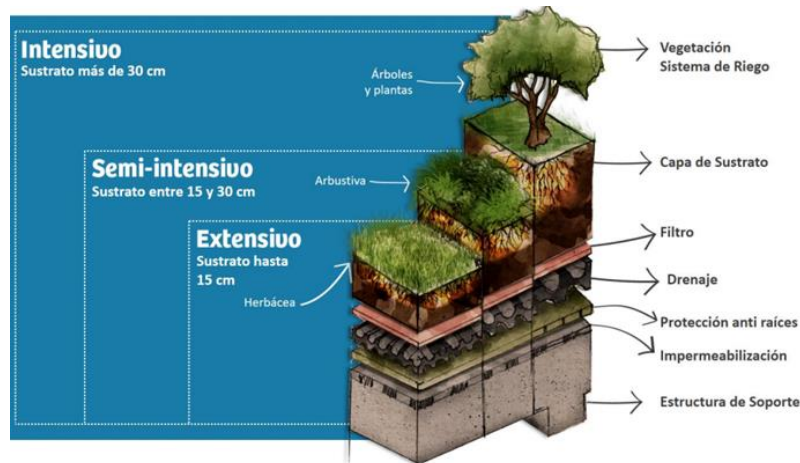


Ilustración 1: Diagrama Norma Techos Verdes, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2021

Tabla 1: Categorías de techos verdes, elaboración propia. Fuente: CDT

Característica	Extensivo	Semi-intensivo	Intensivo
Espesor sustrato	< 15 cm	15 – 30 cm	> 30 cm
Cobertura vegetal	No transitable	Según diseño	Transitable
Peso saturado	50 – 150 kg/m ²	150 – 250 kg/m ²	> 250 kg/m ²
Diversidad vegetal	Poca	Media	Máxima
Mantenimiento	Mínima	Variable	Alto
Tipo de vegetación	Rastreras, Sedum	Arbustos pequeños y pastos ornamentales	Arbustos y árboles pequeños

Un factor importante es el cómo está compuesto el techo verde, ya que puede proporcionar información relevante sobre la absorción de precipitaciones, carga que ejercerá cuando se encuentra saturado, cuantificar la evapotranspiración, entre otros.

A continuación, se describe la función y algunos aspectos importantes de las componentes de un techo verde:

Estructura de soporte: La cubierta o techo debe estar en la capacidad de soportar el sustrato, la vegetación, el agua almacenada y/o nieve (en caso de presentarse), el paso peatonal y diversos equipos para su mantenimiento.

Membrana impermeabilizante: Impide el paso del agua a la edificación. Algunos materiales recomendados son asfalto modificado, caucho sintético o termoplásticos reforzados. Esta también puede actuar como bloqueo de las raíces.

Protección anti raíces: Esta protege la membrana impermeabilizante previniendo su perforación por las raíces de las especies vegetales plantadas en el sistema. Su densidad y material dependerán del material empleado como membrana impermeabilizante y tipo de vegetación empleada. Este debe extenderse incluso sobre la zona de basalto de grava y lateralmente a cualquier elemento vertical.

Drenaje: este debe permitir el drenaje del agua lluvia de exceso en el sistema cuando el sustrato se encuentre saturado. El uso de techos verdes modulares o manufacturados es recomendado cuando

existe un mecanismo efectivo de drenaje. Debe ponerse especial atención al punto de ubicación del drenaje procurando evacuar efectivamente el agua de exceso.

Membrana de filtración: Previene el ingreso de partículas finas o material del sustrato a la capa de drenaje luego de presentarse un evento de lluvia.

Capa de sustrato: Aunque el medio de crecimiento no es típicamente “suelo”, se emplean otros términos como sustrato de crecimiento o suelo mejorado para referirse a este. El material que lo conforma debe ser liviano y debe proveer suficientes nutrientes para garantizar el crecimiento de plantas. La mezcla típica del material que lo conforma varía entre 5% orgánico, 95% inorgánico de material inorgánico, y 30% orgánico/70% inorgánico, dependiendo del tipo de vegetación (Clean Water Services, (2009)).

Vegetación: Por lo general, la vegetación sembrada corresponde a especies nativas o naturalizadas, de raíces poco profundas, resistentes a sequías, perenes, resistentes al frío y vientos fuertes; predominantemente de poca necesidad de irrigación, fertilización y mantenimiento. Se recomienda la siembra de diversas especies para incrementar la supervivencia de las mismas y mayor cobertura.

2.2. Requisitos de diseño

El Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), establece ciertos requisitos de diseño para un techo verde, donde se debe hacer un análisis general de qué objetivos se quiere cumplir con su edificación, las cargas estructurales que ejercerá, el sistema de riego que se llevará a cabo y su mantención a lo largo del tiempo.

2.3. Principales beneficios de los techos verdes

Según Minke G. (2004), mejorar el clima urbano podría lograrse con ajardinar de un 10% a un 20% de las superficies techadas de la ciudad, ya que los techos verdes pueden ofrecer de 5 a 10 veces más área de hojas que un parque abierto del mismo tamaño. Esto subraya su efectividad en aumentar las áreas verdes dentro de entornos urbanos densamente construidos.

Tabla 2: Tabla resumen de beneficios y desventajas. Elaboración propia con datos obtenidos de Minke G. (2004)

SECTOR	BENEFICIOS	Desventajas
Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> - Regulación térmica del ambiente - Reducción del efecto isla de calor urbano - Mejora la calidad del aire - Producen oxígeno y absorben CO₂ - Reducción de escorrentías - Aprovechamiento aguas lluvias - Aislamiento acústico - Conservación de la biodiversidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Requieren estructuras particulares.
Económico	<ul style="list-style-type: none"> - Incentivos fiscales - Incremento en el valor de los inmuebles - Aumento de la vida útil de los techos - Reducción en el consumo de energía 	<ul style="list-style-type: none"> - Requieren mantención - No se pueden instalar en cualquier estructura - Puede requerir un costo elevado de elaboración

Social	<ul style="list-style-type: none"> - Acceso a la educación verde - Obtención de productos agrícolas para el autoconsumo - Mejora en la estética de la urbanización 	- Son complejos de instalar
--------	---	-----------------------------

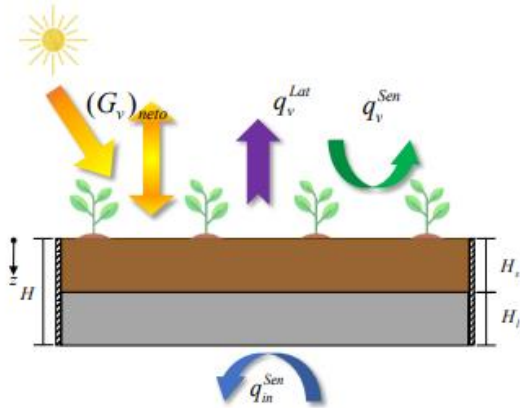


Ilustración 2: Modelo físico de un techo verde. Chagolla-Aranda, M. A. (2021)

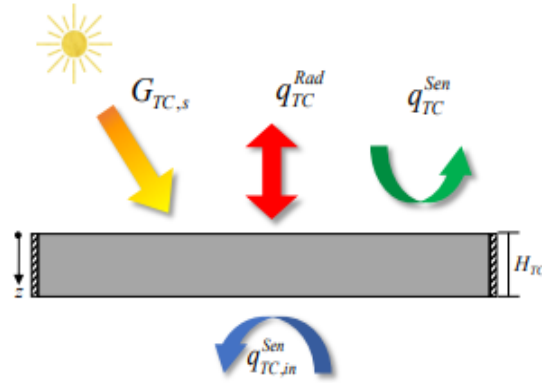


Ilustración 3: Modelo físico de un techo convencional. Chagolla-Aranda, M. A. (2021)

2.4. Normativas vigentes sobre techos verdes

Según el MINVU, para una correcta etapa constructiva de un techo verde es importante que cumpla con la normativa vigente de cada país, las cuales contemplan la terminología, clasificación y requisitos.

A continuación, se presenta una breve descripción de algunas de ellas:

Norma NCh 3626: Presenta requisitos y orientaciones tanto para el diseño, ejecución y posterior mantenimiento de techos verdes. Garantiza la viabilidad, seguridad y sostenibilidad en todas las fases de los proyectos de techos verdes que se implementen. Sus aspectos más relevantes de la norma son la sostenibilidad, sustrato a elección, peso, partículas finas y su mantenimiento. (Valenzuela, M. L. (2020))

NCh 853: Contempla el cálculo de resistencias y transmitancias térmicas, lo cual es fundamental en todos los casos relacionados con las pérdidas de calor de los edificios.

NCh850-2008: Determina la resistencia térmica y define el uso del método de la placa caliente para medir la transferencia de calor en estado estacionario.

ASTM E2777-20 Standard Guide for Vegetative Roof Systems: Aborda los requisitos mínimos y criterios para el diseño, construcción y mantenimiento de un techo verde en edificios nuevos o existentes, públicos o privados.

3. MÉTODOS

3.1. Descripción del lugar de estudio

La Universidad Católica de la Santísima Concepción se encuentra ubicada en Avenida Alonso Ribera N° 2850 de Concepción. Está emplazada a un costado de la autopista Concepción-Talcahuano y cuenta con una superficie de aproximadamente 20 hectáreas.

Dentro del campus se encuentra el llamado Edificio Central, el cual el punto de análisis. El edificio fue construido el año 2012 y cuenta con una superficie de 9.027,00 m². Cuenta con 7 pisos más dos pisos de zócalos que en su mayoría, se encuentran construido por hormigón armado y estructuras de madera que cubren parte de los ventanales del edificio.

A continuación, se muestran las características topográficas del edificio.

Tabla 3: Ubicación del sitio a estudiar, elaboración propia.

NOMBRE	EDIFICIO CENTRAL
LATITUD	36.7978°S
LONGITUD	73.0582°O
ELEVACIÓN	36 m

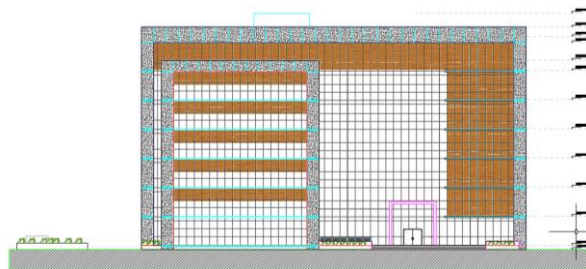


Ilustración 4: Elevación Norte Edificio Central UCSC.

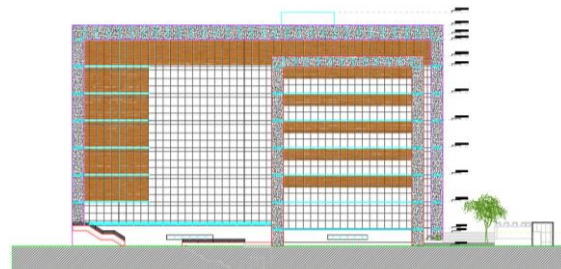


Ilustración 5: Elevación Sur Edificio Central UCSC.



Ilustración 6: Elevación Oeste Edificio Central UCSC.

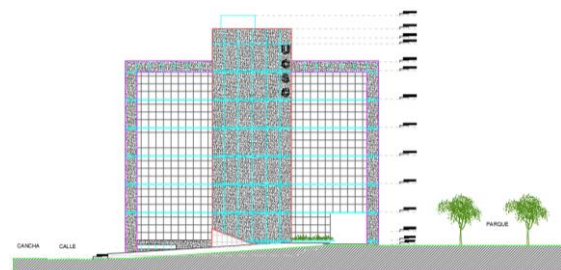


Ilustración 7: Elevación Este Edificio Central UCSC.

El piso a estudiar es el sexto nivel ya que sobre este se realizaría el techo verde, por lo que sus efectos se verían reflejados directamente sobre él.

La distribución del nivel consta de 6 áreas como se observa en la **Ilustración 8**. Los espacios que lo conforman son:

- Asistencia médica
- Baños
- Bienestar estudiantil
- Hall
- Oficinas Administrativas
- Taller alumnos

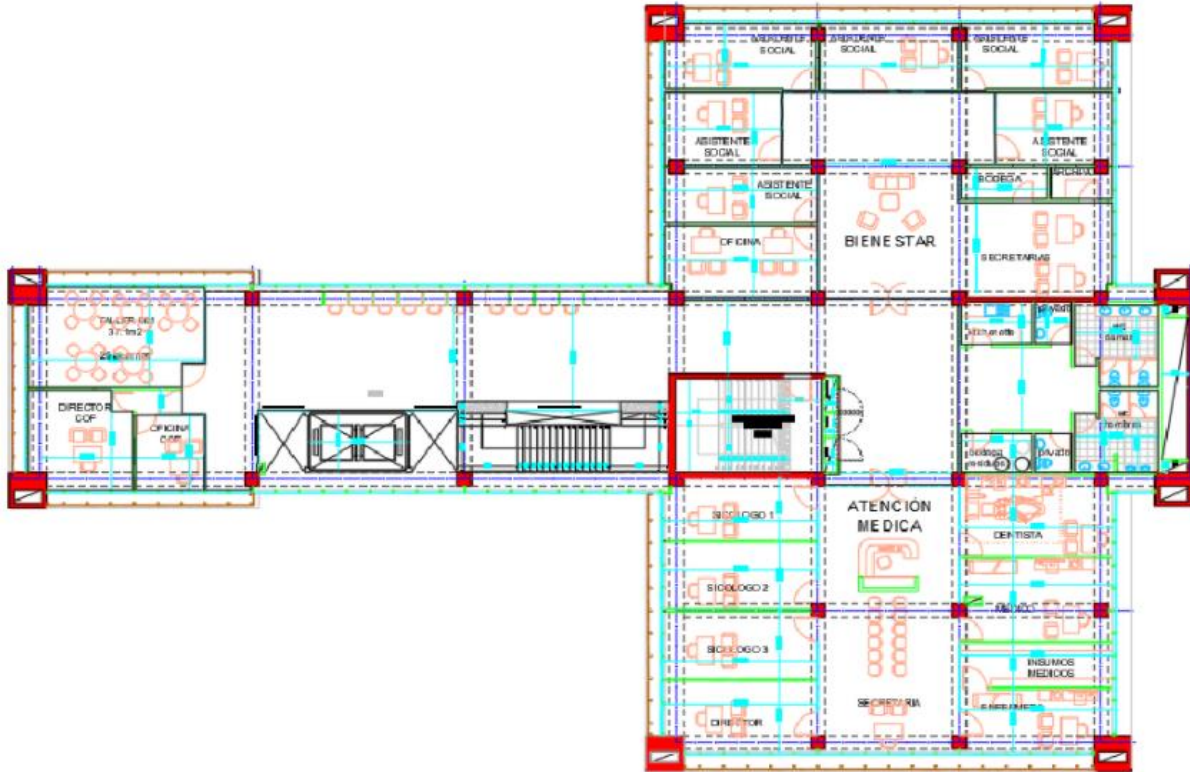


Ilustración 8: Planta arquitectónica sexto nivel Edificio Central.

3.2. Condiciones de diseño

Según el reporte regional 2023 de la BCN (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile), la región marca las transiciones entre los climas templados secos de la zona central y climas templados lluviosos que se desarrollan al sur del río Bío-bío.

A través del explorador solar del Ministerio de Energía se extrae información sobre el recurso solar basada en la modelación de la transferencia de radiación solar en la atmósfera.

El modelo utilizado para la transferencia en cielo despejado es el modelo CLIRAD-SW, el cual considera las interacciones de la radiación con la atmósfera por bandas espectrales de manera independiente. El modelo utiliza datos de temperatura, humedad y aerosoles de reanálisis meteorológicos y datos climatológicos de CO₂, CH₄ y O₃.

3.2.1. Radiación

Es la energía que se desplaza en forma de ondas entre dos o más elementos. Las siguientes tablas muestran los promedios de radiación directa sobre un plano horizontal. (Reporte de Recursos Meteorológicos, 2024)

Tabla 4: Promedio de la radiación directa sin corregir por temporada en unidades de [W/m²].

Promedio radiación (W/m ²)	
Enero-Marzo	231,014
Abril-Junio	99,885
Julio-Septiembre	103,783
Octubre-Diciembre	214,700

Luego para procesar estos datos es de suma importancia realizar una corrección considerando la declinación solar, ya que la cantidad de radiación que se llega a la superficie varía considerablemente a lo largo del año, por lo tanto, esta corrección permitiría tener una representación más precisa de la cantidad de energía solar que llega teniendo en cuenta las variaciones estacionales y la inclinación del eje terrestre. El promedio de las radiaciones corregidas se muestra en la **Tabla 6**.

Tabla 5: Declinación solar por mes. Elaboración propia.

Declinación solar por mes				
Mes	Fecha	Días del año	Declinación solar	Cos()
Enero	17	17	-20,92	0,934
Febrero	16	47	-12,95	0,975
Marzo	16	75	-2,42	0,999
Abril	15	105	9,41	0,987
Mayo	15	135	18,79	0,947
Junio	11	162	23,09	0,920
Julio	17	198	21,18	0,932
Agosto	16	228	13,45	0,973
Septiembre	15	258	2,22	0,999
Octubre	15	288	-9,60	0,986
Noviembre	14	318	-18,91	0,946
Diciembre	10	344	-23,05	0,920

Tabla 6: Promedio de la radiación directa corregida por temporada en unidades de [W/m²].

Promedio radiación (W/m ²)	
Enero-Marzo	223,911
Abril-Junio	94,995
Julio-Septiembre	100,469
Octubre-Diciembre	204,121

3.2.1.1. Horas de radiación

Mediante la herramienta ShadowMap se obtienen las horas de sol por orientación, lo cual es útil a la hora de calcular las cargas solares.



Ilustración 9: Ubicación Edificio Central, vista Este en modelo software ShadowMap.

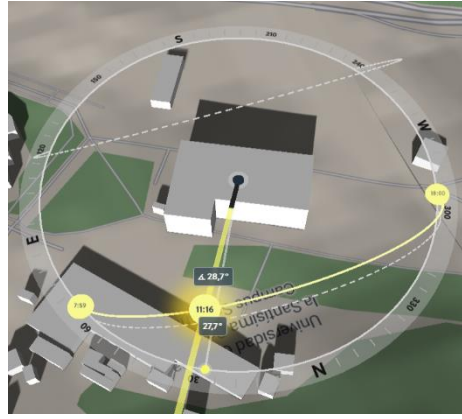


Ilustración 10: Ubicación Edificio Central, vista Norte en modelo software ShadowMap.

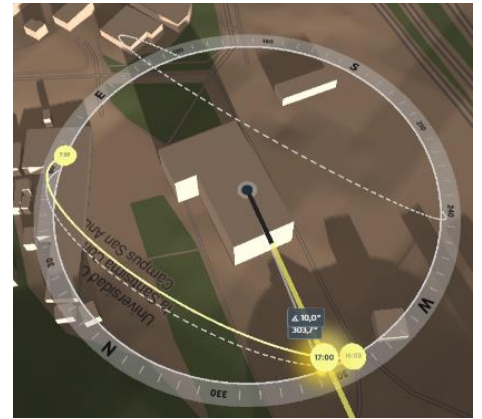


Ilustración 11: Ubicación Edificio Central, vista Oeste en modelo software ShadowMap.

Tabla 7: Horas de sol directa por orientación. Elaboración propia.

Horas de sol directa		
Orientación	Intervalos	
Este	8:30	9:15
Norte	9:15	14:45
Oeste	14:45	17:45
Sur	-	-

3.2.2. Temperatura

Las estimaciones de temperatura están basadas en los resultados del Explorador Eólico, los cuales se basan en simulaciones hechas con el modelo meteorológico WRF a 1 km de resolución.

Para efectos prácticos se muestra las temporadas de invierno y verano ya que durante estas épocas es donde se presentan las temperaturas máximas y mínimas, por lo tanto, son las temporadas más relevantes para este estudio.

Tabla 8: Temperatura promedio por temporada medida en °C. Elaboración propia.

	Promedio temperatura (°C)
Enero-Marzo	16,4
Abril-Junio	11,4
Julio-Septiembre	9,9
Octubre-Diciembre	13,8

Tabla 9: Temperatura de diseño en Kelvin.

T° Diseño	
Kelvin	294,15
Celsius	21

Para luego trabajar estos datos es necesario que sean expresados en Kelvin, teniendo como temperatura de diseño la temperatura media de 21°C, equivalente a 294,15 K.

Tabla 10: Temperatura promedio por temporada medida en Kelvin. Elaboración propia

Promedio temperatura (K)	
Enero-Marzo	289,525
Abril-Junio	284,548
Julio-Septiembre	283,004
Octubre-Diciembre	286,902

Para efectos de cálculo se consideró el promedio de radiación y temperatura por temporadas, considerando de enero a marzo temporada de verano, de abril a junio temporada de otoño, de julio a septiembre temporada de verano y de octubre a diciembre temporada de primavera.

3.2.3. Viento

Las estimaciones de viento corresponden a los resultados del Explorador Eólico para una altura de 5,5 metros, calculados con el modelo WRF a 1 km de resolución.

Tabla 11: Velocidad y dirección del viento por temporadas. Elaboración propia.

Velocidad y dirección del viento por Temporadas								
Temporada	Ene-Mar		Abr-jun		Jul-Sept		Oct-Dic	
Hora	Velocidad	Dirección	Velocidad	Dirección	Velocidad	Dirección	Velocidad	Dirección
0:00	2,70	SUR; OESTE	3,20	SUR	3,70	SUR	2,70	SUR; OESTE
1:00	2,50	SUR; OESTE	3,27	SUR	3,90	SUR	2,60	SUR; OESTE
2:00	2,57	SUR; OESTE	3,30	SUR	4,00	SUR	2,43	SUR; OESTE
3:00	2,50	SUR; OESTE	3,43	SUR	4,00	SUR	2,40	SUR; OESTE
4:00	2,50	SUR; OESTE	3,57	SUR	4,07	SUR	2,43	SUR; OESTE
5:00	2,57	SUR; OESTE	3,50	SUR	4,10	SUR	2,47	SUR; OESTE
6:00	2,73	SUR; OESTE	3,60	SUR	4,00	SUR	2,47	SUR; OESTE
7:00	2,60	SUR; OESTE	3,53	SUR	4,17	SUR	2,33	SUR; OESTE
8:00	2,47	SUR; OESTE	3,40	SUR	4,10	SUR	2,20	SUR; OESTE
9:00	2,63	SUR; OESTE	3,47	SUR	4,10	SUR	2,70	SUR; OESTE
10:00	3,07	SUR; OESTE	3,33	SUR	4,17	SUR	3,03	SUR; OESTE
11:00	3,53	SUR; OESTE	3,67	SUR	4,10	SUR	3,40	SUR; OESTE
12:00	3,67	SUR; OESTE	3,73	SUR	5,77	SUR	3,73	SUR; OESTE
13:00	4,20	SUR; OESTE	3,77	SUR	4,77	SUR	4,47	SUR; OESTE
14:00	4,73	SUR; OESTE	3,83	SUR	4,83	SUR	4,97	SUR; OESTE
15:00	5,07	SUR; OESTE	3,90	SUR	4,80	SUR	5,40	SUR; OESTE
16:00	5,33	SUR; OESTE	3,73	SUR	4,73	SUR	5,60	SUR; OESTE

17:00	5,20	SUR; OESTE	3,53	SUR	4,40	SUR	5,67	SUR; OESTE
18:00	4,83	SUR; OESTE	3,37	SUR	4,10	SUR	5,43	SUR; OESTE
19:00	4,33	SUR; OESTE	3,13	SUR	4,03	SUR	4,87	SUR; OESTE
20:00	3,77	SUR; OESTE	3,07	SUR	4,00	SUR	4,47	SUR; OESTE
21:00	3,17	SUR; OESTE	3,10	SUR	3,73	SUR	3,83	SUR; OESTE
22:00	2,90	SUR; OESTE	3,07	SUR	3,63	SUR	3,20	SUR; OESTE
23:00	2,77	SUR; OESTE	3,07	SUR	3,60	SUR	2,93	SUR; OESTE

3.3. Balance térmico de un edificio

Para determinar las demandas de calefacción y enfriamiento es necesario realizar un balance térmico entre las pérdidas y ganancias de carga para determinados periodos.

Pérdidas: Existen pérdidas a través del perímetro de las estructuras, y por ventilación cuando hay fugas de aire caliente por puertas y ventanas. Es importante considerar el área de las puertas y ventanas en el cálculo, ya que son poseen resistencia térmica menores a muros y techos.

Ganancias: Los aparatos de calefacción aportan ganancia térmica al interior de las edificaciones (estufas, cocinas, ampollitas, etc.). También existen ganancias por conducción a través de muros y techos.

La ecuación de balance térmico permite determinar la envergadura del sistema de climatización que necesita el edificio para lograr una temperatura confortable en su interior.

La relación entre ganancias y pérdidas de calor quedan expresadas en la siguiente ecuación:

$$Q_{total} = Q_s + Q_i + Q_c + Q_v \quad (1)$$

Donde:

- *Q_S: Balance térmico de cargas solares [W]*
- *Q_i: Balance térmico de cargas internas [W]*
- *Q_C: Balance térmico de cargas de los elementos de la envolvente [W]*
- *Q_v: Balance térmico de cargas de ventilación [W]*

Esta ecuación también es equivalente a sumar las cargas sensibles con las cargas latentes.

También es importante determinar todas las cargas que se presentan en la edificación, como las que se mencionan a continuación.

3.3.1 Cargas sensibles

Para el cálculo de Carga térmicas sensibles se emplea la siguiente expresión:

$$Q_{sensible} = Q_s + Q_c + Q_{iii} + Q_{iid} + Q_{ips} + Q_{ie} + Q_{vs} \quad (2)$$

Donde:

- *Q_s: Cargas Solares.*
- *Q_c: Cargas de elementos de la envolvente.*
- *Q_{iii}, Q_{iid}: Cargas internas de Iluminación.*
- *Q_{ips}: Carga interna sensible por ocupante.*
- *Q_{ie}: Cargas interna por artefacto.*
- *Q_{vs}: Carga sensible de ventilación.*

3.3.1.1. Cargas solares

Carga solar directa

Es la carga de radiación solar que atraviesa por las superficies acristaladas, ente caso las ventanas y muro cortina. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Q_{Sr} = S * R * \sigma \quad (3)$$

Donde:

- *S*: Superficie acristalada expuesta a radiación [m²]
- *R*: Radiación que atraviesa la superficie de cristal [W/m²]
- *σ*: Coeficiente de ganancia solar

Carga solar indirecta

Es la carga por transmisión y radiación de superficies opacas que limitan con el exterior. Se calcula de la siguiente forma:

$$Q_{Srt} = U * S * (R * \alpha * R_{s0}) \quad (4)$$

Donde,

- *Q_{srt}*: Carga por transmisión solar en superficies opacas [W]
- *U*: Transmitancia térmica del elemento [W/m²*K]
- *R*: Radiación solar total [W/m²]
- *α*: Absortancia de la superficie [0-1]
- *R_{s0}*: Resistencia de la película exterior de aire.

3.3.1.2. Carga de los elementos de la envolvente

Son las pérdidas de calor por transmisión en régimen estacionario de los elementos que componen la estructura (ventanas, puertas, paredes, etc.) y se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$Q_c = U * S * (T_{ext} - T_{int}) \quad (5)$$

Donde:

- *U*: Transmitancia térmica del elemento [W/m²K]
- *S*: Superficie expuesta a la diferencia de T° [m²]
- *T_{ext}*: Temperatura exterior [K]
- *T_{int}*: Temperatura interior [K]

3.3.1.3. Cargas internas

Cargas internas por iluminación

Está compuesto por dos tipos de carga, para lámparas incandescentes y de descarga.

La carga interna sensible de iluminación para lámparas incandescentes se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$Q_{iii} = n * Pot_{lámpara\ incandescente} \quad (6)$$

Donde:

- *n*: Número de lámparas
- *Pot lámpara incandescente*: Potencia de la ampolla [W]

La carga interna sensible de iluminación para lámparas de descarga se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$Q_{iid} = n * Pot_{lámpara\ descarga} \quad (7)$$

Donde:

- *n*: Número de lámparas
- *Pot lámpara incandescente*: Potencia de la ampolla [W]

Cargas internas por ocupante:

Esta carga tiene una componente sensible y una latente. Es importante considerar el número de ocupantes por tramos que asisten al recinto. Se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{ips} = n * C_{Sensible, persona} \quad (8)$$

Donde:

- *n*: Número de usuarios estimados en el recinto
- *Csensible*: Calor sensible por persona y actividad que realiza [W]

Cargas internas por artefacto:

Para el cálculo de cargas internas por artefacto considera que la potencia íntegra de funcionamiento de los artefactos se transformará en calor sensible. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Q_{ie} = \sum n * C_{artefacto} \quad (9)$$

Donde:

- *n*: Número de artefactos en el recinto
- *Cartefacto*: Carga térmica sensible del artefacto [W]

3.3.1.6. Carga de ventilación

La carga por infiltración y ventilación se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Q_{vs} = C_{aire} * V_{infil} * \rho * \Delta T \quad (10)$$

Donde:

- *Caire*: Calor específico del aire (1012 [J/kg°C])
- *Vinfil*: Caudal de aire de ventilación [m3/s]
- *ρ*: Densidad del aire (1,18 [kg/m3])
- *ΔT*: Gradiente de temperatura entre el ambiente exterior e interior [°C]

*** Caudal de aire de ventilación**

Para las puertas y ventanas que dan al exterior, el caudal de aire que se infiltra está dado por el uso que se le da a las mismas, la orientación y la velocidad del viento. El caudal está dado en m3 /s. Esto

se define como el área considerada por el cual entra aire exterior multiplicado por la velocidad del viento.

$$V_{infil} = A * V_{viento} \quad (11)$$

3.3.2. Cargas latentes

Para el cálculo de carga térmica latente se emplea la siguiente expresión:

$$Q_{latente} = Q_{ipl} + Q_{vl} \quad (12)$$

Donde:

- *Q_{ipl}*: Carga latente por ocupante
- *Q_{vl}*: Carga latente de ventilación

3.3.2.1. Carga latente por ocupante

La carga latente por ocupación del recinto, se determina multiplicando el valor de calor latente emitido por la persona por el número de ocupantes previstos en el local. La expresión para obtener el calor latente por la ocupación del recinto sería la siguiente:

$$Q_{ilp} = n * C_{latente, persona} \quad (13)$$

Donde:

- *n*: Número de personas que ocupan el recinto
- *C_{latente, persona}*: Calor latente por persona según actividad que realice.

3.3.2.2. Carga latente de ventilación

La carga latente transmitida por infiltraciones y ventilaciones de aire exterior, se determina mediante la siguiente expresión:

$$Q_{vl} = V_r * 0.84 * \Delta W \quad (14)$$

Donde:

- *V_r*: Caudal de aire infiltrado y ventilación [m³ /s]
- *ΔW*: Diferencial de humedad entre el ambiente exterior e interior [*W_{ex}* - *W_{in}*]

*Caudal de aire infiltrado y ventilación

Es la cantidad de aire filtrado se determinará en forma global, sobre la base de un cierto número de renovaciones necesarias de acuerdo al tipo de local.

Para el cálculo, se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_r = v * R.A.H. \quad (15)$$

Donde:

- *V*: Volumen del recinto [m³]
- *R.A.H.*: Número de renovación por hora, según tipo de recinto [1/h]

4. METODOLOGÍA

En este ítem se presenta la metodología a seguir para el análisis del proyecto. Se presentan las fórmulas, variables y orden de selección de elementos que constituyen al techo verde y posteriormente simular su desempeño energético y térmico.

4.1. Selección de estructura

En base a las características mencionadas, es posible diseñar una estructura de techo verde que garantice una vida útil prolongada, así como un ahorro energético y una reducción de la carga solar indirecta en el edificio. Para lograr esto, es crucial seleccionar adecuadamente las plantas y sustratos que ofrezcan propiedades aislantes térmicas y proporcionen los beneficios necesarios para su correcta implementación.

Para este caso se considerará un techo verde de tipo extensivo, con un peso de 80 kg/m² cuando este se encuentre saturado en base a las características de la **Tabla N° 1**.

El edificio central cuenta con 2 áreas disponibles en su azotea para el posible desarrollo de un techo verde, las cuales tienen las siguientes medidas:

- Ancho: 11.7 m
- Largo: 18 m
- Área total de superficie piso 6: 781,2 m²
- Área considerada para techo verde: 421,2 m²



Ilustración 12: Vista en planta del área donde se propone la construcción de un techo verde.

Considerando un techo verde extensivo con un peso de 80 kg/m², se obtiene que:

$$p = 11,7 \text{ m} * 18 \text{ m} * 80 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 2 = 36.696 \text{ kg} \sim 37 \text{ Ton.}$$

4.2. Selección de planta

De acuerdo a un catastro realizado por Vera, S., Viecco, M., Rojas, A. y Bustamante, W. (2023), se estima que las especies de vegetación más utilizadas son *Sedum* y césped, donde se utilizan en el 56,3% y 31,3% de los proyectos, respectivamente.

Los *Sedum* son especies que requieren poca agua, lo que les permite sobrevivir durante períodos de sequía. Además, necesitan un mantenimiento mínimo.

Por otra parte, el césped tiene una alta demanda de agua y se deteriora rápidamente si no se riega adecuadamente. También requiere un mantenimiento frecuente.

Tabla 12: 20 especies más usadas en techos vegetativos en Chile. (Vera, S., Viecco, M., Rojas, A. y Bustamante, W. (2023))

Nº	NOMBRE	NOMBRE COMÚN	Nivel Exp. Sol	Req. Hídrico	Res. Heladas
1	<i>Pennisetum villosum</i>	Cola de pluma	Sol	Bajo	Sí
2	<i>Lampranthus spectabilis</i>	Rayito de sol	Sol	Bajo	Sí
3	<i>Sedum acre variedad sp</i>	Sedum de otoño	Sol	Bajo	Sí
4	<i>Agapanthus praecox</i>	Agapanto	Semi-sol	Medio	Sí
5	<i>Pittosporum tobira, var. nana</i>	Pitosporo	Sol	Medio	Sí
6	<i>Festuca glauca</i>	Festuca Ovina	Sol	Bajo	Sí
7	<i>Sedum acre</i>	Uña de Gato	Sol	Bajo	Sí
8	<i>Sedum spurium</i>	Sedum rojo	Sol	Medio bajo	Sí
9	<i>Pennisetum setaceum</i>	Cola de zorro	Sol	Bajo	Sí
10	<i>Lavandula angustifolia</i>	Lavanda	Sol y semi-sombra	Bajo	Sí
11	<i>Aptenia cordifolia</i>	Aptenia	Sol	Medio bajo	Sí
12	<i>Liquidambar styraciflua</i>	Liquidambar	Sol	Alto	Sí
13	<i>Hypericum calycinum</i>	Hiperico	Sol y semi-sombra	Medio bajo	No
14	<i>Sedum album</i>	Sedum	Sol	Bajo	Sí
15	<i>Sedum palmeri</i>	Sedum	Sol	Bajo	Sí
16	<i>Sedum spurium purpureum</i>	Sedum	Sol	Bajo	Sí
17	<i>Carex buchananii</i>	Carex	Sol	Bajo	Sí
18	<i>Verbena hybrida</i>	Verbena	Sol y semi-sombra	Medio	Sí
19	<i>Rosmarinus officinalis</i>	Romero rastrero	Sol	Medio bajo	Sí
20	<i>Festuca arundinacea</i>	Festuca alta	Sol	Bajo	Sí

Para la selección correcta de estas es importante considerar diferentes aspectos, como menciona Jiménez, P. F. (2022), las condiciones climáticas, condiciones de exposición, necesidades de riego, mantenimiento, velocidad de crecimiento, entre otro.

La planta *sedum* no es nativa, pero ha mostrado un comportamiento compatible con la utilidad de los techos verdes, gracias a su capacidad de resistir sequías y diferentes condiciones de clima (Canales Gálvez, M. (2014)), por lo que se considera la más apropiada para este estudio.

4.3. Selección de sustrato

Actualmente se evidencia escasa información respecto a los sustratos utilizados en diferentes proyectos a lo largo del país, el cual es fundamental para el adecuado desarrollo de la vegetación y la retención de humedad.

Por lo anterior, se utilizarán datos obtenidos mediante ensayos de laboratorio realizados por Canales Gálvez, M. (2014), donde se cuantifica la conductividad térmica de tres sustratos característicos de

“Estudio de prefactibilidad para la implementación de un techo verde en Edificio Central de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.”

techos verdes los cuales se adaptan los requerimientos y condiciones estructurales del edificio a analizar.

Los sustratos cuentan con distintos contenidos de materia orgánica, arena y minerales. La turba se emplea como fuente de materia orgánica debido a su naturaleza 100% vegetal. Como agregados, se utilizan arena, vermiculita y perlita, minerales que han demostrado ser efectivos en proyectos de infraestructura vegetal anteriores.

La perlita cuenta con un buen drenaje de agua y un pH neutral, por lo tanto, permite que las raíces de las plantas resoplen.

La vermiculita es un mineral capaz de retener la humedad y los nutrientes de las plantas. Suele usarse en conjunto con la perlita.

Tabla 13: Porcentajes por volumen de los sustratos a ensayar, Canales Gálvez, M. (2014).

Probeta	Turba	Vermiculita	Perlita	Arena	Total
Sustrato 1	0,1	0,33	0,23	0,33	1
Sustrato 2	0,2	0,33	0,13	0,33	1

Se consideran espesores de sustratos de 5, 10 y 15, los cuales se adaptan a la hipótesis de la elaboración de un techo verde extensivo debido a las cargas que logra soportar el edificio en cuestión.

Tabla 14: Carga en [kg/m²] aportada por los tres tipos de sustrato y su espesor, Canales Gálvez, M. (2014).

	E (cm)	Sustrato 1	Sustrato 2
Carga [kg/m²]	5,0	45,5	38,5
	10,0	90,1	77,1
	15,0	136,4	115,6

Tabla 15: Conductividad térmica seca de los sustratos ensayados, Canales Gálvez, M. (2014).

	Sustrato 1	Sustrato 2
λ [W/(m*K)]	0,2336	0,1741

Tabla 16: Resistencia térmica seca de los sustratos 1 y 2. Elaboración propia.

	E (cm)	Sustrato 1	Sustrato 2
R [m²*K/W]	5,00	0,21	0,29
	10,00	0,43	0,57
	15,00	0,64	0,86

Es importante conocer los valores de conductividad térmica en distintos contenidos de humedad, por lo que se interpola a un valor a 100% de contenido de humedad, por lo tanto, se considera la conductividad térmica del agua indicado en la norma NCh853, con valores para 0°C y 94°C. Según la norma chilena NCh 1079-1977, tabla 3, Concepción tiene una temperatura media de 16,5°C, por lo que es posible interpolar para obtener valores representativos de la conductividad térmica del agua a esta temperatura.

Tabla 17: Conductividad térmica del agua. Elaboración propia.

Temperatura [C°]	λ [W/(m*K)]
0	0,590
16,5	X
94	0,690

Interpolando se obtiene el valor de conductividad de 0,608 W/(m*K) para una temperatura de 16,5 °C. Con el valor anteriormente mencionado, es posible calcular la resistencia térmica para distintos contenidos de humedad.

Tabla 18: Resistencia térmica de los sustratos para distintos contenidos de humedad. Elaboración propia.

	% de humedad	Espesor [cm]	Sustrato 1	Sustrato 2
R [m2*K/W]	0	5	0,21	0,29
		10	0,43	0,57
		15	0,64	0,86
	25	5	0,14	0,16
		10	0,29	0,33
		15	0,43	0,49
	50	5	0,11	0,11
		10	0,21	0,23
		15	0,32	0,34
	75	5	0,09	0,09
		10	0,17	0,18
		15	0,26	0,26
100	5	0,07	0,07	
	10	0,14	0,14	
	15	0,21	0,21	

Tal como exige el Art. 4.1.10 de la O.G.U.C, todas las viviendas deben cumplir con las exigencias de acondicionamiento térmico mencionados en el Capítulo C de la OGUC Ilustrada, Vol. II de la Arquitectura.

Tabla 19: Valores exigidos para transmitancia y resistencia según O.G.U.C. Fuente: Reglamento aislación térmica

Zona térmica	Complejo de techumbre		Complejo de muros perimetrales		Complejo de piso ventilado		Complejo de puertas opacas	
	U(*)	Rt(*)	U(*)	Rt(*)	U(*)	Rt(*)	U(*)	Rt(*)
	W/m2K	m2k/W	W/m2K	m2k/W	W/m2K	m2k/W	W/m2K	m2k/W
A	0,84	1,19	2,1	0,48	3,6	0,28	-	-
B	0,47	2,13	0,8	1,25	0,7	1,43	1,7	0,59
C	0,47	2,13	0,8	1,25	0,87	1,15	1,7	0,59
D	0,38	2,63	0,8	1,25	0,6	1,67	1,7	0,59

“Estudio de prefactibilidad para la implementación de un techo verde en Edificio Central de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.”

E	0,33	3,03	0,6	1,67	0,6	1,67	1,7	0,59
F	0,28	3,57	0,45	2,22	0,5	2	1,7	0,59
G	0,28	3,57	0,4	2,5	0,39	2,56	1,7	0,59
H	0,25	4	0,3	3,33	0,32	3,13	1,7	0,59
I	0,25	4	0,35	2,86	0,32	3,13	1,7	0,59



Ilustración 13: Zonificación climática de Chile. Fuente: NCh 1079:2008

Considerando que la ciudad de Concepción se encuentra ubicado en la zona F (Ver **Ilustración 13**), la resistencia térmica total mínima recomendada para techos es de 3,57 [m²*K/W] de acuerdo a la **Tabla 17**. Por lo tanto, con este valor es posible ver el porcentaje que aporta el techo verde a la estructura en cuanto a resistencia térmica, considerando sólo la capa del sustrato (sin capa de vegetación ni drenaje).

Tabla 20: Aporte porcentual de los sustratos a la resistencia térmica recomendada por norma para distintos contenidos de humedad. Elaboración propia.

% de humedad	Espesor [cm]	Sustrato 1	Sustrato 2
0	5	0,1	0,13
	10	0,2	0,27
	15	0,3	0,4
25	5	0,07	0,08
	10	0,13	0,15
	15	0,2	0,23
50	5	0,05	0,05
	10	0,1	0,11
	15	0,15	0,16
75	5	0,04	0,04
	10	0,08	0,08
	15	0,12	0,12
100	5	0,03	0,03
	10	0,07	0,07
	15	0,1	0,1

Según la Red Agroclimática Nacional, la región del BíoBío cuenta con una humedad relativa que fluctúa entre el 60% y 100%, por lo tanto, para estos casos se considera más eficiente la implementación del Sustrato 2 ya que tiene un mejor aporte en la resistencia térmica de la estructura.

5. RESULTADOS

5.1. Balance térmico edificación sin techo verde

Para calcular las cargas térmicas del edificio primero es necesario establecer las condiciones iniciales de diseño, los cuales para efectos de cálculo se considerarán bajo un régimen estacionario. Estas se muestran en el **Apartado 3.2.**

5.1.1. Cargas sensibles

5.1.1.1. Cargas solares de la estructura

Carga solar directa

La carga solar directa se calcula según lo expresado en la **Ecuación (3)**

- ❖ La transmitancia a considerar corresponde a loza, muro de hormigón, pilares y Termopanel. Los valores de esto se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 21: Resistencia térmica de los elementos de la envolvente. Elaboración propia

Elemento	Dimensiones [Largo*Alto][m]	Material	espesor [m]	Conductividad térmica	R=e/k	Transmitancia	% aportación	U ponderado
Muro Cortina	3,50*largo	Rse	-	-	0,120	1,57	1	1,57
		Termopanel Low e	0,006	1,8	0,003			
		Cámara de aire	0,012	0,031	0,387			
		Vidrio común	0,006	1,2	0,005			
		Rsi	-	-	0,120			
Pilares	3,50x1,60	Rse	-	-	0,050	0,87	1	0,87
		Hormigón	1,6	1,63	0,982			
		Rsi	-	-	0,120			
Muro hormigón	3,5x10,6	Rse	-	-	0,050	3,82	1	3,82
		Hormigón	0,15	1,63	0,092			
		Rsi	-	-	0,120			
Loza		Rsi		-	0,090	3,01	1	3,01
		Hormigón	0,2	1,63	0,123			
		Rse		-	0,120			

- ❖ La radiación solar, es la señalada en la **Tabla 4**.
- ❖ El coeficiente de transparencia considerado es de $\theta=0.84$.
- ❖ Resistencia de la película exterior de aire (Rso), corresponde a $0.05 \text{ [m}^2\cdot\text{K/W]}$, esto tanto para muros y techumbre.

Finalmente, de acuerdo a los valores entregados anteriormente, la carga solar queda resumida en la siguiente tabla:

Tabla 22: Carga solar directa. Elaboración propia

	Ene-Mar	Abr-Jun	Jul-Sept	Oct-Dic
Promedio carga solar directa [kW]	21,943	9,911	10,108	20,214

Carga solar indirecta

Para el cálculo de cargas solares indirectas, se hace uso de la **Ecuación (4)** mencionada anteriormente.

Tabla 23: Carga solar indirecta. Elaboración propia.

	Ene-Mar	Abr-Jun	Jul-Sept	Oct-Dic
Promedio carga solar indirecta [kW]	13,454	4,561	5,094	12,630

La transmitancia térmica a considerar, corresponde a la techumbre, muros y pilares de hormigón. Los valores de estos, se resumen en la **Tabla 21**.

- ❖ Las radiaciones solares, son las señales en la **Tabla 4**.

- ❖ Absortancia considerada para todos los elementos opacos es de 0.1, de acuerdo a la pintura de estos.
- ❖ La resistencia de la película exterior de aire (R_{so}) corresponde a $0,055 [m^2K/W]$, tanto para loza, muros y pilares.

5.1.1.2 Envoltente de la estructura

Según la materialidad con la que está construida el edificio, presenta diferentes valores de conductividad. Se identifican los materiales a través de los planos y se establece su conductividad a través de la Tabla Anexo 1 de la norma chilena NCh853. En caso de que no se encuentre un material, se utiliza el que más se asemeje a sus características.

Con los datos de la **Tabla 21** y la **Ecuación (5)** es posible calcular la carga de la envoltente de la estructura, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 24: Carga envoltente térmica. Elaboración propia

	Ene-Mar	Abr-Jun	Jul-Sept	Oct-Dic
Promedio envoltente térmica [kW]	-10,230	-14,937	-24,653	-16,031

5.1.1.3. Cargas internas

Cargas internas por iluminación:

Para el cálculo de cargas internas de iluminación se realiza un catastro de la cantidad de ampollitas o tubos presentes en el edificio, la cantidad de estos se mencionan en la siguiente tabla:

Tabla 25: Carga interna por iluminación. Elaboración propia.

Nivel	Zona	Área [m]	Cantidad	Watts	Qiii [W]
6	Enfermería	30,31	6	100	180
6	Oficina director	51	6	100	180
6	Psicólogo	76,44	18	100	540
6	Médico	23,61	6	100	180
6	Dentista	23,22	6	100	180
6	Atención médica	56,16	12	100	360
6	Bienestar estudiantil	90,73	12	100	360
6	Bodega secretaría	4,98	2	100	60
6	Asistente social	100,03	24	100	720
6	Oficina	20,05	6	100	180
6	Taller	31,61	8	100	240
6	Oficina COF	9,68	4	100	120
6	Directorio COF	18,3	4	100	120
6	Hall	174,18	20	100	600
6	Baño varones	11,6	6	100	180
6	Baño damas	11,81	6	100	180
6	Bodegas auxiliares	5,08	2	100	60
6	Baños auxiliares	2,6	2	100	60
6	Baño secretarias	2,84	2	100	60

6	Kitchenette	5,54	2	100	60
6	Zona seguridad	25,74	6	100	180
6	Ascensores	10,25	2	100	60
				TOTAL [kW]	4,9

Cargas internas por ocupante:

Para el cálculo de carga sensible por ocupante, se realiza un catastro de la capacidad de personas dentro del recinto. Además, señalar que este aporte es durante el tiempo de funcionamiento del recinto (12 horas diarias).

Tabla 26: Carga sensible por ocupante. Elaboración propia.

Cargas Internas por ocupante					
	Actividad	Cantidad	Sensible [W]	Qips [W]	
Trabajadores	Empleado de oficina	21	82	1722	
	Auxiliares	5	79	395	
Alumnos	De pie marcha lenta	25	82	2050	
				TOTAL [kW]	4,167

Cargas internas por artefacto:

De acuerdo a lo expresado en la **Ecuación (9)**, se obtiene los siguientes valores de carga interna por artefacto:

Tabla 27: Carga interna por artefacto. Elaboración propia.

Carga de aparatos	N°	Potencia (W)	10% Pot. Residual (W)	P. Total (W)	
Ascensor	2	4000	400	800	
Televisor	4	150	15	60	
Impresoras	21	15	1,5	31,5	
Computador	22	15	1,5	33	
Hervidor	1	2200	220	220	
Microondas	1	5000	500	500	
				TOTAL [kW]	1,6445

5.1.1.4. Carga de ventilación

El cálculo de la carga sensible por ventilación se realiza según lo descrito en la **Ecuación (10)**, según las consideraciones descritas en la metodología, las áreas de infiltración a considerar se resumen en la siguiente tabla, correspondientes a cada orientación.

Tabla 28: Áreas de ventilación en m². Elaboración propia.

Área puertas, ventanas y exclusas por orientación						
Tipo	Dimensiones		Cantidad por orientación			
Ventanas	Ancho [m]	Alto [m]	Este	Norte	Oeste	Sur
Termopanel	1	1	6	12	8	12

*** Caudal de aire de ventilación**

De acuerdo, a los valores de velocidad de viento y áreas de infiltración proporcionados en la Tabla 28, se obtiene el caudal de aire de ventilación de acuerdo a la **Ecuación (11)**. El caudal de aire de infiltración queda expuesto en la siguiente tabla:

Tabla 29: Caudal de aire de ventilación. Elaboración propia.

Nivel	Zona	Área [m ²]	Altura [m]	Volumen [m ³]	RAH	RAS	Caudal [m ³ /s]
6	baño	33,93	3,5	118,755	60	0,0167	1,98
	hall	174,18	3,5	609,63	5	0,0014	0,85
						Total	2,83

Finalmente, la carga de ventilación sensible del edificio y queda resumida en la siguiente tabla:

Tabla 30: Carga ventilación sensible

	Ene-Mar	Abr-Jun	Jul-Sept	Oct-Dic
Promedio carga ventilación sensible [kW]	-5,0	-10,9	-16,3	-14,4

5.1.2. Cargas latentes

Para el cálculo de cargas latentes, se utiliza la **Ecuación (12)**.

5.1.2.1. Carga latente por ocupante

En este caso, al igual que en la carga sensible por ocupante, se considera que el aporte se realiza durante el tiempo de funcionamiento del recinto. La carga latente por ocupante se resume en la siguiente tabla:

Tabla 31: Carga latente por ocupante. Elaboración propia.

Cargas Internas por ocupante				
	Actividad	Cantidad	Latente [W]	Qipl [W]
Trabajadores	Empleado de oficina	21	49	1029
	Auxiliares	5	37	185
Alumnos	De pie Marcha lenta	25	49	1225
			Total [kW]	2,439

5.1.2.2. Carga latente de ventilación

Para el cálculo de carga latente de ventilación, se debe obtener en primer lugar el Caudal de aire infiltrado y ventilación (V_r), según lo descrito en la **Ecuación (14)**. La carga de ventilación latente es de:

Tabla 32: Carga ventilación latente. Elaboración propia.

	Ene-Mar	Abr-Jun	Jul-Sept	Oct-Dic
Carga ventilación latente [kW]	0,0003	0,0005	0,0006	0,0004

5.1.3. Balance térmico total

El balance térmico total de edificio, está asociado a las ganancias y pérdidas de calor que se producen en el recinto, por lo tanto, de acuerdo a los valores calculados para carga sensible y latente, el balance térmico total se resume en la siguiente tabla:

Tabla 33: Balance térmico total. Elaboración propia.

	Ene-Mar	Abr-Jun	Jul-Sept	Oct-Dic
Balance térmico total [kW]	33,051	-0,680	-15,005	14,981

5.2. Costo económico

Se deben considerar gastos en el consumo de agua por riego y mantención de la capa vegetal y del sustrato, si fuera necesario. Como se propone un techo verde extensivo, los gastos de mantención y riego deberían ser mínimos.

Existe poca información respecto de los costos de mano de obra y materiales para elaborar un techo verde sin la intervención de empresas dedicadas al rubro, pero es posible estimar el costo por capa del techo verde.

TECPRO proporciona la siguiente cotización con valores actualizados según el Instituto Nacional de Estadísticas a julio del 2024 para la elaboración de un techo verde extensivo:

Tabla 34: Costo aproximado de las capas de un techo verde. Elaboración propia

Capa	Rango de valores por capa (\$/m²)
Impermeabilización	\$ 12.300 - \$18.500
Protección anti raíces	\$6.200 - \$9.200
Membrana de filtración	\$12.300 - \$12.300
Drenaje	\$15.500 - \$ 23.000
Sustrato	\$76.700 - \$107.400
Vegetación	\$7.700 - \$23.000
TOTAL	\$130.700 - \$193.400

6. DISCUSIÓN

Sustrato

Según la Red Agroclimática Nacional, la región del BíoBío cuenta con una humedad relativa que fluctúa entre el 60% y 100%, por lo tanto, para estos casos se considera más eficiente la implementación del Sustrato 2 ya que tiene un mejor aporte en la resistencia térmica de la estructura.

Según dos datos obtenidos en la Tabla 16 promediando entre el 75% y 100% de humedad que son los valores en los que fluctúa en la región del BíoBío, el aporte del sustrato en la resistencia térmica es de un 14% aproximadamente.

Techo verde

Los efectos que ejerce el techo verde sobre la estructura no son notables a corto plazo. Afecta directamente en el aumento de la resistencia térmica y la disminución de la carga solar indirecta.

A continuación, se presentan las cargas obtenidas para los casos de calefacción y refrigeración en las diferentes estaciones del año.

Tabla 35: Cargas de calefacción medidos en W/m². Elaboración propia

Calefacción [W/m ²]				
Periodo	Sin techo verde	Horas	Con techo verde	Horas
Ene-Mar	-9,43	14	-10,93	15
Abr-Jun	-15,09	16	-17,95	18
Jul-Sept	-25,83	18	-32,34	21
Oct-Dic	-17,28	16	-20,29	17

Se observa que, en todos los periodos, la demanda de calefacción de la estructura con techo verde es mayor (es decir, se requiere más calefacción) en comparación a sin techo verde. Esto sugiere que el techo verde no está contribuyendo a una reducción energética en la necesidad de calefacción durante estos periodos debido al aumento de la resistencia térmica.

- **Ene-Mar (verano):** La diferencia es de -1,50 W/m², lo que indica que, en verano, la demanda de calefacción requerida con un techo verde es ligeramente mayor.

- **Abr-Jun (otoño):** La diferencia es de -2,86 W/m², sugiriendo que el techo verde también incrementa la demanda de calefacción en otoño.

- **Jul-Sept (invierno):** La diferencia es de -6,51 W/m², lo que indica un aumento aún mayor en la demanda de calefacción durante el invierno con un techo verde.

- **Oct-Dic (primavera):** La diferencia es de -3,04 W/m², que es consistente con las diferencias observadas en otros periodos, mostrando una mayor necesidad de calefacción con un techo verde en primavera.

Al implementar un techo verde los resultados arrojan además de un aumento en la demanda de calefacción, también un aumento en la cantidad de horas que se requieren calefaccionar.

Tabla 36: Carga de refrigeración medida en W/m². Elaboración propia.

Refrigeración [W/m ²]				
Periodo	Sin techo verde	Horas	Con techo verde	Horas
Ene-Mar	46,037	10	30,709	9
Abr-Jun	13,319	7	6,827	6
Jul-Sept	5,551	6	0,817	3
Oct-Dic	30,079	8	16,856	7

- **Ene-Mar (verano):** La refrigeración requerida con un techo verde se ve disminuida en comparación a la estructura sin techo verde. La diferencia es una disminución de 15,33 W/m².

- **Abr-Jun (otoño):** La refrigeración requerida con techo verde se ve disminuida en comparación a la estructura sin techo verde, con una diferencia de 6,50 W/m².

- **Jul-Sept (invierno):** La refrigeración requerida con techo verde se ve disminuida en comparación a la estructura sin techo verde, con una diferencia de 4,73 W/m².

- **Oct-Dic (primavera):** La refrigeración requerida con techo verde se ve disminuida en comparación a la estructura sin techo verde, con una diferencia de 13,22 W/m².

En resumen, la implementación de un techo verde en cuando a la refrigeración es beneficiosa, disminuyendo cerca del 50% la demanda de refrigeración, y además disminuyendo la cantidad de horas que se requiere refrigerar, donde las temporadas más notorias son las de primavera-verano.

7. CONCLUSIONES

Aunque la demanda de calefacción necesaria es más alta con un techo verde en todos los periodos, la diferencia no es extremadamente grande, lo que podría reflejar la efectividad del techo verde en aislamiento térmico o su diseño.

En cuanto a la refrigeración, el techo verde tiende a disminuir la necesidad de refrigeración en todos los periodos, especialmente en primavera y verano. Esto es debido a que el aumento en la resistencia térmica trae beneficios en paralelo con la disminución de la carga solar indirecta, proporcionando una disminución en el flujo de calor.

Sin embargo, la elaboración de un techo verde para esta estructura no demuestra factibilidad a corto plazo, debido a que en la zona los periodos de frío son más prolongados que los de calor, por lo tanto, se difiere una mayor demanda de calefacción, lo cual con un techo verde implicaría un mayor gasto energético de acuerdo a los resultados.

Es posible lograr un ahorro energético implementando un nuevo modelo de techo verde, como el caso de un techo intensivo, pero el cual requeriría un mayor gasto de implementación y mantenimiento.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barrios, L. E. (2018). Techos Verdes: de la teoría a la práctica. Revista Científica OMNES, (3), 136–184. Recuperado a partir de <https://www.columbia.edu/py/investigacion/ojs/index.php/OMNESUCPY/article/view/27>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Reporte Regional 2023, región del BíoBío.
- Canales Gálvez, M. (2014). Efectos del uso de techos y fachadas vegetales en el comportamiento térmico de edificios.
- Chagolla-Arandaa, M. A., Hernández-López B, I., Simá A, E., & Téllez-Velázquez A, E. Evaluación térmica de un techo verde en un clima cálido subhúmedo para ahorro de energía en edificaciones en México.
- Jiménez Ruiz, P. F. (2022). Análisis técnico y ambiental de la utilización de envoltente vegetal en edificios.
- López Machado, N. A., Domínguez González, C. G., Barreto, W., Méndez, N., López Machado, L. J., Soria Pugo, M. G., ... & Montesinos, V. (2020). Almacenamiento de agua de lluvia en medios urbanos utilizando techos verdes. LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida, 32(2), 54-71.
- Ministerio de Energía. Recurso Solar y datos meteorológicos (2024). Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Minke, G. (2004). Techos verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos. Montevideo, Uruguay: Fin de siglo.
- Nieto, J., & Santamarta, J. (2005). Evolución de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en España (1990-2004). CCOO, Madrid.
- Vera, S., Viecco, M., Rojas, A. y Bustamante, W. (2023) Techos y Muros Vegetativos en Chile: Propuesta de política pública basada en I+D para la implementación de techos y muros vegetativos en Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile. DOI 10.7764/24082023SV. URL [hup://www.liveuc.cl/libro](http://www.liveuc.cl/libro).
- Zielinski, S., Collante, M. A. G., & Paternina, J. C. V. (2012). Techos verdes: ¿Una herramienta viable para la gestión ambiental en el sector hotelero del Rodadero, Santa Marta? Gestión y Ambiente, 15(1), 91-104.