

Diseño y modelado de un techo verde para la reducción de la temperatura del laboratorio de  
combustión de la escuela de Ingeniería Mecánica

Jhon Stivent Grimaldos Valencia y José Efrén García Barón

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Ingeniero Mecánico y phd

Codirector

Pablo Antonio Nieto Rangel

Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander

Faculta de Ingenierías Físico-Mecánicas

escuela de ingeniería mecánica

Bucaramanga

2025

### **Agradecimientos**

Primero quiero agradecer a Dios por tantas bendiciones y por permitirme alcanzar este logro caminando a su lado. En segundo lugar, agradezco a mi mayor motor de impulso: mis padres. A mi papá, Pedro Antonio Grimaldos A., por su gran esfuerzo, admiración e inspiración, y por su apoyo incondicional; siempre ha estado a mi lado brindándome las herramientas necesarias para convertirme en la persona que soy hoy: una mejor persona.

A mi mamá, María Alexandra Valencia B., por su inmenso apoyo emocional, su calidad humana y sus sabios consejos, especialmente en los momentos difíciles que viví durante la carrera. Gracias por darme ánimos para continuar y por ayudarme a lograr esta meta, que no es solo mía, sino también de ellos. Asimismo, agradezco a mi familia en general, a mi hermana y a mis primos, mi compañera de lucha universitaria.

También quiero expresar mi profundo agradecimiento a la universidad y a sus profesores por su invaluable formación profesional. Cuando inicié esta etapa, nunca imaginé convertirme en la persona y profesional que soy ahora, y esto es gracias a la UIS. Además, agradezco a mis amigos, con quienes compartí este camino y que hicieron que la universidad fuera una de las mejores experiencias de mi vida. Me invade la tristeza al cerrar esta etapa, pero también la emoción por el futuro que me espera.

Por último, agradezco a mi director y codirector por su apoyo como excelentes profesionales, y por compartirme sus conocimientos y experiencia, claves para la realización de este proyecto. También agradezco a mi compañero de grado por su compromiso, confianza y amistad incondicional

***Jhon Stivent Grimaldos Valencia.***

Primeramente, agradezco a Dios por darme la vida, la salud y la fortaleza necesarias para alcanzar este importante objetivo en mi vida.

Extiendo un agradecimiento muy especial a mis padres, José Efrén García y Everlides Barón, por su apoyo incondicional, su amor constante y por acompañarme en cada etapa de mi formación. Su ejemplo de esfuerzo, responsabilidad y entrega ha sido una fuente permanente de inspiración. Este logro no habría sido posible sin los valores que me inculcaron ni sin el respaldo que siempre me brindaron. A ellos, y a cada persona que en algún momento creyó en mí, les agradezco profundamente; hoy puedo decirles que no se equivocaron, y que su confianza fue clave para seguir adelante. A mis hermanos y demás familiares, gracias por su cariño, comprensión y palabras de aliento en los momentos difíciles. Su compañía ha sido esencial en cada paso de esta etapa.

A la Universidad Industrial de Santander (UIS), mi alma mater, gracias por brindarme una formación de calidad y las herramientas necesarias para crecer como profesional y como persona.

Mi gratitud también al equipo de mantenimiento de la empresa donde realicé mis prácticas, por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias. En especial, a la ingeniera Alejandra Dulcey, jefa del área de mantenimiento, por su orientación, disposición y por facilitar los espacios que hicieron posible cumplir con mis responsabilidades académicas y el desarrollo de este proyecto. Gracias, ingeniera, por su apoyo humano y profesional.

Agradezco sinceramente al profesor Yesid Javier Rueda, director de este proyecto, y al profesor Pablo Antonio Nieto, codirector, por su guía, compromiso y valiosos aportes durante cada etapa del trabajo. Su acompañamiento fue clave para alcanzar los objetivos propuestos y enriquecer la calidad del proyecto.

Finalmente, agradezco a mi compañero de trabajo de grado por su compromiso, confianza y dedicación. Su apoyo fue fundamental para avanzar con éxito en esta investigación conjunta.

***José Efrén García Barón.***

### Tabla de Contenido

Introducción .....	13
1. Objetivo General .....	16
2. Objetivos Específicos.....	16
3. Marco teórico .....	16
3.1. Techos Verdes.....	17
3.2. Componentes Básicos .....	18
3.3. Tipos de techos verdes.....	20
3.3.1. Intensivos .....	20
3.3.2. Semi intensivos .....	21
3.3.3. Extensivos.....	21
3.4. Vegetación.....	22
3.4.1. Tipo de plantas.....	22
3.5. Sustrato .....	25
3.5.1. Sustrato Orgánico.....	25
3.5.2. Sustrato inorgánico .....	25
3.6. Beneficios.....	26
3.6.1. Beneficios de los techos verdes para el ambiente .....	26
3.6.2. Disminución de la isla de calor.....	26
3.6.3. Disminución del consumo eléctrico .....	28
3.6.4. Disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero.....	28
3.7. Principios físicos de los techos verdes .....	29
3.8. Transferencia de calor .....	33
3.8.1. Conducción unidimensional en estado estable .....	33
3.8.2. Conducción de calor en régimen transitorio en paredes planas .....	35
3.8.3. Convección .....	37
3.8.4. Radiación.....	38
3.9. Evapotranspiración.....	40
3.10. Carga térmica .....	42
3.10.1. Cargas térmicas sensibles.....	42
3.10.2. Cargas térmicas latentes .....	42
4. Método numérico para el cálculo.....	43
4.1. Modelamientos térmicos de los recintos.....	44
Metodología .....	45

4.2.	Fase 1. Planteamiento del modelo matemático y caracterización del fenómeno físico.....	45
1.	Toma y recopilación de datos del laboratorio de combustión.....	45
4.3.	Fase 2. Desarrollo del modelo matemático: .....	51
4.3.1.	Modelamiento térmico .....	51
4.3.2.	Balance de energía sobre la superficie exterior del techo de concreto.....	51
4.3.3.	Balance de energía sobre la superficie interior de la placa del techo .....	58
4.3.4.	Balance de energía sobre la superficie exterior con techo verde .....	60
4.3.5.	Balance de energía en la superficie interior del recinto con techo verde .....	70
4.4.	Fase 2: Validación del modelo matemático a través de pruebas experimentales en los dos modelos a escala reducida.....	73
4.4.1.	Pruebas experimentales.....	75
4.4.2.	Modelo de techo de concreto.....	77
4.4.3.	Modelo con techo verde .....	79
4.4.4.	Predicción de la temperatura mediante modelo matemático .....	82
5.	Análisis y discusiones del modelo .....	89
5.1.	Desempeño del modelo en el techo de concreto .....	89
5.2.	Limitaciones del modelo aplicado al techo verde.....	90
5.3.	3. Consideraciones finales .....	91
6.	Recomendaciones .....	91
7.	Fase 3: Desarrollar el diseño ingenieril.....	92
7.1.	Localización .....	93
7.1.1.	Precipitación y lluvia .....	93
7.1.2.	Cantidad de sol.....	93
7.1.3.	Temperatura.....	94
7.1.4.	Humedad.....	94
7.1.5.	Radiación solar .....	95
7.1.6.	Clima .....	95
7.2.	Análisis de requisitos y restricciones .....	95
7.2.1.	Matriz QFD aplicada a el tipo de techo verde.....	96
7.2.2.	Matriz QFD aplicada a la selección de la especie vegetal .....	98
7.2.3.	Matriz QFD aplicada a el Drenaje.....	99
7.2.4.	Matriz QFD aplicada a el impermeabilizante .....	101
7.3.	Diseño .....	104

7.3.1.	Diseño de la estructura metálica base .....	104
7.3.2.	Diseño techo verde .....	107
7.4.	Costos.....	108
7.4.1.	Materiales .....	108
7.4.2.	Construcción .....	109
7.4.3.	Mantenimiento .....	110
8.	Conclusiones.....	111
9.	Cronograma.....	113
10.	Presupuesto .....	114
	Bibliografía.....	115
	Anexos .....	118

### Lista de tablas

Tabla 1.....	24
<i>Especies Vegetales</i> .....	24
Tabla 2.....	77
Datos experimentales del techo de concreto .....	77
Tabla 3.....	80
<i>Datos experimentales modelo con techo verde</i> .....	80
Tabla 4.....	83
Temperaturas y error porcentual del modelo matemático implementado en un techo de concreto .....	83
Tabla 5.....	84
<i>Temperaturas y error porcentual del modelo matemático implementado en un techo verde</i> .....	84
Tabla 6.....	85
<i>Temperaturas entre las capas del techo verde</i> .....	85
Tabla 7.....	96
<i>Tipos de techo verde</i> .....	96
Tabla 8.....	108
<i>Costo de los materiales del techo</i> .....	108
Tabla 9.....	109

<i>Costo de la construcción del techo</i> .....	109
Tabla 10.....	110
<i>Costo anual de mantenimiento preventivo</i> .....	110

### Lista de figuras

Figura 1 .....	18
<i>Componentes básicos de un techo verde</i> .....	18
Figura 2.....	21
<i>Capas del techo verde</i> .....	21
Figura 3.....	27
<i>Islas de calor</i> .....	27
Figura 4.....	30
<i>Techo con placa de concreto durante el día</i> .....	30
Figura 5.....	32
<i>Techo verde durante el día</i> .....	32
Figura 6.....	34
Conducción de calor a través de una pared plana .....	34
Figura 7.....	35
Conducción transitoria en una pared plana .....	36
Figura 8.....	37
Enfriamiento de un huevo por convección forzada y natural .....	37
Figura 9.....	39

<i>Absorción, Reflexión y Transmisión de la radiación incidente por un material semitransparente.</i>	40
Figura 10.....	41
Ciclo de energía .....	41
Figura 11.....	43
<i>Cargas térmicas presentes en un recinto.....</i>	43
Figura 12.....	47
<i>Techo de la escuela de ingeniería mecánica.....</i>	47
Figura 13.....	48
<i>Representación de puntos de medición .....</i>	48
Figura 14.....	50
<i>Perfil de temperatura del techo de concreto.....</i>	50
Figura 15.....	52
<i>Flujos de energía en la superficie exterior del techo de concreto .....</i>	52
Figura 16.....	56
<i>Humedad relativa durante el año.....</i>	56
Figura 17.....	58
<i>Flujos de energía en el interior del recinto tanto para techo verde como techo de concreto .....</i>	58
Figura 18.....	61
<i>Flujos de energía y componentes del modelo con techo verde .....</i>	61
Figura 19.....	62
<i>Diagrama de resistencias térmicas .....</i>	62
Figura 20.....	63
Diagrama simplificado de resistencias térmicas .....	63
Figura 21.....	71
<i>Diagrama de resistencias térmicas .....</i>	71
Figura 22.....	72
<i>Flujograma para la implementación computacional del modelo térmico del techo verde .....</i>	72
Figura 23.....	75
<i>Toma de datos experimentales .....</i>	75
Figura 24.....	76
<i>Techo verde.....</i>	76
Figura 25.....	78

<i>Radiación total durante el día</i> .....	78
Figura 26.....	78
<i>Temperatura en la superficie exterior de la placa</i> .....	79
Figura 27.....	79
<i>Temperatura en el interior del recinto con techo de concreto</i> .....	79
Figura 28.....	80
<i>Variación de la temperatura en la superficie interior de la placa</i> .....	80
<b>Figura 29</b> .....	81
<i>Variación de la temperatura en el interior del recinto</i> .....	81
<b>Figura 30</b> .....	82
<i>Temperaturas en la superficie inferior de la placa</i> .....	82
<b>Figura 31.</b> ....	84
<i>Temperaturas en la superficie inferior de la placa para el modelo con techo verde</i> .....	84
Figura 32.....	86
<i>Distribución de temperaturas entre capas</i> .....	86
Figura 33.....	87
<i>Transferencia de calor por Convección exterior en horas críticas</i> .....	87
Figura 34.....	88
<i>Transferencia de calor por radiación exterior en horas críticas</i> .....	88
Figura 35.....	96
<i>QFD aplicada al tipo de techo verde</i> .....	97
Figura 36.....	98
<i>QFD aplicada las plantas seleccionadas</i> .....	98
Figura 37.....	100
<i>QFD aplicada al sistema de drenaje</i> .....	100
Figura 38.....	102
<i>QFD aplicada al sistema de impermeabilización</i> .....	102
Figura 39.....	105
<i>Base de estructura metálica</i> .....	105
Figura 40.....	113
<i>Diagrama de Gantt del cronograma, elaboración propia</i> .....	113

**Lista de anexos**

Anexo A. Datos necesarios para el cálculo .....	118
<b>A.1</b> Absortividad solar y emisividad de algunos materiales .....	118
A.2 Conductividades y espesores de los materiales que componen el techo verde .....	118
A.3 Valores experimentales obtenidos en el recinto con techo de concreto durante el periodo de máxima radiación solar .....	119
<b>A.4</b> Valores experimentales obtenidos en el recinto con techo verde durante el periodo de máxima radiación solar .....	119
Anexo B. Implementación computacional y solución del modelo matemático en EES .....	119
B.1 Modelamiento para el recinto con techo de concreto .....	119
B.2 Implementación computacional para el recinto con techo verde .....	122
Anexo C. Correlación para superficie inferior caliente de una placa horizontal .....	127
Anexo D. Medidas geométricas del prototipo.....	127
Anexo E. Diseño conceptual del prototipo .....	128
Anexo F. Tablas de mediciones experimentales.....	128
Anexo G. Datos promedio del clima en Bucaramanga .....	132
Anexo H. Diseño del techo verde .....	135
Anexo I. Catálogos.....	135

## Resumen

**Título:** Diseño y modelado de un techo verde para la reducción de la temperatura del laboratorio de combustión de la escuela de Ingeniería Mecánica \*

**Autor:** Jhon Stivent Grimaldos Valencia y José Efrén García Barón \*\*

**Palabras Clave:** Transferencia de Calor, Modelamiento Matemático, Radiación, Isla de Calor, Techo verde, Evapotranspiración

Este trabajo de grado presenta el diseño y modelado de un sistema de techo verde como estrategia de enfriamiento pasivo para el laboratorio de combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. A través de un prototipo a escala y la aplicación del método de diferencias finitas, se evaluó el comportamiento térmico de la cubierta vegetal y su impacto en la reducción de la temperatura interior. El estudio permitió comparar las condiciones de un techo convencional frente a un techo verde, evidenciando mejoras en el confort térmico del recinto y un potencial de disminución en el consumo energético asociado a sistemas de refrigeración. Los resultados muestran que la implementación de techos verdes en edificaciones académicas representa una alternativa sostenible y eficiente, que puede servir de referencia para futuras aplicaciones en contextos similares.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. Doctor en ingeniería Química. Codirector: Pablo Antonio Nieto Rangel. Ingeniero Mecánico

### Abstract

**Title:** Design and modeling of a green roof for the reduction of the temperature of the combustion laboratory of the School of Mechanical Engineering \*

**Author:** Jhon Stivent Grimaldos Valencia y José Efrén García Barón \*\*

**Key Words:** Heat Transfer, Mathematical Modeling, Radiation, Heat Island, Green Roof, Evapotranspiration.

This thesis presents the design and modeling of a green roof system as a passive cooling strategy for the combustion laboratory of the School of Mechanical Engineering at Universidad Industrial de Santander. Using a scaled prototype and the finite difference method, the thermal behavior of the vegetative cover and its effect on reducing indoor temperature were evaluated. The study compared the performance of a conventional roof with that of a green roof, demonstrating improvements in indoor thermal comfort and the potential to reduce energy consumption associated with cooling systems. Results indicate that the implementation of green roofs in academic buildings represents a sustainable and efficient alternative, serving as a reference for future applications in similar contexts.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Advisor : Yesid Javier Rueda Ordoñez. Ph.D. in Chemical Engineering. Co-Advisor: Pablo Antonio Nieto Rangel. Mechanical Engineer

## Introducción

Este proyecto presenta el análisis de la ecuación gobernante de transferencia de calor a través de un techo verde, donde se estudia la transferencia de calor por conducción de una placa plana en estado transitorio y el efecto de reducción de temperatura que tiene el techo verde al interior del laboratorio. El prototipo es un recinto con techo verde diseñado a tamaño escala de manera fiel al laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander, el prototipo permite probar de forma dinámica las distintas configuraciones para realizar el estudio de la configuración más óptima para la disminución de la temperatura del laboratorio.

La ecuación resultante abre el camino para ser utilizada con otro tipo de configuraciones de edificios, simplemente ajustando los parámetros para obtener una aproximación muy cercana de la realidad del efecto de reducción de temperatura.

En la primera fase, se obtuvo los datos fundamentales de temperatura, tales como la temperatura superficial del techo sin cubierta vegetal, la temperatura al interior del laboratorio y la temperatura en el exterior, durante un periodo de un mes, así mismo la cantidad de radiación del sistema, esto permitió establecer los parámetros analizar, posteriormente con los datos obtenidos y con la ayuda de un software, se logra establecer una primera ecuación inicial del sistema sin techo verde.

Para el sistema de techo verde, nos valemos del prototipo realizado, ajustamos los parámetros para obtener las mismas condiciones energéticas que experimenta el laboratorio y posteriormente tras validar la información, se monta la cubierta vegetal y obtenemos una nueva

ecuación y gradientes de temperaturas distintos, logrando disminuir la temperatura al interior del edificio hasta en 4° C.

El objetivo principal del proyecto fue realizar una solución de enfriamiento pasivo y ecológico para la reducción de temperatura al interior del laboratorio de combustión y en los edificios donde se desee implementar y conocer el efecto que tendrá.

### **Justificación**

La búsqueda de estrategias para diseñar edificaciones cada vez más sostenibles con el medio ambiente y frente a los desafíos del cambio climático, ha tomado mayor relevancia a través de los años, esto y motivado también por los costos energéticos es que existe la necesidad de implementar sistemas pasivos de enfriamiento como lo son los techos verdes.

Dentro de las instalaciones de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander, el laboratorio de combustión es un espacio especializado en el que se desarrollan investigaciones, prácticas docentes y proyectos de grado. Este laboratorio, por naturaleza de sus procesos, genera condiciones térmicas variables, lo que afecta de forma directa las condiciones climáticas locales, así mismo el diseño del techo no contribuye a mantener un ambiente interior de condiciones óptimas de temperatura estable para el confort, por eso es imperativo utilizar alguna alternativa para refrigerar el laboratorio.

Una alternativa de solución que se ha posicionado a nivel internacional es la implementación de techos verdes, los cuales ofrecen múltiples beneficios, mejorando el

incremento de la biodiversidad, absorción de dióxido de carbono y mejora el confort térmico interior, sin embargo implementar esta tecnología en el contexto universitario es un reto que combina múltiples variables, como la selección adecuada de plantas y sustrato acorde a las condiciones climáticas y nativas de la región, mantenimiento, impacto visual y energético.

Es por eso que nace la necesidad de generar un estudio que permita diseñar e implementar un techo verde para el laboratorio de combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, para mejorar las condiciones de temperatura interior y optimizar el consumo energético proponiendo soluciones y dejando un precedente que puedan ser utilizado para futuros proyectos. El presente trabajo de tesis abordara el análisis, conceptualización y diseño, analizando temas técnicos y ambientales.

## **1. Objetivo General**

Diseñar y modelar un sistema de techo verde como estrategia de enfriamiento pasivo, con el fin de evaluar su efecto en la reducción de la temperatura interior del laboratorio de combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica

## **2. Objetivos Específicos**

1. Plantear un modelo matemático detallado para el cálculo de los parámetros (perfil de temperatura, coeficientes de transferencia, ecuación gobernante y cantidad de radiación) y caracterización del fenómeno físico del laboratorio de combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica.
2. Validar el modelo matemático a través de pruebas experimentales en dos modelos a escala reducida.
3. Desarrollar el diseño ingenieril del techo verde para el laboratorio de combustión, considerando los costos, requisitos espaciales y parámetros específicas del entorno.

## **3. Marco teórico**

Este proyecto se enfoca en estudiar y analizar el intercambio térmico de un techo verde a través de un prototipo, estableciendo las ecuaciones físicas necesarias para parametrizarlo y luego aplicarlas en el diseño del techo del laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica. Es fundamental considerar estas ecuaciones para llevar a cabo esta investigación. Entre ellas se encuentran la Ley de Fourier para el estudio de la conducción unidimensional a través de una placa plana, la Ley de enfriamiento de Newton para determinar el calor por convección en la superficie del techo con y sin aislamiento pasivo (techo verde), y la ecuación de radiación para calcular el calor que se transfiere desde el medio hacia el interior. Del mismo modo, el estudio del proceso que realizan las plantas llamado evo transpiración también es de carácter importante, para el análisis.

### **3.1. Techos Verdes**

Los techos verdes están compuestos por una cubierta vegetal. El concepto de construcción de techos verdes surgió hace aproximadamente 300 o 400 años, en regiones como Islandia y Escandinavia, donde se encontraban casas con esta estructura. Estas surgen debido a la necesidad de aislamiento en los tejados de madera y piedra, así como por la escasez de materiales de construcción. Este tipo de construcción se mantuvo hasta el siglo XIX (Carbajal, 2009).

Los techos verdes representan una solución para diferentes tipos de climas en el interior de un recinto, ya que las plantas funcionan como aislantes de calor naturales. Además, los materiales de construcción de estos techos contribuyen aún más a la reducción de las temperaturas. Este

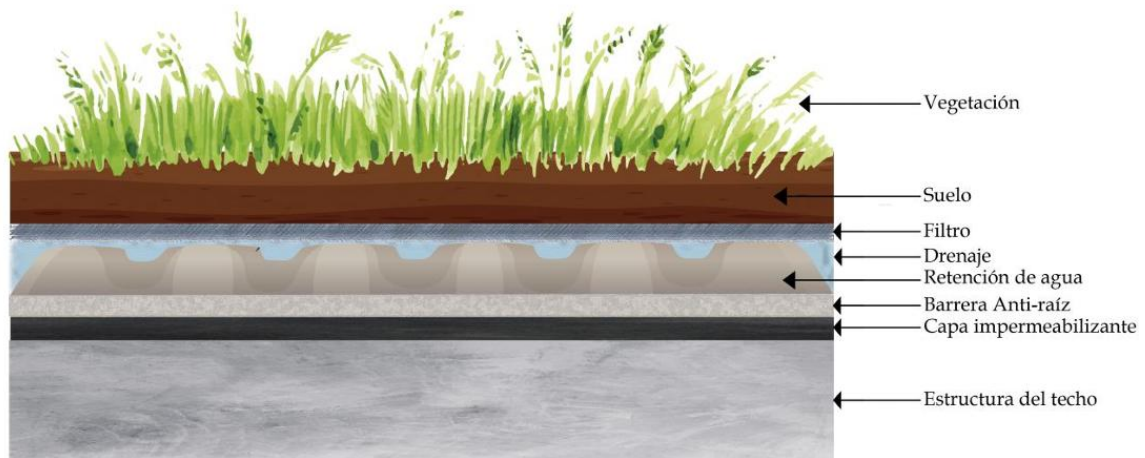
método de enfriamiento pasivo ofrece múltiples beneficios ambientales y climáticos (Cárdenas, 2014).

### 3.2. Componentes Básicos

Para comprender el funcionamiento y los beneficios de un techo verde, es fundamental conocer las partes que lo componen. Cada una de ellas juega un rol específico que garantiza la durabilidad, funcionalidad y eficiencia del sistema. Un techo verde está compuesto por varias capas, cada una con funciones únicas, que van desde la impermeabilización y el drenaje hasta el sustrato para el crecimiento de la vegetación ver figura 1.

Figura 1

*Componentes básicos de un techo verde*



**Nota. 1** Análisis del comportamiento térmico de un techo verde desértico y su espesor de sustrato en el clima seco del noroeste de México (Sahagun, 2019)

- **Estructura del techo de losa:** es la losa o estructura sobre la que se instala el techo verde. Debe estar libre de partes metálicas y elementos que causen daños o rasgaduras a la

membrana de impermeabilización. El sistema se instala sobre la losa de concreto o bien sobre placas de madera, es muy importante considerar el peso que tendrá que soportar. Cuando se trata de losa de concreto.

- **Capa impermeabilizante:** cobertura para proteger la estructura del techo de la edificación, se aplica una membrana de poliuretano líquido en frío. De preferencia debe quedar una capa de 3 mm de espesor, colocada en dos capas. La ventaja de utilizar este tipo de material, se encuentra en la posibilidad de que la membrana no quede con uniones ya que queda 100% adherida a la losa, conformando una unidad monolítica.
- **Barrera anti-raíz:** sobre la capa impermeabilizante se instala una protección contra las raíces, que consiste en una película de polietileno de alta densidad con químicos que previenen la intrusión de raíces, protegiendo la membrana de posibles daños, especialmente mientras se completa la instalación.
- **Drenaje:** el sistema está compuesto por una plancha de poliestireno extruido con ondulaciones, que almacenan agua para que la vegetación no se seque. En la cara superior, este drenaje contiene, tela de fibra de vidrio que facilita el avance del agua e impide el paso de la tierra. Entre las ondulaciones hay perforaciones que eliminan el exceso de agua. El agua que no cabe cae por las perforaciones al drenaje, por donde el agua sale hasta llegar a una canaleta o lugar de desagüe.
- **Sustrato:** sobre las capas anteriores, se distribuye una mezcla de materiales orgánicos con tierra rica en nutrientes. Este material debe cumplir con las especificaciones de nutrientes y tierra dependiendo del tipo de vegetación elegido el techo verde.

- **Vegetación:** las plantas deben ser cuidadosamente seleccionadas para que sean capaces de manejar las condiciones medioambientales que hay en los techos. Se recomiendan aquellas variedades que por su naturaleza son resistentes a condiciones climáticas extremas (Maldonado, 2008).

Los techos verdes se clasifican en tres tipos según factores como el costo de mantenimiento, el tipo de vegetación y si son transitables para peatones. Esto está directamente relacionado con el tipo de sustrato, su espesor y la carga que ejerce sobre la infraestructura donde se implementa el sistema, (Pereira & Torres, 2023).

- **Estanqueidad:** impedir la penetración de agua a la estructura de soporte del techo verde y garantizar que no existan filtraciones o deterioros causados por la humedad (Piga, 2017).

### 3.3. Tipos de techos verdes

#### 3.3.1. Intensivos

son considerados jardines convencionales, con sustratos espesos que albergan una gran variedad de plantas, incluyendo arbustos y árboles pequeños. Requieren una mayor profundidad de sustrato, la cual debe estar entre 20 y 60 cm, siendo recomendable un valor de 30 cm. Esta cantidad de sustrato aumenta el peso del sistema, siendo superior a los  $250 \frac{kg}{m^2}$  hasta los  $400 \frac{kg}{m^2}$ , también se debe tener en cuenta los costos de mantenimiento y construcción, por lo que se tiende a realizar en construcciones nuevas, (Zielinski, Garcia, & Mario, 2012). Son utilizados en áreas verdes de recreación, su mantenimiento es alto, ya que necesita riego más frecuente y en más cantidades, además de los nutrientes requeridos y el control de crecimiento (Pereira & Torres, 2023).

### 3.3.2. Semi intensivos

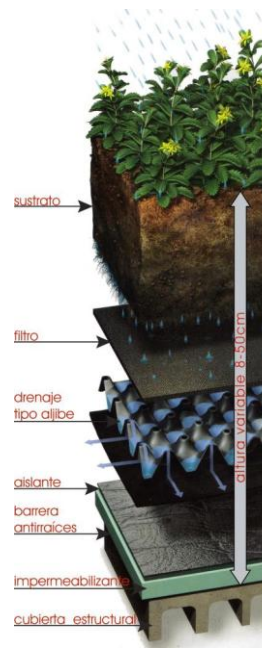
Son considerados intermedios debido al espesor del sustrato, que oscila entre 12 y 30 cm. Esto reduce la variedad de plantas en comparación con los techos de uso intensivo, pero teniendo una variedad superior a los extensivos, ya que permite la utilización de plantas de mayor tamaño y mejores características para que tenga un mejor rendimiento térmico (Pereira & Torres, 2023). Además, requieren un mantenimiento regular, lo que eleva su costo, el peso estimado de esta configuración se estima en 120 y 250  $\frac{kg}{m^2}$ , (Zielinski, Garcia, & Mario, 2012).

### 3.3.3. Extensivos

Su mantenimiento es el más bajo en comparación con los anteriores, ya que no requiere ser realizado de forma periódica. Es de fertilidad reducida; sin embargo, es necesario, dependiendo de la época, implementar el riego hasta que la planta crezca y únicamente el riego se vuelva un auxilio para esta masa de vegetación. Las plantas para este tipo de montaje deben contar generalmente con una alta resistencia a la radiación solar directa, capacidad de adaptación alta, raíces cortas y buenas propiedades de regeneración, usualmente son musgo, hierba y pasto. Siempre para el montaje de estos sistemas se necesita trabajar con plantas locales, altura del sustrato generalmente esta entre 7 y 20 cm, el peso estimado es alrededor de 60 y 140  $\frac{kg}{m^2}$ , (Zielinski, Garcia, & Mario, 2012).

Figura 2

*Capas del techo verde*



Nota. <https://tallercodigoabierto.wordpress.com/2010/11/17/61/>

### 3.4. Vegetación

Para la selección de las plantas que formarán la capa vegetal en la cubierta verde (Paisatge, 2012), es indispensable que cumplan con requisitos específicos, tales como ser altamente resistentes a la radiación solar, requerir poco mantenimiento, necesitar una cantidad reducida de nutrientes y tener raíces de poca profundidad. Del mismo modo, estas plantas deben ser locales de la región o estar adaptadas a ella.

#### 3.4.1. Tipo de plantas

Las Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo NTJ-11C (Paisatge, 2012), clasifican estas plantas en 5 grupos, estas están seleccionadas por el tipo de planta y el crecimiento, las principales características según su tipo son:

- **Suculentas:** son plantas que tienen la capacidad de retener grandes cantidades de agua en sus hojas, lo que les otorga su apariencia gruesa y carnosa. Estas plantas se destacan por su





extraordinaria tolerancia a condiciones de sequía y altas temperaturas, además de ser fáciles de propagar. Otra ventaja importante es que necesitan un aporte mínimo de nutrientes, lo que las convierte en una opción ideal para espacios con recursos limitados o para personas que buscan plantas de bajo mantenimiento.

- **Herbáceas perennifolias:** son plantas de vida prolongada, capaces de sobrevivir más de dos años y mantener sus hojas verdes durante todo el año. Suelen tener un crecimiento bajo y compacto. Una de sus principales cualidades es su capacidad para propagarse rápidamente a áreas sin nada de vegetación. Además, requieren un mantenimiento mínimo, ya que necesitan pocos nutrientes y muestran una notable resistencia a temperaturas elevadas, lo que las hace ideales para entornos con condiciones difíciles.
- **Vivaces y sub-arbustivas:** las plantas vivaces son un tipo de herbáceas perennes que tienen una característica especial: cuando las temperaturas son extremas, ya sea por mucho frío o mucho calor, pierden su follaje, como si entraran en una especie de pausa. Por otro lado, las sub-arbustivas, aunque puedan parecerse a los arbustos o matas, se distinguen porque son más bajas y tienen una base de tallo que es parcialmente leñosa. Ambas resultan opciones muy interesantes en jardinería y paisajismo, no solo por su capacidad para adaptarse a diferentes climas, sino también por el toque especial que aportan al diseño de los espacios.
- **Arbustivas:** las plantas arbustivas son especies que suelen medir entre 1 y 5 metros de altura. A diferencia de los árboles, no tienen un tronco único y definido, ya que sus ramas surgen directamente desde la base, dándoles esa forma característica. Son conocidas por ser increíblemente resistentes a climas extremos y por requerir pocos nutrientes, lo que las convierte en una opción perfecta para zonas con recursos limitados o condiciones difíciles.

- **Árboles y palmeras:** los árboles son plantas que se diferencian de las arbustivas por tener un tronco principal claramente definido, que suele ser más grueso y nudoso en su base. En su madurez, pueden superar los 5 metros de altura. Aunque son muy resistentes a temperaturas extremas, necesitan un suministro constante de nutrientes para crecer de manera saludable. Además, su capacidad para generar sombra los hace indispensables para regular el microclima y embellecer espacios al aire libre, aportando frescura y bienestar.

Tabla 1

*Especies Vegetales*

<b>Especie Vegetal</b>	<b>Imagen</b>	<b>Tipo de techo</b>	<b>Luminosidad</b>	<b>Cantidad de agua</b>
<b>Suculentas</b>		Extensivo	muy baja a muy alta	Bajo
<b>Herbáceas perennifolias</b>		Extensivo y semi-intensivo	Baja a muy alta	Modera do
<b>Vivaces y sub-arbustivas</b>		Semi-intensivo	Media a alta	Bajo
<b>Arbustivas</b>		Semi-intensivo e intensivo	baja a alta	Modera do

<b>Árboles y palmeras</b>		Intensivo	Baja a muy alta	Alto
---------------------------	---	-----------	-----------------	------

### 3.5. Sustrato

En el caso de Bucaramanga, será necesario que la composición del sustrato se adecue a las necesidades de las plantas suculentas. Por lo tanto, la proporción recomendada es la siguiente: una parte de suelo franco, una parte de abono inorgánico u orgánico como el estiércol (teniendo en cuenta que este puede atraer insectos que podrían dañar las plantas) y una parte de arena. Además, se puede complementar con materiales como fibra de coco, lana de roca, viruta o aserrín para mejorar la textura y drenaje del sustrato.

#### 3.5.1. Sustrato Orgánico

Los sustratos orgánicos son materiales de origen animal o vegetal, que pueden encontrarse en diferentes grados de descomposición. Se emplean en cultivos para proporcionar nutrientes esenciales que favorecen el crecimiento y desarrollo de las raíces. Muchos de estos sustratos son biodegradables, lo que los convierte en una opción sostenible. Algunos ejemplos comunes incluyen el compost, el humus de lombriz, la turba, la fibra de coco y la corteza de pino.

#### 3.5.2. Sustrato inorgánico

Un sustrato inorgánico es un material de origen mineral o sintético que no suministra nutrientes a las plantas. Su función principal es brindar soporte a las raíces, mejorar el drenaje y facilitar la aireación del sustrato. En algunos casos, también puede ayudar a retener agua o nutrientes. Ejemplos comunes incluyen espuma de poliuretano, esponjas agrícolas y ciertos tipos

de geotextiles, los cuales se emplean principalmente en jardines verticales por su versatilidad y funcionalidad.

### **3.6. Beneficios**

Los techos verdes presentan múltiples ventajas que los hacen realmente atractivos. Estos beneficios están relacionados con el clima en el que se encuentren. Entre estas ventajas, se encuentra la reducción del efecto de isla de calor urbano y el mejoramiento del aislamiento térmico de los edificios. Además, ayudan en el manejo del agua de lluvia, ya que este sistema retiene el agua y evita inundaciones en los techos, así como la acumulación de agua. Del mismo modo, contribuyen a la calidad del aire al capturar partículas y gases contaminantes, y liberar oxígeno al medio que los rodea, lo que ayuda a reducir el CO<sub>2</sub>, (Villegas & Rodriguez, 2022).

#### **3.6.1. Beneficios de los techos verdes para el ambiente**

Según Wong et al., (2002 citado en Sahagun, 2019) los beneficio que se dan por la utilización de los techos verde en el medio ambiente urbano son ampliamente beneficiosos. Los techos verdes constituyen una solución ecológica a la gran utilización de concreto en los techos de las ciudades, también establece que son estéticamente atractivos y que pueden dar variados beneficios al ecosistema que lo rodea esos beneficios, pueden ir desde la escala de la edificación en el que son colocados, hasta la escala de ciudad donde pueden traer grandes beneficios si se utilizan de manera extendida.

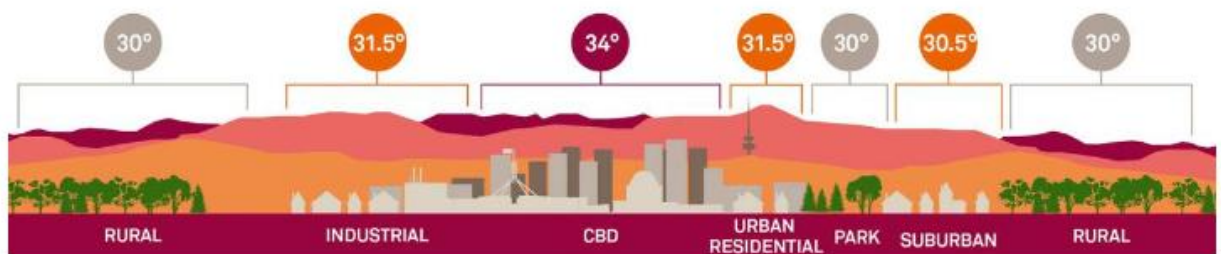
#### **3.6.2. Disminución de la isla de calor**

Debido al aumento del tamaño de las ciudades, las poblaciones, el número de vehículos y la emisión de gases a la atmósfera se produce lo que se conoce como efecto isla de calor. El efecto isla de calor urbana es un fenómeno que se produce en las áreas urbanas donde las temperaturas son significativamente más altas que en las áreas rurales circundantes. Esto se debe a la combinación de factores relacionados con la infraestructura y la actividad humana en las ciudades. Cuando hablamos de infraestructura, nos referimos a elementos como edificios, calles, aceras y asfalto. Estas superficies retienen el calor de manera más eficiente que los espacios abiertos y naturales, como los campos o los bosques. Además, la falta de vegetación en las ciudades reduce la capacidad de enfriamiento natural a través de la evaporación del agua (portillo, 2024).

En otras palabras, la definición de isla de calor se refiere a la diferencia de temperatura que existe entre una ciudad densamente poblada y las zonas rurales, donde esta diferencia puede llegar a ser de hasta los 4 °C. (Ver Figura 3).

Figura 3

### *Islas de calor*



**Nota.** <https://www.ecologiaverde.com/isla-de-calor-que-es-causas-consecuencias-y-soluciones-4442.html>

Según Wong et al., (2002 citado en Sahagun, 2019), demostró como la utilización de la vegetación sobre las superficies puede disminuir el efecto de isla de calor. Para ello se analizó la temperatura de aire a diferentes alturas sobre la superficie de un techo de un edificio en dos distintos casos, con un techo común plano y sin protección alguna, y con un techo verde colocado en la ciudad de Singapur. Cuando se compararon las temperaturas medias sobre el techo verde con las medidas tomadas con el techo plano sin protección, las temperaturas en la zona de la cubierta entre 0.3m y 1.2m de altura llegaban a ser de hasta 6°C menor que el edificio con techo común sin protección.

### **3.6.3. Disminución del consumo eléctrico**

En el ámbito de reducción energética se han realizado numerosas investigaciones donde se evalúan los beneficios de los techos verdes dentro de la edificación. Los techos verdes han demostrado que puede reducir la cantidad de electricidad que consumen las edificaciones que los contienen, principalmente en la temporada de verano. Esto se da por la reducción de la transferencia de calor a través del techo hacia el interior del edificio. El sombreado, el enfriamiento evaporativo y la energía que se consume en los procesos de la fotosíntesis de las plantas, son las principales razones por las cuales las plantas regulan la temperatura superficial del techo verde y de manera colateral las temperaturas en los alrededores del edificio donde están instalados, porque la reducción de la temperatura en la superficie del techo reduce la radiación emitida al aire que rodea al edificio y mejorando las condiciones de confort. (Sahagun, 2019).

### **3.6.4. Disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero**

Por la disminución del impacto sobre el aspecto energético en una edificación se puede entender también como su capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Las ciudades y las zonas urbanizadas son consideradas como las mayores fuentes de gases de efecto invernadero debido, principalmente, al consumo de electricidad requerido para la utilización de sistemas de climatización artificial. La capacidad de los techos verdes para disminuir el consumo eléctrico, se ve reflejado directamente en la cantidad de emisiones producto de este consumo. Estudios anteriores evaluaron el efecto de colocar plantas en edificaciones y como estas tienen un efecto directo sobre las emisiones de gases de efecto invernadero. Un estudio realizado en Tucson Arizona validó la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, derivadas de la energía consumida por el sistema de calefacción y aire acondicionado en edificaciones de vivienda, por el efecto de las plantas instaladas en la superficie el edificio. (Simpson & Mcpherson, 2000).

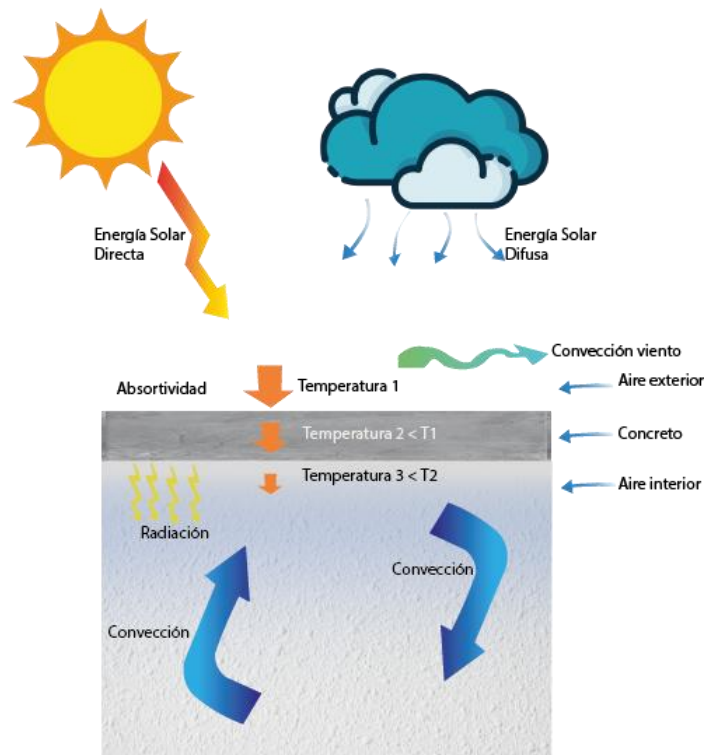
La disminución de partículas en suspensión en el aire representa un gran beneficio a la salud humana, reduciendo el gasto en el sistema sanitario público, además disminuye el deterioro provocado por estos elementos en suspensión sobre las fachadas de las edificaciones y otros elementos urbanos lo cual disminuye el costo del mantenimiento y de limpieza en la ciudad, la vegetación además de absorber esos compuestos también libera oxígeno durante el proceso de la fotosíntesis. En este proceso, las plantas transforman dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), agua y radiación solar en oxígeno (O<sub>2</sub>) y glucosa. Esta transformación tiene lugar en las hojas verde, por lo tanto, la cantidad de oxígeno que se puede producir es proporcional a la superficie de hoja de cada tipo de planta, en general se puede estimar que 25m<sup>2</sup> de superficie de hojas produce 27g de Oxígeno durante el día. (Sahagun, 2019).

### **3.7. Principios físicos de los techos verdes**

Un techo verde funciona como un micro hábitat en las azoteas y los techos de las edificaciones donde se construye. El micro hábitat se puede considerar como la parte más pequeña de un Ecosistema, el cual suele diferir en las condiciones a su alrededor. Al igual que con un techo tradicional, la mayoría de la energía recibida es por radiación. En la figura 4 se muestra como la energía del sol llega al techo de concreto con rayos directos, así como energía difusa reflejada por las nubes y el cielo. Una vez que toca la superficie de concreto comienza a atravesarlo, perdiendo un porcentaje de esta energía por convección ocasionado por el viento. (Sahagun, 2019).

Figura 4

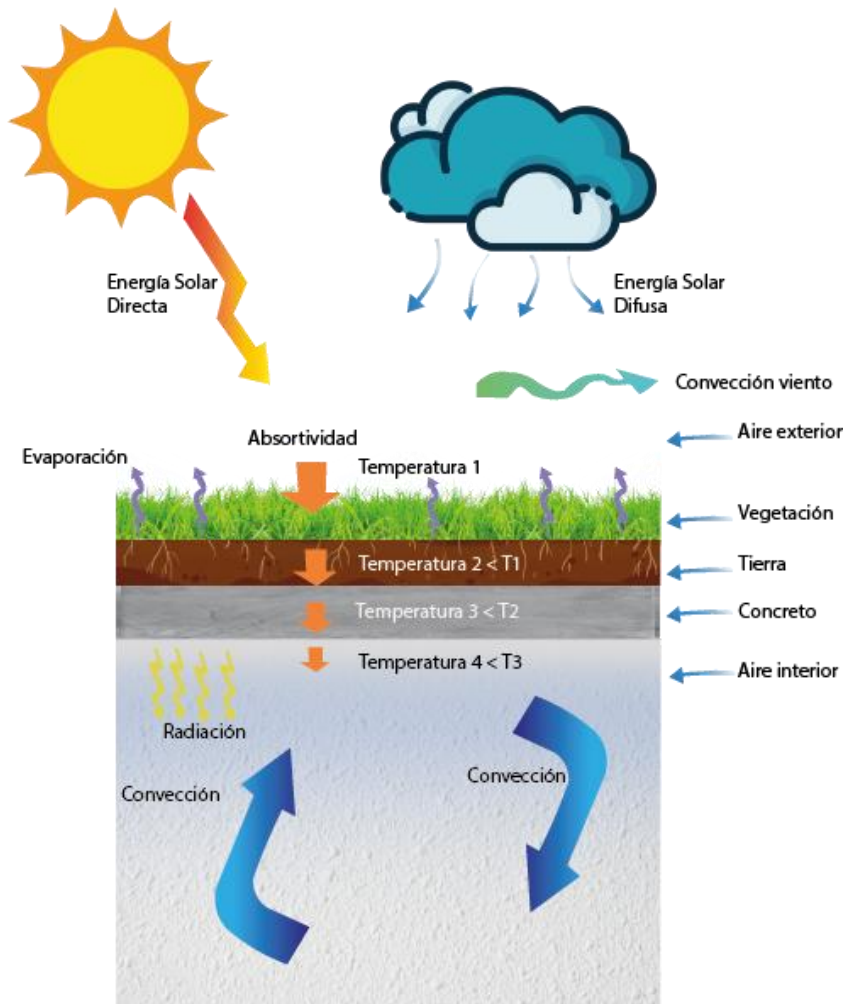
*Techo con placa de concreto durante el día*



Al atravesar las capas el calor tiene un retardo térmico lo cual provoca que se sienta aun después de que el sol se haya ocultado. Posteriormente se difunde al interior por convección y por radiación.

En la figura 5 se observa cómo la energía del sol llega al techo con rayos directos, así como la energía difusa reflejada por las nubes y el cielo. Una vez que la energía llega al techo una parte es absorbida por las plantas, otra se transmite en forma de calor al techo, otro porcentaje se pierde por el paso del viento entre las plantas, otra es absorbida por la evaporación del agua y la que logra pasar es retardada por la tierra y el agua en el techo. Una vez que la energía logra cruzar la tierra, el calor debe pasar por una capa aislante y después el techo de concreto. Cuando el calor logra atravesar todas las capas, sólo un porcentaje de lo que llegó originalmente al techo, se transmitirá por radiación y por convección en el espacio que se encuentre bajo el techo. (Sahagun, 2019).

Figura 5

*Techo verde durante el día*

Los techos verdes presentan múltiples ventajas que los hacen realmente atractivos. Estos beneficios están relacionados con el clima en el que se encuentren. Entre estas ventajas, se encuentra la reducción del efecto de isla de calor urbano y el mejoramiento del aislamiento térmico de los edificios. Además, ayudan en el manejo del agua de lluvia, ya que este sistema retiene el agua y evita inundaciones en los techos, así como la acumulación de agua. Del mismo modo,

contribuyen a la calidad del aire al capturar partículas y gases contaminantes, y liberar oxígeno al medio que los rodea, lo que ayuda a reducir el CO<sub>2</sub>, (Villegas & Rodriguez, 2022).

### **3.8. Transferencia de calor**

La transferencia de calor es un fenómeno fundamental en la ingeniería mecánica que describe el movimiento de energía térmica desde un objeto o sistema a otro, debido a una diferencia de temperatura. Este proceso ocurre de manera espontánea siempre que exista un gradiente de temperatura y tiene como finalidad alcanzar el equilibrio térmico, donde las temperaturas entre los cuerpos o sistemas se igualan.

El estudio de la transferencia de calor es crucial para entender cómo los sistemas térmicos interactúan con su entorno, lo cual es especialmente importante en aplicaciones como el diseño de techos verdes. Un techo verde no solo proporciona beneficios estéticos y ecológicos, sino que también actúa como un moderador térmico, reduciendo el calor que ingresa al edificio y mejorando la eficiencia energética.

De este modo, la transferencia de calor plantea los siguientes mecanismos de transferencia de calor

#### **3.8.1. Conducción unidimensional en estado estable**

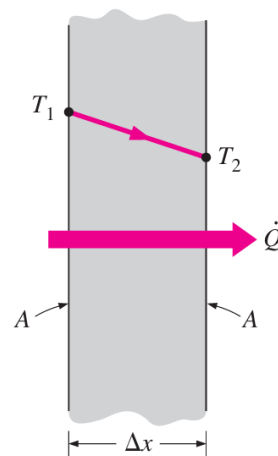
es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte

de energía por parte de los electrones libres. Por ejemplo, llegará el momento en que una bebida enlatada fría en un cuarto cálido se caliente hasta la temperatura ambiente como resultado de la transferencia de calor por conducción, del cuarto hacia la bebida, a través del aluminio. La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él. (Cengel & Yunus)

Considere una conducción de estado estacionario de calor a través de una pared plana grande de espesor  $\Delta x=L$  y área  $A$ , como se muestra en la figura 6. La diferencia de temperatura de uno a otro lado de la pared es  $T_2-T_1$ . (Cengel & Yunus)

Figura 6

Conducción de calor a través de una pared plana



**Nota.** (Cengel & Yunus).

Este mecanismo de transferencia de calor es estudiado mediante la ley de Fourier de la conducción del calor expresada en la ecuación I:

$$\dot{Q} = -K * A \frac{dT}{dX} \quad (I)$$

Donde:

- A: Es el área de transferencia de calor dada en ( $m^2$ )
- K: Es la conductividad térmica del material que indica la capacidad que tiene el material de conducir calor y viene dada en ( $\frac{W}{m \cdot K}$ )
- $\frac{dT}{dX}$ : Es el gradiente de temperatura

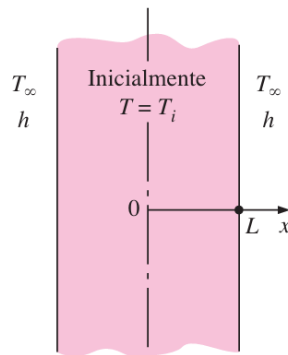
El signo negativo en la ecuación I garantiza que la transferencia de calor en la dirección x sea una cantidad positiva.

### 3.8.2. Conducción de calor en régimen transitorio en paredes planas

En el modelo anterior, los cuerpos permanecen casi isotérmicos durante un proceso. Los cuerpos relativamente pequeños de materiales intensamente conductores se aproximan a este comportamiento. Sin embargo, en general, la temperatura dentro de un cuerpo cambia de punto a punto, así como de tiempo en tiempo. En este punto se considera la variación de la temperatura con el tiempo y la posición en problemas unidimensionales, como los asociados con una pared plana. Considere una pared plana de espesor  $2L$ . La solución de estos problemas en estado transitorio está relacionada con series infinitas, ecuaciones trascendentes y del método analítico, siendo este último es más utilizado ya que presenta una visión más valiosa del fenómeno físico que ocurre como se muestra en la figura 7 (Cengel & Yunus).

Figura 7.

## Conducción transitoria en una pared plana



Nota. (Cengel & Yunus)

Luego de considerar un elemento delgado de espesor  $\Delta x$  en una pared plana, donde suponemos que la densidad de la pared es  $\rho$ , y realizarle un balance de energía durante un pequeño intervalo de tiempo y teniendo en cuenta que no se presenta generación en este elemento (Cengel & Yunus) ver ecuación II.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II})$$

En donde

- $\alpha = \frac{k}{\rho c}$  es la difusividad térmica del material y representa la rapidez con que se propaga el calor a través del mismo. (Cengel & Yunus).

Esta ecuación sirve para determinar la distribución de temperatura en función del tiempo y de la posición. De acuerdo con el caso en estudio se pueden hacer las simplificaciones necesarias, por ejemplo, si el término del lado derecho se toma como cero quiere decir que el proceso es en estado estable, ya que la distribución de temperatura solo es función de la posición. (Reyes & Romualdo, 2013).

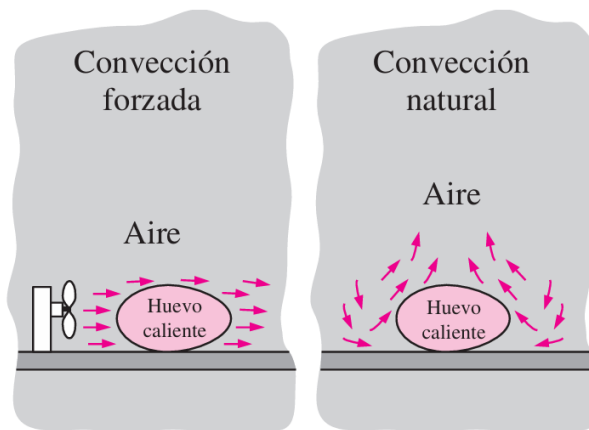
### 3.8.3. Convección

Es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las razones de esa transferencia.

La convección puede darse de dos formas, **convección forzada** si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Como contraste, se dice que es **convección natural** (libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido ver figura 8 (Cengel & Yunus).

Figura 8.

Enfriamiento de un huevo por convección forzada y natural



Nota. (Cengel & Yunus)

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento ver ecuación III (Cengel & Yunus).

$$\dot{Q} = h * A_s * (T_s - T_{\infty}) \quad \text{(III)}$$

Donde:

- h: es el coeficiente de transferencia de calor dado en (W/m<sup>2</sup>)
- A<sub>s</sub>: área de transferencia de calor (m<sup>2</sup>)
- T<sub>s</sub>: es la temperatura de la superficie (k o °C)
- T<sub>∞</sub>: es la temperatura del aire ambiente (k o °C)

#### 3.8.4. Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electro magnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío. Ésta es la manera en la que la energía del Sol llega a la Tierra.

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T<sub>s</sub> (en K o R) es expresada por la ley de Stefan-Boltzmann ver ecuación IV (Cengel & Yunus).

$$Q = \varepsilon * \sigma * A_S * T^4 \quad (IV)$$

Donde:

- $\sigma$ : es la constante de **Stefan Boltzmann** y equivale a  $5.67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$
- $\varepsilon$ : es la emisividad y es una medida de cuán próximo esta una superficie de ser un cuerpo negro y oscila entre  $(0 \leq \varepsilon \leq 1)$ . (Cengel & Yunus)

Para poder comprender bien el fenómeno de la radiación solar sobre superficies es necesario tener en cuenta los siguientes conceptos: Irradiación, absorptividad, transmisividad y reflectividad como se ilustran en la Figura 9.

**Irradiación (G):** Cantidad de radiación que incide sobre una superficie y se mide en  $(\text{W/m}^2)$

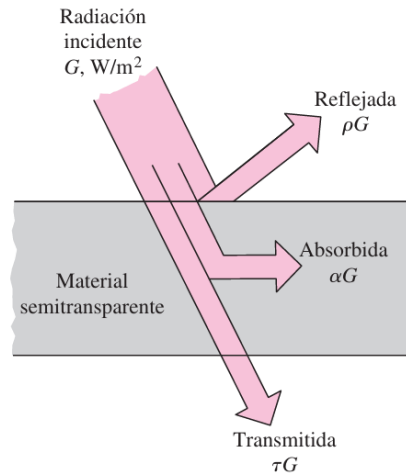
**Absortividad ( $\alpha$ ):** fracción de la radiación que es absorbida por una superficie. Varía entre 0 y 1, donde 1 significa que la radiación fue absorbida totalmente y 0 que la superficie no absorbe radiación.

**Transmisividad ( $\tau$ ):** Es la fracción de la radiación incidente que pasa a través de un material sin ser absorbida ni reflejada. Varía entre 0 y 1 y se ve principalmente en materiales transparentes como los vidrios.

**Reflectividad ( $\rho$ ):** Es la fracción de la energía que se refleja. También varía entre 0 y 1, y depende de la naturaleza de la superficie y de la longitud de onda

Figura 9

*Absorción, Reflexión y Transmisión de la radiación incidente por un material semitransparente.*



Nota. (Cengel & Yunus)

### 3.9. Evapotranspiración

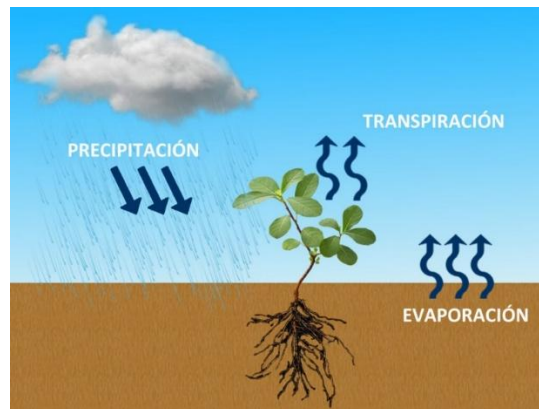
Es la tierra que pierde agua al aire a través de uno de dos métodos. Uno es familiar, la evaporación, en la que el agua que se ha empapado en el suelo o que está asentada en la superficie se convierte en vapor de agua, que se transporta al aire. La mayoría de las personas no saben tanto sobre el otro, la transpiración, en el que las plantas absorben agua a través de sus raíces, la envían a través de sus tallos y hojas y luego la usan como alimento (combinándola con dióxido de carbono para producir oxígeno y azúcar) o evaporarlo de sus superficies. En esta lección, veremos las condiciones que afectan la evapotranspiración y algunos de los cálculos involucrados en su medición (Ricardo R. , 2021).

La evapotranspiración depende principalmente de factores como la humedad relativa, la temperatura y la cantidad de agua disponible para la planta según Fitts,( 2012 citado en Salas & Torres, 2023). Cualquiera de estos factores puede tener un alto impacto en la transpiración o en la evaporación del agua. Por ejemplo, en alguna localización donde el acceso al agua no sea tan sencillo para la planta, ya sea por falta de precipitación o porque el agua se encuentra en el subsuelo, la transpiración no sucede de la mejor forma según Fitts,(2012 citado en Salas & Torres, 2023).

Como el sistema de una planta y la tierra donde está plantada no es un sistema aislado, existirá siempre el aire circundante y la radiación solar que incida y afecte al sistema. En una superficie que cuente con plantas (y, por lo tanto, con agua), la energía que absorbe el sistema no solo se enfoca en la absorción y reflexión de la radiación (y en calentar el aire circundante), si no, se enfoca también en evaporar el agua que hay disponible y transpirar el agua que se adquiere de las raíces ver figura 10. Por tanto, la mayor cantidad de energía se invierte en la evapotranspiración, por lo que la radiación que absorbe la planta no se convierte en calor que aumentará la temperatura del aire circundante según Alvarado, (2019 citado en (Salas & Torres, 2023).

Figura 10

Ciclo de energía



Nota. <https://www.rainbird.com/es/weatherbasedirrigation>

### 3.10. Carga térmica

La carga térmica, también llama carga de refrigeración, se define como la cantidad neta de calor que se extrae del recinto. Este calor se extrae para compensar el calor ganado por la edificación por medio de fuentes como la radiación solar, conducción, iluminación, personas, infiltración de aire y equipos ver figura 11; donde se busca poder mantener las condiciones de temperatura y humedad en niveles confortables según (Pita citado en Salas & Torres, 2023)

en un espacio interior las cargas térmicas se pueden dividir en dos categorías principales: cargas térmicas sensibles y cargas térmicas latentes

#### 3.10.1. Cargas térmicas sensibles

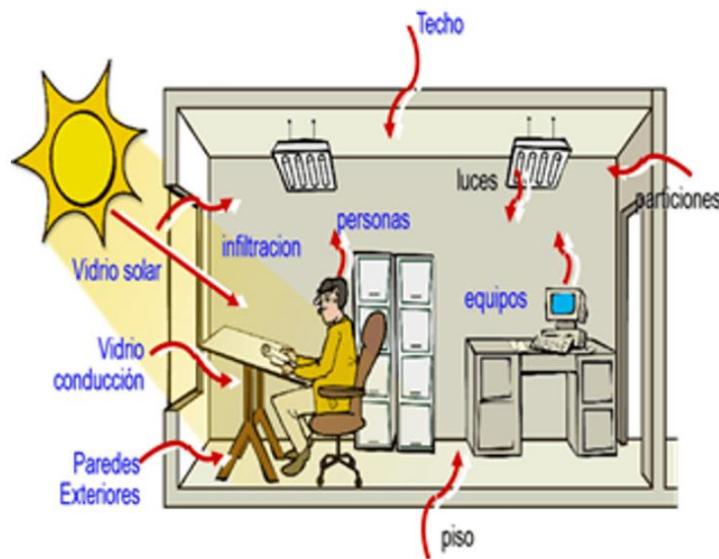
son aquellas que originan una variación en la temperatura del aire. Estas pueden ser causadas por la radiación solar a través de las superficies acristaladas, la transmisión y radiación a través de paredes y techos exteriores, y la transmisión a través de paredes, techos, suelos y puertas interiores

#### 3.10.2. Cargas térmicas latentes

son las que originan una variación en la humedad absoluta del ambiente. Estas pueden ser debidas a una aportación de humedad al aire, por ejemplo, las derivadas del aire exterior o de la actividad interior (como puede ser la humedad generada por unas cocinas o una maquinaria específica) (Glaciar ingenierias s.a.s., s.f.)

Figura 11.

*Cargas térmicas presentes en un recinto*



Nota. <https://www.kin.energy/blogs/post/balance-t%C3%A9rmico-para-sistemas-hvac.-importancia-y-requerimientos>

#### 4. Método numérico para el cálculo

Como método para calcular las temperaturas del techo del laboratorio de combustión industrial de la Universidad Industrial de Santander (UIS), y continuar con el desarrollo de esta tesis de grado, hemos decidido utilizar el método de diferencias finitas.

Este método es una técnica numérica fundamental para resolver problemas de transferencia de calor en diversas aplicaciones, tanto en geometrías unidimensionales como bidimensionales. Este enfoque permite reemplazar ecuaciones diferenciales por ecuaciones algebraicas. En este método, el dominio se divide en volúmenes de control a través de una malla de nodos, donde se aplica un balance de energía para calcular las temperaturas en puntos específicos. Si bien muchos problemas de transferencia de calor pueden simplificarse a unidimensionales, es crucial considerar también la variación de temperatura en otras direcciones cuando esta es significativa. Por ello, el método se adapta para abordar la conducción bidimensional de calor en estado estacionario utilizando coordenadas rectangulares.

En el análisis en estado estacionario, el sistema de ecuaciones resultante se resuelve simultáneamente, proporcionando una representación precisa del fenómeno térmico. Por otro lado, en situaciones donde la temperatura varía con el tiempo, se introducen términos temporales en las ecuaciones, permitiendo el análisis en estado transitorio. Para este tipo de problemas, se pueden emplear dos enfoques: el método explícito, que permite obtener resultados rápidos bajo ciertas limitaciones de estabilidad, y el método implícito, que ofrece mayor estabilidad y no está restringido por el tamaño del paso de tiempo, aunque requiere resolver un sistema de ecuaciones simultáneamente.

#### **4.1. Modelamientos térmicos de los recintos**

En este apartado, se analizan los balances de energía considerando la transferencia de calor desde el techo, las paredes y las cargas térmicas internas que interactúan. Este balance se aplicó a

dos recintos: uno con techo verde y otro sin techo verde, con el fin de evaluar los beneficios de los techos verdes como método de enfriamiento pasivo para el laboratorio y analizar el comportamiento de la temperatura a lo largo del día.

## **Metodología**

### **4.2. Fase 1. Planteamiento del modelo matemático y caracterización del fenómeno físico.**

Actividades:

#### **1. Toma y recopilación de datos del laboratorio de combustión:**

1.1. Recolectar datos relevantes sobre la geometría del laboratorio de combustión, propiedades de los materiales. Cálculo de espesor, elementos del laboratorio y caracterización del techo.

Comenzaremos definiendo la geometría del recinto, incluyendo la inclinación del techo, las propiedades físicas del concreto y otras variables relevantes que influyen en el cálculo de la transferencia de calor. Este análisis permitirá establecer una base precisa para evaluar el comportamiento térmico del espacio.

a través de varias visitas y con la ayuda de instrumentos de medición de longitud, temperaturas y a través de inspección visual identificamos las características de importancia, dando como resultado una longitud de 13 metros de largo, 7.75 metros de ancho, la altura del suelo a la ventana es de 1 metro y la altura de la ventana es de un 1.64 centímetros, el espesor de las paredes y el techo son de 22 centímetros, en conclusión, nuestro recinto es un rectángulo.

El material de construcción de las paredes y el techo es de concreto, las ventanas están fabricadas en vidrio. El aislamiento utilizado para el techo es de la marca Sika, que es para impermeabilizar techos, cubiertas y terrazas con tecnología DFX y fibras que puentean las fisuras, este producto deja una tonalidad verde y según el fabricante tiene una duración de 7 años.

La temperatura se mide con la ayuda una termocupla, dándonos varios resultados a analizar, donde llegamos a tener diferentes condiciones, cuando al interior es de 27 a 28 grados sin equipos encendidos la temperatura exterior es de 29 grados a 30, pero la temperatura exterior cambia más rápido, dando resultados más altos hasta de 32 grados y mínimas de 27 y en días muy fríos hasta de 25 o menos dependiendo de la velocidad del viento, mientras que la temperatura interior debido a la carga térmica y condiciones del viento, se mantiene por más tiempo cálido, y cuando se encienden equipos térmicos la temperatura aumenta al interior.

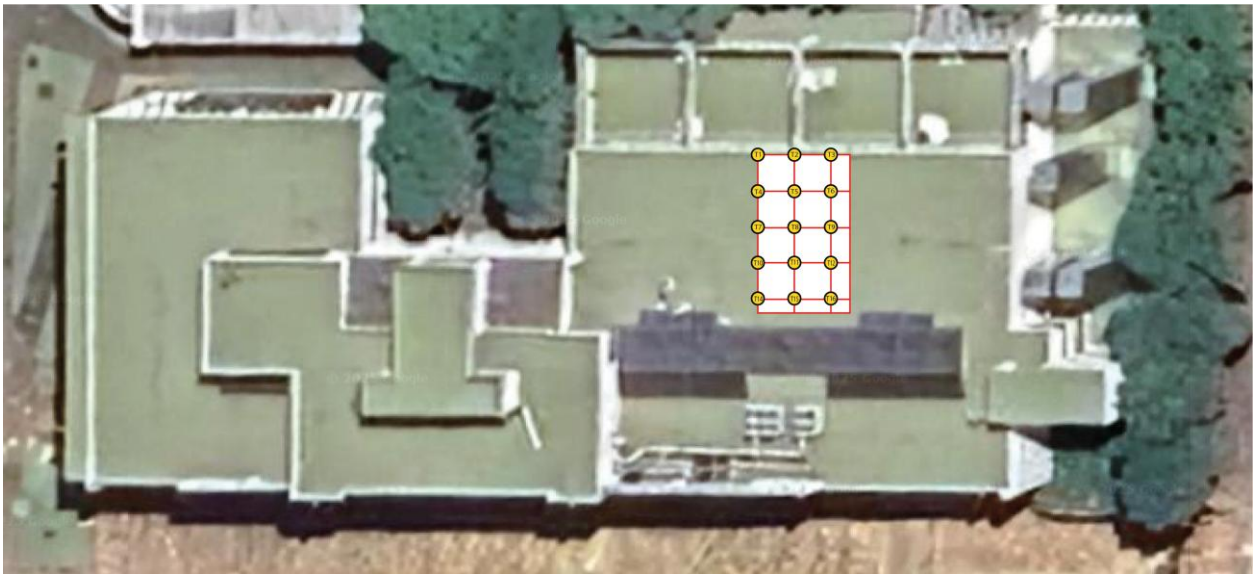
En cuanto a los elementos del laboratorio existen once equipos encontrados que está en condiciones de operación, estas son: dos peletizadora, un reactor de pirolisis, dos sopladores, dos bombas calorimétrica, un reactor de pirolisis de lecho fluido, un molino de martillos, una mufla, un reactor nuclear de pirolisis, es importante tener en cuenta que la temperatura en el laboratorio llega a aumentar notoriamente debido al funcionamiento de estos equipos de manera prolongada, como también es importante resaltar que la mufla es el artefacto que más aporta calor al ambiente en comparación con los demás equipos cuando este está en funcionamiento.

1.2. Cálculo del perfil de temperatura del techo del laboratorio durante el día a través de la toma de datos de temperatura.

Para el cálculo del perfil de temperatura a través del techo verde primero dividimos el área del techo en secciones rectangulares de 3x3 metros para analizar la distribución de la temperatura local a través del área del techo e identificar los puntos críticos de mayor y menor temperatura, este procedimiento fue realizado con una termocupla PT100.

Figura 2

*Techo de la escuela de ingeniería mecánica*

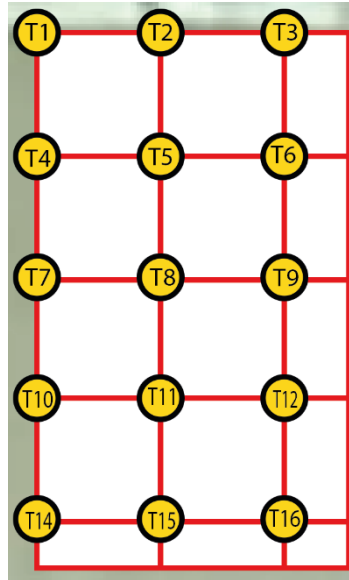


Nota. *Google Maps*

Se crea una malla y se analiza 16 nodos de estudio ver figura 13, se toman temperaturas locales en cada punto, la diferencia de temperatura entre cada nodo se puede considerar despreciable debido a que el delta de temperatura entre los puntos es menor a un de 1 grado la temperatura en el exterior para el momento del estudio era de 31 grados Celsius.

Figura 3.

*Representación de puntos de medición*



De manera análoga, se replica el procedimiento al interior del laboratorio y el resultado es el mismo, una vez determinado esto, por simplificación asumimos, temperatura superficial constante en la superficie interior y exterior, la temperatura para el interior al momento del estudio es de 28 grados Celsius.

Para la determinación del perfil de temperatura a través del espesor del techo de la ecuación general de la transferencia de calor por conducción deducimos la ecuación para el perfil donde tenemos lo siguiente.

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} + \frac{q'''}{K} = \frac{\rho C_p}{K} \frac{dT}{dt}$$

Las consideraciones a tener en cuenta para el análisis de la transferencia por conducción son: techo sin generación de calor, unidimensional y en estado estable, por lo tanto, eliminamos de la ecuación los términos espaciales de los ejes X y Z, así mismo como nuestra consideración es en estado estable el término respecto al tiempo se convierte en cero.

$$\cancel{\frac{d^2 T}{dx^2}} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \cancel{\frac{d^2 T}{dz^2}} + \cancel{\frac{q'''}{K}} = \cancel{\frac{\rho C_p dT}{K dt}}$$

$$\frac{d^2 T}{dy^2} = 0$$

ahora derivando para obtener la ecuación del perfil de temperaturas tenemos lo siguiente:

$$\frac{dT}{dy} = 0 dy = C_1$$

$$T_{(y)} = C_1 Y + C_2 \quad (3)$$

Para encontrar estas constantes desarrollamos el siguiente sistema de ecuaciones:

1. En  $Y=0 \rightarrow T_{(y=0)} = T_{s1}$

2. En  $Y=L \rightarrow T_{(y=L)} = T_{s2}$

De (3) tenemos para la ecuación (1) tenemos:

$$T_{s1} = C_1(0) + C_2$$

$$T_{s1} = C_2$$

De (3) tenemos para la ecuación (2) tenemos:

$$T_{s2} = C_1 L + T_{s1}$$

$$C_1 = \frac{T_{s2} - T_{s1}}{L}$$

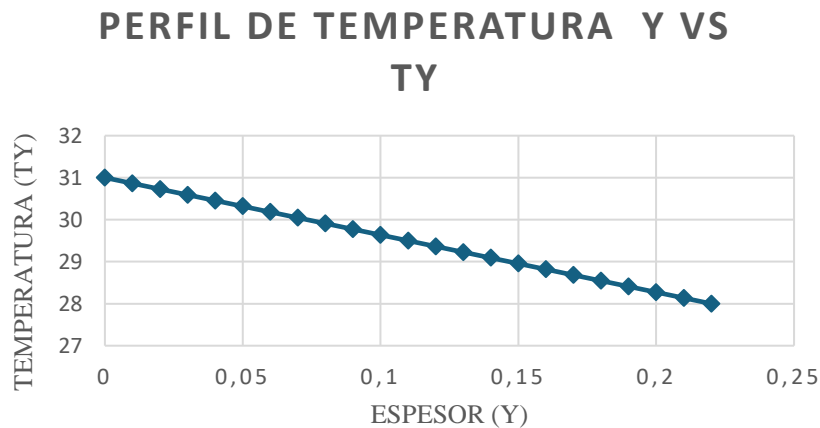
Ahora con el valor de las constantes reemplazamos en 3 y la ecuación queda de la siguiente manera:

$$T_{(y)} = \frac{T_{s2} - T_{s1}}{L} Y + T_{s1}$$

De este modo se describe el perfil de temperatura a través del techo del laboratorio, reemplazando los valores medidos experimentalmente obtenemos una tendencia lineal ver figura 14.

Figura 14

*Perfil de temperatura del techo de concreto*



#### 4.3. Fase 2. Desarrollo del modelo matemático:

1.3. Definir las ecuaciones que describan el fenómeno físico según la toma de datos de temperaturas, velocidad del viento y cantidad de radiación.

1.4. Definir el comportamiento de la transferencia de calor del laboratorio a través de principios teóricos para el cálculo de los coeficientes de transferencia y el modelo que describa el flujo de energía en el laboratorio.

##### 4.3.1. Modelamiento térmico

En este apartado, se realiza un análisis detallado de los balances de energía, considerando la transferencia de calor a través del techo. El estudio se aplica a dos configuraciones: un recinto con techo verde y otro sin él, con el propósito de evaluar la efectividad de los techos verdes como estrategia de enfriamiento pasivo en el laboratorio. Además, se examina la evolución de la temperatura a lo largo del día, proporcionando una comprensión más precisa de su impacto en el confort térmico y la eficiencia energética del espacio.

Es importante destacar que, tanto en el recinto con techo de concreto como en el de techo verde, se analiza el comportamiento térmico de ambas superficies por separado. Para ello, se aplican dos balances de energía: el primero en la superficie exterior ecuación 1, con el objetivo de predecir, a través del modelo, la temperatura en la cara interior de la placa; y el segundo en la parte inferior de la misma ecuación 2, para evaluar la transferencia de calor hacia el interior del recinto.

##### 4.3.2. Balance de energía sobre la superficie exterior del techo de concreto

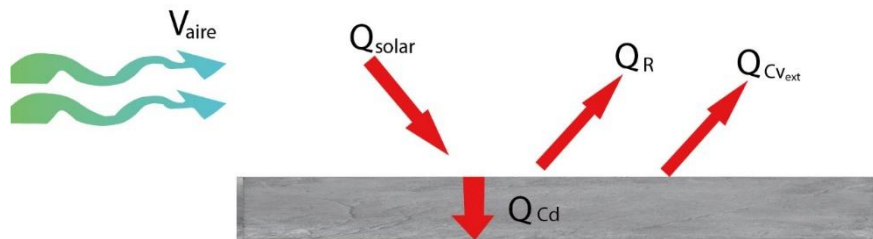
$$E_{ent} - E_{sal} + E_g = \rho v C_p \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

Anulamos tanto la energía generada como la variación de la energía con respecto al tiempo, ecuación 3 para finalmente obtener la ecuación gobernante de energía sobre la superficie exterior ecuación 4 y en la figura 15 se ilustran flujos de energía en la superficie.

$$E_{ent} - E_{sal} + E_g = \rho \nu C_p \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

Figura 15

*Flujos de energía en la superficie exterior del techo de concreto*



$$Q_{solar} - Q_{cv} - Q_{rad} - Q_{cd} = 0 \quad (4)$$

• **Suposiciones:**

1. Se aplica el modelo de transferencia de calor sobre una placa plana con temperatura constante en la superficie (isotérmica)
2. Tenemos un flujo estacionario e incompresible
3. Flujo laminar sobre toda la superficie
4. Se considera transferencia de calor por radiación y convección exterior

Los datos requeridos para los cálculos, se encuentran detallados en el **Anexo A**

El proceso comienza con el cálculo de la relación entre los números de Grashof y Reynolds  $Gr/Re^2$  (ecuaciones 5 y 6). Este valor permite determinar el tipo de convección dominante en el proceso, ya sea forzada, natural o mixta.

$$Re_L = \frac{V_{Aire} * L}{\vartheta} \quad (5)$$

Donde

- $V_{Aire}$ : Velocidad del aire (m/s)
- $L$ : Longitud de la placa (m)
- $\vartheta$ : Viscosidad cinemática del fluido ( $m^2/s$ )

Se calcula el Grashof

$$Gr_L = \frac{g * \beta * (T_{S_{Ext}} - T_{Amb})}{\vartheta^2} \quad (6)$$

Donde

- $g$ : Aceleración gravitacional ( $m/s^2$ )
- $\beta$ : Coeficiente de expansión volumétrica (1/K)
- $T_{S_{EXT}}$ : Temperatura en la superficie exterior de la placa ( $^{\circ}C$ )
- $T_{AMB}$ : Temperatura ambiente exterior ( $^{\circ}C$ )
- $L_c$ : Longitud característica de la geometría (m)
- $\vartheta$ : Viscosidad cinemática del fluido ( $m^2/s$ )

Dado que la relación entre los números de Reynolds y Grashof es menor que 0.1, los efectos de la convección natural pueden considerarse despreciables. En consecuencia, se procede a calcular la convección forzada en el exterior de una placa plana.

En la ecuación 7 se presenta la correlación correspondiente a una placa plana sometida a un flujo de calor uniforme y régimen laminar propuesta en (Cengel & Yunus) y calculado en anexo II. II. En la ecuación 8 se determina el coeficiente de transferencia de calor por convección forzada en el exterior.

$$Nu = 0,664Re^{0.5} * Pr^{1/3} \quad (7)$$

$$h_{ext} = \frac{K}{Lc} Nu \quad (8)$$

Se plantea la ecuación 9, que describe el flujo de calor por convección en la superficie exterior

$$Q_{CV-EXT} = h_{ext} * As * (T_{S-EXT} - T_{AMB}) \quad (9)$$

Donde:

- $h_{ext}$ : Coeficiente de convección exterior ( $W/m^2$ )
- $As$ : Area de tranferencia de calor ( $m^2$ )

Se utiliza la ecuación de Stefan-Boltzmann para estimar la pérdida de calor por radiación entre el techo y el cielo, ya que este caso cumple con las condiciones necesarias: superficies extensas, emisividad alta y medio transparente a la radiación., ecuación 10.

$$Q_R = \varepsilon * \sigma * A_S * (T_{S-EXT}^4 - T_{ALR}^4) \quad (10)$$

Donde:

- $\varepsilon$ : Emisividad de la superficie ( $W/m^2$ )
- $\sigma$ : Constante de Stefan – Boltzmann ( $W/m^2$ ) \*  $K^4$
- $T_{S-EXT}$ : Temperatura en la superficie exterior de la placa (K)
- $T_{ALR}$ : Temperatura de los alrededores (K)

Para la estimación del calor transferido por radiación ecuación **10**, es necesario determinar la temperatura de los alrededores. En este contexto, dicha temperatura se asocia con la temperatura efectiva del cielo, también denominada temperatura del cielo radiante, la cual puede ser calculada mediante la Ecuación **11**.

La estimación de esta temperatura se realiza a partir de una correlación empírica que relaciona la temperatura ambiente con la emisividad del cielo, la cual depende de la presión parcial de vapor de agua presente en la atmósfera. Para ello, se utiliza la ecuación de (Tetens, 1930) ecuación **12** para estimar la presión de vapor:

$$e = RH * 6.112EXP\left(\frac{17.67 * T_{AMB}}{T_{AMB} + 243.5}\right) \quad (12)$$

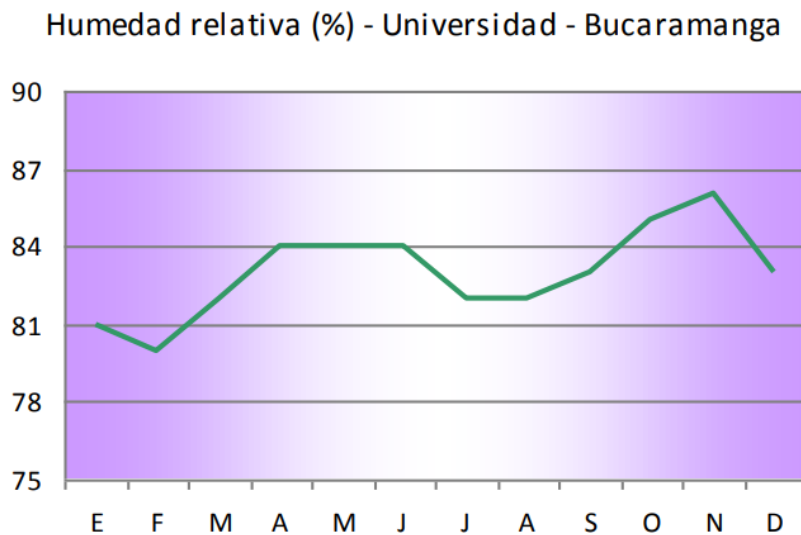
Donde:

- $e$ = Presión de vapor de agua en el aire en (hpa)
- RH= Humedad relativa
- $T_{AMB}$ = Temperatura ambiente del aire (°C)

Dado que no se disponen de datos meteorológicos suficientes para el cálculo puntual de la humedad relativa, se optó por utilizar valores promedio reportados en fuentes oficiales. Según el informe Características Climatológicas de Ciudades Principales y Municipios Turísticos (IDEAM), la humedad relativa promedio en Bucaramanga supera el 80%, y durante las épocas de lluvia puede alcanzar valores superiores al 84%. Para este caso, utilizaremos el valor del 84% según figura 16.

Figura 16

*Humedad relativa durante el año*



Nota. (CARÁCTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE CIUDADES PRINCIPALES Y MUNICIPIOS TURÍSTICOS)

La emisividad del cielo se calcula mediante la ecuación **13**, la cual es una correlación empírica que relaciona dicho valor con la presión parcial de vapor de agua, expresada como:

$$\varepsilon_{CIE} = 0.84 - 0.031 * EXP^{-(0.5*e)^{1.4}} \quad (13)$$

Donde:

- $\varepsilon_{cie}$  = Emisividad efectiva del cielo
- e= Presión de vapor de agua en el aire en (hpa)

Finalmente, se estima la temperatura efectiva, con la expresión propuesta en (Monteith & Unsworth, 2013), basada en la ley de Stefan-Boltzmann

$$T_{CIE} = \varepsilon_{CIE}^{\frac{1}{4}} * T_{AMB} \quad (11)$$

En donde:

- $T_{AMB}$  = Temperatura ambiente (K)

De la ecuación 14 se calcula la transferencia de calor por conducción en la placa de concreto, es necesario considerar el coeficiente de conductividad térmica del concreto.  $K= 2,5$  W/mk (Sahagun, 2019)

$$Q_{Cd} = \frac{K_c * A_s * (T_{S-EXT} - T_{S-INT})}{e} \quad (14)$$

- $K_c$ : Conductividad térmica del concreto (W/mk)
- e: Espesor de la placa (m)
- $A_s$ : Área superficial de transferencia calor de la placa ( $m^2$ )
- $T_{S-EXT}$ : Temperatura en la superficie exterior de la placa ( $^{\circ}C$ )
- $T_{S-INT}$ : Temperatura en la superficie interior de la placa ( $^{\circ}C$ )

Con lo anterior, se definieron las ecuaciones que describen la transferencia de calor en la superficie exterior del techo. A partir de principios teóricos, se calcularon los coeficientes de transferencia para desarrollar un modelo matemático capaz de determinar la temperatura de la superficie interior del techo del laboratorio de combustión industrial de la Universidad Industrial de Santander (UIS) en cualquier momento y bajo diversas condiciones climáticas. Los detalles completos del cálculo y la solución obtenida se presentan en el **Anexo 2.1**

#### 4.3.3. Balance de energía sobre la superficie interior de la placa del techo

$$E_{ent} - E_{sal} + E_g = \rho v C_p \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

Se cancelan las variaciones de energía en el tiempo y la energía generada, ya que es un proceso estacionario. Ecuación **15**

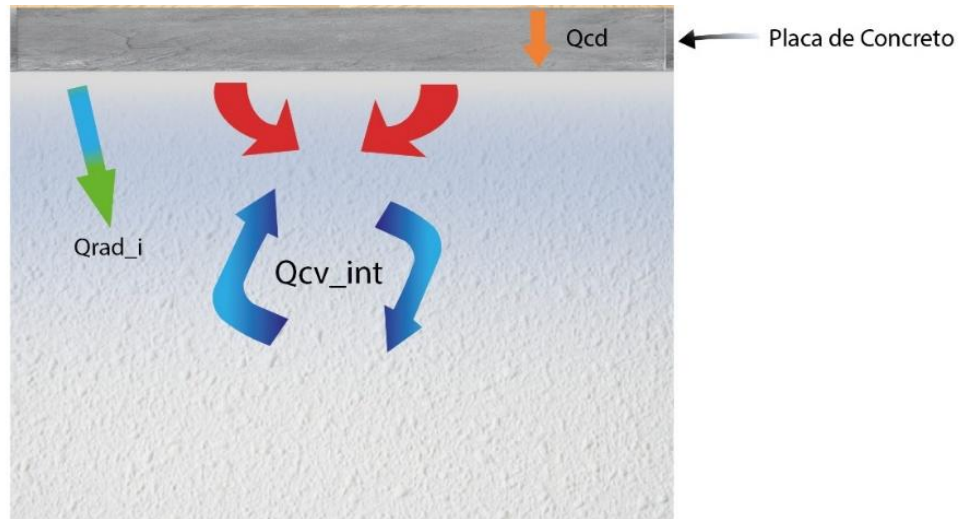
$$E_{ent} - E_{sal} + E_g = \rho v C_p \frac{dT}{dt} \quad (15)$$

En la ecuación **16** se logra apreciar la ecuación general para la transferencia de calor en el interior del laboratorio y en la figura 17 se ilustran los flujos de energía en el interior del recinto.

$$Q_{cd} - Q_{cvi} - Q_{rad} = 0 \quad (16)$$

Figura 17

*Flujos de energía en el interior del recinto tanto para techo verde como techo de concreto*



### Suposiciones:

1. Las paredes del recinto se consideran adiabáticas
2. Flujo estacionario e incompresible
3. Convección natural en interior
4. Se asume que las paredes y el piso del recinto tienen igual emisividad

El calor por conducción que llega a ese punto, se calculó anteriormente en la ecuación 14.

Para el caso de la convección natural en el interior, se emplea una correlación empírica para el cálculo del número de Nusselt en convección natural sobre superficies ecuación 17, según lo propuesto por (Cengel & Yunus). En particular, se utiliza la correlación correspondiente a una superficie inferior caliente de una placa horizontal, tomada de la tabla 9-1 ver **anexo 3**.

$$Nu = 0,27 Ra^{0,25} \quad (17)$$

$$Ra = \left[ \frac{g * \beta (T_{S-INT} - T_{AMB-INT}) L c^3}{\vartheta^2} \right] Pr \quad (18)$$

$$h_{int} = \left( \frac{K}{L} \right) Nu \quad (19)$$

Luego de calcular el Ra y el coeficiente de convección interior en ecuaciones 18 y 19, Se plantea ecuación para el cálculo de la transferencia de calor por convección natural en el interior del recinto mediante la ecuación 20.

$$Q_{CV-int} = h_{int} * AS * (T_{S-INT} - T_{AMB-INT}) \quad (20)$$

Por último, se plantea la ecuación 21 para el cálculo de la radiación incidente en el interior del recinto.

$$Q_{Rad} = \varepsilon \sigma AS (T_{S-INT}^4 - T_{Alr}^4) \quad (21)$$

- Las temperaturas vienen en Kelvin

#### 4.3.4. Balance de energía sobre la superficie exterior con techo verde

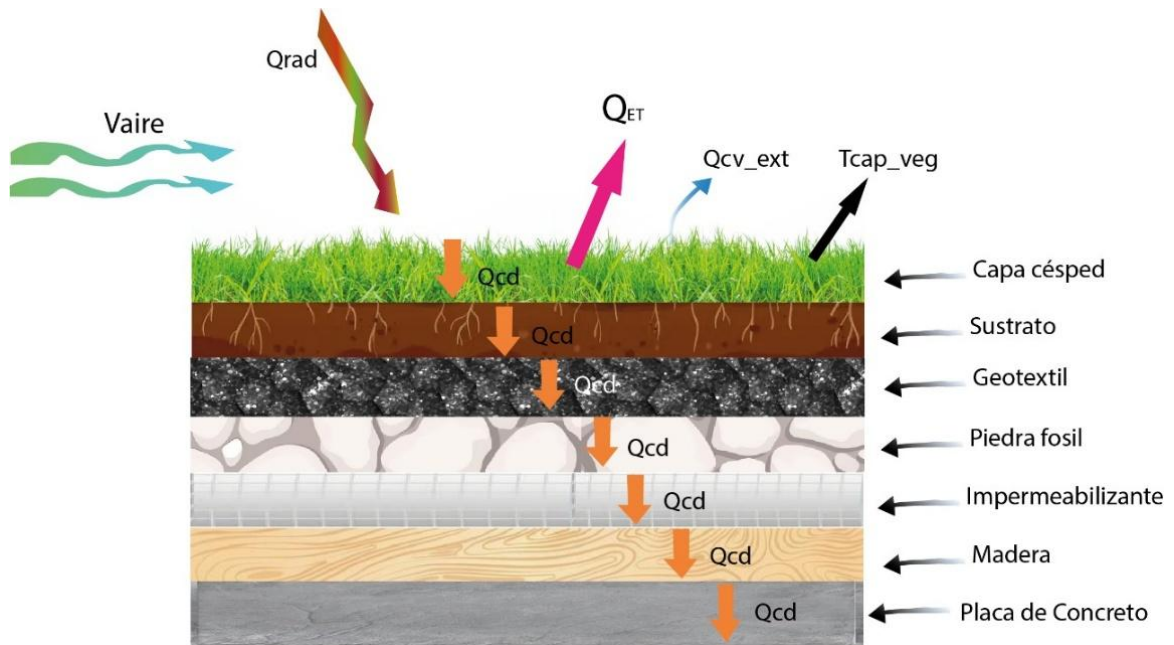
En esta sección se plantea el modelo matemático correspondiente para la implementación del techo verde, incorporando tanto las ecuaciones de transferencia de calor como las relacionadas con el proceso de evapotranspiración. Aunque se mantiene el mismo principio de análisis utilizado en el caso del techo convencional empleando las mismas ecuaciones generales y coeficientes de transferencia de calor, este nuevo enfoque introduce la conducción a través de múltiples capas, característica propia de la estructura del techo verde. Esta formulación permitirá comparar los flujos de calor asociados a cada configuración, con el fin de evaluar en mayor detalle el comportamiento térmico del recinto y determinar el impacto de la implementación de este método de enfriamiento pasivo, ver implementación computacional en el **anexo 2.2**.

$$E_{ent} - E_{sal} + E_g = \rho v C_p \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

En el planteamiento del balance de energía para el techo verde, se adiciona el término de evapotranspiración en la ecuación 22, ya que es propio de este tipo de cubierta y permite representar con mayor precisión los mecanismos de intercambio térmico presentes, en la figura 18 se ilustran los flujos de energía presentes en el recinto con techo verde

Figura 18

*Flujos de energía y componentes del modelo con techo verde*



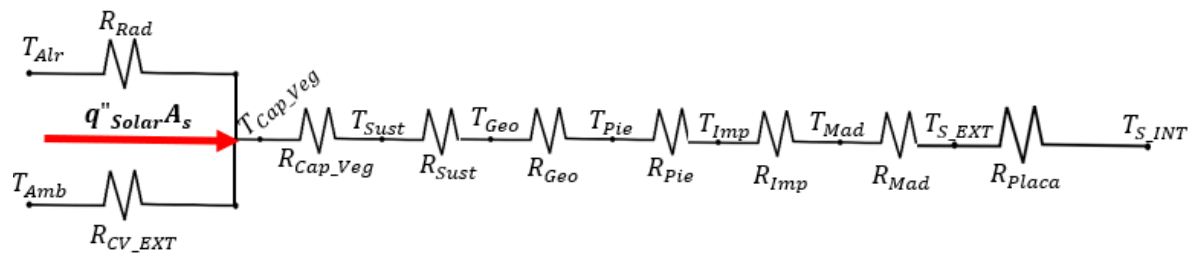
$$Q_{solar} - Q_{cv} - Q_{rad} - Q_{cd} - Q_{ET} = 0 \quad (22)$$

➤ **Suposiciones:**

1. Se aplica el modelo de transferencia de calor sobre una placa plana con temperatura constante en la superficie (isotérmica).
2. Tenemos un flujo estacionario e incompresible.
3. Flujo laminar sobre toda la superficie.
4. Se considera transferencia de calor por radiación, convección forzada exterior y por evapotranspiración.
5. Se plantea el método de resistencias térmicas para la solución del sistema
6. Cambia el área efectiva de transferencia de calor por Radiación y por Convección exterior.

Figura 19

*Diagrama de resistencias térmicas*

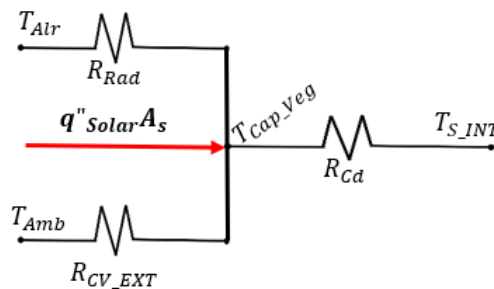


En la figura 19 se presenta la resolución del balance de energía para la superficie exterior del techo verde, sin incluir aún la pérdida de energía asociada al proceso de evapotranspiración del césped.

El diagrama se simplifica al reemplazar todas las resistencias térmicas por conducción por una sola resistencia equivalente, obtenida mediante la suma de las individuales, tenemos la figura 20 simplificada.

Figura 20.

Diagrama simplificado de resistencias térmicas



Se considera un aumento significativo en el área efectiva de transferencia de calor por radiación y convección exterior debido a la presencia de una alta densidad de hojas de césped sobre la superficie. Estas hojas, al estar densamente distribuidas, actúan como pequeñas aletas, incrementando considerablemente la superficie disponible para el intercambio térmico con el entorno. Este fenómeno permite que el sistema disipe más energía.

Para estimar este incremento en el área, se emplean correlaciones empíricas basadas en la geometría de las hojas y su distribución superficial. En las ecuaciones 23 y 24, se presentan las ecuaciones utilizadas para calcular el área efectiva de transferencia de calor, teniendo en cuenta el número de hojas por unidad de superficie y las dimensiones características de cada hoja.

$$A_{hoja} = 2 * L * w \quad (23)$$

Donde:

- L= Longitud de hoja (m)
- W= Ancho de hoja (m)

$$A_{Efe} = A_{hoja} * N^{\circ} \quad (24)$$

Donde:

- $A_{efe}$  = área efectiva de transferencia de calor ( $m^2$ )
- $N^{\circ}$  = número de hojas presentes en el techo

Teniendo en cuenta lo anterior, se calcula la convección exterior, utilizando las ecuaciones **7** y **8**, previamente planteadas para el caso del recinto con techo de concreto.

Además, se formulan las siguientes expresiones: la ecuación **25**, correspondiente a la resistencia térmica por convección, y la ecuación **26**, que permite determinar la transferencia de calor por convección.

$$R_{cv} = \frac{1}{h_{ext} * A_{efe}} \quad (25)$$

$$Q_{cv-ext} = \frac{T_{Capveg} - T_{AMB}}{R_{cv}} \quad (26)$$

Para el cálculo de la radiación, se utilizan las ecuaciones **11,12** y **13**, previamente empleadas para determinar la temperatura de los alrededores.

Sin embargo, el cálculo del flujo de calor por radiación se modifica, ya que ahora se representa mediante un modelo de resistencias térmicas. Este enfoque se describe en las ecuaciones 27,28 y 29.

$$R_{Rad} = \frac{1}{h_{rad} * A_{efe}} \quad (27)$$

$$h_{Rad} = \varepsilon * \sigma * (T_{Capveg}^2 - T_{Atr}^2) * (T_{Capveg} - T_{Atr}) \quad (28)$$

$$Q_{Rad} = \frac{T_{Capveg} - T_{Atr}}{R_{Rad}} \quad (29)$$

Para el cálculo de la conducción (Cengel & Yunus) ponen la ecuación 30.

$$Q_{Cd} = \frac{\Delta T}{\Sigma_{RT}} \quad (30)$$

$$Q_{Cd} = \frac{(T_{Capveg} - T_{SINT})}{\Sigma_{RT}} \quad (31)$$

Donde:

- $\Sigma_{RT}$  = Sumatoria de resistencias térmicas (1/°C)
- $T_{Capveg}$  = Temperatura de la capa vegetal (°C)
- $T_{SINT}$  = Temperatura de la superficie interior de la placa (°C)

A partir de esta expresión, se procede al cálculo de las resistencias térmicas por conducción representadas en el diagrama **1**, utilizando para desde la ecuación **32** hasta la **39**.

$$R_{cd} = \frac{e}{K * A_s} \quad (32)$$

Donde:

- e= Espesor del material (m)
- K= Conductividad térmica W/mk
- As= Área superficial ( $m^2$ )

➤ Resistencia térmica de la capa vegetal

$$R_{Capveg} = \frac{e_{Capveg}}{K_{Capveg} * A_s} \quad (33)$$

➤ Resistencia térmica del sustrato

$$R_{Sust} = \frac{e_{Sust}}{K_{Sust} * A_s} \quad (34)$$

➤ Resistencia térmica del Geotextil

$$R_{Geo} = \frac{e_{Geo}}{K_{Geo} * A_S} \quad (35)$$

- Resistencia térmica de las piedras

$$R_{Pie} = \frac{e_{Pie}}{K_{Pie} * A_S} \quad (36)$$

- Resistencia térmica de la capa impermeabilizante

$$R_{Geo} = \frac{e_{Geo}}{K_{Geo} * A_S} \quad (37)$$

- Resistencia térmica de la madera

$$R_{Mad} = \frac{e_{Mad}}{K_{Mad} * A_S} \quad (38)$$

- Resistencia térmica de la placa

$$R_{Pla} = \frac{e_{Pla}}{K_{Pla} * A_S} \quad (39)$$

Para finalizar el cálculo de los flujos de energía en la superficie exterior del techo verde, se determinan las pérdidas de energía por efecto de la evapotranspiración del césped. Este cálculo se realiza mediante el método de Penman-Monteith, representado en la ecuación **40**, de acuerdo con lo planteado en (Evapotranspiración del cultivo , 1998)

$$ET_0 = \frac{0.408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T_{AMB} + 273} * u_2 * (u_s - u_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0.34u_2)} \quad (40)$$

Donde:

- $ET_0 =$  Evapotranspiración de referencia (mm /día)
- $R_n =$  Radiación neta en la superficie ( $MJ/m^2$  día)
- $G =$  Flujo de calor del suelo ( $MJ/m^2$  día)
- $T =$  Temperatura del aire ( $^{\circ}C$ )
- $u_2 =$  Velocidad del viento (m/s)
- $e_s =$  Presión de vapor de saturación (Kpa)
- $e_a =$  Presión real de vapor (Kpa)
- $\Delta =$  Pendiente de la curva de presión de vapor (Kpa/ $^{\circ}C$ )
- $\gamma =$  Contante psicrométrica (Kpa/ $^{\circ}C$ )

De acuerdo con la ecuación 40, la evapotranspiración de referencia representa una estimación estandarizada obtenida bajo condiciones ideales de disponibilidad hídrica, tipo de vegetación y otras variables climáticas controladas. Sin embargo, para ajustar este valor a las condiciones específicas del sistema en estudio, como el tipo de vegetación utilizada, la disponibilidad real de agua en el sustrato y el estado de desarrollo del césped. Es necesario aplicar factores de corrección ecuación 41.

$$ET_{Real} = K_s * K_c * ET_0 \quad (41)$$

- $K_c =$  Coeficiente de cultivo, representa las características fisiológicas del césped
- $K_s =$  Coeficiente de estrés hídrico, representa limitaciones de agua

Con esto, es posible determinar la cantidad de calor perdido debido a los efectos de la evapotranspiración, como se muestra en la ecuación **42**

$$Q_{ET} = \rho_w * l_v * ET_{Real} \quad (42)$$

En donde:

- $ET_{Real} =$  Flujo de calor perdido por evapotranspiración ( $Kg/m^2 s$ )
- $l_v =$  Calor latente de vaporización ( $J/Kg$ )
- $\rho_w =$  Densidad del agua ( $Kg/m^3$ )

Empezamos calculando la Radiación neta en la superficie  $R_n$

$$R_n = \frac{q''_{Abs} * 86400}{1000000} \quad (43)$$

Para estimar la presión de vapor a saturación  $e_s$ , se utiliza la ecuación **44**

$$e_s = 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27 * T_{AMB}}{T_{AMB} + 237.3}\right) \quad (44)$$

Para el cálculo de la presión de vapor real  $e_a$ , se necesita el valor de la humedad relativa el cual ya fue promediado según la gráfica **3**.

$$e_a = RH * e_s \quad (45)$$

En la ecuación 46 se visualiza la expresión para el cálculo de la pendiente de la curva de presión de vapor ( $\Delta$ ) tomada de (Evapotranspiración del cultivo , 1998).

$$\Delta = \frac{4098 * e_s}{(T_{AMB} + 237.3)^2} \quad (46)$$

En la ecuación 47 se calcula el valor de la constante psicrométrica. Para ello, se requiere el valor de la constante  $a_{psi}$ , el cual se toma de la publicación (Evapotranspiración del cultivo , 1998).

$$\gamma = a_{psi} * P \quad (47)$$

Donde:

- $\gamma =$  *Contante psicrometrica (Kpa/°C)*
- $a_{psi} =$  *Cóntante que depende de la velocidad del viento*
- $P =$  *Presión atmosferica local (Kpa)*

Para calcular el valor de la presión atmosférica local, el documento (Evapotranspiración del cultivo , 1998) propone la ecuación 48, la cual depende exclusivamente de la altitud sobre el nivel del mar del sitio de estudio.

$$P = 101.3 * \left( \frac{293 - 0.0065 * Z}{293} \right)^2 \quad (48)$$

- $Z =$  *Metros sobre el nivel del mar de Bucaramanga (m)*

#### 4.3.5. Balance de energía en la superficie interior del recinto con techo verde

$$E_{ent} - E_{sal} + E_g = \rho v C_p \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

Se cancelan las variaciones de energía en el tiempo y la energía generada, ya que es un proceso estacionario. Ecuación 49

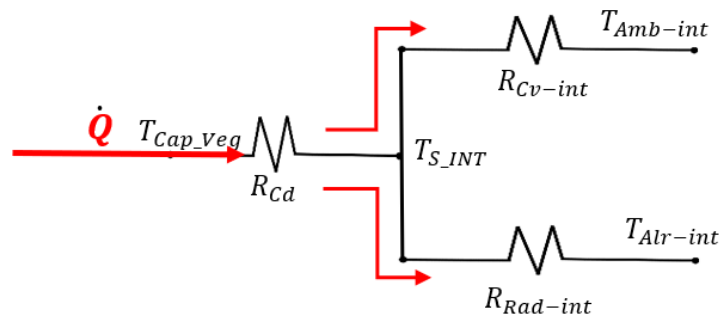
$$E_{ent} - E_{sal} + E_g = \rho v C_p \frac{dT}{dt} \quad (49)$$

$$Q_{cd} - Q_{cv} - Q_{rad} = 0 \quad (50)$$

En la ecuación **50** se presenta la expresión general para la transferencia de calor al interior, junto con la figura **21** equivalente de resistencias térmicas que representa el modelo propuesto y flujos de energía presentes en el interior del recinto.

Figura 21

*Diagrama de resistencias térmicas*



Para el caso de la convección natural en el interior, se emplean las ecuaciones planteadas para el recinto con techo de concreto, ecuaciones **(17,18 y 19)**

Se plantean las ecuaciones para calcular la resistencia térmica por convección y la ecuación de convección para el modelo de resistencias térmicas, en ecuaciones **51 y 52**

$$R_{cvi} = \frac{1}{h_{int} * A_s} \quad (51)$$

$$Q_{cvi} = \frac{T_{S-int} - T_{AMB-INT}}{R_{cvi}} \quad (52)$$

Por último, planteamos ecuaciones **53**, **54** y **55**, donde se calcula la resistencia térmica por radiación, coeficiente y ecuación de transferencia de calor por radiación.

$$R_{Rad-i} = \frac{1}{h_{rad-i} * A_S} \quad (53)$$

$$h_{Rad} = \varepsilon * \sigma * (T_{S-int}^2 - T_{Atr-i}^2) * (T_{S-int} - T_{Atr-i}) \quad (54)$$

$$Q_{Rad-i} = \frac{T_{S-int} - T_{Atr-i}}{R_{Rad-i}} \quad (55)$$

- Las temperaturas vienen en (**K**)

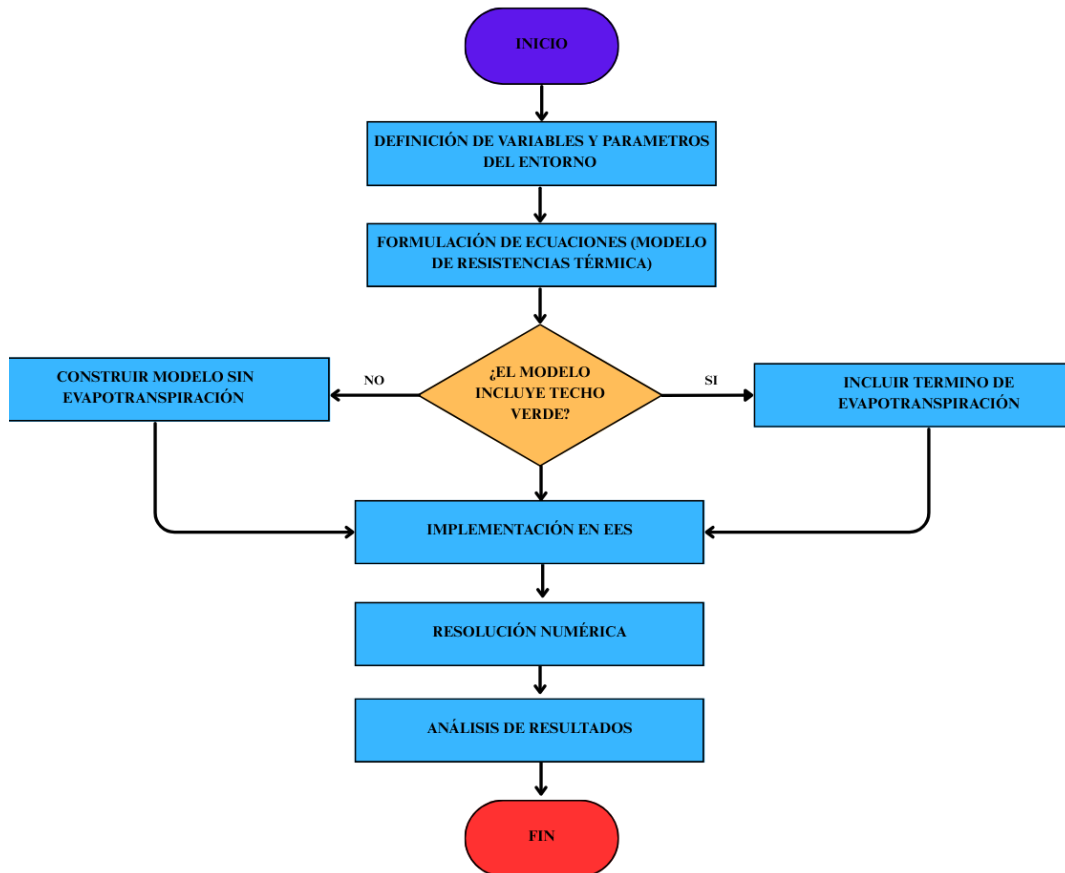
## 2. Implementación computacional

- 2.1. Representar el modelo matemático en un conjunto de ecuaciones a través de métodos computacionales utilizando un software apropiado (por ejemplo, MATLAB, EES, etc.).

En este apartado se representa el modelo matemático mediante un conjunto de ecuaciones formuladas para su resolución computacional en el software EES. Esta implementación permite integrar los distintos mecanismos de transferencia de calor presentes en el sistema, conducción, convección, radiación y evapotranspiración bajo condiciones ambientales definidas. Para ilustrar la secuencia lógica seguida en la codificación y solución del modelo, se presenta a continuación en la figura **22**.

Figura 22

*Flujograma para la implementación computacional del modelo térmico del techo verde*



El estudio se llevó a cabo durante las horas más críticas del día, específicamente entre las 11:30 a.m. y las 2:30 p.m. (considerando los intervalos de 11:30, 12:30, 1:30 y 2:30), periodos en los que la temperatura ambiente alcanza sus valores máximos. Esta elección permite evaluar el desempeño térmico del sistema bajo condiciones de mayor exigencia, lo cual resulta fundamental para validar la efectividad del techo verde en la mitigación de cargas térmica, ver resultados en los

#### 4.4. Fase 2: Validación del modelo matemático a través de pruebas experimentales en los dos modelos a escala reducida.

##### 3. Diseño y construcción de los modelos a escala reducida:

- 3.1. Diseñar dos modelos a escala reducida del laboratorio de combustión que representen el fenómeno físico ocurrido en el laboratorio según características relevantes del sistema como: geometría, material, aislamiento, espesores, temperaturas interiores y exteriores.

### **Diseño y construcción de los modelos**

Para iniciar la fase de prototipado es necesario primero caracterizar el laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica, para poder realizar el estudio y para ello necesitamos conocer sus características como: geometría, material, aislamiento, espesores, temperaturas interiores y exteriores.

A través de un modelo escalado para las dimensiones geométricas con una relación de 1 a 13, para el desarrollo del prototipado, se construye un modelo del laboratorio, para la facilidad del transporte se adopta realizar un prototipo desmontable, donde las paredes el techo y los demás elementos no están fijos para su fácil manipulación.

Las medidas resultantes para el prototipo son de un metro de largo por 60 cm de ancho, y un espesor del techo de 2,5 cm, el techo está fabricado en concreto siendo lo más fiel posible al que podemos encontrar en el laboratorio, como no vamos analizar el intercambio a través de las paredes únicamente a través del techo, estas están fabricadas de madera y aisladas con lana de fibra de vidrio y cubierta con cartulina color blanca para evitar la transferencia de calor a través de las paredes y únicamente estudiar el flujo de energía que sucede a través del techo.

### **4. Realización de pruebas experimentales para la validación:**

- 4.1. Ejecutar pruebas experimentales en los modelos a escala reducida comparando los dos posibles escenarios, uno con techo verde y el otro simulando el estado actual

del laboratorio registrando datos de temperatura, flujos de calor y otras variables relevantes.

#### 4.4.1. Pruebas experimentales

Para la realización de las pruebas experimentales, el prototipo se instaló en la parte superior de la azotea y se tomaron los datos correspondientes mediante instrumentos de medición específicos: un solarímetro para registrar la radiación solar, un anemómetro para la velocidad del viento y una termocupla PT100 para determinar la temperatura ambiental (exterior e interior) y la temperatura superficial (externa e interna) del sistema.

Figura 23

*Toma de datos experimentales*



Asimismo, resulta fundamental comprender el comportamiento del modelo sin techo verde; por ello, se realizaron las mediciones experimentales correspondientes en ambas configuraciones.

En esta primera etapa, se tomaron temperaturas a distintas horas del día junto con los datos de radiación y velocidad del viento ver figura 23. Tras este análisis preliminar, se identificó que el rango horario de mayor interés es entre las 11:30 a.m. y las 2:30 p.m. Por ello, en la siguiente fase experimental se mantuvieron las mismas condiciones y procedimientos para el techo verde, garantizando así la comparabilidad de los resultados.

Este estudio se llevó a cabo en un intervalo de 4 horas, comprendido entre las 11:30 a.m. y las 2:30 p.m., horario en el que se registra la mayor radiación solar y las temperaturas ambientales más elevadas. Para los fines del proyecto, resulta fundamental conocer si, bajo estas condiciones críticas, el techo verde es capaz de reducir la temperatura ver figura 24. Por ello, se seleccionó este rango horario y se realizó el análisis de los datos obtenidos a lo largo de un mes completo.

Figura 24

*Techo verde*



## 5. Comparación y análisis de resultados:

5.1. Comparar los datos experimentales obtenidos en los dos modelos a escala para validar el modelo matemático de la fase anterior a través de un análisis estadístico

En este apartado se presentan y organizan los datos obtenidos experimentalmente a partir de las mediciones realizadas en los modelos físicos a escala. Asimismo, se incluyen los resultados generados mediante la simulación computacional del modelo térmico para el caso del techo verde.

La comparación entre los datos experimentales y las simulaciones permite identificar tendencias térmicas y comprender el comportamiento del sistema en cada configuración. Esta confrontación es clave para evaluar la capacidad del modelo propuesto para reproducir el fenómeno observado, así como para comprender en mayor profundidad el impacto del techo verde en el desempeño térmico del recinto.

### 4.4.2. Modelo de techo de concreto

A continuación, se presenta la Tabla 2, la cual contiene los registros experimentales obtenidos durante la fase de medición. Adicionalmente, en las Figuras 25, 26 y 27 se visualizan las tendencias más representativas de las variables térmicas clave. Estos resultados servirán como base de comparación para validar el modelo computacional y analizar el comportamiento térmico del sistema con techo verde

Tabla 2.

Datos experimentales del techo de concreto

HORA	RADIACIÓN	VEL AIRE	Tamb	Tamb_int	Ts_int	Ts_sup
10:30	736,67	1,05	24,67	28,03	30,97	33,07
11:30	912,03	1,15	26,70	30,13	33,89	35,37
12:30	892	1,59	27,83	31,93	34,80	35,66
1:30	813,47	2,53	28,20	31,50	34,70	34,90
2:30	590	2,40	27,50	30,93	34,53	33,90
3:30	400,67	2,57	26,70	29,26	33,43	32,53

Figura 25

*Radiación total durante el día*

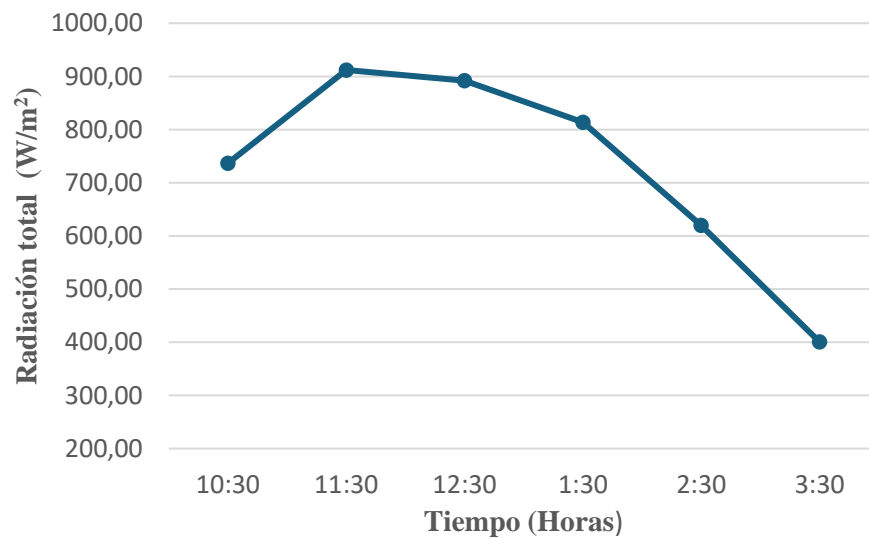


Figura 26

*Temperatura en la superficie exterior de la placa*

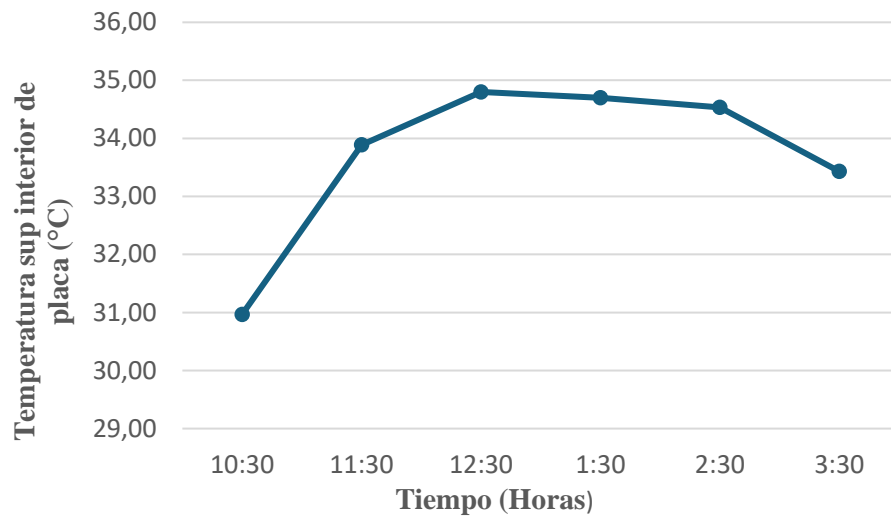
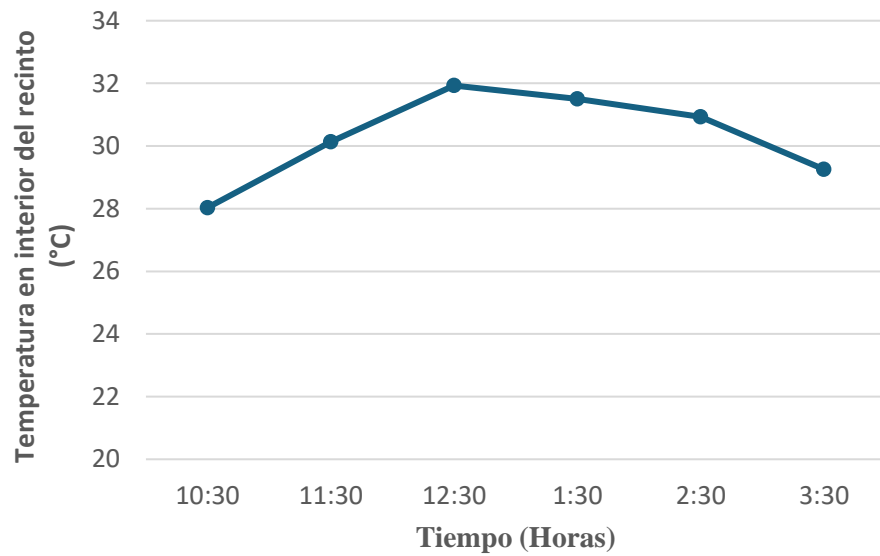


Figura 27

*Temperatura en el interior del recinto con techo de concreto*



#### 4.4.3. Modelo con techo verde

En esta sección se presentan los resultados experimentales del modelo con techo verde, los cuales permiten evaluar su comportamiento térmico frente al modelo convencional. La Tabla 2 recoge los valores registrados durante la medición, y las Figuras 28 y 29 ilustran la evolución de la temperatura en la superficie interior de la placa y en el interior del recinto, lo que facilita la comparación directa entre ambos modelos y permite identificar las ventajas térmicas del sistema con cubierta vegetal.

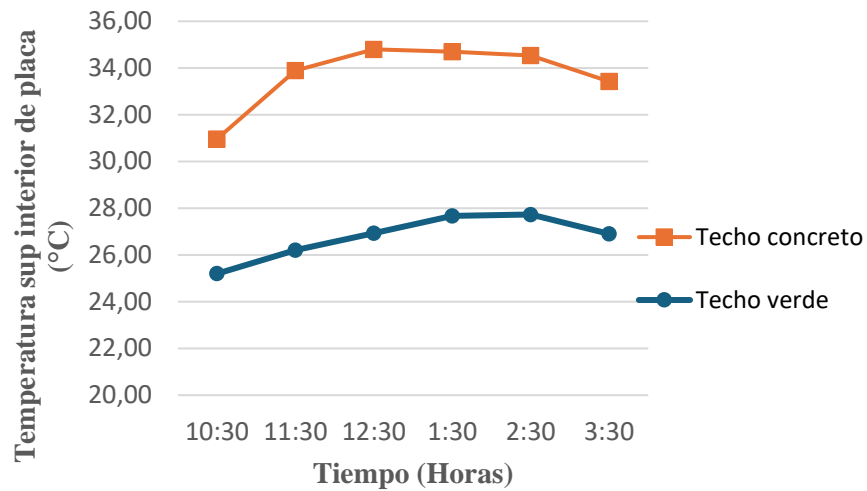
Tabla 3

*Datos experimentales modelo con techo verde*

HORA	RADIACIÓN	VEL AIRE	Tamb	Tamb_int	Ts_int	Ts_sup	T_veg
10:30	730,5	1,1	24,9	24,8	24,9	26,1	31,9
11:30	899,00	1,32	26,53	25,43	26,20	26,97	33,57
12:30	1051,00	1,47	28,67	26,50	26,93	27,87	34,77
1:30	967,33	1,73	28,27	25,73	27,67	28,53	34,43
2:30	733,33	1,77	27,10	25,77	27,73	28,63	33,33
3:30	460,00	2,05	25,60	25,10	26,90	27,80	32,10

Figura 28.

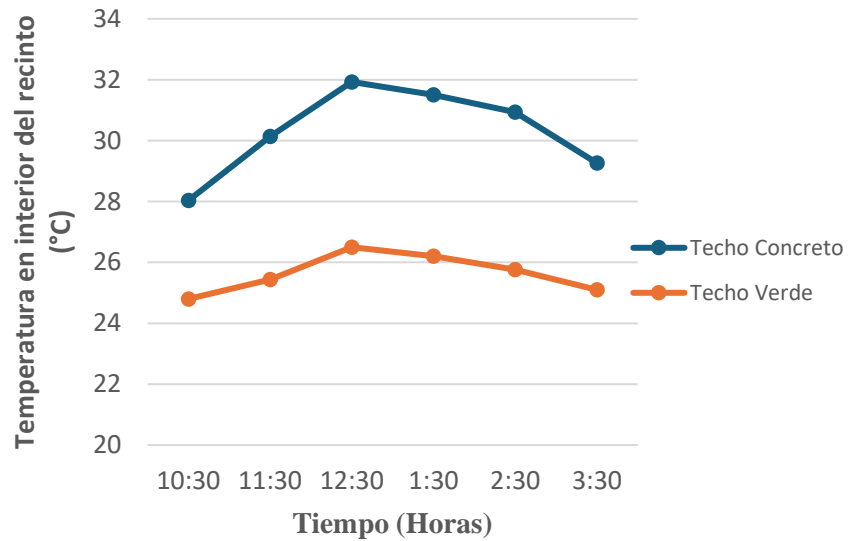
*Variación de la temperatura en la superficie interior de la placa*



De la Figura 28 se observa que el techo verde logra una reducción significativa en la temperatura de la superficie interior de la placa en comparación con el techo de concreto, alcanzando diferencias de hasta 7 °C durante las horas de mayor radiación. Asimismo, se aprecia una curva térmica más estable, con menores fluctuaciones y sin picos de temperatura, lo que refleja un mejor desempeño térmico del sistema. Esta mejora térmica se atribuye a la capacidad del sistema vegetal para absorber parte de la energía incidente, disminuir la ganancia térmica mediante el de enfriamiento evaporativo como la evapotranspiración. Esta disminución contribuye directamente al aumento del confort térmico dentro del recinto.

**Figura 29**

*Variación de la temperatura en el interior del recinto*

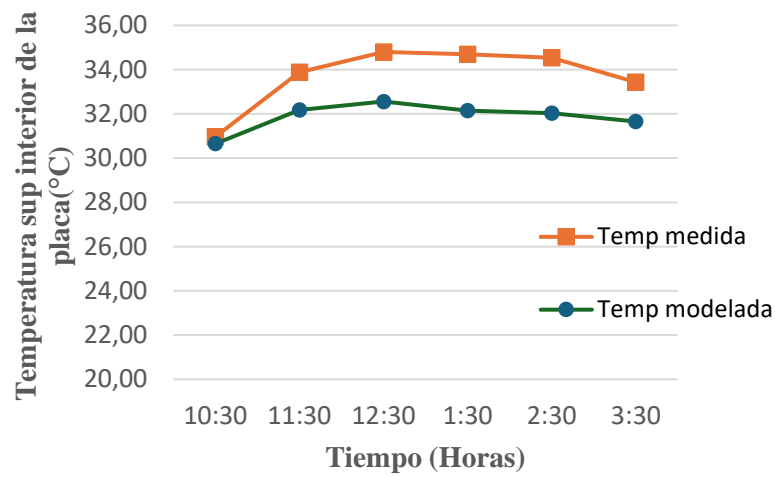


#### 4.4.4. Predicción de la temperatura mediante modelo matemático

En esta etapa, se implementa el modelo matemático con el objetivo de predecir la temperatura en la superficie interior de la placa. Para ello, se integran ecuaciones de transferencia de calor, junto con ecuaciones auxiliares que permiten representar adecuadamente las condiciones del entorno. Esta formulación proporciona una herramienta capaz de estimar el comportamiento térmico de la placa bajo distintas condiciones ambientales. A continuación, se presentan las temperaturas obtenidas a través del modelo matemático para el modelo sin techo verde, figura 30 y modelo con techo verde en la figura 31.

#### Figura 30

*Temperaturas en la superficie inferior de la placa*



En la Figura 30, se observa una concordancia significativa entre ambas curvas, con una diferencia promedio de 2 °C y una desviación máxima de 2,5 °C en las horas centrales del día. El error porcentual absoluto promedio del modelo es de aproximadamente **5.40 %** según tabla 4, lo cual indica una buena precisión del modelo para la predicción de la temperatura en la superficie interior de la placa del techo.

Tabla 4

Temperaturas y error porcentual del modelo matemático implementado en un techo de concreto

HORA	Ts_int	TS_INT EES	%Error
<b>10:30</b>	30,97	30,65	1,02
<b>11:30</b>	33,89	32,18	5,04
<b>12:30</b>	34,80	32,56	6,44

<b>1:30</b>	34,70	32,15	7,35
<b>2:30</b>	34,53	32,03	7,25
<b>3:30</b>	33,43	31,66	5,29
<b>% Error promedio</b>			<b>5,40</b>

Tabla 5

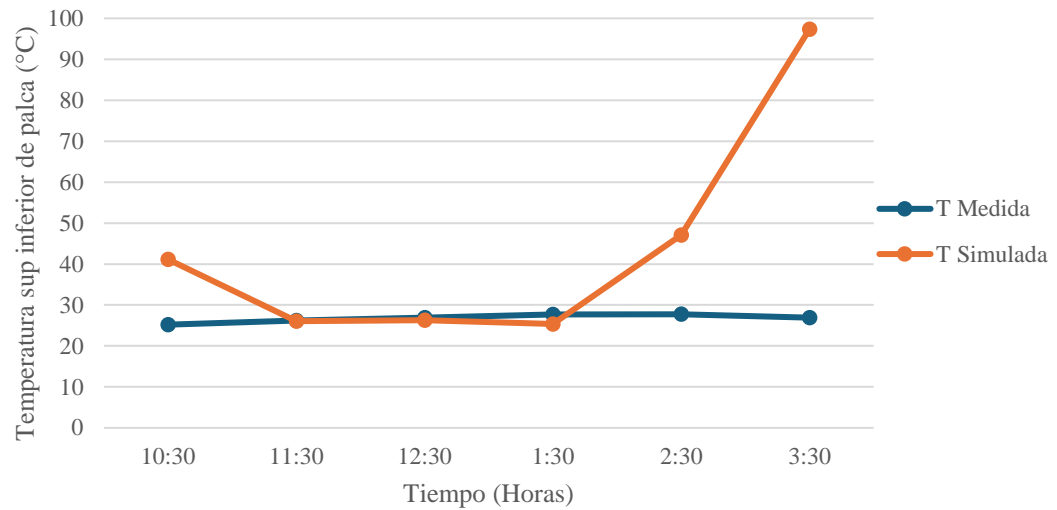
*Temperaturas y error porcentual del modelo matemático implementado en un techo verde*

<b>Hora</b>	<b>Ts_int</b>	<b>Ts_int EES</b>	<b>%Error</b>
<b>10:30</b>	25,2	41,11	63,13
<b>11:30</b>	26,20	26,05	0,57
<b>12:30</b>	26,93	26,29	2,39
<b>1:30</b>	27,67	25,37	8,30
<b>2:30</b>	27,73	47,1	69,83
<b>3:30</b>	26,90	97,37	261,97
<b>% Error promedio</b>			<b>67,70</b>

El comportamiento de los valores presentados en la Tabla 5 se explica con base en el ítem 2 de la sección de análisis y discusión, el cual se desarrolla más adelante

Figura 31.

*Temperaturas en la superficie inferior de la placa para el modelo con techo verde*



Para comprender el comportamiento térmico del sistema de techo propuesto, se realizó un análisis de la distribución de temperatura a lo largo del espesor de sus capas. En la Tabla 6, se presentan los valores de temperatura obtenidos en distintos puntos del espesor del techo, los cuales fueron calculados

Con el objetivo de visualizar de manera más clara la distribución térmica, se presenta la Figura 32, la cual muestra gráficamente la variación de temperatura en función del espesor. Los valores representados fueron obtenidos a partir del modelo matemático, considerando como base la temperatura de la superficie interior. Esta gráfica permite identificar los gradientes térmicos y las zonas críticas donde se concentran las mayores pérdidas de calor.

Tabla 6

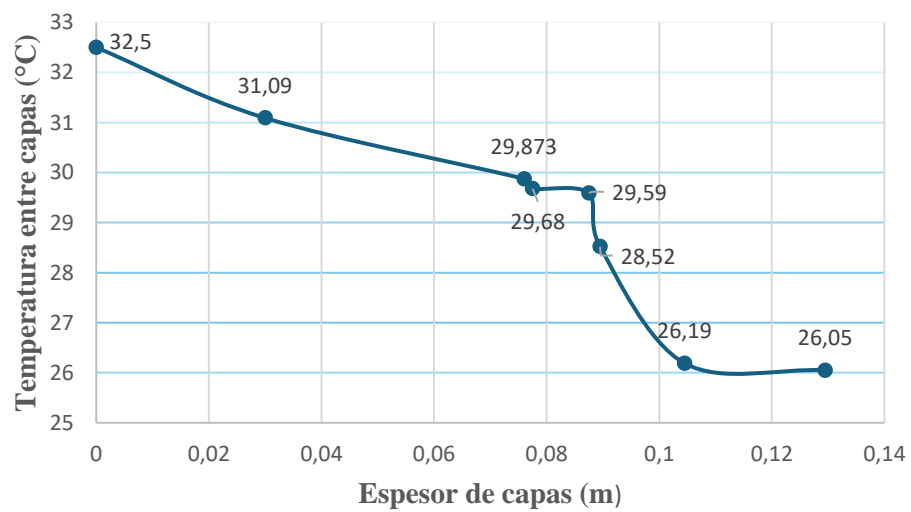
*Temperaturas entre las capas del techo verde*

MATERIAL	TEMPERATURA	ESPESOR (m)
----------	-------------	-------------

<b>Capa Vegetal</b>	32,5	0
<b>Sustrato</b>	31,09	0,03
<b>Geotextil</b>	29,873	0,076
<b>Piedra</b>	29,68	0,0775
<b>Impermeabilizante</b>	29,59	0,0875
<b>Madera</b>	28,52	0,0895
<b>Placa de concreto</b>	26,19	0,1045
<b>T_Int placa concreto</b>	26,05	0,1295

Figura 32

*Distribución de temperaturas entre capas*



Como puede observarse, la temperatura disminuye progresivamente a través del espesor del techo. En particular, se destaca el efecto combinado de la capa impermeabilizante y la madera, ya que entre los espesores correspondientes a estas dos capas (aproximadamente entre 0,0875 m y 0,1045 m), la temperatura experimenta una caída significativa, pasando de 29,59 °C a 26,19 °C. Esta reducción representa una atenuación térmica importante, lo que sugiere que ambos materiales juegan un papel crucial en la disminución del calor transmitido hacia el interior del recinto.

Otro factor clave en la disminución del calor transmitido al interior es la transferencia de calor por convección y radiación, la cual se ve intensificada por el aumento del área efectiva de intercambio térmico. Este incremento se debe a la superficie expuesta de las briznas de césped, que amplía significativamente el área real de contacto con el entorno. Esta condición, observable en las Figuras 33 y 34, favorece una mayor disipación del calor hacia el ambiente, reforzando el efecto aislante del sistema. El calor transferido fue calculado a partir de las temperaturas registradas experimentalmente, lo que permite cuantificar con mayor precisión el comportamiento térmico del sistema.

Figura 33

*Transferencia de calor por Convección exterior en horas críticas*

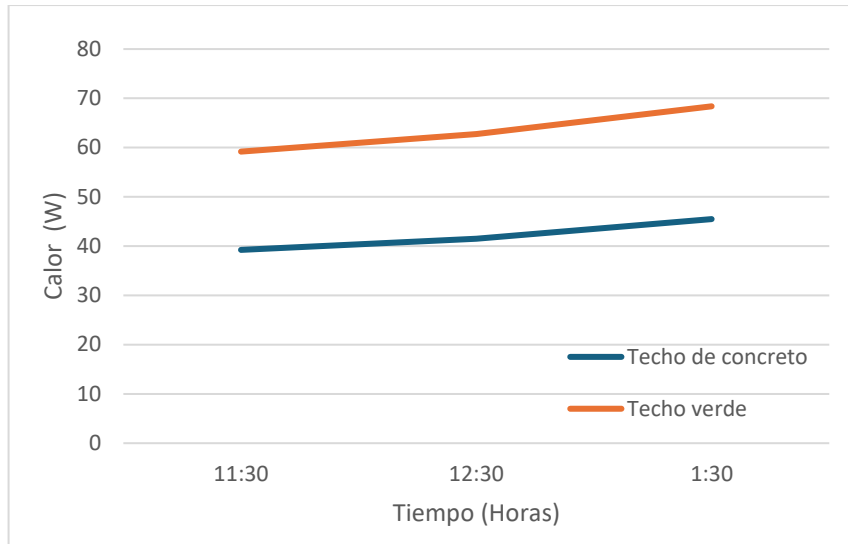
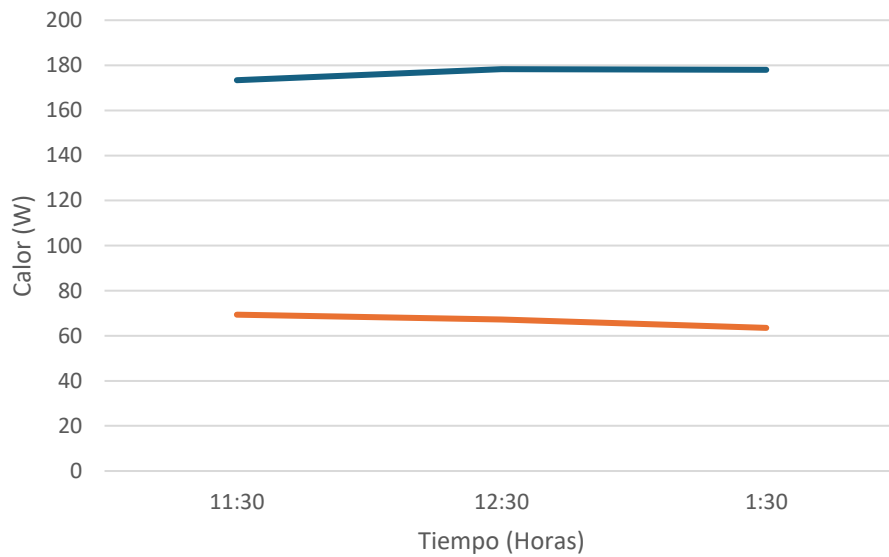


Figura 34

*Transferencia de calor por radiación exterior en horas críticas*



Se puede observar una diferencia notable en las pérdidas de energía entre el modelo con techo verde y el de placa de concreto, atribuida principalmente al aumento significativo del área efectiva de transferencia de calor que se produce al implementar el sistema de techo verde. Este

incremento en el área, generado por la geometría de las briznas de césped, favorece una mayor disipación térmica hacia el entorno, reduciendo así el calor transmitido al interior del recinto.

## **5. Análisis y discusiones del modelo**

En este apartado se realiza un análisis comparativo entre los resultados obtenidos mediante el modelo matemático implementado en EES y los datos experimentales registrados en los prototipos físicos a escala. El objetivo principal es identificar las posibles inconsistencias del modelo, así como las fuentes de error que podrían haber afectado su capacidad predictiva.

### **5.1. Desempeño del modelo en el techo de concreto**

La comparación entre los resultados experimentales y simulados para el techo de concreto revelan una concordancia general adecuada. Sin embargo, durante las horas de mayor radiación solar (aproximadamente entre las 11:30 a. m. y las 2:30 p. m.), se observaron desviaciones de hasta 2 °C en los picos de temperatura interior, con el modelo subestimando ligeramente dichos valores.

Posibles causas:

La radiación solar usada como entrada en el modelo corresponde a un valor promedio diario, mientras que las mediciones reales pueden haber sido afectadas por nubosidad, sombras parciales o reflejos.

El modelo no incorpora la inercia térmica del aire ni de las superficies internas del recinto, lo cual podría afectar la distribución del calor.

A pesar de estas diferencias, el modelo presentó un nivel de error relativo aceptable, inferior al 5 %, lo cual respalda su capacidad para representar adecuadamente el comportamiento térmico del techo convencional.

## 5.2. Limitaciones del modelo aplicado al techo verde

El modelo aplicado al techo verde mostró discrepancias significativas respecto a las mediciones experimentales, especialmente a partir de las 2:30 p. m. En este intervalo, la simulación predice un aumento abrupto de la temperatura superficial superior a 90 °C mientras que los datos experimentales muestran temperaturas cercanas a los 27 °C.

Esta divergencia se atribuye a varias limitaciones técnicas y conceptuales:

a) Falta de variables dinámicas en el sustrato

El modelo no contempla factores clave como la humedad del sustrato, variaciones en la cobertura vegetal o el estado hídrico del sistema. Estos influyen directamente en la capacidad de disipación térmica del techo verde.

b) Sensibilidad anómala a la radiación solar

En simulaciones específicas, se observa un comportamiento no físico: la temperatura superficial aumenta cuando la radiación solar disminuye. Esto se debe a que la evapotranspiración, altamente dependiente de la radiación incidente, se reduce de forma abrupta, mientras que las pérdidas por convección permanecen casi constantes. Para cerrar el balance de energía, el modelo eleva la temperatura superficial, generando resultados poco realistas. Además, como indica Sailor (2008), la evapotranspiración tiende a ser mayor en la mañana cuando el sustrato está más húmedo y disminuye en la tarde debido al secado del suelo y a la regulación estomática de las plantas, lo cual no fue contemplado en esta versión del modelo.

c) Errores instrumentales y de medición

Los sensores utilizados, como el PT100, pueden presentar márgenes de error entre  $\pm 0.5$  °C y  $\pm 1.0$  °C. En condiciones reales de campo, estos errores pueden incrementarse debido a interferencias ambientales o un acoplamiento térmico imperfecto, afectando la precisión de los datos experimentales.

d) Simplificaciones en las condiciones de frontera

El modelo asume condiciones ambientales constantes, como humedad relativa y velocidad del viento. Esta simplificación, aunque necesaria para la resolución computacional, no representa adecuadamente la variabilidad natural del entorno.

### 5.3. 3. Consideraciones finales

A pesar de las discrepancias observadas, el modelo matemático cumple con su propósito principal: establecer una base cuantitativa para predecir el comportamiento térmico de cubiertas convencionales y verdes. El techo de concreto fue modelado con una precisión aceptable (error  $< 5$  %), mientras que, en el caso del techo verde, las diferencias superaron el 63 % en ciertos momentos del día. Esta diferencia resalta la necesidad de incorporar mecanismos adicionales en el modelo, especialmente aquellos relacionados con la dinámica hídrica del sustrato y la respuesta fisiológica de la vegetación.

## 6. Recomendaciones

1. Incluir en el modelo térmico la evolución del contenido de humedad del sustrato, mediante ecuaciones de balance hídrico, con el fin de representar adecuadamente la variación temporal de la evapotranspiración.
2. Implementar un esquema de medición más completo que permita registrar, además de temperaturas y radiación, la humedad relativa, la humedad del sustrato y la velocidad del viento en intervalos cortos, lo cual enriquecerá la base de datos para calibración y validación.
3. Considerar en futuros modelos la conductividad térmica variable del sustrato vegetal en función de su contenido de humedad y compactación, ya que estos factores influyen notablemente en la conducción del calor.
4. Evaluar la implementación del modelo en otros softwares más robustos o con mayor capacidad para el tratamiento de fenómenos transitorios no lineales, como MATLAB o ANSYS.
5. Explorar diferentes especies vegetales para la cubierta, evaluando su coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), profundidad radicular, albedo y capacidad de sombra, lo cual podría optimizar el desempeño térmico del sistema.

### **7. Fase 3: Desarrollar el diseño ingenieril.**

1. Análisis de requisitos y restricciones:
  - a. Identificar los requisitos específicos del techo verde, como drenaje, selección de plantas, mantenimiento y Evaluar las restricciones del entorno, como regulaciones de construcción, condiciones climáticas y locales

### **7.1. Localización**

El análisis para la implementación del techo verde se realizó en la azotea del Laboratorio de Combustión Industrial de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, ubicada en Bucaramanga, Santander. Esta ciudad se sitúa en una terraza inclinada de la Cordillera Oriental, a 7° 08' de latitud Norte respecto al Meridiano de Bogotá y 73° 08' de longitud Oeste de Greenwich. Su altitud es de 959 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura media anual cercana a los 23 °C, (Colombiamania.com, 2021).

Para el desarrollo del proyecto es fundamental considerar las condiciones ambientales propias de la región. En particular, la humedad, la temperatura, el clima y la radiación solar son variables clave para la adecuada selección de las especies vegetales, priorizando plantas nativas o bien aquellas con alta capacidad de adaptación a las condiciones locales (ver anexo VII).

#### **7.1.1. Precipitación y lluvia**

En Bucaramanga, la temporada seca se extiende entre diciembre y marzo, con una probabilidad de precipitación que varía entre el 6 % y el 43 %. Durante diciembre, la probabilidad de lluvia desciende del 43 % al 19 %, y en enero alcanza su valor mínimo, con un promedio de apenas 6,3 días lluviosos al mes, convirtiéndose en el periodo más seco del año.

A partir de finales de marzo, inicia la temporada de lluvias, con una probabilidad que vuelve a incrementarse hasta el 43 %. Esta tendencia se acentúa entre mayo y octubre, cuando las precipitaciones son más frecuentes, alcanzando su punto máximo en octubre, con una probabilidad cercana al 67 %. En este mes, considerado el más lluvioso, se registran en promedio 145 mm de precipitación, en contraste con los 35 mm que promedia enero.

#### **7.1.2. Cantidad de sol**

La mayor cantidad de horas de sol en Bucaramanga se registra entre mayo y julio, con una duración aproximada de 12 horas y 40 minutos diarios. Por el contrario, los meses con menor insolación son noviembre y diciembre, con cerca de 11 horas y 40 minutos de luz solar al día. Esta diferencia, de apenas una hora a lo largo del año, es típica de las regiones cercanas al ecuador, donde la duración del día permanece prácticamente constante en comparación con latitudes más altas.

### **7.1.3. Temperatura**

Bucaramanga presenta una temperatura templada durante aproximadamente 2,2 meses, entre julio y septiembre, con promedios diarios máximos cercanos a los 27 °C. Marzo es el mes más cálido del año, registrando temperaturas que oscilan entre los 21 °C y los 27 °C. Por su parte, la temporada más fresca se extiende de octubre a diciembre, cuando las temperaturas experimentan un leve descenso, manteniendo un clima confortable y estable.

### **7.1.4. Humedad**

La humedad es elevada durante un periodo de aproximadamente 9,7 meses, que se extiende desde marzo hasta finales de diciembre. En este intervalo, las condiciones ambientales resultan bochornosas, opresivas o incómodas cerca del 60 % del tiempo. Mayo es el mes que presenta mayor sensación de bochorno, mientras que febrero es el menos afectado por este tipo de condiciones.

### **7.1.5. Radiación solar**

El periodo con mayor incidencia solar en la región se extiende por aproximadamente 2,5 meses, entre enero y marzo, con una radiación diaria promedio superior a 5,4 kWh/m<sup>2</sup>. Febrero es el mes que presenta los mayores valores de radiación. Por el contrario, la época menos soleada abarca cerca de dos meses, desde finales de septiembre hasta finales de noviembre, registrándose una energía incidente promedio cercana a 4,5 kWh/m<sup>2</sup>.

### **7.1.6. Clima**

En conclusión, Bucaramanga se caracteriza por veranos cortos y calurosos, con niveles de humedad que pueden percibirse como bochornosos u opresivos, mientras que los inviernos también son breves, con temperaturas agradables y estables. En general, el clima es húmedo, con alta probabilidad de precipitación y una notable cobertura nubosa a lo largo del año. Las temperaturas se mantienen en un rango entre los 20 °C y los 27 °C, con muy pocas variaciones por debajo o por encima de estos valores, lo que favorece la implementación de sistemas que requieren condiciones climáticas moderadas y constantes

## **7.2. Análisis de requisitos y restricciones**

Para garantizar la sostenibilidad del sistema a largo plazo, es fundamental seleccionar el tipo de techo verde considerando tres criterios clave: alta resistencia a la exposición solar, bajo requerimiento de mantenimiento y uso de especies con raíces poco profundas, adecuadas a las condiciones climáticas del entorno. Esto nos conduce a implementar un techo verde con vegetación nativa, destacando la importancia de una correcta identificación y selección de las especies.

Asimismo, las especificaciones técnicas para el sistema de drenaje, el plan de mantenimiento y las restricciones propias del proyecto se determinarán en la siguiente etapa, en

función del tipo de techo verde elegido. Cada modalidad extensiva, semi-intensiva o intensiva presenta requerimientos particulares en cuanto a estructura, sistema de drenaje y cuidados. Por ello, tanto la capacidad portante de la cubierta como la elección de las plantas dependerán directamente de las condiciones ambientales y las características físicas del lugar.

Tabla 7

*Tipos de techo verde*

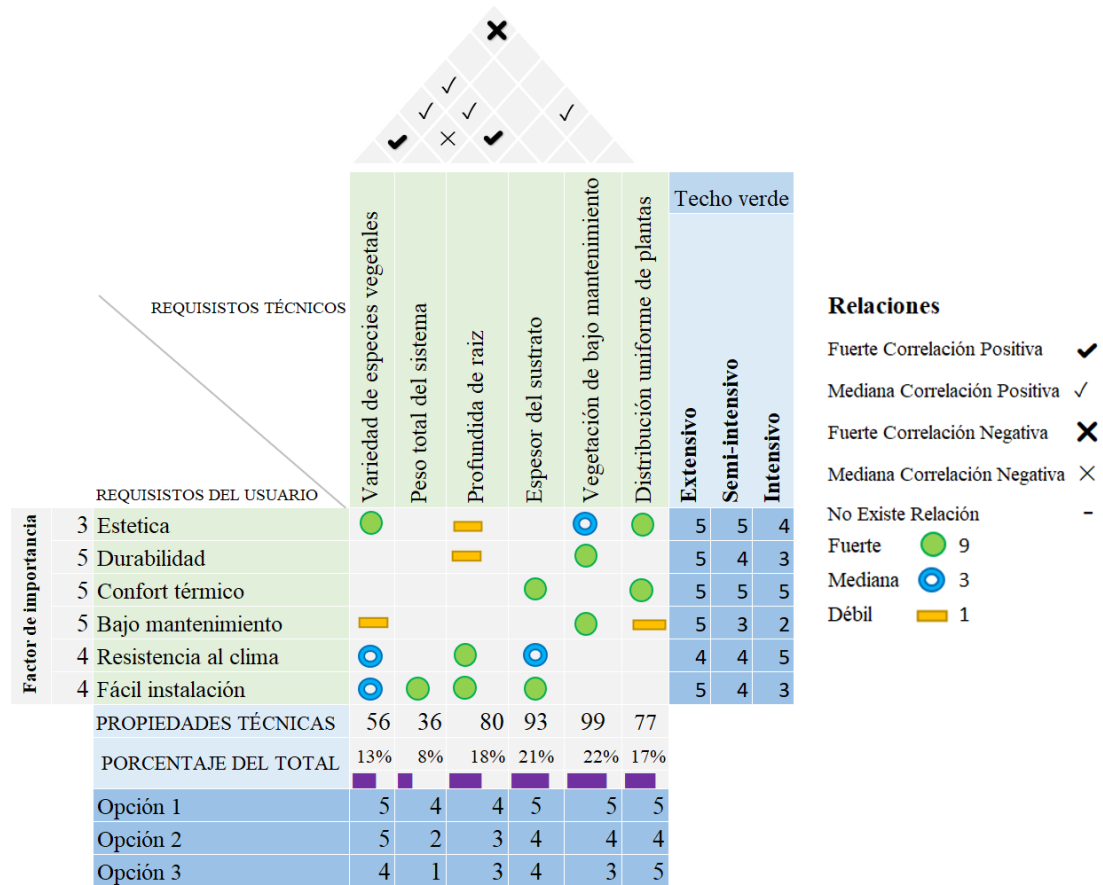
Características	Extensivos	Semi intensivos	Intensivos
<b>Espesor del sustrato</b>	7 cm a 20 cm	12 cm a 30 cm	20 cm a 60 cm
<b>Peso adicional</b>	60 a 140 $kg/m^2$	120 a 250 $kg/m^2$	250 a 400 $kg/m^2$
<b>Tipo de vegetación</b>	Musgo, hierba y pasto (suculentas y herbáceas)	Musgo, hierba, pasto y arbustivas	Musgo, hierba, pasto, arbustivas y arboles
<b>Mantenimiento</b>	Simple – Poco	Moderado – frecuente	Complejo - constantemente
<b>Riego</b>	Poco frecuente	Constante	Constante
<b>Demanda</b>	Alta	Baja	Baja

**7.2.1. Matriz QFD aplicada a el tipo de techo verde**

La matriz QFD se emplea con el propósito de identificar la alternativa más adecuada para la fabricación del prototipo. En este análisis se evaluaron tres opciones: techo verde extensivo, semi-intensivo e intensivo ver figura 35. El proceso busca garantizar que los criterios de confort térmico y bajo mantenimiento sean los factores determinantes en la selección, priorizando la alternativa que ofrezca el mejor desempeño frente a estos requerimientos.

Figura 35.

QFD aplicada al tipo de techo verde



En conclusión, el techo verde extensivo constituye la opción que mejor se adapta a los requisitos específicos del proyecto, ya que ofrece bajo mantenimiento, alta resistencia a la radiación solar y un excelente desempeño en términos de confort térmico.

2. Diseño conceptual y selección de alternativas:

- Identificar los subsistemas necesarios para la realización del diseño del techo verde
- Selección de alternativas para el desarrollo de los subsistemas teniendo en cuenta los requisitos y restricciones del entorno.

**Subsistemas y selección de alternativas**

En esta fase se procederá a la caracterización de las distintas capas que conforman el techo verde, con el objetivo de garantizar una adecuada selección y un desempeño óptimo a largo plazo. Para ello, se priorizarán criterios como la facilidad de adquisición de los materiales, su calidad y el cumplimiento de las especificaciones técnicas requeridas para este tipo de sistemas.

### **7.2.2. Matriz QFD aplicada a la selección de la especie vegetal**

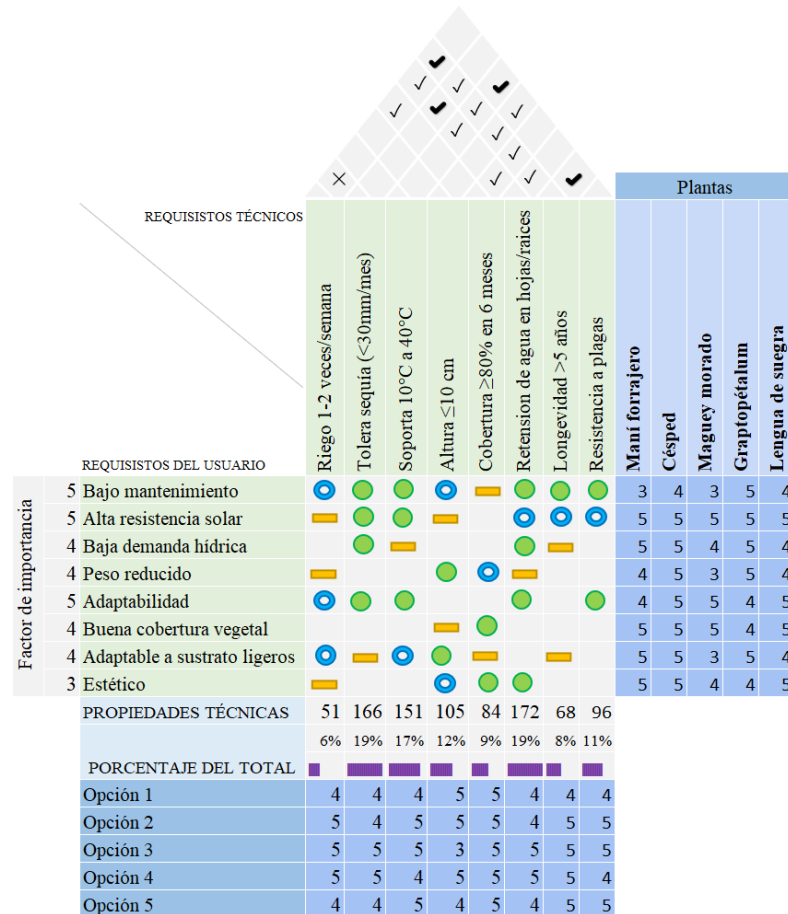
El siguiente paso del proyecto consiste en la selección de las plantas. Para ello, es fundamental priorizar especies nativas de la región que cumplan con los siguientes criterios: resistencia a la radiación solar, alta capacidad de adaptación y bajo requerimiento de mantenimiento ver figura 36.

Con este objetivo, se realizaron visitas a viveros, se consultaron fuentes oficiales de la alcaldía municipal y se recopiló información a través de jardineros locales. Como resultado, se identificó una amplia variedad de especies adecuadas para el techo verde, entre las que se incluyen: mañanitas (*Portulaca grandiflora*), venturosa, distintas variedades de lengua de suegra, maní forrajero, gualanday, hierba sansevieria, césped, diversas suculentas, palo de Brasil, aloe vera, anturio, hiedra, maguey morado y graptopétalo, entre otras.

Para este proyecto, se priorizarán las especies con raíces suculentas y poco profundas, ya que ofrecen ventajas en términos de adaptabilidad y facilidad de mantenimiento. Entre las especies más adecuadas que se evaluarán se encuentran el maní forrajero, el césped, el maguey morado, el graptopétalo y la lengua de suegra.

Figura 36.

*QFD aplicada las plantas seleccionadas*



Entre las opciones, tenemos como resultados 3 plantas que cumplen con los criterios evaluados, siendo el césped la opción ganadora por su alta capacidad de resistir fuertes cambios, a ser pisado, con bajo mantenimiento y expectativa de vida duradera.

### 7.2.3. Matriz QFD aplicada a el Drenaje

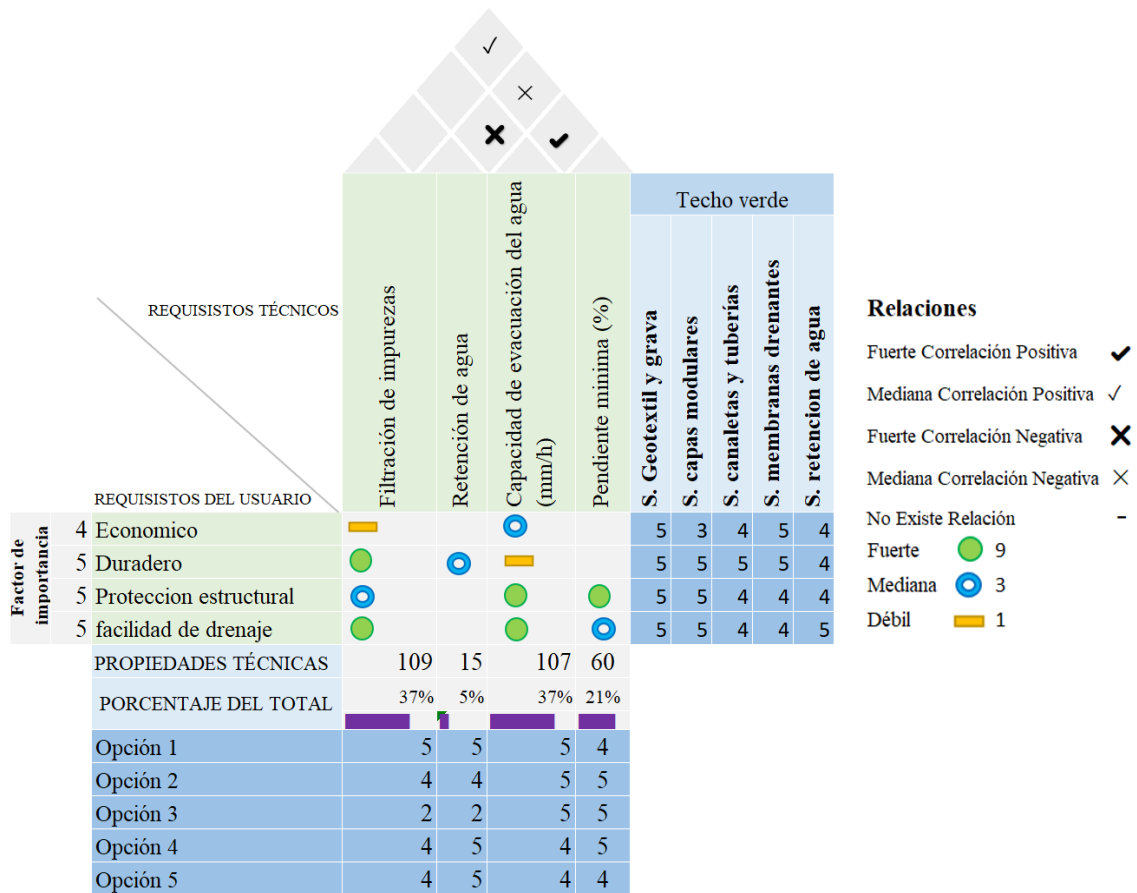
Para los sistemas de drenaje del techo verde se han evaluado cinco alternativas principales:

- Sistema de drenaje con geotextil y grava.
- Sistema de drenaje modular mediante paneles drenantes.
- Sistema de drenaje con canaletas y tuberías.
- Sistema de drenaje con membranas drenantes.

- Sistema de drenaje con retención de agua.

Figura 37.

QFD aplicada al sistema de drenaje



Si bien cualquiera de los sistemas mencionados podría emplearse en el techo verde propuesto para el laboratorio, su selección depende de los requerimientos específicos del proyecto. En este caso, se han priorizado tanto los aspectos técnicos como los económicos, por lo que la opción más adecuada es un sistema de geotextil y grava, ampliamente utilizado en techos verdes ver figura 37.

Este sistema resulta especialmente apropiado para pendientes mínimas y se adapta correctamente a la inclinación requerida en el proyecto. Dado que el techo es de tipo extensivo, la pendiente mínima definida en torno a los 6 grados es suficiente para garantizar un buen comportamiento del sistema, evitando acumulación de agua y facilitando su correcto drenaje.

#### **7.2.4. Matriz QFD aplicada a el impermeabilizante**

Los impermeabilizantes líquidos son revestimientos fluidos, similares a una pintura espesa o resina, que al curar (secar) forman una membrana continua, flexible y sin juntas, completamente impermeable. Existen diferentes tipos, entre los que destacan los poliuretanos, acrílicos, resinas epóxicas e híbridas (poliureas) ver figura 38.

Sus principales ventajas son su fácil aplicación, alta adherencia y bajo peso. Como desventajas, su desempeño depende directamente de una adecuada preparación del sustrato y de condiciones ambientales específicas (humedad y temperatura), además de que algunos son sensibles a la radiación UV y no ofrecen resistencia contra la penetración de raíces.

Por su parte, las membranas asfálticas consisten en una base de fibra de vidrio o poliéster impregnada con asfalto modificado, que se instala mediante calor o en versiones autoadhesivas, formando una barrera impermeable y continua. Existen dos tipos principales: las APP (Atactic Polypropylene), que son más rígidas, resistentes a los rayos UV y adecuadas para climas cálidos, y las SBS (Styrene-Butadiene-Styrene), que son más flexibles y elásticas, adaptándose mejor a climas fríos. Su espesor varía entre 1, 2 y 4 mm. Estas membranas resultan ideales para techos verdes, ya que también evitan la penetración radicular.

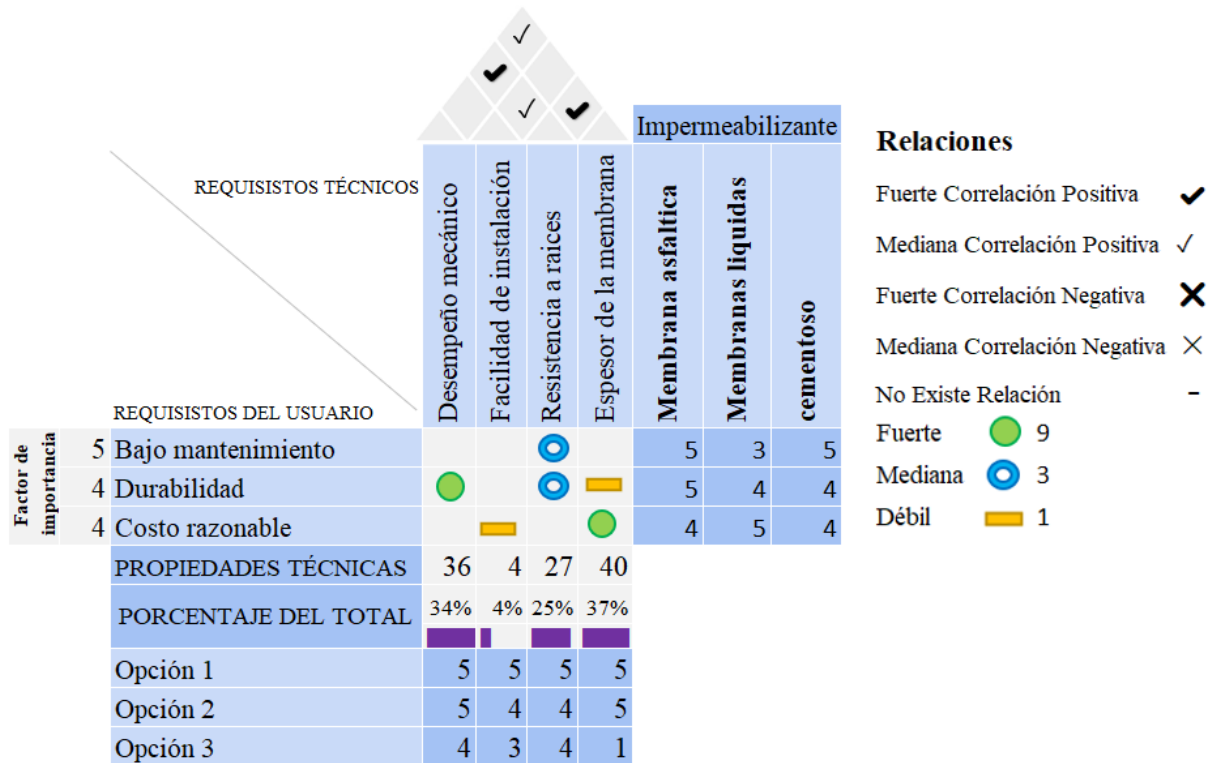
Los impermeabilizantes cementosos son morteros modificados con polímeros y aditivos que se preparan con agua hasta obtener una pasta, aplicable con brocha o rodillo. Tras su curado, forman una barrera rígida o semiflexible contra la humedad. Existen dos tipos: rígidos y flexibles.

Entre sus ventajas se destacan la facilidad de aplicación, buena adherencia, nula toxicidad y, en el caso de los flexibles, la capacidad de tolerar fisuras pequeñas. Sin embargo, entre sus desventajas figura que algunos son poco flexibles, no recomendables para exteriores expuestos a radiación solar intensa o movimientos estructurales, y pueden fisurarse si el soporte sufre deformaciones.

Su aplicación incluye la preparación previa del sustrato, la mezcla del producto según las proporciones indicadas por el fabricante, su aplicación uniforme y el adecuado tiempo de curado para garantizar su desempeño.

Figura 38.

*QFD aplicada al sistema de impermeabilización*



El sistema genera una carga estructural adicional sobre la edificación, la cual varía en función de la clasificación del techo verde implementado. Asimismo, es imprescindible considerar las tareas de mantenimiento regular, que incluyen riego, poda y eventual reemplazo de especies vegetales. Por ello, resulta clave realizar una adecuada selección de la capa de vegetación en función de las condiciones climáticas locales, así como prever las condiciones óptimas de drenaje y riego.

De igual manera, es fundamental tener en cuenta los costos de diseño, los requerimientos operativos y las necesidades de mantenimiento, especialmente cuando se evalúa la posibilidad de replicar el sistema a mayor escala o implementarlo en otros proyectos.

3. Diseño detallado y evaluación económica: de los ítems

- a. Elaborar planos y especificaciones detalladas para la construcción del techo verde, incluyendo detalles de la estructura, sistemas de riego y drenaje, y selección de plantas. (redactar mejor y agregar la parte de mantenimiento)

### **7.3. Diseño**

En esta fase se desarrolla el diseño del techo verde para el laboratorio de combustión, considerando las condiciones específicas del lugar, las recomendaciones de la escuela y los criterios de selección definidos a partir del análisis del prototipo. Para ello, se emplea modelado 3D con el software SolidWorks 2024.

El proyecto se ha dividido en dos componentes principales. El primero corresponde a la estructura metálica, dimensionada para garantizar la resistencia y estabilidad necesarias para soportar el peso propio de las capas que conforman el sistema de techo verde.

La segunda parte abarca la configuración del techo verde, basada en el diseño del prototipo previamente evaluado. Esta solución será escalada a las dimensiones reales del laboratorio de combustión, replicando la disposición y las características de cada capa del sistema. Asimismo, se ha establecido un porcentaje de inclinación óptimo que favorece el correcto escurrimiento del agua y evita encharcamientos, asegurando un desempeño eficiente y duradero del techo verde.

#### **7.3.1. Diseño de la estructura metálica base**

Para el diseño de la estructura metálica se consideraron diversos criterios, entre los cuales destacan minimizar la invasión a la superficie del techo del laboratorio preservando su impermeabilización, utilizar un material estructural adecuado para condiciones exteriores y

garantizar que la geometría proporcione la rigidez y resistencia necesarias frente a esfuerzos normales, flexión y compresión.

La geometría seleccionada corresponde a una configuración común en este tipo de construcciones, basada en perfiles rectangulares de 6 metros de longitud con sección transversal rectangular de 3,84 cm<sup>2</sup> y 2 mm de espesor. Estos perfiles, fabricados en acero galvanizado, ofrecen mayor resistencia a la corrosión y una adecuada durabilidad a la intemperie. La unión entre los componentes se realiza mediante escuadras metálicas de 5 mm de espesor, que aseguran una sólida fijación entre perfiles.

La base de apoyo del techo cuenta con escuadras perforadas para tornillos y tuercas tipo M8, que permiten anclar la estructura al techo mediante perforación, espaciadas aproximadamente cada 1,5 metros. Para la unión entre las caras de los perfiles se utilizan platinas rectangulares de 5 mm de espesor, y las columnas están distribuidas a intervalos de 3 metros. Asimismo, el techo presenta una inclinación del 2,62 % (equivalente a unos 1,50°), logrando una altura de 34 cm hasta la base del techo verde y una longitud total de 13 metros ver figura **39**.

Figura 39.

*Base de estructura metálica*



7. Perfil metálico (1 m)
8. Perfil metálico (6m)

### **7.3.2. Diseño techo verde**

En la fase de prototipado de los modelos empleados para el estudio de la transferencia de calor, se consideró el diseño y la adecuada selección de cada capa que conforma el sistema de techo verde. A partir de los resultados obtenidos, para el diseño final del laboratorio se propone escalar el prototipo desarrollado, manteniendo tanto el criterio de selección de especies vegetales como la composición de las demás capas que lo integran (ver figura en anexo VIII).

Como diferencia principal, este diseño incorpora una base de soporte fabricada en placa metálica, cuya función es proporcionar mayor capacidad estructural para el peso del sistema y un refuerzo adicional en términos de impermeabilización. La elección de la placa metálica obedece a su practicidad, durabilidad y resistencia, evitando el contacto directo con la cubierta original y facilitando su uso en estructuras livianas, como es el caso del techo extensivo propuesto. Esta placa metálica fue seleccionada a partir del catálogo de un fabricante que garantiza su durabilidad y comportamiento en servicio.

El sistema final presenta una inclinación del 2,62 %, adecuada para su magnitud, logrando una altura final de 34 cm y asegurando tanto la evacuación del agua sin encharcamientos como la estabilidad del sustrato, evitando la necesidad de capas antideslizantes adicionales.

Para la etapa inicial de establecimiento del sistema, se plantea un plan de riego constante en un período estimado entre uno y dos meses para favorecer el enraizamiento de las plantas en el sustrato. Una vez superado este periodo, el mantenimiento se limitará a riegos puntuales cuando

la vegetación, tras inspección visual, presente señales de deshidratación. Asimismo, se recomienda la posibilidad de instalar una estructura externa para la colocación de una malla polisombra en días de alta radiación solar, evitando el estrés hídrico y asegurando un desarrollo óptimo del sistema verde.

- b. Realizar un análisis de costos para estimar el presupuesto total del proyecto, incluyendo materiales, mano de obra y otros gastos asociados.

## 7.4. Costos

### 7.4.1. Materiales

Para determinar el costo de los materiales, se utilizaron valores de referencia del mercado, calculados en función de la unidad de medida más adecuada para cada producto (área, cantidad o volumen). Multiplicando la cantidad requerida por el precio unitario, se obtuvo un costo total estimado para cada material. Los datos de precios fueron recopilados tanto de proveedores locales en la región como de tiendas especializadas y fabricantes a través de fuentes en línea.

Tabla 1

*Costo de los materiales del techo*

ELEMENTO	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR	TOTAL
<b>CESPED</b>	m <sup>2</sup>	100,75	\$ 10.000	\$ 1.007.500,00
<b>SUSTRATO</b>	m <sup>3</sup>	6,045	\$ 50.000	\$ 302.250,00
<b>GEOTEXTIL</b>	m <sup>2</sup>	100,75	\$ 28.500	\$ 2.871.375,00
<b>DRENAJE</b>	m <sup>3</sup>	6,045	\$ 120.000	\$ 725.400,00

<b>IMPERMEABILIZANTE</b>	m <sup>2</sup>	100,75	\$ 15.000	\$ 1.511.250,00
<b>PLACA METALICA</b>	m <sup>2</sup>	100,75	\$ 91.547	\$ 9.223.360,25
<b>PERFIL RECTANGULAR</b>	Unidad	34	\$ 149.000	\$ 5.066.000,00
<b>TUERCA M8</b>	Unidad	32	\$ 1.650	\$ 52.800,00
<b>TORNILLO M8 X 60 MM</b>	Unidad	64	\$ 332	\$ 21.248,00
<b>ESCUADRA METALICA</b>	Unidad	100	\$ 1.000	\$ 100.000,00
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>\$ 20.881.183,25</b>

#### 7.4.2. Construcción

Para la construcción de la estructura y el sistema de techo verde, se requiere un equipo técnico conformado por un mínimo de dos personas, con un tiempo estimado de ejecución de 8 días y una jornada laboral de 8 horas diarias. Al menos uno de los operarios deberá contar con habilidades en procesos de soldadura. Asimismo, el personal debe disponer de las herramientas necesarias para la construcción, como martillos, llaves, equipos de medición y demás implementos requeridos para garantizar la calidad y seguridad del montaje.

Tabla 9.

*Costo de la construcción del techo*

<b>TALENTO HUMANO</b>	<b>COSTO POR DÍA LABORAL</b>	<b>COSTO TOTAL DE 8 DIAS</b>
<b>SOLDADOR</b>	\$ 61.000	\$ 488.000

<b>OPERARIO TÉCNICO</b>	\$ 54.117	\$ 432.936
-------------------------	-----------	------------

### 7.4.3. Mantenimiento

El plan de mantenimiento se divide en dos etapas fundamentales. La primera, de vital importancia, consiste en regar la capa vegetal cada mañana durante un período aproximado de 24 días, favoreciendo que las plantas se enraícen correctamente en el sustrato. Asimismo, es importante monitorear las condiciones ambientales y, en caso de radiación solar directa excesiva, considerar la instalación de una malla polisombra para evitar el estrés térmico.

Una vez transcurrido este período inicial, la frecuencia de riego se reduce y se realiza únicamente cuando, tras una inspección visual, la vegetación presente signos evidentes de deshidratación o vulnerabilidad.

Tabla 10.

*Costo anual de mantenimiento preventivo*

ELEMENTO	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR	TOTAL
<b>OPERARIO</b>	Unidad	1	\$ 54.117	\$ 162.351
<b>AGUA</b>	m <sup>3</sup>	6.9	\$ 5.812	\$ 40.078
<b>POLISOMBRA</b>	m <sup>2</sup>	100,75	\$ 1.695	\$ 169.475

## 8. Conclusiones

- El modelo matemático formulado en EES permitió calcular perfiles de temperatura, coeficientes de transferencia y pérdidas por radiación de manera estructurada y coherente. En el caso del techo de concreto, el modelo presentó un error porcentual absoluto promedio inferior al 5 %, validando su precisión y robustez. No obstante, al aplicarlo al techo verde, surgieron discrepancias importantes, con errores superiores al 63 % en ciertos momentos del día. Estas diferencias se atribuyen a simplificaciones como la omisión de la dinámica hídrica del sustrato y el proceso de evapotranspiración, lo cual revela la necesidad de incorporar en futuras versiones variables como el contenido de humedad, el grado de cobertura vegetal y condiciones de contorno más realistas. A pesar de estas limitaciones, el modelo cumple su función principal como herramienta de predicción térmica de distintas cubiertas.
- Las pruebas experimentales en los dos modelos a escala permitieron evaluar el comportamiento térmico real de las cubiertas, validando parcialmente la precisión del modelo computacional. Las mediciones demostraron que el techo verde reduce hasta en 7 °C la temperatura interior de la placa en comparación con el techo convencional, especialmente en las horas más críticas del día. También se observó una mayor estabilidad térmica a lo largo de la jornada. Sin embargo, el modelo mostró comportamientos no coherentes en algunos escenarios, como el incremento de temperatura al disminuir la radiación solar, lo que evidencia limitaciones en la representación de la evapotranspiración. Adicionalmente, se identificó que las mayores tasas de enfriamiento ocurren en la mañana debido a la mayor disponibilidad de humedad en el sustrato. Aunque los errores

instrumentales, como los asociados a sensores tipo PT100, introducen desviaciones, estas se mantienen dentro de márgenes aceptables.

- El diseño del sistema de techo verde se planteó considerando criterios estructurales, térmicos y de mantenimiento. Se estableció que la pendiente no debe superar el 4 % para evitar el deslizamiento del sustrato y garantizar la funcionalidad térmica del sistema sin aumentar innecesariamente su altura. Además, se identificó que un sistema extensivo, con vegetación de bajo porte, resulta suficiente para cumplir con los objetivos térmicos, estéticos y ecológicos, sin incurrir en las mayores exigencias estructurales y de mantenimiento que implican los sistemas intensivos. Se concluye que especies vegetales de bajo mantenimiento y carga estructural reducida son las más adecuadas para este tipo de soluciones constructivas.

### 9. Cronograma

Figura 40

*Diagrama de Gantt del cronograma, elaboración propia*

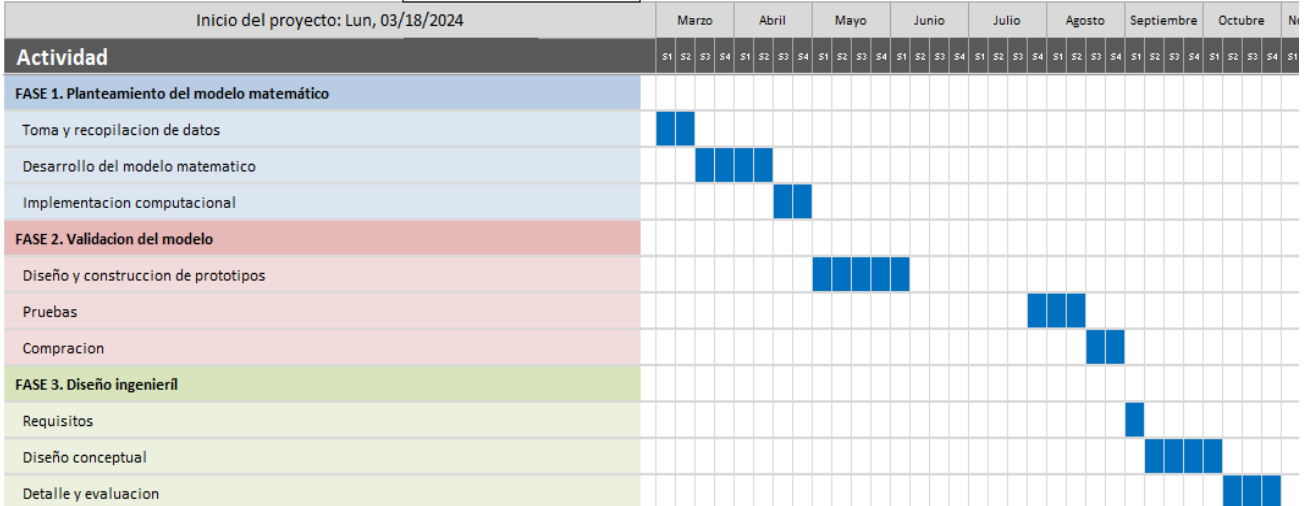
#### CRONOGRAMA DE DESARROLLO METODOLOGICO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

DISEÑO Y MODELADO DE UN TECHO VERDE PARA LA  
REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL LABORATORIO DE  
COMBUSTION DE LA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

Finalizacion de proyecto, Jue, 10/31/2024


Duracion (semanas): 26



## 10. Presupuesto

Figura 41.

*Costo del proyecto*

<b>PRESUPUESTO DESARROLLO DEL PROYECTO</b>					
<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>					
DISEÑO Y MODELADO DE UN TECHO VERDE PARA LA REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL LABORATORIO DE COMBUSTION DE LA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA					
Descripción	Financiamiento	Unidad	Cantidad	Costo por unidad	Total
<b>Recursos Humanos</b>					
Director del proyecto	UIS	Hora	26	200.000	5.200.000
Estudiante 1	Estudiante	Hora	208	80.000	16.640.000
Estudiante 2	Estudiante	Hora	208	80.000	16.640.000
<b>Equipos</b>					
Instrumento de medición de longitud	Estudiante	Unidad	1	150.000	150.000
Termómetro digital	Estudiante	Unidad	1	220.000	220.000
Sensores	Estudiante	Unidad	1	300.000	300.000
Piranometro	UIS	Unidad	1	3.000.000	3.000.000
Camara termografica	UIS	Unidad	1	1.500.000	1.500.000
Computador portatil	Estudiante	Unidad	2	5.000.000	10.000.000
<b>Software</b>					
SolidWorks	UIS	Año	1	52.000	52.000
EES	Estudiante	Unidad	1	60.000	60.000
Matlab y Similink	UIS	Año	1	235.000	235.000
Microsoft Office 365	Estudiante	Mes	10	58.000	580.000
Arduino	Estudiante	Unidad	1	-	-
Mendeley	UIS	Unidad	1	-	-
<b>Materiales</b>					
Sustrato	Estudiante	Bolsa	4	8.000	32.000
Plantas	Estudiante	Unidad	100	28.000	2.800.000
Cemento	Estudiante	Bulto	1	33.000	33.000
Varilla	Estudiante	Unidad	1	16.500	16.500
Aislante termico	Estudiante	Metro	4	25.000	100.000
Tierra	Estudiante	Bolsa	1	37.000	37.000
Madera (tablas)	Estudiante	Tabla	2	15.000	30.000
Arena	Estudiante	Bulto	1	5.000	5.000
<b>Otros</b>					
Internet	UIS	Mes	10	100.000	1.000.000
Electricidad	UIS	\$/Kw*h	6.400	600	3.840.000
Recursos bibliograficos	UIS	Unidad	2	-	-
Transporte	Estudiante	Día	60	6.000	360.000
<b>Costo parcial del proyecto</b>					<b>62.830.500</b>
<b>Imprevistos</b>					<b>3.141.525</b>
<b>Costo total del proyecto</b>					<b>\$ 65.972.025</b>

### Bibliografía

Allen. (1998). *Irrigation Demand VS Supply-Remote Sensing and GIS Approach*.

Alvarado, S. (2019). *Evapotranspiracion:Proceso esencial e invisible*.

Barrientos, A. (2019). *Evapotranspiracion:Proceso esencial e invisible*.

(s.f.). *CARÁCTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE CIUDADES PRINCIPALES Y MUNICIPIOS TURÍSTICOS*.

Obtenido de

<http://sgi.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>

Carbajal, H. (Noviembre de 2009). Obtenido de Digeset:

[http://digeset.ucol.mx/tesis\\_posgrado/Pdf/HARO\\_CARBAJAL\\_ELBA\\_TERESA.pdf](http://digeset.ucol.mx/tesis_posgrado/Pdf/HARO_CARBAJAL_ELBA_TERESA.pdf)

Cárdenas, S. (Diciembre de 2014). *Repositorio universidad de los andes*. Obtenido de

<https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/3970a256-8af3-4410-b953-a75364d20214>

Cengel, G., & Yunus, A. (s.f.). *Transferencia de calor y masa*.

*Colombiamania.com*. (2021). Obtenido de

<https://www.colombiamania.com/ciudades/bucaramanga.html>

EFE, V. (14 de Diciembre de 2023). *Linea Verde Huelva*. Obtenido de

<https://www.lineaverdehuelva.com/lv/noticiasDestacadas.asp?noticia=37903#>

*Evapotranspiración del cultivo* . (1998).

Fitts, c. (2012). *Groundwater science*.

*Glaciar ingenierias s.a.s.* (s.f.). Obtenido de <https://glaciaringenieria.com.co/la-carga-termica/>

López, V. (02 de Agosto de 2020). *cicese.repositorioinstitucional.mx*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/[https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/3281/1/tesis\\_Diana%20Veronica%20Lopez%20Silva\\_02-agosto%202020.pdf](https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/3281/1/tesis_Diana%20Veronica%20Lopez%20Silva_02-agosto%202020.pdf)

Mendez, M. (2020). *repositorio.uan.edu.co*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/2918/2/2020Mar%C3%ADaVictoriaMendezRoza.pdf>

Monteith, J., & Unsworth, S. (2013). *Principios de física ambiental: plantas, animales y la atmósfera*.

Morales, J., Cristancho, M., & Baquero-Rodriguez, G. (31 de Julio de 2017). *ResearchGate*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/318766065\\_Tendencias\\_en\\_el\\_diseno\\_construccion\\_y\\_operacion\\_de\\_techos\\_verdes\\_para\\_el\\_mejoramiento\\_de\\_la\\_calidad\\_del\\_agua\\_lluvia\\_estado\\_del\\_arte](https://www.researchgate.net/publication/318766065_Tendencias_en_el_diseno_construccion_y_operacion_de_techos_verdes_para_el_mejoramiento_de_la_calidad_del_agua_lluvia_estado_del_arte)

Paisatge, F. d. (2012). *Normas Tecnológicas de Jardineria y Paisajismo*. Cataluña.

Patiño, C., & Garcia, S. (2019). *repository.upb.edu.co*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/[https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/6448/digital\\_38749.pdf?sequence=1](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/6448/digital_38749.pdf?sequence=1)

Pereira, M., & Torres, L. (Marzo de 2023). *College Sidekick*. Obtenido de <https://www.collegesidekick.com/study-docs/5511267>

Piga, d. N. (2017). *Techos verdes*. Bogota.

Pita, E. (s.f.). *Acondicionamiento de aire principios y sistemas*.

portillo, g. (3 de julio de 2024). Obtenido de <https://www.ecologiaverde.com/isla-de-calor-que-es-causas-consecuencias-y-soluciones-4442.html>

Reyes, S., & Romualdo, J. (2013). *ESTUDIO DE LAS VENTAJAS TÉRMICAS DE LOS TECHOS VERDES EN Bucaramanga* : Universidad industrial de santander.

Ricardo, & Rodrigo. (24 de agosto de 2021). Obtenido de <https://estudyando.com/evapotranspiracion-definicion-formula-y-calculo/>

Ricardo, R. (24 de Agosto de 2021). Obtenido de <https://estudyando.com/evapotranspiracion-definicion-formula-y-calculo/>

Sahagun, M. (Junio de 2019). *Repositorio Institucional Séneca*. Obtenido de <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/5883>

SAILOR. (2008). *A green roof model for building energy simulation programs*.

Salas, M., & Torres, L. (2023). <https://estudyando.com/evapotranspiracion-definicion-formula-y-calculo/>.

Simpson, & Mcpherson. (2000). *Efectos de los árboles urbanos en el uso de energía regional y emisiones de carbono evitadas*.

Tetens. (1930). *Über einige meteorologische begriffe* .

Villegas, J., & Rodriguez, W. (Noviembre de 2022). *Evaluar la implementación de los techos verdes como estrategia de mitigación al cambio climático en el Edificio Multifamiliar “Black” en San Isidro, Perú*. Perú.

Zielinski, S., Garcia, C. V., & Mario. (2012). *Techos verdes: ¿Una herramienta viable para la gestión ambiental en el sector hotelero del Rodadero, Santa Marta, Colombia*.

## Anexos

### Anexo A. Datos necesarios para el cálculo

#### A.1 Absortividad solar y emisividad de algunos materiales.

Superficie	$\alpha_s$	$\varepsilon$
Aluminio		
Pulido	0.09	0.03
Anodizado	0.14	0.84
Hoja	0.15	0.05
Cobre		
Pulido	0.18	0.03
Deslustrado	0.65	0.75
Acero inoxidable		
Pulido	0.37	0.60
Opaco	0.50	0.21
Metales plateados		
Óxido negro		
de níquel	0.92	0.08
Cromo negro	0.87	0.09
Concreto	0.60	0.88

Fuente: (Cengel & Yunus)

#### A.2 Conductividades y espesores de los materiales que componen el techo verde.

Material	Espesor (m)	Conductividad Térmica (W/m*K)
Capa Vegetal	0,03	0,4
Sustrato	0,046	0,7
Geotextil	0,0015	0,15
Piedra	0,001	2
Impermeabilizante	0,002	0,035
Madera	0,015	0,12
Placa de concreto	0,02	2,5

Fuente: elaboración propia con base en (Sailor, 2008), (Sahagun, 2019) y fichas técnicas del fabricante

A.3 Valores experimentales obtenidos en el recinto con techo de concreto durante el periodo de máxima radiación solar.

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> k)	Velocidad del aire (m/s)	Tamb (°C)	Tamb_int (°C)	Ts_int (°C)	Ts_sup (°C)
10:30	736,67	0,9	24,67	28,033333	30,97	33,07
11:30	912,03	1,15	26,70	30,13	33,89	35,37
12:30	892,00	1,59	27,83	31,93	34,80	35,66
1:30	813,47	2,53	28,20	31,50	34,70	34,90
2:30	620	2,40	27,50	30,93	34,53	33,90
3:30	400,67	2,57	26,70	29,26	33,43	32,53

A.4 Valores experimentales obtenidos en el recinto con techo verde durante el periodo de máxima radiación solar

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> k)	Velocidad del aire (m/s)	Tamb (°C)	Tamb_int (°C)	Ts_int (°C)	Ts_sup (°C)	T_veg (°C)
10:30	740	0,7	25,1	24,8	25,2	26,1	31,2
11:30	899,00	1,32	26,40	25,43	26,20	26,97	32,50
12:30	962,00	1,47	28,67	26,50	26,93	28,53	34,77
1:30	967,33	1,73	28,27	26,20	27,67	28,53	34,43
2:30	733,33	1,55	27,10	25,77	27,73	28,63	32,57
3:30	460,00	2,05	25,60	25,10	26,90	27,80	32,10

## Anexo B. Implementación computacional y solución del modelo matemático en EES

En este apartado se presentan las ecuaciones y los resultados correspondientes a la simulación realizada para la 1:30 p. m. Se opta por mostrar únicamente esta hora, ya que el procedimiento de cálculo se mantiene constante, variando únicamente los datos de entrada para obtener los resultados en otros momentos del día

### B.1 Modelamiento para el recinto con techo de concreto

- Datos de entrada.

$$e = 0,88$$

$$K_c = 2,5 \text{ [W/M}^2\text{K]}$$

$$V_{\text{aire}} = 2,53 \text{ [m/s]}$$

$$L_c = 0,1875 \text{ [m]}$$

$$A_s = L \cdot A_n \text{ [m}^2\text{]}$$

$$ESP = 0,02 \text{ [m]}$$

$$T_{\text{ext}} = 28,2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$ABS = 0,6$$

$$T_{\text{SEXT}} = 34,9 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$$

$$L = 1 \text{ [m]}$$

$$A_n = 0,6 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$Q = 813,47 \text{ [W/(M}^2\text{.}^\circ\text{K)}]}$$

$$G = 9,8 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$HR = 84$$

- Se calcula la convección exterior para este caso forzada

$$T_p = \frac{T_{\text{ext}} + T_{\text{SEXT}}}{2}$$

$$B = \frac{1}{273 + T_p}$$

$$Pr = Pr(\text{Air}; T = T_p)$$

$$\mu = \text{Visc}(\text{Air}; T = T_p)$$

$$k_{\text{aire}} = k(\text{Air}; T = T_p)$$

$$GR = \frac{G \cdot B \cdot (T_{\text{SEXT}} - T_{\text{ext}}) \cdot Lc^3}{\mu^2}$$

$$RE = \frac{V_{\text{aire}} \cdot L}{\mu}$$

$$R = \frac{GR}{RE^2}$$

$$NUS_E = 0,664 \cdot RE^{0,5} \cdot Pr^{(1/3)}$$

$$NUS_E = \frac{H_F \cdot L}{k_{\text{aire}}}$$

$$Q_F = H_F \cdot A_s \cdot (T_{\text{SEXT}} - T_{\text{ext}})$$

- Se calcula la transferencia de calor por Radiación.

$$T_{\text{ALRE}} = EMI^{(1/4)} \cdot T_{\text{EXTR}}$$

$$T_{\text{EXTR}} = T_{\text{ext}} + 273$$

$$mi = HR \cdot 6,112 \cdot \exp\left[\frac{17,67 \cdot T_{\text{ext}}}{T_{\text{ext}} + 243,5}\right]$$

$$EMI = 0,84 - 0,031 \cdot \exp(-(0,5 \cdot mi)^{1,4})$$

$$Q_{\text{RAD}} = \sigma \cdot A_s \cdot e \cdot ((T_{\text{SEXT}} + 273)^4 - T_{\text{ALRE}}^4)$$

- Se calcula la porción de radiación absorbida debido a la radiación solar.

$$Q_R = Q \cdot ABS \cdot A_s$$

- Se calcula la transferencia de calor por Conducción.

$$Q_{CD} = \frac{K_c \cdot A_s \cdot (T_{SEXT} - T_{SINT})}{ESP}$$

$$Q_R - Q_F - Q_{RAD} - Q_{CD} = 0$$

- Para finalmente obtener la solución:

ABS = 0,6	An = 0,6 [m]	As = 0,6 [m <sup>2</sup> ]	B = 0,003284	e = 0,88
EMI = 0,84	ESP = 0,02 [m]	G = 9,8 [m/s <sup>2</sup> ]	GR = 4,024E+06 [C]	HR = 84 [W]
H <sub>F</sub> = 5,694 [W/m <sup>2</sup> *k]	k <sub>aire</sub> = 0,026 [W/mk]	K <sub>c</sub> = 2,5 [W/M*K]	L = 1 [m]	Lc = 0,1875 [m]
mi = 3213	μ = 0,00001879 [m <sup>2</sup> /s]	NUS <sub>E</sub> = 219	Pr = 0,7265	Q = 813,5 [W/m <sup>2</sup> ]
Q <sub>CD</sub> = 207,9 [W]	Q <sub>F</sub> = 22,89 [W]	Q <sub>R</sub> = 292,8 [W]	Q <sub>RAD</sub> = 62,09 [W]	R = 0,000222 [r]
RE = 134629	σ = 5,670E-08	T <sub>p</sub> = 31,55 [°C]	T <sub>SEXT</sub> = 34,9 [°C]	<b>T<sub>SINT</sub> = 32,13 [°C]</b>
T <sub>ALRE</sub> = 288,4 [K]	T <sub>ext</sub> = 28,2 [°C]	T <sub>EXTR</sub> = 301,2 [K]	V <sub>aire</sub> = 2,53 [m/s]	

## B.2 Implementación computacional para el recinto con techo verde

- Datos de entrada.

$$e = 0,96$$

$$K_{Pla} = 2,5 [W/M*K]$$

$$K_{Sus} = 0,7 [W/M*K]$$

$$K_{ces} = 0,4 [W/M*K]$$

$$K_{Geo} = 0,15 [W/M*K]$$

$$K_{pie} = 2 [W/M*K]$$

$$K_{Imp} = 0,035 [W/M*K]$$

$$K_{Mad} = 0,12 [W/M*K]$$

$$E_{Pla} = 0,02 \text{ [m]}$$

$$E_{ces} = 0,03 \text{ [m]}$$

$$E_{Sus} = 0,046 \text{ [m]}$$

$$E_{Geo} = 0,0015 \text{ [m]}$$

$$E_{Pie} = 0,01 \text{ [m]}$$

$$E_{Imp} = 0,002 \text{ [m]}$$

$$E_{Mad} = 0,015 \text{ [m]}$$

$$ABS = 0,7$$

$$V_{aire} = 1,73 \text{ [m/s]}$$

$$Lc = 0,182 \text{ [M]}$$

$$HR = 0,84$$

$$As = L \cdot An \text{ [M}^2\text{]}$$

$$T_{ext} = 28,27 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{SEXT} = 28,53 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{CES} = 34,43 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$$

$$L = 0,98 \text{ [m]}$$

$$An = 0,6 \text{ [m]}$$

$$Q = 967 \text{ [W/(M}^2\text{*K)]}$$

$$G = 9,8 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$AS_R = 1,56 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$Kc = 0,98$$

$$Ks = 0,7$$

$$Q_{ABS} = Q \cdot As \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$a_\psi = 0,0008$$

$$Z = 959 \text{ [m]}$$

$$Lv = 2450 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\rho_W = 1000 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$GR_E = 0$$

- Calculamos la convección exterior

$$T_p = \frac{T_{\text{ext}} + T_{\text{SEXT}}}{2}$$

$$\mu = \text{Visc} (\text{Air} ; T = T_p)$$

$$Pr = \text{Pr} (\text{Air} ; T = T_p)$$

$$k_{\text{AIRE}} = k (\text{Air} ; T = T_p)$$

$$B = \frac{1}{273 + T_p}$$

$$GR = \frac{G \cdot B \cdot (T_{\text{SEXT}} - T_{\text{ext}}) \cdot Lc^3}{\mu^2}$$

$$RE = \frac{V_{\text{aire}} \cdot L}{\mu}$$

$$R = \frac{GR}{RE^2}$$

$$NUS_E = 0,664 \cdot RE^{0,5} \cdot Pr^{(1/3)}$$

$$NUS_E = \frac{H_F \cdot L}{k_{\text{AIRE}}}$$

$$Q_F = H_F \cdot AS_R \cdot (T_{\text{CES}} - T_{\text{ext}})$$

- Se calcula la transferencia de calor por Radiación.

$$T_{\text{ALRE}} = EMI^{(1/4)} \cdot T_{\text{EXTR}}$$

$$T_{\text{EXTR}} = T_{\text{ext}} + 273$$

$$mi = HR \cdot 6,112 \cdot \exp \left[ \frac{17,67 \cdot T_{\text{ext}}}{T_{\text{ext}} + 243,5} \right]$$

$$EMI = 0,84 - 0,031 \cdot \exp \left( - (0,5 \cdot mi)^{1,4} \right)$$

$$Q_{\text{RAD}} = \sigma \cdot AS_R \cdot e \cdot ((T_{\text{CES}} + 273)^4 - T_{\text{ALRE}}^4)$$

- Se calcula el calor perdido debido a la Evapotranspiración.

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - GR_E) + \Gamma \cdot \left[ \frac{900}{T_{ext} + 273} \right] \cdot V_{aire} \cdot (Es - Ea)}{\Delta + \Gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot V_{aire})}$$

$$ET_{REAL} = K_s \cdot K_c \cdot ET_0$$

$$Rn = \frac{Q_{ABS} \cdot 86400}{1000000}$$

$$Es = 0,6108 \cdot \exp \left[ \frac{17,27 \cdot T_{ext}}{T_{ext} + 237,3} \right]$$

$$\Delta = \frac{4098 \cdot Es}{(T_{ext} + 237,3)^2}$$

$$\Gamma = a_\psi \cdot Patm$$

$$Patm = 101,3 \cdot \left[ \frac{293 - 0,0065 \cdot Z}{293} \right]^{5,28}$$

$$Q_{ETAS} = \rho_w \cdot Lv \cdot \frac{ET_{REAL}}{86400}$$

$$Q_{ET} = Q_{ETAS} \cdot As$$

- Se calcula esa cantidad de calor absorbida por el techo verde debido a la radiación solar.

$$Q_R = Q \cdot ABS \cdot As$$

- Se calcula la transferencia de calor por Conducción.

$$Q_{CD} = \frac{T_{CES} - T_{SINT}}{SUM_{RT}}$$

$$R_{Ces} = \frac{E_{Ces}}{K_{Ces} \cdot AS}$$

$$R_{Sus} = \frac{E_{Sus}}{K_{Sus} \cdot AS}$$

$$R_{Geo} = \frac{E_{Geo}}{K_{Geo} \cdot AS}$$

$$R_{Pie} = \frac{E_{Pie}}{K_{Pie} \cdot AS}$$

$$R_{Imp} = \frac{E_{Imp}}{K_{Imp} \cdot AS}$$

$$R_{Mad} = \frac{E_{Mad}}{K_{Mad} \cdot AS}$$

$$R_{Pla} = \frac{E_{Pla}}{K_{Pla} \cdot AS}$$

$$SUM_{RT} = R_{Ces} + R_{Sus} + R_{Geo} + R_{Pie} + R_{Imp} + R_{Mad} + R_{Pla}$$

$$Q_R - Q_{RAD} - Q_{ET} - Q_F - Q_{CD} = 0$$

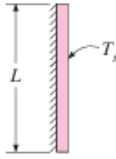
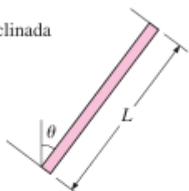
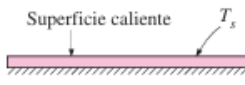
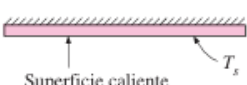
- Por último, obtenemos la solución del sistema.

ABS = 0,7	An = 0,6 [m]	As = 0,588 [m <sup>2</sup> ]	AS <sub>R</sub> = 1,56 [m <sup>2</sup> ]	a <sub>ψ</sub> = 0,0008
B = 0,003318	Δ = 0,2231 [Kpa/°C]	e = 0,96	Ea = 3,225 [Kpa]	EMI = 0,84
Es = 3,84 [Kpa]	ETo = 13,91 [mm/día]	ET <sub>REAL</sub> = 9,541 [mm/día]	E <sub>Ces</sub> = 0,03 [m]	E <sub>Geo</sub> = 0,0015 [m]
E <sub>Imp</sub> = 0,002 [m]	E <sub>Mad</sub> = 0,015 [m]	E <sub>Pie</sub> = 0,01 [m]	E <sub>Pla</sub> = 0,02 [m]	E <sub>Sus</sub> = 0,046 [m]
G = 9,8 [m/s <sup>2</sup> ]	Γ = 0,07237 [Kpa/°C]	GR = 146587 [C]	GR <sub>E</sub> = 0	HR = 0,84
H <sub>F</sub> = 4,733 [w/m <sup>2</sup> k]	Kc = 0,98	Ks = 0,7	k <sub>AIRE</sub> = 0,02576 [w/mk]	K <sub>Ces</sub> = 0,4 [W/M*K]
K <sub>Geo</sub> = 0,15 [W/M*K]	K <sub>Imp</sub> = 0,035 [W/M*K]	K <sub>Mad</sub> = 0,12 [W/M*K]	K <sub>Pie</sub> = 2 [W/M*K]	K <sub>Pla</sub> = 2,5 [W/M*K]
K <sub>Sus</sub> = 0,7 [W/M*K]	L = 0,98 [m]	Lc = 0,182 [m]	Lv = 2450 [kJ/kg]	mi = 32,26
μ = 0,00001865 [m <sup>2</sup> /s]	NUS <sub>E</sub> = 180,1	Patm = 90,47 [Kpa]	Pr = 0,7272	Q = 967 [W/m <sup>2</sup> ]
Q <sub>ABS</sub> = 568,6 [W/m <sup>2</sup> ]	Q <sub>CD</sub> = 15,41 [W]	Q <sub>ET</sub> = 159,1 [W]	Q <sub>ETAS</sub> = 270,6 [W]	Q <sub>F</sub> = 45,49 [W]
Q <sub>R</sub> = 398 [W]	Q <sub>RAD</sub> = 178 [W]	R = 0,00001773 [C·kg <sup>2</sup> /m <sup>6</sup> ]	RE = 90925 [m <sup>3</sup> /kg]	ρ <sub>W</sub> = 1000 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Rn = 49,13 [MJ/m <sup>2</sup> *día]	R <sub>Ces</sub> = 0,1276 [W/°C]	R <sub>Geo</sub> = 0,01701 [W/°C]	R <sub>Imp</sub> = 0,09718 [W/°C]	R <sub>Mad</sub> = 0,2126 [W/°C]
R <sub>Pie</sub> = 0,008503 [W/°C]	R <sub>Pla</sub> = 0,01361 [W/°C]	R <sub>Sus</sub> = 0,1118 [W/°C]	σ = 5,670E-08	Sum <sub>RT</sub> = 0,5882 [W/°C]
T <sub>p</sub> = 28,4 [°C]	TS <sub>EXT</sub> = 28,53 [°C]	TS <sub>INT</sub> = 25,37 [C]	T <sub>ALRE</sub> = 288,4 [°C]	T <sub>CES</sub> = 34,43 [°C]
T <sub>ext</sub> = 28,27 [°C]	T <sub>EXTR</sub> = 301,3 [°C]	V <sub>aire</sub> = 1,73 [m/s]	Z = 959 [m]	

Anexo C. Correlación para superficie inferior caliente de una placa horizontal

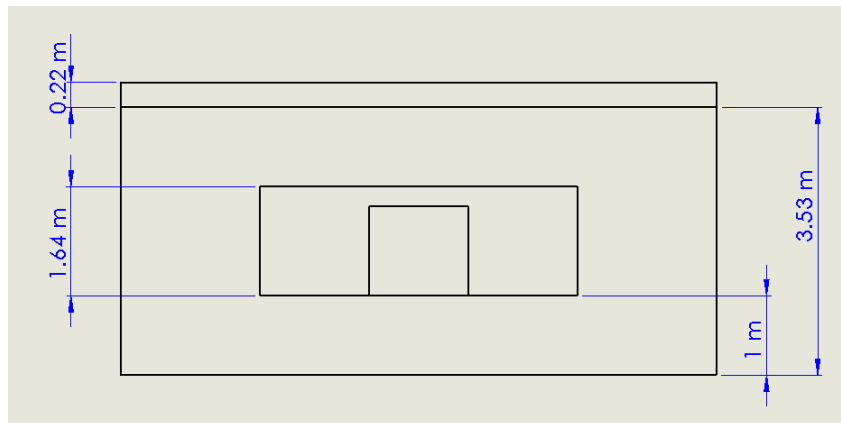
**TABLA 9-1**

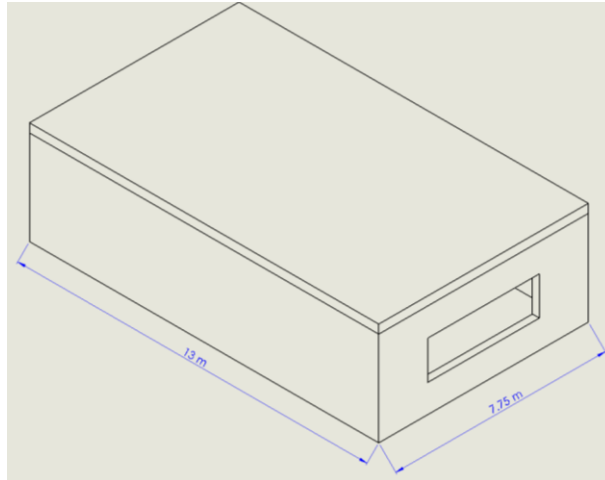
Correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies

Configuración geométrica	Longitud característica $L_c$	Intervalo de Ra	Nu
Placa vertical 	$L$	$10^4 - 10^9$ $10^{10} - 10^{13}$ Todo el intervalo	$Nu = 0.59Ra_L^{1/4}$ (9-19) $Nu = 0.1Ra_L^{1/3}$ (9-20) $Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{1/4}} \right\}^2$ (9-21) (compleja pero más exacta)
Placa inclinada 	$L$		Utilícense las ecuaciones de la placa vertical para la superficie superior de una placa fría y la superficie inferior de una placa caliente  Reemplácese $g$ por $g \cos \theta$ para $0 < \theta < 60^\circ$
Placa horizontal (Área superficial $A$ y perímetro $p$ ) a) Superficie superior de una placa caliente (o superficie inferior de una placa fría) 	$A_s/p$	$10^4 - 10^7$ $10^7 - 10^{11}$	$Nu = 0.54Ra_L^{1/4}$ (9-22) $Nu = 0.15Ra_L^{1/3}$ (9-23)
b) Superficie inferior de una placa caliente (o superficie superior de una placa fría) 		$10^5 - 10^{11}$	$Nu = 0.27Ra_L^{1/4}$ (9-24)

Fuente: (Cengel & Yunus)

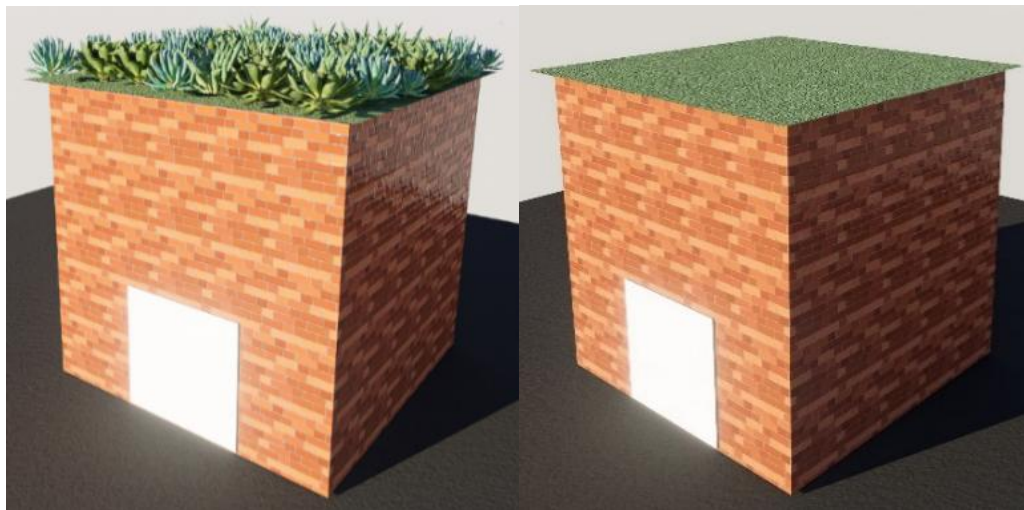
Anexo D. Medidas geométricas del prototipo





A partir de los datos geométricos obtenidos en el Laboratorio de Combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica, se ha determinado que el techo presenta un área superficial aproximada de  $100 \text{ m}^2$ .

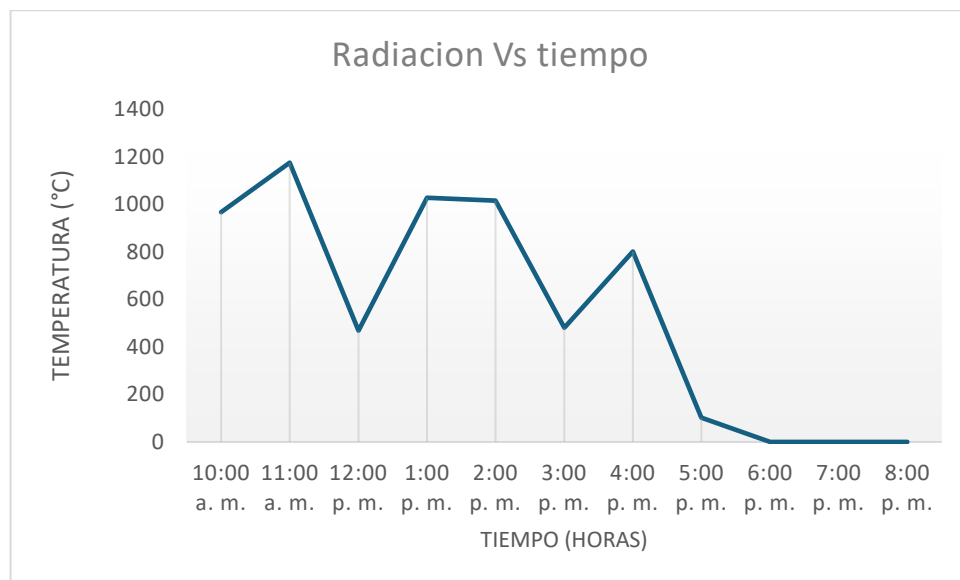
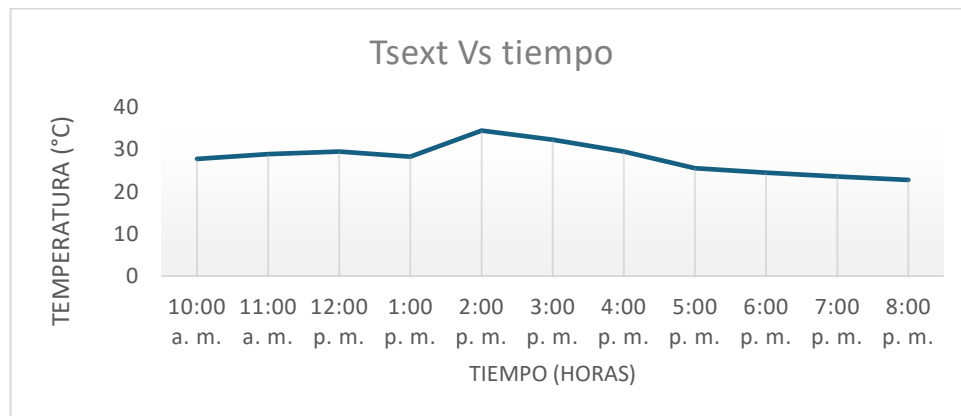
#### Anexo E. Diseño conceptual del prototipo

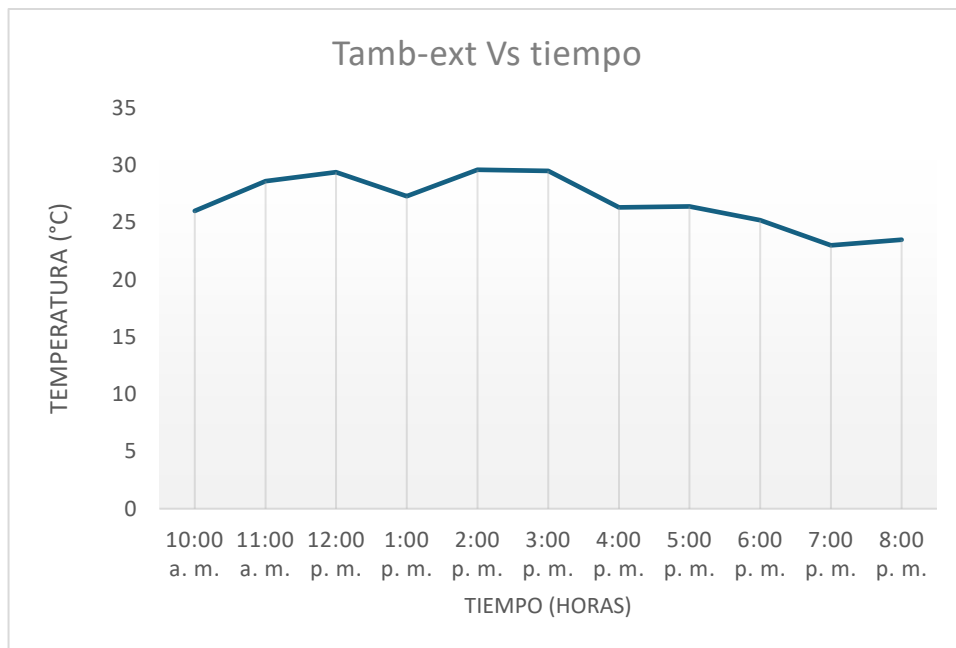
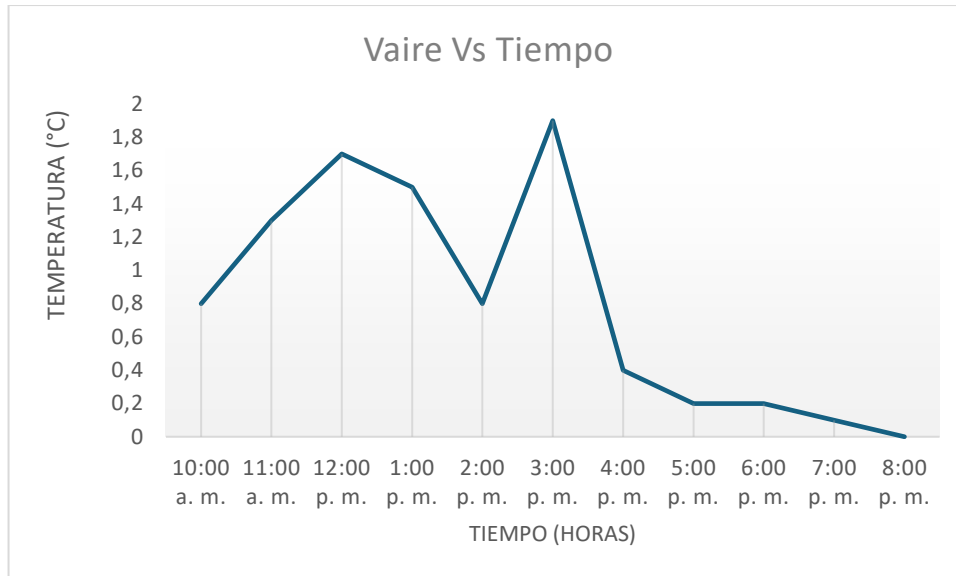


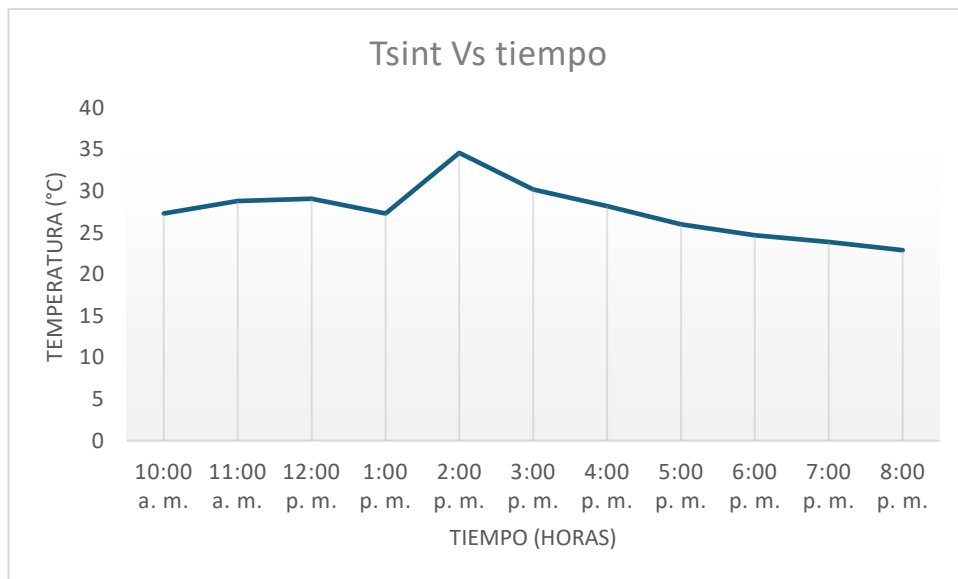
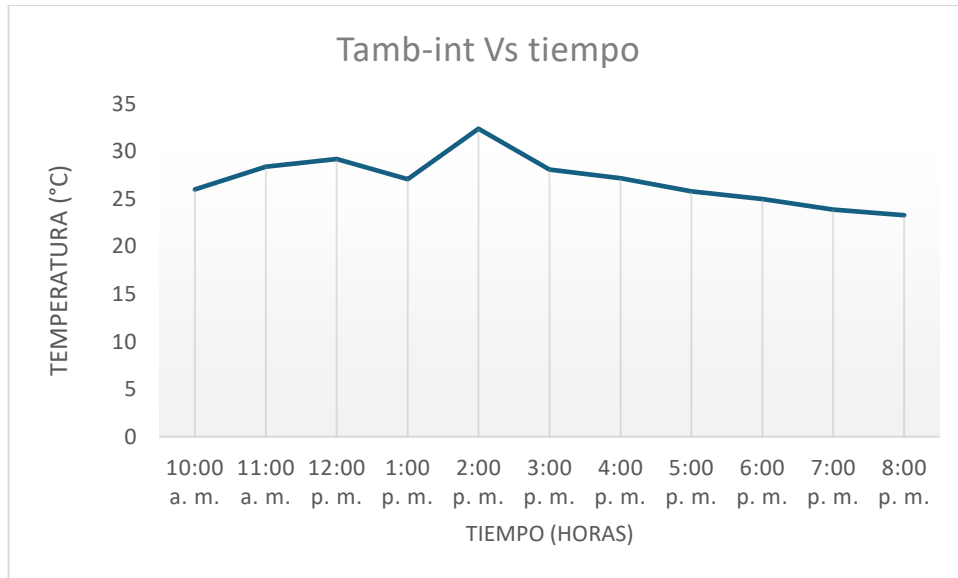
Para la propuesta del diseño conceptual inicial del prototipo de techo verde, se planteó originalmente desarrollar dos prototipos como objeto de estudio. Sin embargo, se optó por simplificar el planteamiento a un solo prototipo, considerando que el techo verde previsto sería desmontable.

#### Anexo F. Tablas de mediciones experimentales

Para comprender el fenómeno que se presenta experimentalmente en el sitio de estudio, se realizó un análisis temporal que correlaciona el tiempo con una variable de interés, con el fin de evaluar su evolución a lo largo de una semana completa. Este enfoque permitió identificar patrones, fluctuaciones y tendencias significativas en las condiciones operativas del sistema, sirviendo como base para el ajuste y validación del prototipo propuesto

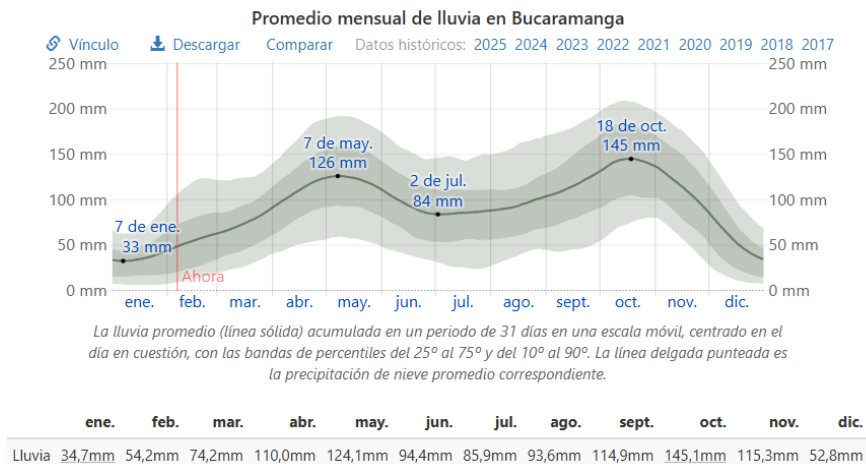
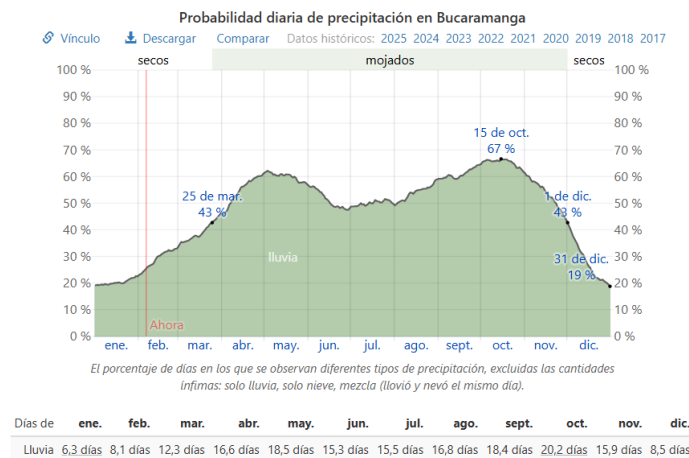






Anexo G. Datos promedio del clima en Bucaramanga

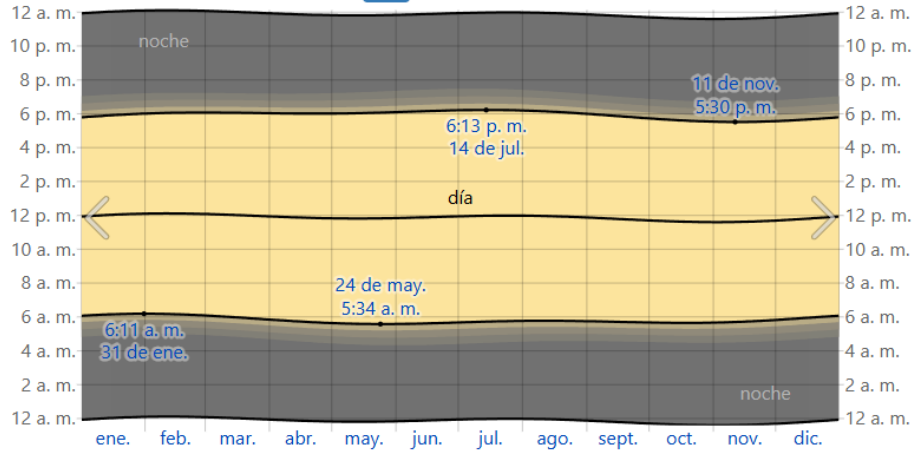
Los datos climáticos fueron obtenidos a partir de fuentes especializadas en mediciones meteorológicas, con el objetivo de estimar el comportamiento del clima a lo largo del año en Bucaramanga. Entre los parámetros analizados se incluyen la probabilidad de precipitación, el promedio mensual de lluvia, los horarios de salida y puesta del sol, la temperatura ambiente, el índice de confort asociado a la humedad, la radiación solar de onda corta y las condiciones generales del clima. Esta información resulta clave para comprender las variables ambientales que inciden en el desempeño del sistema y su integración en el entorno local (tomado de [https://es.weatherspark.com/y/24381/Clima-promedio-en-Bucaramanga-Colombia-durante-todo-el-año](https://es.weatherspark.com/y/24381/Clima-promedio-en-Bucaramanga-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o)).



Salida del sol y puesta del sol con crepúsculo en 2024 en Bucaramanga

Vínculo Descargar Comparar Promedios

Datos históricos: 2025 2024 2023 2022 2021 2020 2019 2018 2017

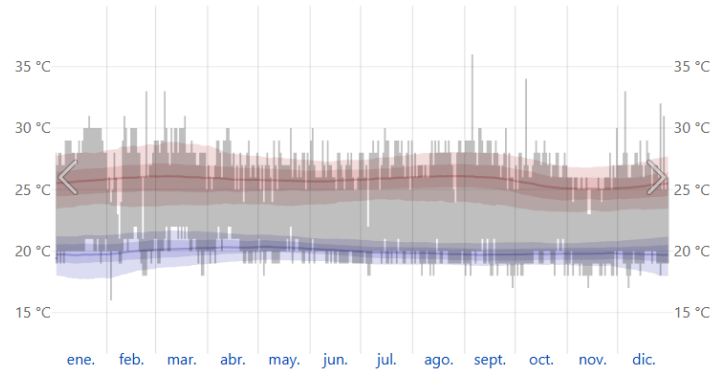


El día solar durante el año 2024. De abajo hacia arriba, las líneas negras son la medianoche solar anterior, la salida del sol, el mediodía solar, la puesta del sol y la siguiente medianoche solar. El día, los crepúsculos (civil, náutico y astronómico) y la noche se indican por el color de las bandas, de amarillo a gris.

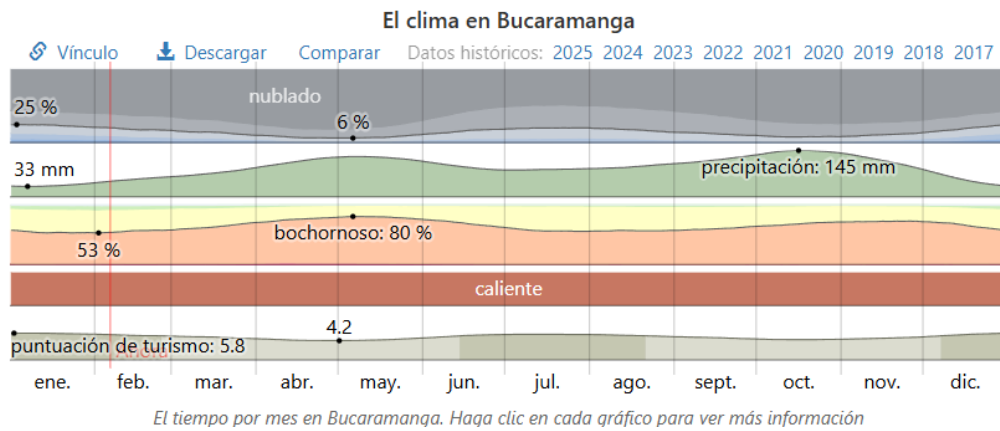
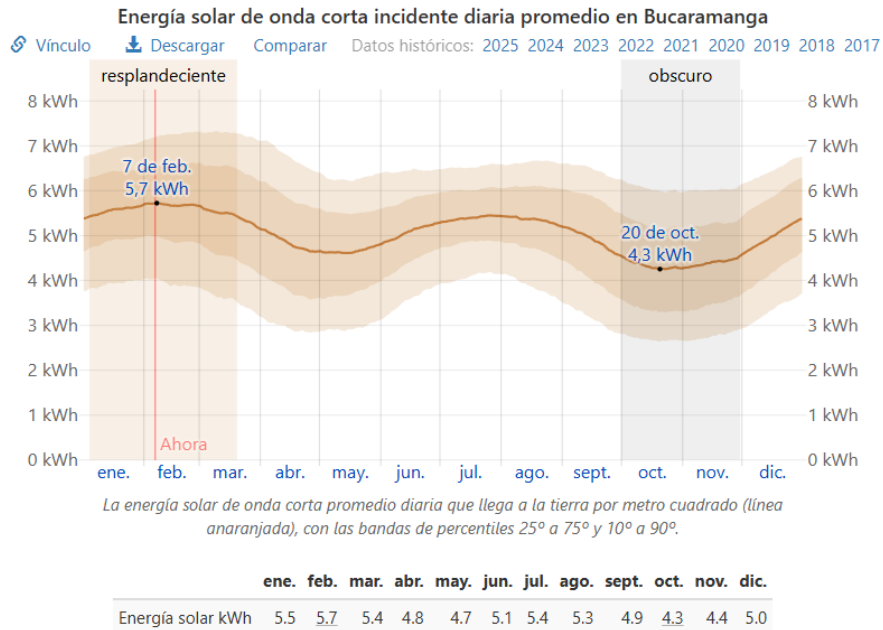
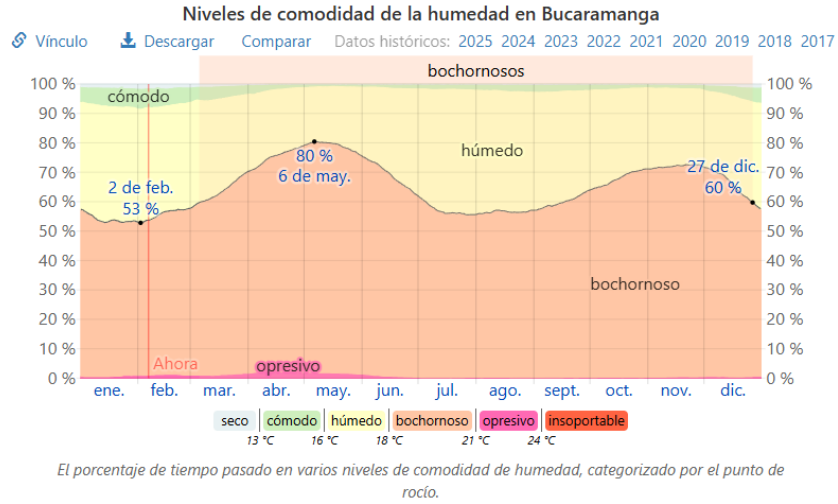
Datos históricos de temperatura en el Bucaramanga en 2024

Vínculo Descargar Comparar Promedios

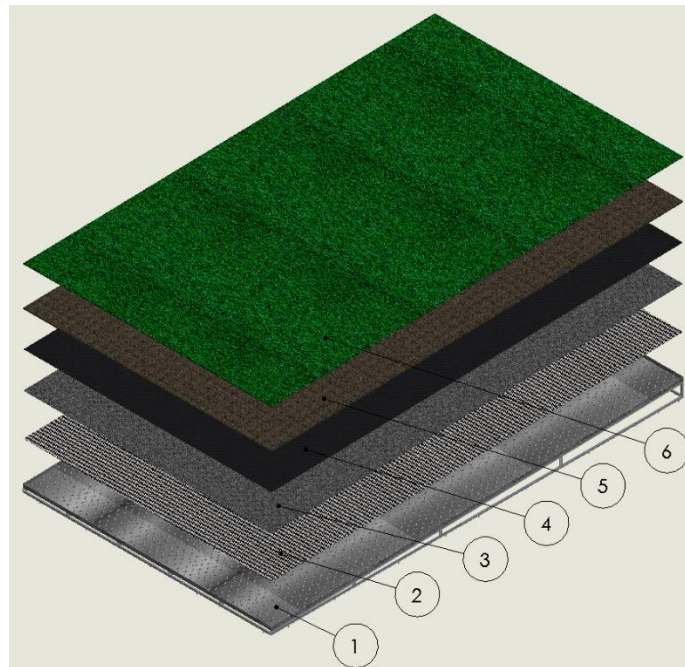
Datos históricos: 2025 2024 2023 2022 2021 2020 2019 2018 2017



El intervalo diario de temperaturas reportadas (barras grises) y las máximas (marcas rojas) y mínimas (marcas azules) de 24 horas, colocadas arriba del promedio diario de la máxima (línea rojo claro) y de la mínima (línea azul claro), con las bandas de los percentiles 25 a 75 y 10 a 90.



## Anexo H. Diseño del techo verde



Representación gráfica del techo verde propuesto, mostrando su configuración por capas, así como la inclinación y la orientación del sistema. Esta visualización permite comprender la disposición constructiva, los materiales que conforman cada estrato y su integración en la estructura existente.

## Anexo I. Catálogos

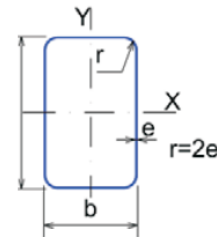
A continuación, se representa algunos catálogos a modo de ejemplo de fabricantes colombianos para la construcción estructural, para el diseño estructural, en los cuales podemos observar un catálogo de perfiles rectangular y uno de placas metálicas.



TUBERIA

1 | PERFIL ESTRUCTURAL TUBULAR  
REDONDO, CUADRADO, RECTANGULAR - NEGRO Y GALVANIZADO

PERFIL ESTRUCTURAL RECTANGULAR

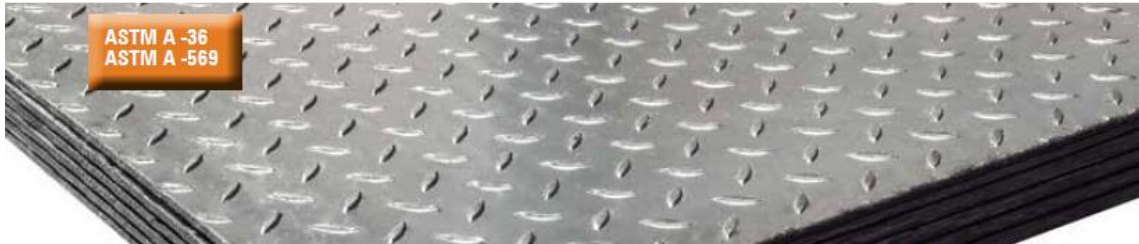


CARACTERÍSTICAS Y DENOMINACIÓN					PROPIEDADES ESTADÍSTICAS													
TAMAÑO PERFIL		ESPOSOR DE PARED		PESO		FLEXIÓN EJE X - X			FLEXIÓN EJE Y - Y			MÓDULO PLÁSTICO		TORSIÓN		Unidad de Empaque		
Tamaño Nominal	Real	mm	mm	Negro (kg/m)	Galv. (kg/m)	ÁREA cm <sup>2</sup>	Momento Inercia Ix cm <sup>4</sup>	Módulo Elástico Sx cm <sup>3</sup>	Radio de Giro rx cm	Momento Inercia Iy cm <sup>4</sup>	Módulo Elástico Sy cm <sup>3</sup>	Radio de Giro ry cm	Zx cm <sup>3</sup>	Zy cm <sup>3</sup>	Momento Inercia J cm <sup>4</sup>		Módulo Elástico B cm <sup>3</sup>	
2X1/2	50 x 13	50,00	13,00	1,37	1,49	1,72	4,54	1,81	1,62	0,50	0,77	0,54	2,46	0,90	1,61	1,45	36	
		50,00	30,00	3,00	1,77	1,90	2,25	7,72	2,97	1,85	2,78	2,06	1,11	3,70	2,34	6,71		3,56
2X1 1/16	50 X 30	50,00	30,00	2,31	2,49	2,94	9,76	3,76	1,82	3,49	2,58	1,09	4,74	2,99	6,63	4,49	25	
		50,00	30,00	2,82	2,98	3,59	11,55	4,44	1,79	4,09	3,03	1,07	5,69	3,58	10,41	5,31		
		60,00	40,00	4,00	2,24	2,53	2,85	13,84	4,61	2,20	6,81	3,60	1,54	5,59	4,07	14,59		5,99
2 3/8X1 1/2	60 X 40	60,00	40,00	2,93	3,31	3,73	17,69	5,90	2,18	8,66	4,57	1,52	7,22	5,26	18,95	7,66	20	
		60,00	40,00	3,60	3,97	4,59	21,18	7,06	2,15	10,32	5,45	1,50	8,75	6,35	23,07	9,18		
		60,00	40,00	4,25	4,62	5,41	24,33	8,11	2,12	11,79	6,23	1,48	10,16	7,37	26,96	10,56		
3X1 1/2	75X38	78,00	38,00	2,57	2,89	3,27	24,92	6,54	2,76	8,54	4,48	1,61	8,07	5,00	20,50	7,74	16	
		78,00	38,00	3,37	3,79	4,29	32,06	8,42	2,73	10,90	5,72	1,59	10,48	6,47	26,65	9,93		
		78,00	38,00	4,15	4,55	5,29	38,64	10,14	2,70	13,05	6,85	1,57	12,75	7,85	32,48	11,94		
3 3/16X1 1/2	80X40	80,00	40,00	2,71	2,94	3,45	28,99	7,25	2,90	9,94	4,97	1,70	8,93	5,53	23,81	8,58	16	
		80,00	40,00	3,56	3,86	4,54	37,36	9,34	2,87	12,72	6,36	1,67	11,61	7,17	30,99	11,02		
		80,00	40,00	4,39	4,63	5,59	45,11	11,28	2,84	15,26	7,63	1,65	14,15	8,72	37,61	13,28		
3 1/2X2	90X50	90,00	50,00	3,18	3,54	4,05	44,88	9,96	3,33	18,15	7,26	2,12	12,09	8,07	41,02	12,32	16	
		90,00	50,00	4,19	4,65	5,34	58,15	12,90	3,30	23,41	9,36	2,09	15,78	10,52	53,63	15,93		
		90,00	50,00	5,17	5,59	6,59	70,59	15,66	3,27	28,28	11,31	2,07	19,31	12,84	65,75	19,32		
4X14/7	100X40	100,00	40,00	3,18	3,54	4,05	50,49	10,10	3,53	12,16	6,08	1,73	12,68	6,89	31,94	10,80	16	
		100,00	40,00	4,19	4,65	5,34	65,38	13,08	3,50	15,61	7,81	1,71	16,54	8,69	41,59	13,91		
		100,00	40,00	5,17	5,59	6,59	79,32	15,86	3,47	18,78	9,39	1,69	20,23	10,59	50,77	16,80		
4X2	100X50	100,00	40,00	6,13	6,52	7,81	92,34	18,47	3,44	21,67	10,84	1,67	23,75	12,38	59,49	19,48	16	
		100,00	50,00	4,50	5,33	5,74	74,98	15,00	3,62	25,67	10,27	2,12	18,50	11,46	61,72	17,75		
		100,00	50,00	5,56	6,41	7,09	91,20	18,24	3,59	31,06	12,42	2,09	22,67	14,01	75,68	21,54		
4 3/4X2 3/8	120X60	100,00	50,00	6,80	7,48	8,41	106,46	21,29	3,56	36,06	14,42	2,07	26,66	16,44	89,09	25,09	16	
		100,00	50,00	8,59	-	10,95	134,14	26,83	3,50	44,95	17,98	2,03	34,10	20,93	114,32	31,55		
		120,00	60,00	6,00	6,74	7,23	8,59	167,03	27,43	4,41	55,68	18,59	2,55	33,94	20,77	135,18		32,22
6X2	150X50	120,00	60,00	8,01	8,45	10,20	195,96	32,18	4,38	65,03	21,71	2,52	40,05	24,46	159,64	37,73	16	
		150,00	50,00	5,00	8,96	-	11,41	298,55	39,81	5,12	52,65	21,06	2,15	51,43	23,49	150,80		38,36
		150,00	50,00	11,73	-	14,95	381,39	50,85	5,05	66,16	26,47	2,10	66,47	30,13	193,62	48,51		
6X4	150X100	150,00	100,00	14,87	5,91	18,95	594,60	79,28	5,60	318,57	63,71	4,10	95,67	72,50	664,06	105,15	15	
		150,00	100,00	21,69	-	27,63	834,69	111,29	5,50	444,19	88,84	4,01	136,68	103,30	957,04	147,81		
		160,00	65,00	65,00	10,13	12,91	408,35	51,04	5,62	100,23	30,84	2,79	64,35	34,24	264,43	54,83		
6 2/7X2 5/8	160X65	160,00	65,00	13,30	-	16,95	524,69	65,59	5,56	127,44	39,21	2,74	83,50	44,23	342,49	70,05	15	
		180,00	65,00	14,56	-	18,55	709,17	78,80	6,18	142,35	43,80	2,77	101,25	49,11	398,32	79,21		
7X2 5/8	180X65	200,00	70,00	16,13	-	20,55	969,18	96,92	6,87	185,51	53,00	3,00	124,52	59,08	521,89	96,03	9	
		200,00	70,00	23,58	-	30,03	1.364,48	136,45	6,74	255,38	72,97	2,92	178,35	83,75	741,83	133,47		
		200,00	100,00	100,00	18,01	22,95	1.199,71	119,97	7,23	410,78	82,16	4,23	148,04	91,70	988,08	142,01		
8X4	200X100	200,00	100,00	26,40	-	33,63	1.703,31	170,33	7,12	576,91	115,38	4,14	213,27	131,50	1.426,66	200,83	9	
		250,00	100,00	100,00	26,18	33,36	2.553,76	204,30	8,75	609,85	121,97	4,28	258,51	162,94	2.174,9	217,49		
		250,00	150,00	150,00	30,11	38,36	3.304,18	264,33	9,28	1.507,95	201,06	6,27	319,76	225,48	3.292,28	337,32		
11 4/5X4	300X100	300,00	100,00	100,00	30,11	38,36	4.085,22	271,01	10,29	722,77	144,55	4,34	348,15	159,59	2.049,91	262,65	9	
		300,00	100,00	100,00	41,43	52,78	5.455,64	363,71	10,17	954,21	190,84	4,25	472,62	215,04	2.764,22	348,77		
14X6	350X150	350,00	150,00	150,00	52,42	66,78	10.222,35	584,13	12,37	2.732,02	364,27	6,40	733,37	405,79	7.069,57	643,79	6	
16X8	400X200	400,00	200,00	200,00	80,60	102,67	21.303,00	1.065,15	14,40	7.274,28	727,43	8,42	1.319,09	816,15	17.621,93	1.259,57	4	

ACEROS PARA LA INDUSTRIA



## 5 LAMINAS Y BOBINAS ALFAJOR ANTIDESLIZANTES



Láminas alfafor con resaltes

### DESCRIPCION

"Bobinas y láminas con diseño especial para pisos, escaleras etc., que disminuyen los riesgos de deslizamiento"

### DIMENSIONES Y PROPIEDADES

CALIDADES MAS COMUNES		COMPOSICIÓN QUIMICA							PROPIEDADES MECANICAS					
		L	C	MN	P	S	SI	CU	LIMITE ELASTICO	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	% ALARGA	APLICACIONES MAS FRECUENTES		
ASTM	DIN		(X 100)	(X 100)	(X 100)	(X 100)	(X 100)	(X 100)						
ASTM 569		MIN												
		MAX	15	60	3.5	3.0			25 kg / mm3	250 Mpa	36 kg / mm2	365 Mpa	22	Fabricación de pisos antideslizantes

### ESPESOR

CALIBRE	PULGADA	MILIMETRO	M2	1.0 X 3.0 MTS	1.22 X 2.44 MTS (4' X 8')
			Kg.	Kg.	Kg.
		2.5	20,68	62,03	61,44
12		2.66	22	65,99	65,38
11		3	24,81	74,43	73,73
	1/8"	3.17	26,22	78,65	77,91
		4	33,08	99,24	98,31
		4.5	37,22	111,65	110,6
	3/16"	4.76	39,37	118,1	116,99
		5	41,35	124,05	122,89
		6	49,62	148,66	147,47
	1/4"	6.35	52,51	157,54	156,06



### DISEÑO DE LAMINA

