

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**“EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE REGULACIÓN DE TEMPERATURA  
EN VIVIENDAS RURALES DISEÑADAS PARA MITIGAR LAS  
CONSECUENCIAS DEL FRÍO”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL**

**ELABORADO POR**

**ARTURO JIMMY CENTENO SAIRITUPA**

**ASESOR**

**Dr. LUIS ALBERTO MOSQUERA LEIVA**

**Lima- Perú**

**2021**

© 2020, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte,  
con fines estrictamente académicos.”**

Centeno Sairitupa, Arturo Jimmy

acentenos@uni.pe

935588345

Dedico la presente tesis a mi papá Dionisio que desde el cielo me está cuidando, a mi mamá María que fue parte de mi inspiración para escoger el rubro de la tesis, quienes, me dieron vida, educación, apoyo, consejos, son los que me motivaron y guiaron en el camino de mi vida. A mis hermanos y cuñadas que constantemente me dan consejos y apoyo en todo tipo de situaciones. Agradezco a Dios que siempre lo llevo en mi interior, me dio la energía y salud para salir adelante. Agradezco a la Ing. Nadia que me encaminó desde el principio con el desarrollo de la investigación, al Dr. Leiva que gracias a su tiempo y guía pude encaminar la tesis, al Ing. Arbocco que constantemente me ayudó en mejorar la tesis, al equipo Techos Verdes con quienes compartimos grandes momentos en toda esta etapa, y a mis amistades más cercanas que me dedicaron su tiempo y consejos para poder culminar con la presente tesis.

## ÍNDICE

ÍNDICE .....	2
RESUMEN.....	4
ABSTRACT .....	6
PRÓLOGO .....	8
LISTA DE TABLAS .....	10
LISTA DE FIGURAS.....	12
LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS .....	14
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	16
1.1 PROBLEMÁTICA.....	16
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	16
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 OBJETIVO GENERAL: .....	16
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS:.....	16
1.4 HIPÓTESIS .....	16
1.5 ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS DE TECHOS VERDES EN EL MUNDO .....	17
1.6 ESTADO DEL ARTE SOBRE TECHOS VERDES EN EL PERÚ .....	19
1.7 OTROS SISTEMAS DE REGULACIÓN DE TEMPERATURA .....	20
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	22
2.1 DEFINICIONES TÉCNICAS .....	22
2.1.1 HELADAS.....	22
2.1.2 FRIAJES.....	22
2.1.3 NEVADAS .....	23
2.2 TIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR .....	23
2.2.1 LA CONDUCCIÓN.....	24
2.2.2 LA CONVECCIÓN .....	24
2.2.3 LA RADIACIÓN .....	25
2.3 PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES .....	26
2.3.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA ( $k$ ).....	26
2.3.2 CALOR ESPECÍFICO ( $c$ ) y CAPACIDAD CALORÍFICA ( $C$ ).....	26

2.3.3 DIFUSIVIDAD TÉRMICA ( $\alpha$ ).....	26
2.3.4 RESISTENCIA TÉRMICA ( $R_t$ ).....	27
2.4 CONFORT TÉRMICO.....	27
2.5 BALANCE DE ENERGÍA EN LA COBERTURA VEGETAL.....	30
2.6 METODOLOGÍA DE ESCALAMIENTO: MÉTODO DE ANÁLISIS DIMENSIONAL NO DISTORSIONADO .....	32
CAPÍTULO III: ZONA DEL PROYECTO Y VIVIENDA ALTOANDINA.....	34
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DEL PROYECTO .....	34
3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS VIVIENDAS .....	36
3.3 ZONA BIOCLIMÁTICA DE LA ZONA DEL PROYECTO .....	37
3.4 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES DE VIVIENDA ALTOANDINA .....	38
CAPÍTULO IV: DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	40
4.1 DISEÑO DE MODELO Y PROTOTIPO.....	40
4.1.1 PROTOTIPO.....	40
4.1.2 FACTOR DE ESCALA .....	42
4.1.3 MODELO .....	42
4.2 CONSTRUCCIÓN DE MODELOS A ESCALA REDUCIDA .....	44
4.3 INSTRUMENTACIÓN .....	45
4.4 MEDICIONES.....	47
4.5 ESCENARIOS DE ANÁLISIS DE EVALUACIÓN TÉRMICA .....	49
4.6 CÁLCULO DE TEMPERATURA INTERNA EN EL PROTOTIPO.....	49
4.6.1 METODOLOGÍA .....	49
4.6.2 APLICACIÓN DEL SOFTWARE ENERGYPLUS .....	50
4.7 PROCEDIMIENTOS DE EVALUACION TÉRMICA DE UNA VIVIENDA RURAL ALTOANDINA.....	52
4.1 EVALUACIÓN ANALÍTICA .....	53
4.2 EVALUACIÓN COMPUTACIONAL.....	53
4.3 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL .....	54
4.3.1 PARÁMETROS DE AJUSTE Y CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	55

4.4 GANANCIA DE TEMPERATURAS CON OTROS PROYECTOS DE REGULACIÓN TÉRMICA .....	57
CAPÍTULO V: RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	59
5.1 PARÁMETROS DE CLIMA DE LA ZONA .....	59
5.2 TRANSFERENCIA DE CALOR.....	60
5.2.1 ESCENARIO 1.....	60
5.2.2 ESCENARIO 2.....	62
5.2.3 ESCENARIO 3.....	64
5.2.4 COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS EN LOS MODELOS Y PROTOTIPOS .....	66
5.3 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	71
CONCLUSIONES.....	73
RECOMENDACIONES.....	74
BIBLIOGRAFÍA.....	75
ANEXO A. INGRESO DE DATOS AL SOFTWARE ENERGYPLUS.....	79
ANEXO B. TABLAS DE VALORES DEL CLIMA INGRESADOS EN EL ENERGYPLUS .....	84
ANEXO C. FICHA TÉCNICA DE GEOCOMPUESTO DE DRENAJE UTILIZADO EN EL TECHO VERDE.....	87
ANEXO D. FICHA TÉCNICA DE SENSOR HIGROTÉRMICO UTILIZADO EN LOS MODELOS DE VIVIENDA DE ESCALA REDUCIDA .....	88
ANEXO E. PLANOS DE VISTA EN PLANTA Y ELEVACIÓN DEL MODELO Y PROTOTIPO DE VIVIENDA SIN TECHO VERDE.....	89

## RESUMEN

En la zona sur y centro de nuestro país se presentan cambios meteorológicos debido al cambio climático y al Fenómeno El Niño (El Niño-Oscilación del Sur). Estos cambios afectan la calidad de vida de las personas. De otro lado, en los últimos años se ha registrado gran disminución de temperatura en las zonas altoandinas del Perú. Según datos de SENAMHI, se han registrado temperaturas hasta por debajo de los 0°C, tal como ocurre con el fenómeno meteorológico de las heladas.

La presente tesis se realizó en el marco del proyecto “Propuesta de techos verdes acondicionados a viviendas rurales de las zonas altoandinas del Perú (altitud > 3500 msnm)”. La investigación planteó un sistema de regulación de temperatura en viviendas rurales con la finalidad de incrementar las temperaturas cuando estas sean bajas. Este sistema consiste en adicionar una cobertura vegetal a un techo preexistente de una vivienda rural típica denominando a este sistema como “Techo Verde”.

El techo verde está conformado desde abajo hacia arriba, por una capa impermeable, un sistema de drenaje, un geotextil, un sustrato vegetal y plantaciones. El sistema de drenaje utilizado es el MacDrain 2L FP, el sustrato vegetal y las plantaciones son nativas de la zona del proyecto. Se utilizó además tabloncillos de madera para el contorno del techo verde.

El Techo Verde es una alternativa para reducir los efectos del frío al interior de la vivienda. La variación de temperatura al interior de la vivienda fue evaluada de forma analítica, computacional y experimentalmente cuantificándose la transferencia de calor para compararlo con otros sistemas de regulación de temperatura. Para esta evaluación se propuso un prototipo de vivienda a escala real (PVER) y un modelo de vivienda a escala reducida (MVER).

El PVER es la representación de una vivienda rural típica con dimensiones a escala real obtenidas a partir de las medidas realizadas en las viviendas rurales típicas de la región Junín. El MVER es la representación de una vivienda rural con dimensiones reducidas considerando similitud geométrica con el PVER mediante un factor de escala reducida. Para la determinación del factor de escala se revisaron valores usados en estudios similares eligiéndose el factor de escala más adecuado considerando el procedimiento de instrumentación y la toma de datos.

Para la evaluación experimental se construyeron cuatro MVER ubicándolos en la localidad de Chuquiquirpay, distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán, Provincia de Yauli, Región Junín. Los MVER fueron denominados MC-0, MV-1, MV-2 y MV-3. El MC-0 es el modelo de control y los MV-1, MV-2 y MV-3 son los modelos de vivienda con techo verde.

En la evaluación de los MVER y PVER se cuantificó el flujo de calor por los mecanismos de conducción, convección y radiación en cada elemento de la envolvente. La evaluación computacional del Techo Verde consistió en la comparación del comportamiento térmico entre el MVER y PVER con datos de temperaturas del MVER obtenidos experimentalmente. Los programas Sketchup y EnergyPlus fueron empleados para obtener valores de temperatura que fueron usadas en el PVER. Los programas emplearon data de las propiedades térmicas de los componentes del interior de la vivienda y de la envolvente.

Como resultado del análisis se observó que el modelo MV-3 funcionó mejor como regulador térmico debido a su mayor densidad foliar del techo verde. En todos los casos se logró aumentar la temperatura interior para las condiciones de temperaturas mínimas, demostrándose que Techo Verde es un sistema eficiente.

Se observó que la temperatura mínima registrada en el ambiente ocurre entre las 5am y 6am, el MC-0 alcanzó una temperatura mínima promedio de 2 °C, en el MV-3 se alcanzó, 4.5 °C, y el prototipo del MV-3 alcanzó, hasta 6 °C. El aumento de temperatura logrado en el prototipo del MV-3 no consideró las ganancias térmicas comunes en una vivienda altoandina, como el calor humano, el calor ganado por la cocción de alimentos, las luminarias y la masa térmica de mobiliarios.

La temperatura mínima de confort térmico según Givoni es de 20 °C, para alcanzar dicha temperatura se recomienda utilizar complementariamente estrategias bioclimáticas como reguladores de temperatura aplicado a los muros, pisos y puentes térmicos, ya que por allí también hay gran pérdida de calor.

## **ABSTRACT**

In the south and center of our country there are meteorological changes due to climate change and the El Niño phenomenon (El Niño-Southern Oscillation). These changes affect people's quality of life. On the other hand, in recent years there has been a large decrease in temperature in the high Andean zones of Peru. According to SENAMHI's data, temperatures have dropped below 32 °F, as is the case with the meteorological phenomenon of frost.

This thesis was carried out within the framework of the project "Proposal for conditioned green roofs for rural houses in the high Andean zones of Peru (altitude > 3500 masl)". The research proposed a temperature regulation system in rural houses in order to increase temperatures when they are low. This system consists of adding a vegetation cover to a pre-existing roof of a typical rural house, calling this system "Techo Verde".

Techo Verde consists of a waterproof layer, a drainage system, a geotextile, a plant substrate and plantings from the bottom up. The drainage system used is the MacDrain 2L FP, the plant substrate and the plantations are native to the project area. Wood planks were also used for the contour of the Techo Verde.

Techo Verde is an alternative to reduce the effects of cold inside the house. The variation of temperature inside the house was evaluated analytically, computationally and experimentally, quantifying the heat transfer to compare it with other temperature regulation systems. For this evaluation, a full-scale housing prototype (PVER) and a reduced-scale housing model (MVER) were proposed.

The PVER is the representation of a typical rural dwelling with full-scale dimensions obtained from measurements taken in typical rural dwellings in the Junín region. The MVER is the representation of a rural house with reduced dimensions considering geometric similarity with the PVER by means of a reduced scale factor. To determine the scale factor, values used in similar studies were reviewed, choosing the most adequate scale factor considering the instrumentation procedure and data collection. For the experimental evaluation, four MVERs were built, locating them in the Chuquiquirpay town, Santa Bárbara de Carhuacayán district, Yauli province, Junín region. The MVERs were named MC-0, MV-1, MV-2 and MV-3. The MC-0 is the control model and the MV-1, MV-2 and MV-3 are the Techo Verde housing models.

In the evaluation of the MVER and PVER, the heat flow by conduction, convection and radiation mechanisms in each envelope element was quantified. The computational evaluation of the Techo Verde consisted of comparing the thermal performance between MVER and PVER with experimentally obtained MVER temperature data. The Sketchup and EnergyPlus programs were used to obtain temperature values that were used in the PVER. The programs used data from the thermal properties of the interior components of the house and the envelope.

As a result of the analysis, it was observed that the MV-3 model performed better as a thermal regulator due to its higher green roof leaf density. In all cases, it was possible to increase the interior temperature for the minimum temperature conditions, demonstrating that Techo Verde is an efficient system.

It was observed that the minimum temperature recorded in the environment occurs between 5am and 6am, the MC-0 reached an average minimum temperature of 35.6 °F, in the MV-3 reached 40.1 °F, and the prototype of the MV-3 reached, up to 42.8 °F. The temperature increase achieved in the MV-3 prototype did not consider the thermal gains common in a high Andean dwelling, such as human heat, heat gained from cooking food, light fixtures and the thermal mass of furnishings.

The minimum temperature of thermal comfort according to Givoni is 20 °C, to reach this temperature it is recommended to use complementary bioclimatic strategies such as temperature regulators applied to walls, floors and thermal bridges, since there is also great heat loss there.

## PRÓLOGO

En la presente tesis se evalúa cuantitativamente el sistema de regulación de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) denominado “Techo Verde”, el cual se planea utilizar en los techos de las viviendas rurales expuestos a temperaturas bajas.

La zona del proyecto donde se realizó los trabajos de evaluación térmica, fue la localidad de Chuquiquirpay, distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán, Provincia de Yauli, departamento de Junín.

En el Capítulo I, se detalla las características de los climas fríos en las zonas centro y sur del país, así como de las viviendas rurales ubicadas en esas zonas, mostrando los efectos del clima frío en las personas. En este capítulo también se muestra los tipos de sistemas de regulación de temperatura, que son las alternativas que se han planteado en anteriores investigaciones (Ministerio de Vivienda, 2016) para mitigar las consecuencias del frío en las personas.

En este capítulo también se presenta el sistema de regulación de temperatura basado en techos verdes, desarrollando las técnicas de evaluación analítica, computacional y experimental, para estos prototipos.

El Capítulo II empieza explicando sobre los fenómenos meteorológicos relacionados a las temperaturas bajas, como son las heladas, el friaje y la nieve. Además, se explica sobre los tipos de mecanismos de transferencia de calor en las edificaciones, y culmina con la explicación de la metodología de escalamiento, utilizado para la comprensión del comportamiento térmico en una vivienda de escala reducida.

En el Capítulo III, se describe la zona del proyecto, su geografía y ubicación, así como la descripción de las viviendas típicas que se pueden encontrar en esta zona.

En el Capítulo IV, se explica sobre los criterios empleados para el dimensionamiento de los modelos y prototipo, así como la metodología de escalamiento reducido por similitud geométrica.

Se describen los sensores utilizados para la medición de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) interior y exterior de los prototipos, así como la ubicación de los sensores y la frecuencia de la toma de datos.

En el Capítulo V, se muestra el registro de las temperaturas al interior y exterior de los modelos y prototipos de viviendas, así como se indica la lista de parámetros que tienen gran influencia en el cálculo de la temperatura interna, los cuales son el espesor del techo, densidad foliar, calor específico y conductividad térmica. Se muestra además las gráficas de comportamiento térmico de Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) vs Tiempo (días)”, para cada uno de estos tres modelos: MC-0, MV-1 y MV-3.

Y por último en el Capítulo VI, se describe los diferentes tipos de evaluación que se puede utilizar en la investigación, así como el procedimiento de validación de la evaluación computacional del modelo y prototipo.

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de beneficios por el uso e implementación de techos verdes .....	17
Tabla 2 Sistemas de Regulación de Temperatura. ....	21
Tabla 3 Resumen de ecuaciones de balance de energía relacionados a la cobertura vegetal.....	30
Tabla 4. Ecuaciones de transferencia de calor para la evaluación térmica de las edificaciones.....	33
Tabla 5. Zonificación Bioclimático del Perú, según la Norma EM.110.....	37
Tabla 6. Clasificación de provincias por zonas bioclimáticas .....	37
Tabla 7. Características climáticas de la zona del proyecto, según Norma EM.110 Confort térmico y lumínico con eficiencia energética, y lo medido experimentalmente. ....	38
Tabla 8. Propiedades térmicas y espesor de los materiales que conforman el techo verde del prototipo .....	38
Tabla 9. Propiedades térmicas y espesor de los materiales que conforman el muro del prototipo.....	39
Tabla 10 Características de la Vivienda Prototipo de la Zona del proyecto. ....	40
Tabla 11 Escalas usadas en la presente tesis para el diseño del modelo de vivienda. ....	42
Tabla 12 Características del modelo de escala reducida de la zona del proyecto. ....	42
Tabla 13 Características de los módulos de vivienda utilizados para el desarrollo experimental. ....	45
Tabla 14 Resumen de ubicación de sensor, frecuencia de toma de datos y periodo para cada punto de medición de parámetro (temperatura y humedad).....	47
Tabla 15: Características de los escenarios de análisis de la investigación. ....	49
Tabla 16. Valores referenciales de los coeficientes de eficiencia.....	56
Tabla 17. Ecuaciones de cálculo de los coeficientes estadísticos para ajuste de modelo.....	57
Tabla 18 Valores de ganancia de temperaturas °C de calificación baja en el interior de viviendas que cuentan con sistemas de regulación de temperatura.....	58
Tabla 19. Valores de parámetros climáticos utilizados en el software EnergyPlus .....	59
Tabla 20. Obtención de flujos de calor por Conducción en el prototipo y modelo. ....	61

Tabla 21. Obtención de flujos de calor por Convección en el prototipo y modelo. .....	61
Tabla 22. Obtención de flujos de calor por Radiación en el prototipo y modelo.	61
Tabla 23. Resumen de flujos de calor en el modelo y prototipo para el escenario 1. ....	62
Tabla 24. Flujos de calor totales por conducción en el prototipo y modelo del escenario 2. ....	63
Tabla 25. Flujos de calor totales por convección en el prototipo y modelo del escenario 2. ....	63
Tabla 26. Flujos de calor totales por radiación en el prototipo y modelo del escenario 2. ....	63
Tabla 27. Resumen de flujos de calor totales en el modelo y prototipo del escenario 2. ....	64
Tabla 28. Obtención de flujos de calor por Conducción en el prototipo y modelo. .....	64
Tabla 29. Obtención de flujos de calor por Convección en el prototipo y modelo. .....	65
Tabla 30. Obtención de flujos de calor por Radiación en el prototipo y modelo.	65
Tabla 31. Valores resultantes de los flujos de calor en el modelo y prototipo.....	65
Tabla 32. Temperaturas medidas al interior del modelo de vivienda MV-3 .....	67
Tabla 33. Tabla de coeficientes estadísticos obtenidos de los valores de temperatura registradas y simuladas del escenario 1. ....	67
Tabla 34. Tabla de coeficientes estadísticos obtenidos de los valores de temperatura registradas y simuladas del escenario 3. ....	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Techo con cobertura vegetal tradicional en las viviendas de Islandia ..	17
Figura 2 Tipos de transferencia de calor .....	23
Figura 3. Diagrama Bioclimático de Olgyay .....	28
Figura 4 Diagrama de B. Givoni.....	29
Figura 5 Ubicación de las líneas bioclimáticas del SFR en relación con el polígono de Givoni. ....	29
Figura 6 Esquema de Balance de Energía en área de cobertura vegetal. ....	30
Figura 7 Mapa de ubicación del departamento de Junín.....	34
Figura 8 Mapa de Ubicación de la provincia de Yauli y distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán .....	35
Figura 9. Vivienda típica de la zona del proyecto. ....	36
Figura 10. Estructura de techo de verde .....	39
Figura 11 Vista frontal de los muros, ventana y puerta del prototipo .....	40
Figura 12. Vista en planta de la vivienda prototipo.....	41
Figura 13. Vista frontal del prototipo de vivienda.....	41
Figura 14 Vista en planta del modelo a escala reducida. ....	43
Figura 15 Vista frontal del modelo a escala reducida. ....	43
Figura 16 Vista Panorámica del modelo de control (izquierda) y de los tres modelos de vivienda con techo verde. ....	44
Figura 17 Vista en planta de los cuatro modelos de vivienda de escala reducida .....	44
Figura 18 Sensor termohigrómetro Datalogger YUWESE SSN-22ET utilizado en la toma de temperaturas en el modelo a escala reducida. ....	46
Figura 19 Colocación de Sensor termohigrómetro al centro geométrico del interior del modelo de vivienda construido.....	46
Figura 20 Colocación de sonda externa de termohigrómetro en el sustrato del modelo a escala reducida con techo verde. ....	47
Figura 21 Plano de ubicación típica del sensor en el modelo de control MC-0... 48	
Figura 22 Plano de ubicación típica del sensor en el modelo con techo verde MV-1, MV-2 y MV-3.....	48
Figura 23. Geometría de Vivienda definida en el software Sketchup .....	51
Figura 24 Ubicación de Zonas con acceso a data meteorológica de EnergyPlus .....	51
Figura 25 Gráfico que relaciona el costo y la dificultad de la evaluación física de una variable, para los tres tipos de métodos de evaluación: analítico, computacional y experimental.....	52

Figura 26 Gráfica de temperatura interna del modelo MC-0, temperatura interna del modelo MV-3, y la temperatura ambiental, en el periodo de 19 al 21 de diciembre del 2017. .... 66

Figura 27. Gráfica de temperatura vs tiempo del modelo construido MC-0 con el modelo simulado en el EnergyPlus, del escenario 1. .... 68

Figura 28. Gráfica de temperatura vs tiempo del modelo construido MV-3 con el modelo simulado en el EnergyPlus, del escenario 3. .... 68

Figura 29. Gráfica de temperatura interna del modelo y del prototipo simulados del escenario 1, y la temperatura ambiental, en el periodo del 19 al 21 de diciembre del 2017..... 69

Figura 30. Gráfica de temperatura interna del prototipo simulado del escenario 2, y la temperatura ambiental, en el periodo del 19 al 21 de diciembre del 2017. ..70

Figura 31. Gráfica de temperatura interna del modelo y del prototipo simulados del escenario 3, y la temperatura ambiental, en el periodo de 19 al 21 de diciembre del 2017..... 70

Figura 32. Gráfica de temperatura interna de los prototipos simulados del escenario 1, 2 y 3, y la temperatura ambiental, en el periodo de 19 al 21 de diciembre del 2017. .... 71

## LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS

<b>dQ/dt</b>	: Flujo de calor (W)
<b>k</b>	: Conductividad térmica del elemento físico de análisis (W/m°C)
<b>A</b>	: Área de la superficie total del elemento físico de análisis (m <sup>2</sup> )
<b>ΔT</b>	: variación de temperatura (°C)
<b>L</b>	: longitud de un elemento (m)
<b>Lc</b>	: longitud característica de un elemento (m)
<b>h</b>	: Coeficiente de transferencia de calor por convección (adimensional)
<b>Nu</b>	: Número de Nusselt (adimensional)
<b>Re</b>	: Número de Reynolds (adimensional)
<b>Pr</b>	: Número de Prandtl (adimensional)
<b>u</b>	: Velocidad del flujo del aire (m/s)
<b>v</b>	: Viscosidad cinemática del aire, (m <sup>2</sup> /s)
<b>ε</b>	: Coeficiente de emisividad (adimensional)
<b>σ</b>	: Constante de Stefan-Boltzmann (5.67x10 <sup>-8</sup> W/ m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
<b>Ce</b>	: Calor específico (J/kg K)
<b>C</b>	: Capacidad calorífica (J/K)
<b>Q</b>	: Calor transferido (J)
<b>α</b>	: Difusividad térmica (m <sup>2</sup> /s)
<b>R<sub>t</sub></b>	: Resistencia térmica (K/W)
<b>Ff</b>	: Flujo neto de calor a la capa de follaje ancho (W/m <sup>2</sup> )
<b>Fg</b>	: Flujo neto de calor en el suelo (W/m <sup>2</sup> )
<b>Hf</b>	: Flujo de calor transferido por convección en la capa de follaje (W/m <sup>2</sup> )
<b>Hg</b>	: Flujo de calor sensible en el suelo (W/m <sup>2</sup> )
<b>I<sub>s</sub></b>	: Radiación total de onda corta entrante ancho (W/m <sup>2</sup> )
<b>I<sub>i</sub></b>	: Radiación total de onda larga entrante ancho (W/m <sup>2</sup> )
<b>Lf</b>	: Flujo de calor latente en el suelo (W/m <sup>2</sup> )
<b>Lg</b>	: Flujo de calor latente en el follaje (W/m <sup>2</sup> )
<b>α<sub>f</sub></b>	: Albedo en la copa de la planta (adimensional)
<b>α<sub>g</sub></b>	: Albedo en la superficie del suelo (adimensional)
<b>σ<sub>f</sub></b>	: Fracción de cobertura de vegetación verde (adimensional)
<b>ε<sub>f</sub></b>	: Coeficiente de emisividad en la copa de las plantas (adimensional)
<b>ε<sub>g</sub></b>	: Coeficiente de emisividad en la superficie del suelo (adimensional)
<b>Tf</b>	: Temperatura del follaje de plantas (°C)
<b>Tg</b>	: Temperatura en la superficie del suelo (°C)

- $\pi_i$  : Numero  $\pi$  (adimensional)
- $q_n$  : Variable física involucrada en un problema particular
- $\Pi_n$  : Productoria de n variables
- $V_D$  : Variables físicas relevantes
- $V_F$  : Variables dinámicas
- MC-0** : Modelo de vivienda de control tipo 0
- MV-1** : Modelo de vivienda con techo verde tipo 1
- MV-2** : Modelo de vivienda con techo verde tipo 2
- MV-3** : Modelo de vivienda con techo verde tipo 3
- MVER** : Modelo de vivienda de escala reducida
- PVER** : Prototipo de vivienda de escala real
- IIFIC** : Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

### **1.1 PROBLEMÁTICA**

Actualmente, en las zonas altoandinas del centro y sur del Perú, las temperaturas cada vez son más variables, en mucho de los casos no se encuentran dentro de los rangos habituales. En el año 2018 se registró el valor de temperatura más baja (-25°C en el pueblo Mazocruz, Puno), (SENAMHI-PERÚ, 2018). Conllevando al desarrollo de enfermedades de vías respiratorias de las personas de las zonas mencionadas, siendo los más afectados los niños y ancianos (MINSA, 2018).

En el año 2018, el MINSA reportó que una de las principales causas de muertes en niños menores a 5 años y adultos mayores a los 60 años son las infecciones respiratorias.

### **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Con la finalidad de prevenir y disminuir los casos de infecciones respiratorias en niño y adultos mayores, causados por el cambio brusco de temperatura, se busca desarrollar un sistema de regulación de temperatura basado en un techo con cobertura vegetal.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL:**

- Determinar experimentalmente el confort térmico de una vivienda rural con un sistema de regulación de temperatura basado en un techo con cobertura vegetal, haciendo uso de modelos de vivienda de escala reducida (MVER) y prototipos de vivienda a escala real (PVER).

#### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

- Medir las dimensiones de la vivienda rural, para definir las medidas del PVER.
- Definir las medidas geométricas del MVER.
- Identificar en qué intervalo de tiempo ocurre la variación máxima de temperatura tanto en el interior como en el exterior de la vivienda.

### **1.4 HIPÓTESIS**

El sistema tipo techo con cobertura vegetal, funciona como un sistema regulador de temperatura, logrando el aumento de las temperaturas al interior de la vivienda.

### 1.5 ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS DE TECHOS VERDES EN EL MUNDO

Los techos verdes son cobertura vegetal viva, que se pueden utilizar en edificaciones nuevas o en edificaciones existentes. Los techos verdes tienen muchos usos y beneficios, los cuales son clasificados como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1 Clasificación de beneficios por el uso e implementación de techos verdes

MEDIOAMBIENTALES	SOBRE LA EDIFICACION	SOCIALES Y URBANOS
Reducción de los niveles de contaminación	Mejora del aislamiento térmico	Mejora del paisaje urbano
Mitigación del efecto isla de calor	Aumento de la vida útil de la impermeabilización	Calidad de vida
Biodiversidad	Mejora del aislamiento acústico	Accesibilidad a la agricultura urbana
	generadores de agua caliente sanitaria y energía solar fotovoltaica	
	Gestión de aguas pluviales	
	Buen comportamiento frente al fuego	
	Incremento del valor de la edificación	

Fuente: (Iñigo Cruz, 2017)

Islandia ha sido uno de los primeros países en adoptar las técnicas de techos verdes como se muestra en la Figura 1, para disminuir la sensación de bajas temperaturas al interior de sus viviendas, dichas temperaturas oscilan entre 0.7 y 1.6 °C, según lo registrado en el periodo 1871 al 2002 (Hanna, Trausti, & Box, 2004).



Figura 1 Techo con cobertura vegetal tradicional en las viviendas de Islandia

Fuente: Archivo La Nación

Desde hace más de 40 años, se ha implementado el uso de cubiertas verdes en viviendas del estado de Stuttgart, Alemania, que han conseguido aumentar la temperatura dentro de la vivienda entre 2 ° C y 3 ° C. Estos sistemas de cubiertas verdes generaron gran impacto positivo en la regulación térmica en las viviendas, por lo cual, los estados de Alemania han desarrollado políticas estatales que promueven sus usos.

Asimismo, en la ciudad de Copenhague, Dinamarca, se tuvo la iniciativa de convertir las azoteas de los edificios en jardines, por tal razón, fue nombrada la Capital Verde Europea en el 2014, además, desde dicho año, se convirtió obligatorio el uso de techos verdes en esta ciudad.

En la ciudad de Madrid, España, se llevó a cabo el acondicionamiento de 100.000 metros cuadrados de azotea de la ciudad financiera del Banco Santander, con cobertura vegetal, convirtiéndose en una de las cubiertas ecológicas más importantes del mundo.

Así como los techos verdes tienen la finalidad de regular la temperatura, también pueden ser utilizados como sistemas de drenaje pluvial. Dichos sistemas de drenaje son también conocidos en Norteamérica como Best Management Practices (BMPs) y Low Impact Development (LID), y en Australia como Water Sensitive Urban Design (WSUD) y Natural Drainage Systems (NDS).

La ASTM International (ASTM International, 2014) estandariza los procesos de diseño y construcción de sistemas de techos verdes en su norma ASTM E2777.

Entre otras Normativas relacionadas a los techos verdes de la ASTM se tiene a:

- ASTM E2396: Método para evaluar la permeabilidad del agua saturada de drenajes granulares (método con descarga variable) para sistemas de techos con vegetación (verdes), para comparar un medio con otro. (ASTM E2396 / E2396M-15, 2015)
- ASTM E2397: Método para determinar las cargas permanentes y variables asociadas con los sistemas de techos con vegetación (verdes), para ayudar a evaluar la construcción debajo de la carga en cuanto a factores como el diseño estructural según el peso del sistema sin y con lluvia o riego. (ASTM E2397 / E2397M-15, 2015)
- ASTM E2398: Método de prueba para la captación de agua y la retención de medios de capas de drenaje de geocompuestos para sistemas de techos con vegetación (verdes), para ayudar a evaluar el desempeño de un sistema en relación con otro, como también para evaluar las exigencias de riego para diseños de sistemas. (ASTM E2398 / E2398M-15a, 2015)

- ASTM E2399: Método para evaluar la densidad máxima de medios para el análisis de cargas permanentes de los sistemas de techos con vegetación (verdes), que brinda un objetivo de medición de la densidad de los medios para calcular cargas estructurales. (ASTM E2399 / E2399M-15, 2015)
- ASTM E2400: Guía de selección, instalación y mantenimiento de plantas para sistemas de techos verdes, que incluye recomendaciones sobre la elección, plantación y riego de las plantas que crecen en techos con vegetación. (ASTM E2400 / E2400M-06(2015)e1, 2015)
- ASTM E2788: Especificación para usar esquisto, arcilla y pizarra expandidos (ESCS, por sus siglas en inglés) como componente mineral en medios de crecimiento y la capa de drenaje para sistemas de techos con vegetación (verdes), que detalla exigencias de calidad y gradación. (ASTM E2788 / E2788M-18, 2018)

En la actualidad hay países que tienen normativas relacionadas al uso de los techos verdes en sus viviendas, países como:

- Argentina: Ley N° 4428 de Techos o Terrazas Verdes, sobre la reducción de impuestos. (Pérez & Ritondo, 2012)
- Francia: Artículo L111-19 (Gobierno Francés, 2016)
- Colombia: Ley N° 418, 2009. (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2009)
- Canadá: Capítulo 492, Green Roofs. (Toronto Municipal Code, 2009)

## 1.6 ESTADO DEL ARTE SOBRE TECHOS VERDES EN EL PERÚ

En el Perú, la implementación y uso de los techos verdes es reciente, y el uso de este sistema con fines paisajísticos en las ciudades se ha promovido más en la última década.

En el distrito de Comas, Lima, se realizó una evaluación ambiental y económica sobre el uso de los techos verdes en la urbanización El Pinar (Victorio Toribio, 2017).

Además, en el distrito de San Miguel, Lima, se realizó una investigación para la propuesta de implementación del uso de techos verdes con geomembrana importada de Estados Unidos, con la finalidad de cumplir con la meta 8 de biodiversidad de Aichi (Del Aguila Arcentales, 2017).

En el distrito de Pozuzo, Huánuco, se realizó la evaluación de la reducción del consumo de la energía eléctrica, mediante la implementación de un techo verde de tipo indirecto al interior de la I.E.P. Peruano – alemán (Inga Caqui, 2018).

En el distrito de Nuevo Chimbote, Ancash, se realizó investigaciones sobre la propuesta de diseño de techo verde en azotea para vivienda en zona de expansión urbana (Rodríguez Perez, 2017).

En el distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán, Yauli, se realizó el proyecto de investigación “Propuesta de techos verdes acondicionados a viviendas rurales de las zonas altoandinas del Perú (altitud > 3500 msnm)”, financiado por el Instituto de Investigación de la FIC – UNI, con el objetivo de evaluar el comportamiento térmico del uso de cobertura vegetal en los techos de las viviendas de dicha zona, se obtuvo que la cubierta vegetal amortigua la temperatura del interior de una vivienda hasta 6 °C (IIFIC-UNI, 2019).

### 1.7 OTROS SISTEMAS DE REGULACIÓN DE TEMPERATURA

Debido a la ubicación geográfica de muchos países, estos cuentan con climas gélidos o fríos lo que ha conllevado que los gobiernos implementen sistemas de regulación de temperatura en las viviendas que les permite adaptarse a estos climas.

Uno de los primeros países en implementar el sistema de Calefacción Ondol, es Corea del Norte, lo cual consiste en aprovechar el calor de la radiación emitida por el humo producido en la cocina que está a un nivel inferior del piso de la vivienda. El humo generado fluye por los conductos ubicados debajo del piso y fuga por la chimenea, en el proceso logra calentar el piso de la vivienda.

En otros países, se desarrolló el sistema muro Trombe, lo cual es una infraestructura fija que se coloca en las zonas laterales de la vivienda con la finalidad de captar radiación solar y convertirlo en un sencillo sistema de calefacción, además este sistema no requiere de mantenimiento constante.

Entre los años 900 y 1400 d.c, existía un conjunto de pueblos en el distrito de Atavillos Alto, provincia de Huaral, Lima, a una altura aproximada de 3300 msnm, que contaban con infraestructuras como casas, corrales y sitios funerarios, llamadas Kullpis, cuya técnica de construcción consistía en usar muros de piedra, que podían llegar hasta los 8m de altura, techos de piedra, barro y vegetación, que ayudaban a mitigar las bajas temperaturas del ambiente. (Van Dalen Luna, 2014)

En el año 2016, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, publicó un libro “Abrigando Hogares” en donde describe las principales características constructivas de varios tipos de sistemas de regulación de temperatura ya implementados en las viviendas de la zona centro y sur del Perú.

Tabla 2 Sistemas de Regulación de Temperatura.

ITEM	SISTEMAS DE REGULACIÓN DE TEMPERATURA
<b>1</b>	<b>VANOS</b>
1.1	Ventana Doble
1.2	Doble puerta y ventana con vidrio doble y contraventana
<b>2</b>	<b>TECHOS</b>
2.1	Cielo raso aislante
2.2	Aislamiento Térmico de techos con calamina metálica, colchoneta de lana de oveja y plancha de fibrocemento
2.3	Aislamiento de techo con colchón de totora
<b>3</b>	<b>MUROS</b>
3.1	Aislamiento de muro de piedra con colchón de totora
3.2	Muros contenedores de calor
<b>4</b>	<b>PISOS</b>
4.1	Aislamiento higrotérmico con una cama de piedra y una cama de entablado de madera
4.2	Piso antihumedad con acabado de madera o barro pulido
4.3	Aislamiento de piso con sabana de plástico, plancha de tecnopor y entablado de madera
4.4	Piso de cemento pulido.
<b>5</b>	<b>CAPTACION DE CALOR</b>
5.1	Claraboyas en el techo
5.2	Fitotoldo adosado
5.3	Muro trombe

Fuente: (Ministerio de Vivienda, 2016)

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 DEFINICIONES TÉCNICAS**

#### **2.1.1 HELADAS**

La helada meteorológica es un fenómeno atmosférico que se presenta cuando la temperatura del aire desciende hasta los 0 °C o menos, durante un tiempo mayor a cuatro horas.

Estas ocurren debido al movimiento de las masas de aire frío proveniente de la Antártida.

En la región andina, las heladas ocurren después de la puesta del sol, la superficie terrestre empieza a liberar el calor acumulado durante el día, si se encuentra con las nubes en su trayecto, rebota y regresa a las superficies, pero si está despejado este se libera al espacio ocurriendo el enfriamiento.

El periodo de ocurrencia de las heladas depende de los regímenes climáticos de cada ecorregión, en la región andina del Perú, en zonas ubicadas por encima de los 3200 msnm, en la sierra central las heladas ocurren entre mayo y agosto y en la sierra norte suelen ocurrir entre julio y noviembre (SENAMHI-Perú, 2005). Sin embargo, en los últimos años se han registrado los niveles más bajos entre mayo y setiembre.

Las localidades ubicadas sobre los 4000 msnm en los departamentos de Arequipa, Moquegua, Huancavelica, Cusco, Tacna y Puno, presentan heladas meteorológicas durante todo el año, acentuándose más entre el otoño, invierno y primavera (heladas permanentes).

#### **2.1.2 FRIAJES**

En la región amazónica se conoce con este nombre y se ha registrado descenso de hasta los 7°C en las temperaturas diurnas que impactan en la salud y en los cultivos tropicales no adaptados a estas condiciones. Estos descensos bruscos de la temperatura principalmente ocurren en los meses de menor precipitación (junio - agosto), están asociados a la incursión de masas de aire frío de origen polar y tienen una duración media de cinco días, que avanzan desde el extremo sur del continente Sudamericano. A su vez, estos generan tormentas eléctricas, lluvias de moderada a fuerte intensidad e incremento de viento en la selva baja y alta; la temperatura del aire disminuye en algunas horas en 10 °C o 20°C registrando valores extremadamente bajos para la región tropical continental (Marengo, 1983).

### 2.1.3 NEVADAS

En el Perú, la presencia de humedad en niveles medios de la atmósfera, proveniente de la cuenca amazónica, el ingreso de aire frío y seco proveniente de latitudes medias en el Pacífico hacia regiones tropicales, conlleva a la formación de frontogénesis tropicales y posteriormente ocurre una precipitación de nieve en las zonas altas del Perú, sobre los 3500 msnm de la región sur del Perú (Quispe, 2005).

### 2.2 TIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La energía calorífica se transmite desde las zonas con alta temperatura a las zonas de baja temperatura, acompañado con un cambio de entropía que alcanza el estado de equilibrio térmico caracterizado por una distribución uniforme de temperaturas.

Denominamos calor a la transferencia de energía que tiene lugar sin un movimiento ordenado del sistema, en contraposición a la transferencia de energía que tiene lugar con un movimiento ordenado.

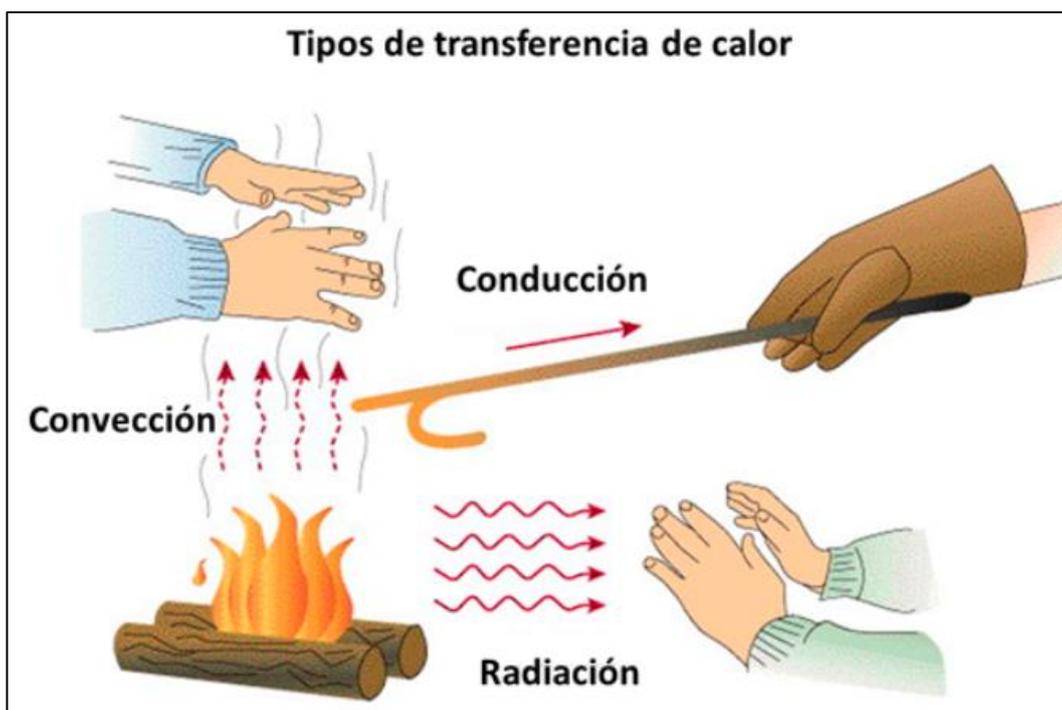


Figura 2 Tipos de transferencia de calor

Fuente: Arquitectura & Energía: Portal de eficiencia energética y sostenibilidad en arquitectura y edificación (Arquitectura & Energía, 2015)

### 2.2.1 LA CONDUCCIÓN

La conducción se realiza al estar dos cuerpos sólidos en contacto físico. El contacto entre moléculas permite homogenizar el grado de excitación térmica, lo que se manifiesta macroscópicamente como un flujo de calor. La velocidad a la cual se transporta calor en un sistema que no está en equilibrio sujeto a conducción se puede hallar por la ley de Fourier. En una sola dirección, es representada por la Ecuación 1.

$$\text{Ecuación 1: } dQ/dt = -k * A * \frac{\Delta T}{L} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

dQ/dt: es el flujo de calor por conducción, (W)

k: es la conductividad térmica del elemento físico de análisis, (W/m°C)

A: es el Área de la superficie total del elemento físico de análisis, (m<sup>2</sup>)

ΔT: es la variación de temperatura a través de todo el ancho del elemento, (°C)

L: es el ancho del elemento físico de análisis, (m)

(Müller, 2002)

### 2.2.2 LA CONVECCIÓN

La transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido adyacente se denomina frecuentemente convección y se refiere como natural o forzada dependiendo de si el movimiento del fluido se debe a fuerzas de flotación o a otras fuerzas inducidas. En estos casos se puede evaluar la transferencia de calor por medio de la Ecuación 2.

$$\text{Ecuación 2: } dQ/dt = h * A * \Delta T \dots\dots\dots (2)$$

Resolviendo para un flujo laminar:

$$dQ/dt = \left( \frac{Nu * k}{L} \right) * A * \Delta T$$

$$dQ/dt = \left( \frac{0.664 * Re^{\frac{1}{2}} * Pr^{\frac{1}{3}} * k}{L} \right) * A * \Delta T$$

$$dQ/dt = \left( \frac{0.664 * \left( \frac{u * L}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} * Pr^{\frac{1}{3}} * k}{L} \right) * A * \Delta T$$

Donde:

dQ/dt: es el flujo de calor por convección, (W)

h: es el coeficiente de transferencia de calor por convección, (adimensional)

A: es el Área de superficie por donde pasa el flujo de aire, (m<sup>2</sup>)

ΔT: es la variación de temperatura, (°C)

Nu: es el número de Nusselt, (adimensional)  
k: es la conductividad térmica del aire, (W/m°C)  
Re: es el número de Reynolds, (adimensional)  
Pr: es el número de Prandtl, (adimensional)  
L: es la longitud de la superficie por donde pasa el flujo de aire, (m)  
u: es la velocidad del flujo del aire, (m/s)  
v: es la viscosidad cinemática del aire, (m<sup>2</sup>/s)  
(Incropera, 1999)

### 2.2.3 LA RADIACIÓN

La radiación térmica es emitida por la materia como consecuencia de cambios en las configuraciones de los átomos y las moléculas. A diferencia de la conducción, la radiación no requiere de un contacto entre los cuerpos y puede llevarse a cabo hasta en el vacío. El caso familiar de la radiación es el calentamiento debido a la acción del sol. Tanto sólidos, líquidos como gases pueden emitir o absorber radiación en alguna proporción. La radiación se cuantifica macroscópicamente utilizando la relación de Stefan-Boltzmann, representada en la Ecuación 3.

$$\text{Ecuación 3: } q_r = \varepsilon * \sigma * A * (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

$q_r$ : es el flujo de calor por radiación, (W)  
 $\varepsilon$ : es la propiedad de la emisividad, la cual proporciona una medida de la eficiencia con una superficie que emite energía en relación con un cuerpo negro, la cual tiene como rango de valores:  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  (adimensional)  
 $\sigma$ : es la constante de Stefan-Boltzmann, que tiene el valor de:  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/ m}^2 \text{ K}^4$ , (W/ m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>)  
A: es el Área de la superficie exterior total que está en contacto con el medio ambiente, (m<sup>2</sup>)  
 $T_1$ : es la temperatura del cuerpo negro, (K)  
 $T_2$ : es la temperatura superficial del cuerpo, (K)  
(Incropera, 1999)

## 2.3 PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES

### 2.3.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA ( $k$ )

Es una medida de la capacidad de un material para conducir calor. La cual es usada en la ecuación denominada Ley de Fourier de la conducción de calor, representada en la Ecuación 1.

Su símbolo es “ $k$ ”, y sus unidades en el Sistema Internacional son  $W/m^*K$

### 2.3.2 CALOR ESPECÍFICO ( $c$ ) y CAPACIDAD CALORÍFICA ( $C$ )

El calor específico (o capacidad calorífica específica) es la energía necesaria para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia. Su símbolo es “ $c$ ”, y sus unidades en el Sistema Internacional son  $J/kg^*^{\circ}C$ .

La Capacidad calorífica representa la capacidad de almacenamiento de calor de un material, expresada por unidad de volumen. Su símbolo es “ $C$ ”, y sus unidades en el Sistema Internacional son  $J/m^3.^{\circ}C$  (Cengel, 2007).

La Ecuación 4 representa la relación entre la propiedad de calor específico y capacidad calorífica.

$$\text{Ecuación 4: } C = p * c \dots\dots\dots (4)$$

$C$ : Capacidad calorífica. ( $J/m^3.^{\circ}C$ )

$p$  : Densidad de un material ( $kg/m^3$ )

$c$ : Calor específico de un material ( $J/kg. ^{\circ}C$ )

### 2.3.3 DIFUSIVIDAD TÉRMICA ( $\alpha$ )

Es una propiedad de un material que aparece en el análisis de la conducción del calor en régimen transitorio, la cual representa cuán rápido se difunde el calor por un material y se define en la Ecuación 5.

$$\text{Ecuación 5: } \alpha = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Calor almacenado}} = \frac{k}{\rho c_p} \left( \frac{m^2}{s} \right) \dots\dots\dots (5)$$

La conductividad térmica  $k$  representa lo bien que un material conduce el calor y la capacidad calorífica  $\rho c_p$  representa cuánta energía almacena un material por unidad de volumen. La difusividad térmica de un material es la razón entre el calor conducido a través del material y el calor almacenado por unidad de volumen. (Cengel, 2007)

### 2.3.4 RESISTENCIA TÉRMICA ( $R_t$ )

Capacidad de un material para resistir el paso de flujos de calor. Es la oposición al paso del calor que presenta una capa de cierto espesor ( $e$ ) de un material. Es inversamente proporcional a la conductividad térmica y aumenta con el espesor de material.

La resistencia térmica se presenta en los tres estados de transferencia de calor, por conducción, convección y radiación, estas resistencias cumplen la relación que se muestra en la Ecuación 6.

Ecuación 6

$$\text{Ecuación 6: } R_t = R_{cond} + R_{conv} + R_{rad} \dots \dots \dots (6)$$

Donde:

$R_t$  : es la Resistencia térmica total del material, cuyas unidades son  $\frac{m^2.k}{W}$ .

$R_{cond}$  : es la Resistencia térmica por conducción, cuyas unidades son  $\frac{m^2.k}{W}$ .

$R_{conv}$  : es la Resistencia térmica por convección, cuyas unidades son  $\frac{m^2.k}{W}$ .

$R_{rad}$  : es la Resistencia térmica por radiación, cuyas unidades son  $\frac{m^2.k}{W}$ .

### 2.4 CONFORT TÉRMICO

Es una sensación neutra de la persona respecto a un ambiente térmico determinado. Según la norma ISO 7730 “es una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico”. Representa un rango de condiciones de confort aceptables donde las personas no sienten ni frío ni calor.

Existen gráficas que dependiendo del valor de la temperatura seca y la humedad del ambiente interior se puede obtener una zona de confort térmico, estas gráficas son denominadas diagramas bioclimáticos.

Los diagramas bioclimáticos integran dos o más variables en un mismo gráfico, las cuales establecen unas zonas de confort, que dependen de la temperatura, humedad y/o viento. Tienen como objetivo ser una herramienta para el diseño de edificaciones adaptadas a las condiciones climáticas del medio, proporcionando ambientes de confort térmico a sus usuarios.

Los diagramas bioclimáticos más utilizados son los de Olgyay y la de Givoni.

El diagrama bioclimático de Olgyay permite determinar las características climáticas de espacios abiertos y es de gran utilidad para la elección del emplazamiento y orientación de los edificios. En la Figura 3 se muestra el diagrama bioclimático de Olgyay, donde se aprecia la zona de confort y tres líneas bioclimáticas para tres meses del año en Puno. (Espinoza P., 2014)

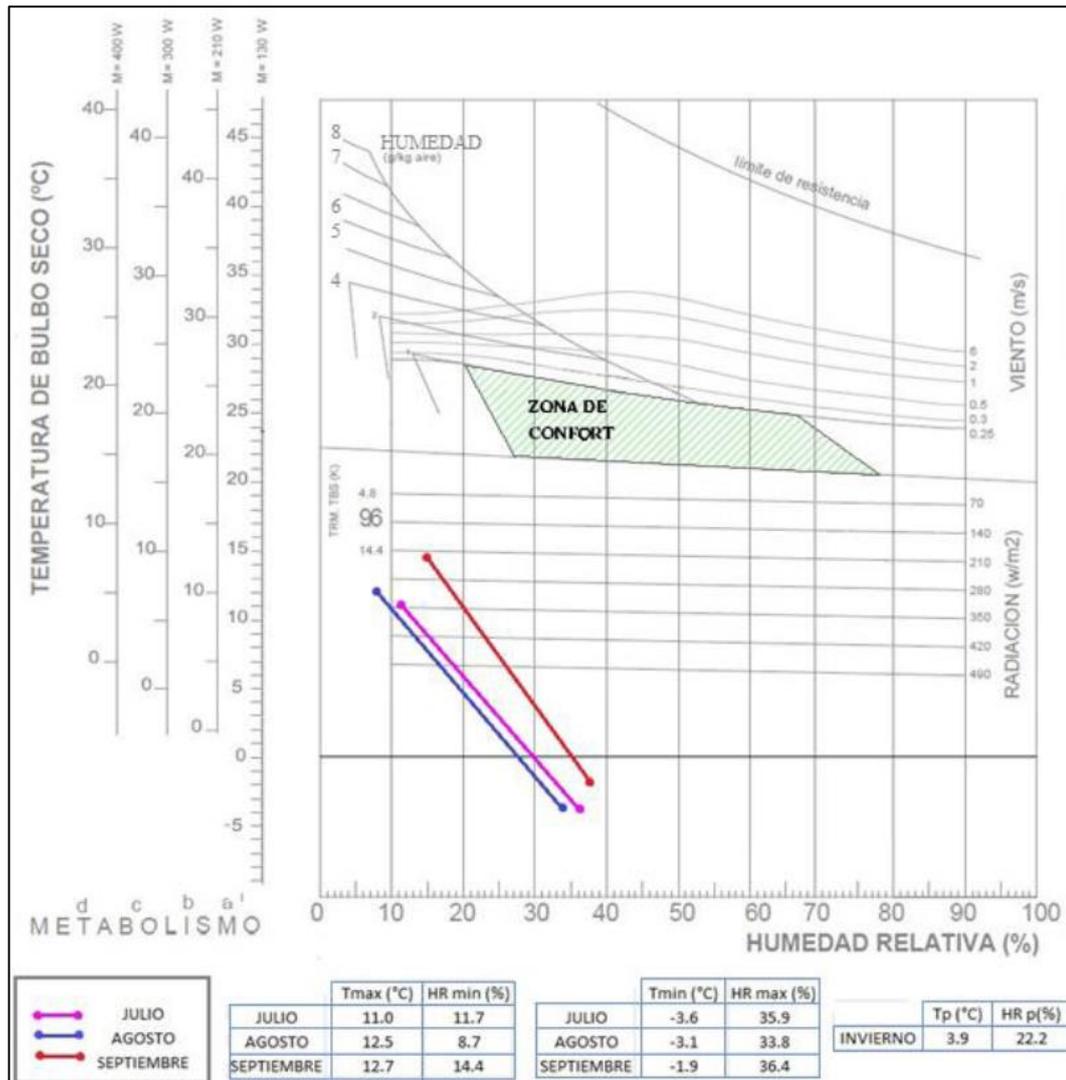


Figura 3. Diagrama Bioclimático de Olgay  
Fuente: (Espinoza P., 2014)

El diagrama bioclimático de Givoni, se utiliza para determinar las condiciones microclimáticas del interior de los edificios, lo que permite evaluar las necesidades energéticas de calentamiento o ventilación necesarias para mantener unas condiciones adecuadas de confort. (Fernández García, 1994). En la Figura 4, se muestra el diagrama de Givoni aplicado a los climas húmedos de la Argentina.

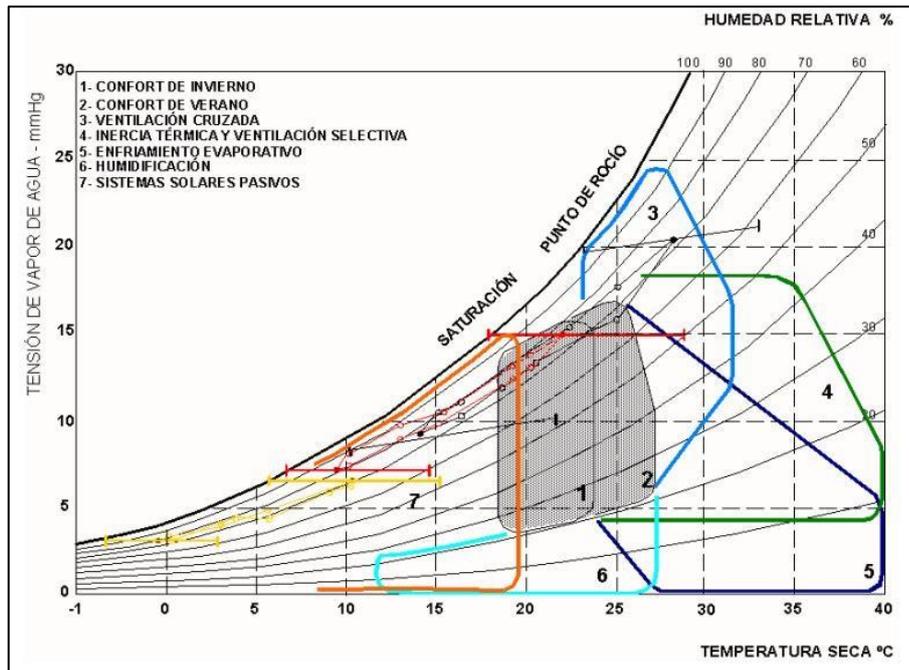


Figura 4 Diagrama de B. Givoni

Fuente: (Espinoza P., 2014)

Según investigaciones realizadas por el Centro de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Ingeniería (CER-UNI), en el departamento de Ayacucho, provincia Vilcashuamán, en la comunidad de San Francisco de Raymina, se propone unas líneas bioclimáticas de este clima, para cada uno de los doce meses del año sobre una carta Psicrométrica, con relación al polígono de Givoni.

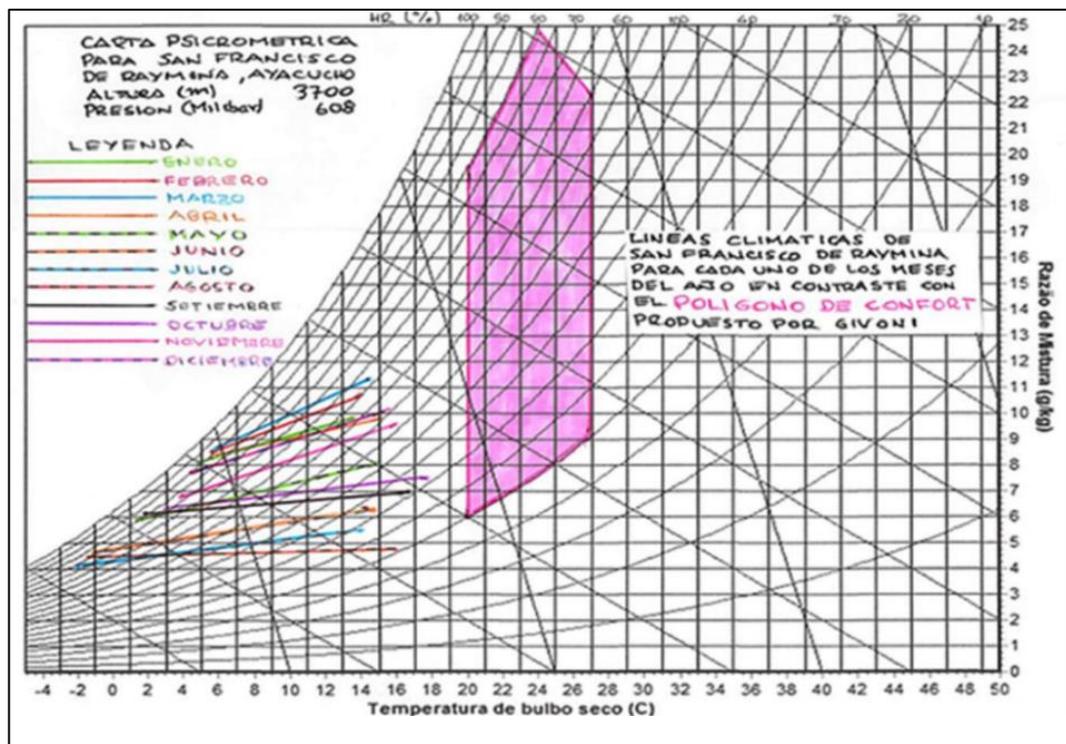


Figura 5 Ubicación de las líneas bioclimáticas del SFR en relación con el polígono de Givoni.

Fuente: (Espinoza P., 2014)

## 2.5 BALANCE DE ENERGÍA EN LA COBERTURA VEGETAL

El techo verde funciona como un regulador térmico, debido que hay un conjunto de flujos de transferencia de calor (energía) en este sistema (radiación solar, nubosidad, aire, plantas, sustrato vegetal).

A los cálculos realizados para obtener el flujo de transferencia de calor resultante, se le denomina balance de energía. El balance de energía en la cobertura vegetal describe la relación entre los flujos de energía que ingresan y salen del sistema de cobertura vegetal.

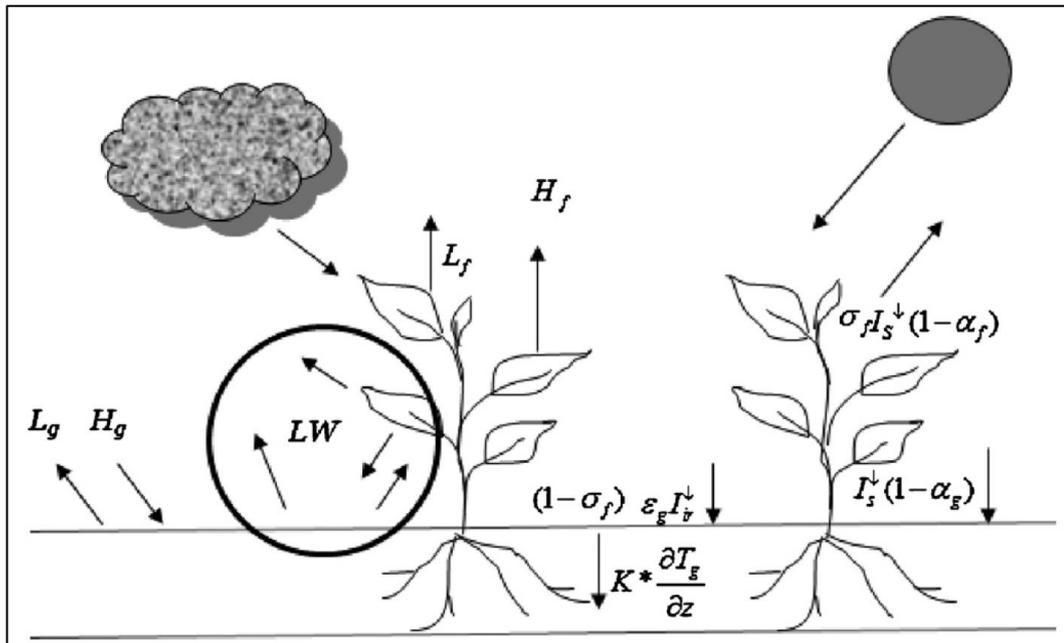


Figura 6 Esquema de Balance de Energía en área de cobertura vegetal.

Fuente: (Sailor, 2008)

Para el análisis térmico del sistema techo verde se utilizó el software EnergyPlus, el cual presenta entre sus módulos de procesamiento a las ecuaciones de J. Sailor que considera para sus cálculos las variables indicadas en la Tabla 3.

Tabla 3 Resumen de ecuaciones de balance de energía relacionados a la cobertura vegetal.

BALANCE DE ENERGÍA	
PLANTAS	SUSTRATO
Ecuación de Balance de energía en las plantas:	Ecuación de Balance de energía en el sustrato:
Ecuación 7:	Ecuación 8:

<b>BALANCE DE ENERGÍA</b>	
<b>PLANTAS</b>	<b>SUSTRATO</b>
$F_f = \sigma_f \left[ I_s^\downarrow (1 - \alpha_f) + \varepsilon_{ir} I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_f \sigma T_f^4 \right]$ $+ \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f.$ <p style="text-align: center;">..... (7)</p>	$F_g = (1 - \sigma_f) [I_s^\downarrow (1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g T_g^4]$ $- \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K \times \frac{\partial T_g}{\partial z}$ <p style="text-align: center;">..... (8)</p>
<p><math>F_f</math> (W/m<sup>2</sup>): flujo neto de calor a la capa de follaje</p> <p><math>H_f</math> (W/m<sup>2</sup>): flujo de calor transferido por convección en la capa de follaje</p> <p><math>I_s^\downarrow</math> (W/m<sup>2</sup>): <math>I_s^\downarrow</math> radiación total de onda corta entrante</p> <p><math>I_{ir}^\downarrow</math> (W/m<sup>2</sup>): radiación total de onda larga entrante</p> <p><math>L_f</math> (W/m<sup>2</sup>): Flujo de calor latente en el follaje</p> <p><math>\alpha_f</math>: Albedo (Reflectividad de onda corta) en la copa de la planta</p> <p><math>\sigma_f</math>: fracción de cobertura de vegetación verde</p> <p><math>\sigma</math>: Stefan-Boltzmann constant (5.67x10<sup>-8</sup> W/ m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>)</p> <p><math>\varepsilon_f</math>: coeficiente de emisividad de las copas de las plantas</p> <p><math>\varepsilon_g</math>: coeficiente de emisividad en la superficie del suelo</p> <p><math>T_f</math>: Temperatura del follaje de plantas</p> <p><math>T_g</math>: Temperatura en la superficie del suelo</p>	<p><math>F_g</math> (W / m<sup>2</sup>): flujo neto de calor en el suelo.</p> <p><math>H_g</math> (W/m<sup>2</sup>): flujo de calor sensible al suelo.</p> <p><math>I_s^\downarrow</math> (W/m<sup>2</sup>): <math>I_s^\downarrow</math> radiación total de onda corta entrante</p> <p><math>I_{ir}^\downarrow</math> (W/m<sup>2</sup>): radiación total de onda larga entrante</p> <p><math>L_g</math> (W/m<sup>2</sup>): flujo de calor latente en el suelo.</p> <p><math>\alpha_g</math>: albedo (reflectividad de onda corta) en la superficie del suelo.</p> <p><math>\sigma_f</math>: fracción de cobertura de vegetación verde</p> <p><math>\sigma</math>: Stefan-Boltzmann constant (5.67x10<sup>-8</sup> W/ m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>)</p> <p><math>\varepsilon_f</math>: coeficiente de emisividad de las copas de las plantas</p> <p><math>\varepsilon_g</math>: coeficiente de emisividad en la superficie del suelo</p> <p><math>T_f</math>: Temperatura del follaje de plantas</p> <p><math>T_g</math>: Temperatura en la superficie del suelo</p>

Fuente: (Sailor, 2008)

Debido a que, el método de escalamiento requiere de las variables dimensionales que intervienen en la transferencia de calor o balance de energía de todos los parámetros que intervengan, y como la cobertura vegetal es de la vivienda, es que

las ecuaciones de J. Sailor son de utilidad para identificar cuáles son estas variables.

## 2.6 METODOLOGÍA DE ESCALAMIENTO: MÉTODO DE ANÁLISIS DIMENSIONAL NO DISTORSIONADO

En la presente tesis, se busca realizar la evaluación térmica de la vivienda típica acondicionada con el componente techo verde, y obtener cuánto de temperatura se logra incrementar en su interior para el instante más frío, para ello se realiza la evaluación experimental en una edificación de dimensiones reducidas, que se pueda cuantificar y comparar, por ello se plantea el uso de una metodología de escalamiento reducido, la cual consiste en el análisis dimensional.

El método de análisis dimensional consiste en obtener los factores de escala de las dimensiones geométricas de los componentes de la vivienda prototipo; a tal edificación de escala reducida se le denominará el modelo.

Según Lirola, el método de análisis dimensional se divide en 2 tipos: Distorsionado y No distorsionado, en donde con el método distorsionado se obtiene diferentes factores de escala geométricos para obtener las dimensiones de los elementos de la envolvente del prototipo, de tal manera que la temperatura al interior del modelo sea la misma que la del prototipo; por otro lado, con el método No distorsionado se obtiene un mismo factor de escala geométrico para los elementos que conforman la envolvente del modelo, pero una temperatura interna diferente a la del prototipo.

Para el modelo, se optó por aplicar el método de análisis dimensional No distorsionado, y un factor de escala recomendable que considere su practicidad para la etapa constructiva.

Mediante el método de escalamiento escogido, se entiende que los valores de temperatura interna del modelo difieren a la del prototipo, por ello se busca una manera de relacionar los resultados térmicos en el modelo y prototipo, y se optó por utilizar las ecuaciones de balance de energía y así comparar los flujos de calor neto obtenidos en el modelo y prototipo, dichas ecuaciones se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Ecuaciones de transferencia de calor para la evaluación térmica de las edificaciones.

DESCRIPCIÓN	ECUACIONES
Flujo de calor por conducción para un elemento de la edificación	$\frac{dq}{dt}(\text{conducción}) = -k * A * \frac{\Delta T}{L}$ <p style="text-align: right;">..... (9)</p>
Flujo de calor por convección para un elemento de la edificación	$\frac{dq}{dt}(\text{convec.}) = h * A * \Delta T$ <p style="text-align: right;">..... (10)</p>
Flujo de calor por radiación para un elemento de la edificación	$\frac{dq}{dt}(\text{radiación}) = \varepsilon * \sigma * A * \Delta T^4$ <p style="text-align: right;">..... (11)</p>
Flujo de calor total para un elemento de la edificación	$\frac{dQ}{dt} = dq/dt(\text{Conducción})$ $+ dq/dt(\text{Convección})$ $+ dq/dt(\text{radiación})$ <p style="text-align: right;">..... (12)</p>
Flujo de calor total en el prototipo	$\frac{dQ}{dt}(\text{Prot.}) = dQ/dt(\text{Muro}) + dQ/dt(\text{Techo})$ $+ dQ/dt(\text{ventana})$ $+ dQ/dt(\text{puerta})$ <p style="text-align: right;">..... (13)</p>
Flujo de calor total en el modelo	$\frac{dQ}{dt}(\text{Mod.}) = dQ/dt(\text{Muro}) + dQ/dt(\text{Techo})$ $+ dQ/dt(\text{ventana})$ $+ dQ/dt(\text{puerta})$ <p style="text-align: right;">..... (14)</p>

Fuente: Elaboración propia

Las ecuaciones de la Tabla 4 no dependen del tiempo, ya que el objetivo que se busca con la evaluación experimental de la tesis, es analizar los instantes más fríos, y según la lectura de temperatura ambiental realizada en la zona del proyecto, que se muestra en la Figura 26, se observa que esto ocurre aproximadamente entre las 5 a.m. y 6 a.m., cuando la temperatura varía 0.5 °C en ese lapso de tiempo, dado que es muy pequeño su valor, se le considera como no variable en el tiempo, representando un estado estacionario.

Para tal estado estacionario se considera las tres (03) ecuaciones de transferencia de calor, conducción, convección y radiación, las cuales están indicadas en el subcapítulo 2.2.

## CAPÍTULO III: ZONA DEL PROYECTO Y VIVIENDA ALTOANDINA

### 3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DEL PROYECTO

El proyecto fue desarrollado en la sierra central del Perú y políticamente corresponde su subdivisión a:

Departamento : Junín

Provincia : Yauli

Distrito : Santa Bárbara de Carhuacayán

Localidad : Chuquirpay

El distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán se encuentra situado al noroeste de la provincia de Yauli, contando con una superficie de 646.29 km<sup>2</sup>. Santa Bárbara de Carhuacayán es uno de los 10 distritos que conforman la provincia de Yauli y limita por el norte con el departamento de Pasco, por el sur con el distrito de Marcapomacocha, por el este con la provincia de Junín y por el oeste con el departamento de Lima. Con coordenadas geográficas latitud sur  $-11.2014^{\circ}$ , y de longitud oeste  $-76.2836^{\circ}$  con una altitud media de 4505 msnm.

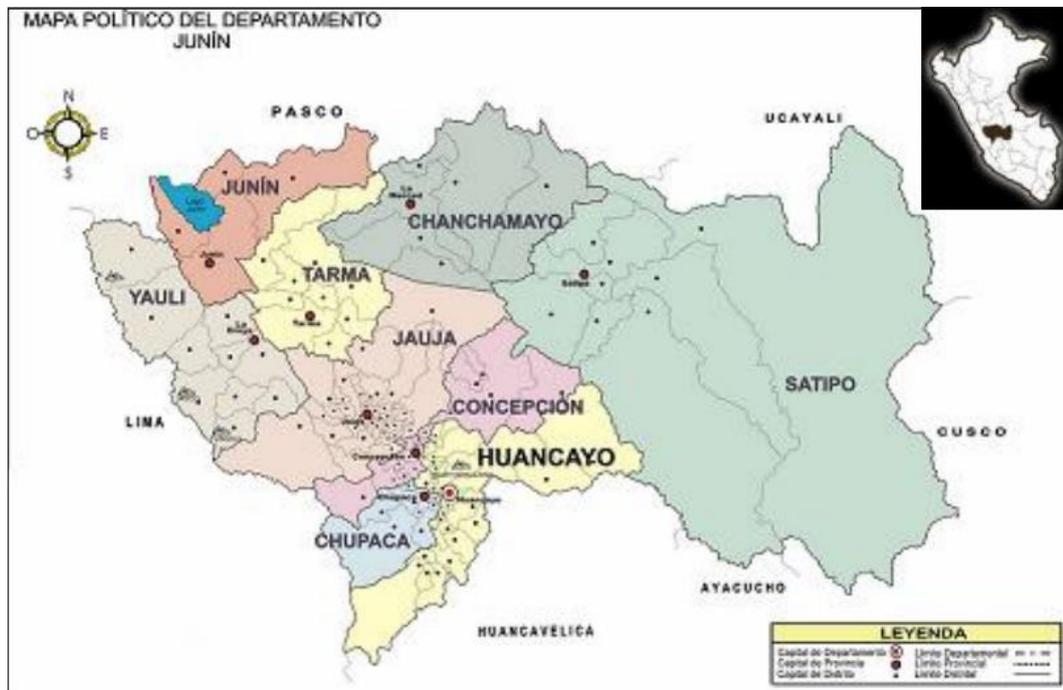


Figura 7 Mapa de ubicación del departamento de Junín

Fuente: Gobierno Regional de Junín



Figura 8 Mapa de Ubicación de la provincia de Yauli y distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán  
Fuente: Gobierno Regional de Junín

El distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán, tiene una población aproximada de 1496 habitantes. Esta ciudad tiene un clima frío-húmedo, la temperatura media anual varía entre 0.3 °C y 4.4 °C. La precipitación pluvial promedio es de 630.9 mm/año.

### 3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS VIVIENDAS

En el Proyecto de investigación (IIFIC-UNI, 2019), se identificó que las edificaciones de la localidad de Chuquiquirpay, son típicas y cuentan con los siguientes ambientes:

- Ambiente 1: Dormitorio y comedor
- Ambiente 2: Dormitorio y cocina
- Ambiente 3: Almacén de madera y estiércol
- Ambiente 4: Estancia de animales
- Ambiente 5: Letrina
- Terreno restante: Ganadería

La vivienda típica identificada en promedio cuenta con las dimensiones de 4.20m x 6.00m (ancho x largo), y 2.85m de altura. El piso, es una losa de concreto de baja resistencia, con un espesor aproximado de 25 cm. Los muros son de material de adobe / tapial, cuyo espesor aproximado es de 60 cm. La puerta y su marco son de madera, cuyas dimensiones son de 1.05m x 2.10m (ancho x alto). Las ventanas son de vidrio y con un enmallado metálico de seguridad, cuyas dimensiones de abertura de cada ventana es de 0.75m x 0.75m (ancho x alto). El techo es de material de calamina a un agua, apoyado en una estructura de madera.



Figura 9. Vivienda típica de la zona del proyecto.

Fuente: (IIFIC-UNI, 2019)

### 3.3 ZONA BIOCLIMÁTICA DE LA ZONA DEL PROYECTO

El Perú cuenta con la Norma EM. 110: Confort térmico y lumínico con eficiencia energética, la cual tiene como objeto establecer zonas del Perú de acuerdo con criterios bioclimáticos para la construcción, indicando las características de cada zona, así como establecer lineamientos o parámetros técnicos de diseño para el confort térmico y lumínico con eficiencia energética, para cada zona bioclimática definida.

La Norma EM. 110, ha clasificado al Perú en nueve (09) zonas bioclimáticas, como se muestra en la Tabla 5, de las cuales, la zona bioclimática Altoandino corresponde a la zona del proyecto, provincia de Yauli, Junín, como se indica en la Tabla 6.

Tabla 5. Zonificación Bioclimático del Perú, según la Norma EM.110

Zona Bioclimática	Definición climática
1	Desértico costero
2	Desértico
3	Interandino bajo
4	Mesoandino
5	Altoandino
6	Nevado
7	Ceja de Montaña
8	Subtropical húmedo
9	Tropical húmedo

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2014)

Tabla 6. Clasificación de provincias por zonas bioclimáticas

Departamento	4 Mesoandino	5 Altoandino	7 Ceja de Montaña	8 Subtropical Húmedo
Junín	Tarma			
	Concepción	Junín	Chanchamayo	Chanchamayo
	Huancayo	Yauli		Satipo
	Chupaca			
	Jauja			

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2014)

Tabla 7. Características climáticas de la zona del proyecto, según Norma EM.110 Confort térmico y lumínico con eficiencia energética, y lo medido experimentalmente.

Parámetro	Según Norma E.M. 110	Experimental Zona del proyecto
Temperatura media anual (°C)	6 °C	3.2 °C
Humedad Relativa media (%)	30% – 50%	79.8 %
Altitud (msnm)	4000 msnm – 4800 msnm	4505 msnm

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2014)

### 3.4 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES DE VIVIENDA ALTOANDINA

Para la presente tesis se analizó térmicamente mediante el cálculo de los flujos de transferencia de calor  $dQ/dt$  (W), para lo cual se requiere conocer las propiedades térmicas de los elementos de la envolvente (piso, muros, puerta, ventanas y techo) de los prototipos. Nosotros consideramos prototipos sin piso, debido que se identificó esa característica en muchas de las viviendas de las zonas altoandinas.

En la Tabla 8 y Tabla 9 se muestran los valores de la conductividad térmica ( $k$ ) y del espesor ( $e$ ) de los elementos que conforman el sistema techo verde del prototipo.

Tabla 8. Propiedades térmicas y espesor de los materiales que conforman el techo verde del prototipo

Composición de techo verde			
Elementos	Material	Conductividad Térmica $k$ (W/m °K)	Espesor $e$ (m)
Listones	Madera	0.12	0.75
Calamina	Acero galvanizado	237	0.0003
Capa impermeabilizante	Material Bituminoso	0.60	0.001
Geotextil y drenaje MacDrain	Polipropileno	0.22	0.02
Capa de Grava de 19mm	Piedra	2.50	0.02
Sustrato	Tierra	1.16	0.15
Plantas	Planta	1	0.10

Fuente: Elaboración propia

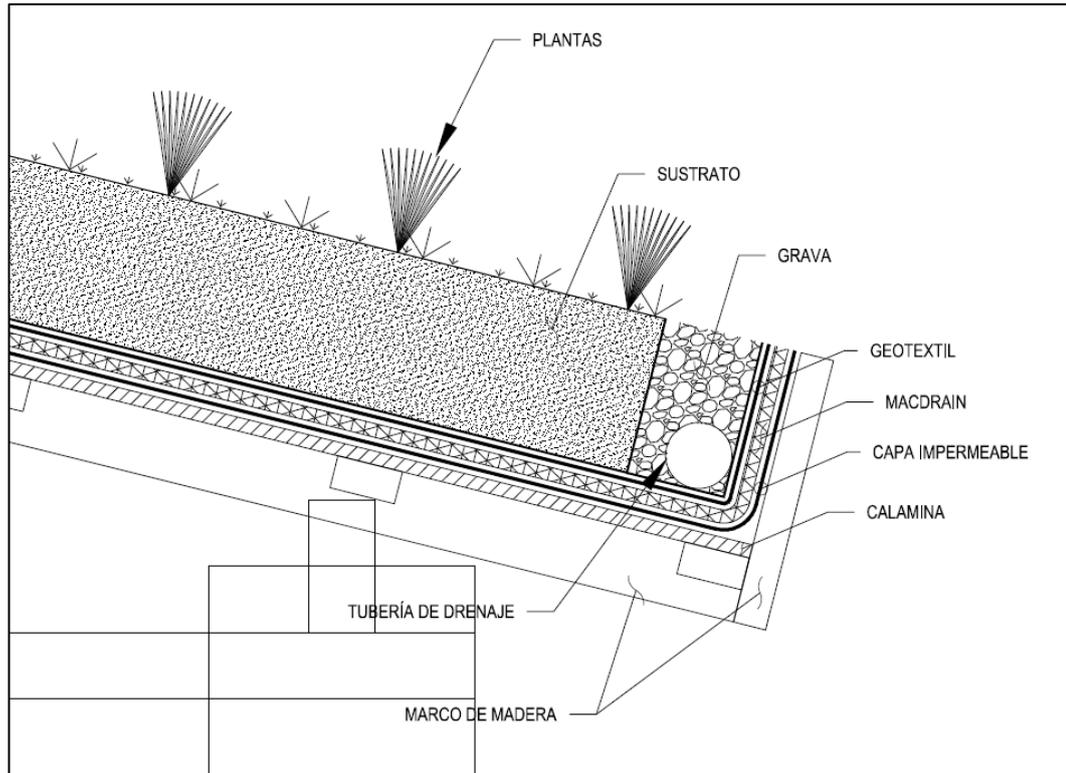


Figura 10. Estructura de techo de verde  
Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Propiedades térmicas y espesor de los materiales que conforman el muro del prototipo

<b>Composición de Muro</b>			
<b>Elementos</b>	<b>Material</b>	<b>Conductividad Térmica <math>k</math> (W/m °K)</b>	<b>Espesor <math>e</math> (m)</b>
Muro	Adobe	0.90	0.60
Ventana	Vidrio	1.00	0.006
Puerta	Madera	0.12	0.036

Fuente: Elaboración propia

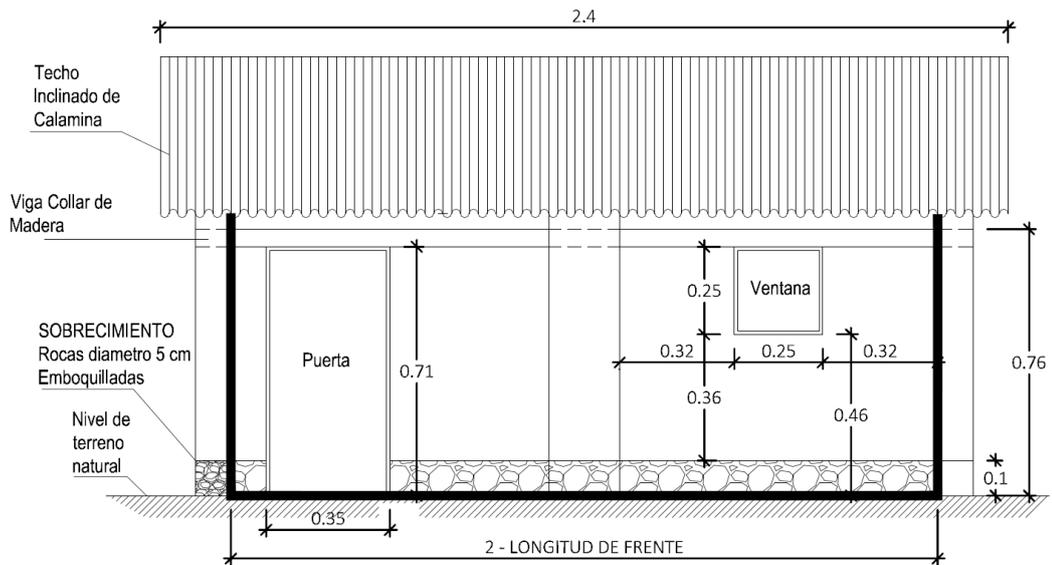


Figura 11 Vista frontal de los muros, ventana y puerta del prototipo  
Fuente: (IIFIC-UNI, 2019)

## CAPÍTULO IV: DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 4.1 DISEÑO DE MODELO Y PROTOTIPO

En el proyecto de investigación del IIFIC-UNI (IIFIC-UNI, 2019), se planteó estimar las dimensiones de una vivienda prototipo a partir de mediciones de viviendas insitu, para la determinación de las dimensiones del modelo se tomó el factor de escala de 1/3, validado por Lirola en sus diferentes trabajos de modelamiento térmico (Lirola, 2017).

#### 4.1.1 PROTOTIPO

En la localidad de Chuquiquirpay, distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán, se realizó las mediciones de las viviendas típicas de la zona, con el objetivo de definir las dimensiones del prototipo de vivienda altoandina, las dimensiones fueron de 4.20m x 6.00m x 2.85m (ancho x largo x alto) con un techo a un agua. Mostrando las siguientes características. Ver Tabla 10.

Tabla 10 Características de la Vivienda Prototipo de la Zona del proyecto.

Descripción	Valor
Ancho exterior	4.20 m
Largo exterior	6.00 m
Altura mayor	3.30 m
Altura menor	2.40 m

Descripción	Valor
Tipo de techo	Techo un agua
Material de techo	Calamina
Piso	Sin revestimiento
Muro	Adobe, e=60 cm
Puerta	1.05m(ancho) x 2.10m(alto)
Ventanas	2 ventanas de 0.75m(ancho) x 0.75m(alto)

Fuente: Elaboración Propia

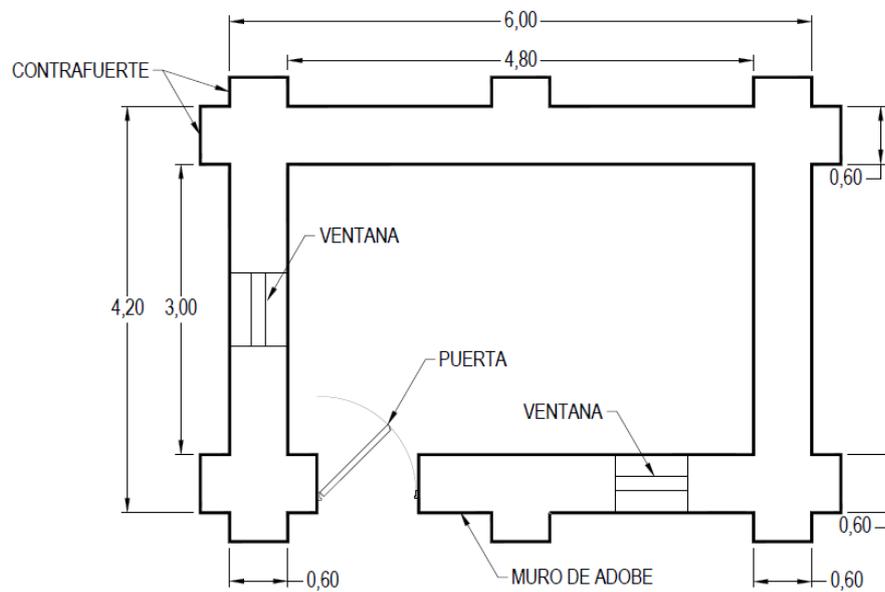


Figura 12. Vista en planta de la vivienda prototipo.

Fuente: (IIFIC-UNI, 2019)

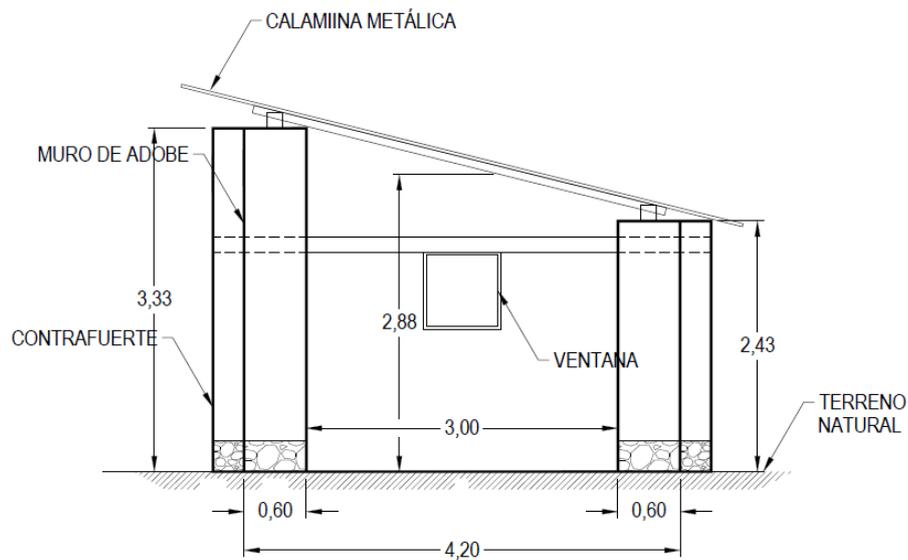


Figura 13. Vista frontal del prototipo de vivienda.

Fuente: (IIFIC-UNI, 2019)

#### 4.1.2 FACTOR DE ESCALA

Para el desarrollo del proyecto de investigación del IIFIC-UNI, se utilizó la escala 1/3, que partió de la literatura de experimentos con modelos de análisis térmicos a escala para edificaciones (Lirola, 2017). Dicha escala 1/3, fue escogido debido a la practicidad de la construcción, instrumentación y recolección de datos.

Tabla 11 Escalas usadas en la presente tesis para el diseño del modelo de vivienda.

Modelos y Prototipos	Escalas
Prototipo de Vivienda a Escala Real – PVER	1/1
Modelo de Vivienda a Escala Reducida - MVER	1/3

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.1.3 MODELO

Mediante el uso del factor de escala de 1/3, se proyectó un modelo de vivienda a escala reducida. Tales características son mostradas en la Tabla 12, así como las dimensiones de la vista en planta y de perfil, son mostradas en la Figura 14 y Figura 15. (IIFIC-UNI, 2019)

Tabla 12 Características del modelo de escala reducida de la zona del proyecto.

Descripción	Valor
Ancho exterior	1.40 m
Largo exterior	2.00 m
Altura mayor	1.10 m
Altura menor	0.80 m
Tipo de techo	Techo 1 agua
Material de techo	Calamina
Piso	Sin revestimiento
Muro	Adobe, e=20 cm
Puerta	0.35m(ancho) x 0.70m(alto)

Descripción	Valor
Ventanas	2 ventanas de 0.25m(ancho) x 0.25m(alto)

Fuente: Elaboración Propia

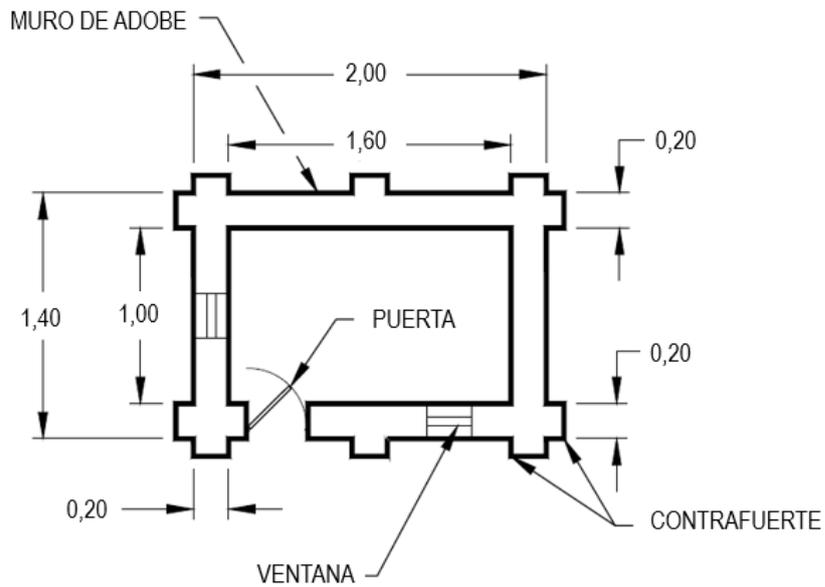


Figura 14 Vista en planta del modelo a escala reducida.

Fuente: (IIFIC-UNI, 2019)

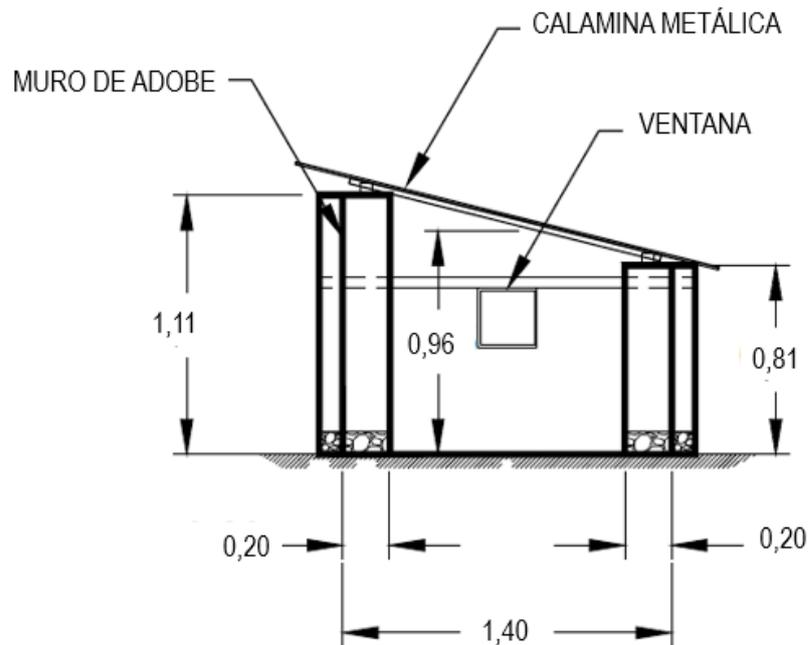


Figura 15 Vista frontal del modelo a escala reducida.

Fuente: (IIFIC-UNI, 2019)

#### 4.2 CONSTRUCCIÓN DE MODELOS A ESCALA REDUCIDA

La presente tesis toma como referencia el desarrollo experimental realizado en el proyecto de Investigación: “Propuesta de techos verdes acondicionados a viviendas rurales de las zonas altoandinas del Perú (altitud > 3500 msnm)”, la cual consistió en la construcción de:

- 01 modelo de escala reducida sin techo verde: Modelo de control.
- 03 modelos de escala reducida con techo verde: Modelo con Techo Verde.

Dichos 04 modelos se muestran panorámicamente en la Figura 16 y el nombre de cada uno de los módulos es indicado en la Figura 17.



Figura 16 Vista Panorámica del modelo de control (izquierda) y de los tres modelos de vivienda con techo verde.

Fuente: (IIFIC-UNI, 2019)



Figura 17 Vista en planta de los cuatro modelos de vivienda de escala reducida

Fuente: (IIFIC-UNI, 2019)

Los modelos de vivienda MV-1, MV-2 y MV-3 mostrados en la Figura 17, están acondicionados con una cobertura vegetal de la misma zona y un sistema de subdrenaje, como se muestra en la Tabla 13.

Y el modelo de control MC-0, no se encuentran acondicionados con cobertura vegetal.

Tabla 13 Características de los módulos de vivienda utilizados para el desarrollo experimental.

Módulo de vivienda	Subdrenaje	Sustrato	Plantas
MC-0	No	No	No
MV-1	MacDrain	15cm de topsoil	Ichu
MV-2	Piedras	15cm de topsoil	Ichu, Chirhua, Oreja de conejo
MV-3	MacDrain	15cm de topsoil	Ichu, Chirhua, Oreja de conejo, Césped de puna

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.3 INSTRUMENTACIÓN

En un sistema de techo verde, las propiedades físicas de sus elementos involucradas en el balance de energía, son la transmitancia térmica, el calor específico, la densidad y su dimensión geométrica, así como las propiedades físicas del clima, que son la radiación solar, la temperatura y la velocidad del viento. Los valores de todas las propiedades físicas mencionadas usadas en esta tesis son provenientes de la información experimental proporcionada del proyecto de investigación: "Propuesta de techos verdes acondicionados a viviendas rurales de las zonas altoandinas del Perú (altitud > 3500 msnm)", realizado en la localidad de Chuquiquirpay, distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán, provincia de Yauli, departamento de Junín.

El procesamiento y análisis de estos datos me permitió:

- Comparar la ganancia real de energía calorífica entre una vivienda con techo de calamina y otra con Techo Verde.
- Amortizar la variación de la humedad en el sustrato del Techo Verde con la humedad relativa ambiental.
- Ajustar el modelo analítico de transferencia energética realizado en EnergyPlus.



Figura 18 Sensor termohigrómetro Datalogger YUWESE SSN-22ET utilizado en la toma de temperaturas en el modelo a escala reducida.

Fuente: (IIFIC-UNI, 2019)



Figura 19 Colocación de Sensor termohigrómetro al centro geométrico del interior del modelo de vivienda construido.

Fuente: (IIFIC-UNI, 2019)



Figura 20 Colocación de sonda externa de termohigrómetro en el sustrato del modelo a escala reducida con techo verde.  
Fuente: (IIFIC-UNI, 2019)

#### 4.4 MEDICIONES

Se registró la Temperatura Interna ( $^{\circ}\text{C}$ ), Temperatura Externa ( $^{\circ}\text{C}$ ) y Humedad Relativa (%), con el uso de un sensor con capacidad de medir la temperatura y humedad relativa, y una sonda externa que mide únicamente la temperatura; en los cuatros modelos y en las paredes internas de los modelos, tal como se muestra en la Figura 21 y Figura 22. Los valores de frecuencia de toma de datos de temperatura y periodo de tiempo se detallan en la Tabla 14.

Los datos de temperaturas leídas se utilizaron para modelar energéticamente los modelos, y poder realizar una comparación energética con el prototipo, a partir de la obtención de la transferencia de calor total.

Tabla 14 Resumen de ubicación de sensor, frecuencia de toma de datos y periodo para cada punto de medición de parámetro (temperatura y humedad)

Parámetro	Ubicación de sensor	Frecuencia de toma datos	Período de tiempo
Temperatura Interna ( $^{\circ}\text{C}$ )	Interior, en centro geométrico	30 min.	02 – 08 enero 2018
Temperatura Externa ( $^{\circ}\text{C}$ )	Exterior, encima de la calamina, y en el centro del sustrato del techo verde.	30 min.	02 – 08 enero 2018
Humedad Rel. (%)	Interior, en centro geométrico	30 min.	02 – 08 enero 2018

Fuente: Elaboración propia

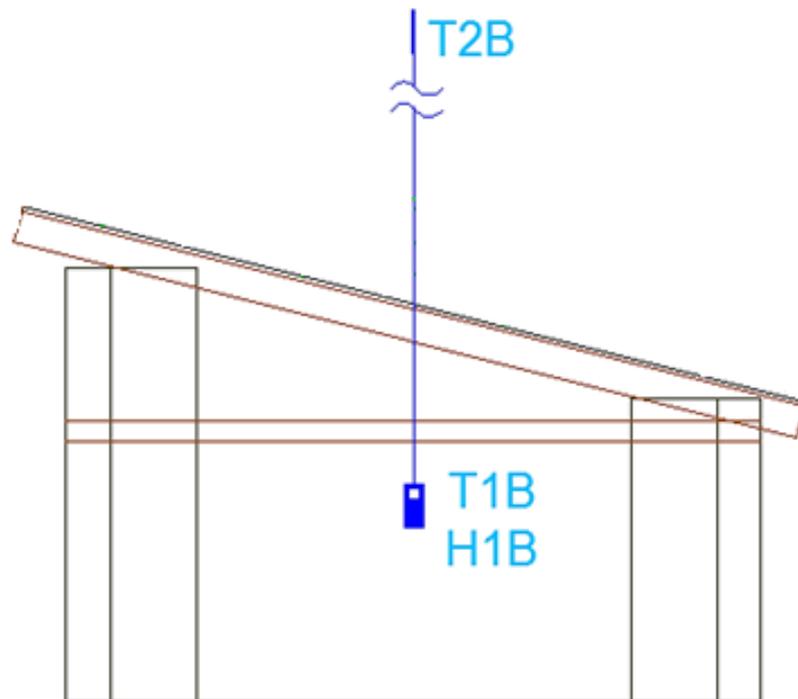


Figura 21 Plano de ubicación típica del sensor en el modelo de control MC-0.  
Fuente: (IIFIC-UNI, 2019)

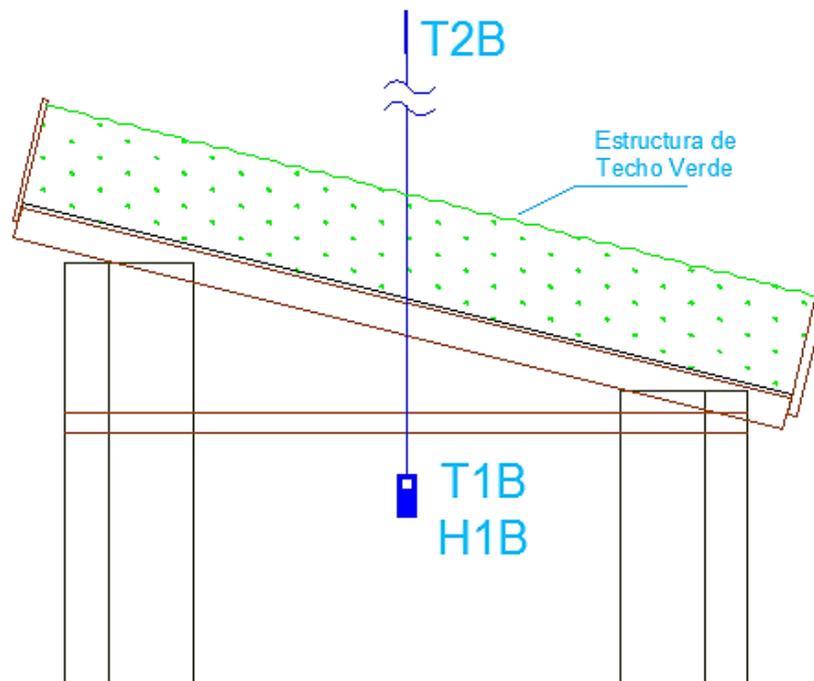


Figura 22 Plano de ubicación típica del sensor en el modelo con techo verde MV-1, MV-2 y MV-3.  
Fuente: (IIFIC-UNI, 2019)

#### 4.5 ESCENARIOS DE ANÁLISIS DE EVALUACIÓN TÉRMICA

La metodología de evaluación térmica se detalló en el subcapítulo 2.6, la cual se emplea en el modelo y prototipo en tres (03) diferentes escenarios, con el objetivo de obtener más información del comportamiento térmico de los sistemas de techos verdes, las características de cada escenario se detallan en la Tabla 15.

Tabla 15: Características de los escenarios de análisis de la investigación.

Descripción	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Prototipo	Prototipo sin techo verde	Prototipo con techo verde real	Prototipo con techo verde real proyectado
Modelo	Modelo sin techo verde	Modelo con techo verde real escalado	Modelo con techo verde real
Análisis	Uso de software y datos Modelo MC-0	Uso de Software	Uso de software y datos Modelo MV-3

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.6 CÁLCULO DE TEMPERATURA INTERNA EN EL PROTOTIPO

##### 4.6.1 METODOLOGÍA

Para la presente tesis, la evaluación térmica de los sistemas de techos verdes se realiza con los valores de temperatura interna de los modelos y prototipos, de los cuales, se cuenta disponible solo los valores de temperatura de los modelos, es por esta razón que se requiere un método para obtener la temperatura interna de los prototipos, en cada uno de sus escenarios.

Entonces, la manera de obtener la temperatura interna del prototipo que se escogió es mediante la simulación de los prototipos en el software EnergyPlus (EnergyPlus, Copyright (c), 2017), por lo que, para tener unos resultados válidos se tendrá que calibrar los parámetros de los elementos (propiedades geométricas y térmicas de los muros, ventanas, puerta, techo, suelo y aire) del prototipo, los cuales son similares a los que cuentan los modelos construidos.

Para ello, se simulará el modelo construido en el software EnergyPlus, y mediante la calibración de las propiedades térmicas de los elementos del modelo se busca alcanzar un comportamiento térmico interno similar al del modelo construido.

La similitud de las temperaturas internas del modelo simulado y del modelo construido serán validadas con los coeficientes estadísticos. (Reyes Rosas, 2012) Luego con los parámetros térmicos calibrados, se los utilizará para la simulación de los prototipos en el software EnergyPlus.

#### 4.6.2 APLICACIÓN DEL SOFTWARE ENERGYPLUS

El software EnergyPlus es un software de simulación de energía de código abierto, desarrollado por la Universidad de Illinois, Universidad de California y el Departamento de Energía de USA (DOE). En el ámbito local, el software EnergyPlus es utilizado también en Perú, por los miembros del Centro de Energía Renovables de la UNI (CER-UNI), para el desarrollo de sus proyectos de investigación y evaluaciones energéticas (Molina Castillo, 2016).

El software EnergyPlus, es un software de simulación de energía de edificios para modelar el consumo de energía (para calefacción, enfriamiento, ventilación, iluminación, carga de enchufes y diferentes procesos de energía), así como también cuenta con un módulo de análisis de energía en edificaciones con techos con cobertura vegetal.

Para que el software EnergyPlus analice la energía en una edificación con sistema de techo verde, requiere la información del clima, dimensiones de la vivienda, propiedades de los materiales, condiciones del análisis térmico como el periodo de procesamiento y el tipo de algoritmo.

Un software complementario al EnergyPlus, es el Sketchup, el cual permite graficar de manera más sencilla las edificaciones, definir las zonas térmicas, y obtener gráficamente las temperaturas en las superficies de la edificación.

Para la presente tesis, las consideraciones para la simulación térmica fueron las siguientes:

- Se realizó 2 tipos de simulaciones computacionales, el modelamiento de los modelos y de los prototipos.
- Tanto el modelo y prototipo, se plantea que consta de una sola zona térmica.
- Se utilizaron datos meteorológicos monitoreados en la localidad de Chuquiquirpay, del distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán, Yauli, Junín, como la temperatura ambiental y humedad.
- Los valores de las propiedades térmicas (conductividad térmica, densidad, calor específico) de los materiales de la envolvente del modelo y prototipo fueron obtenidos de Norma EM110.
- Se consideró la vivienda cerrada y desocupada, sin ganancia de calor interno.
- El algoritmo utilizado para el cálculo es "Conduction transfer function".

- El intervalo de simulación es de una (1) hora.

En el software EnergyPlus se debe ingresar 3 tipos de datos: geometría de la vivienda, parámetros físicos de la vivienda e información meteorológica de la zona de análisis. Para la geometría de la vivienda se recomienda utilizar el software Google Sketchup y el software complementario Open Studio.

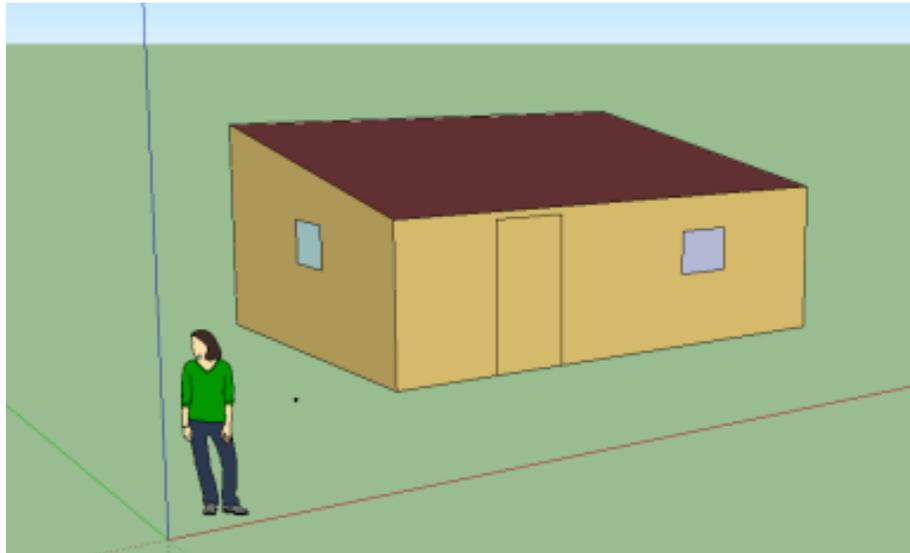


Figura 23. Geometría de Vivienda definida en el software Sketchup  
Fuente: Elaboración Propia

La información meteorológica de la zona del proyecto, se puede obtener de dos maneras, una es con el uso de una estación meteorológica cercana a la zona del proyecto, y la otra manera es con la data meteorológica existente en la base de datos de la página del EnergyPlus (<https://energyplus.net/weather>) que cuenta con información meteorológica de libre acceso en gran cantidad de países, como se muestra en la Figura 24



Figura 24 Ubicación de Zonas con acceso a data meteorológica de EnergyPlus  
Fuente: (DOE, s.f.)

#### 4.7 PROCEDIMIENTOS DE EVALUACION TÉRMICA DE UNA VIVIENDA RURAL ALTOANDINA

Para la evaluación térmica de una vivienda rural altoandina, en la presente tesis se viene a utilizar las técnicas: evaluación analítica, evaluación computacional y evaluación experimental. Los métodos de evaluación analítica y computacional serán aplicados y verificados con la evaluación experimental.

En la Figura 25 se muestra tres (03) tipos de evaluación, las cuales se diferencian por el nivel de dificultad que existe para una evaluación física, según Hossdorf, los métodos clásicos, corresponden a una evaluación analíticamente posible (dificultad baja); los métodos computacionales que hacen referencia a una evaluación analíticamente posible (dificultad intermedia), y los métodos experimentales o test por modelos de escala, que se pueden utilizar para cualquiera de los tres tipos de evaluación: analíticamente posible, analíticamente imposible y físicamente imposible (dificultad alta). (Qingyan, 2009)

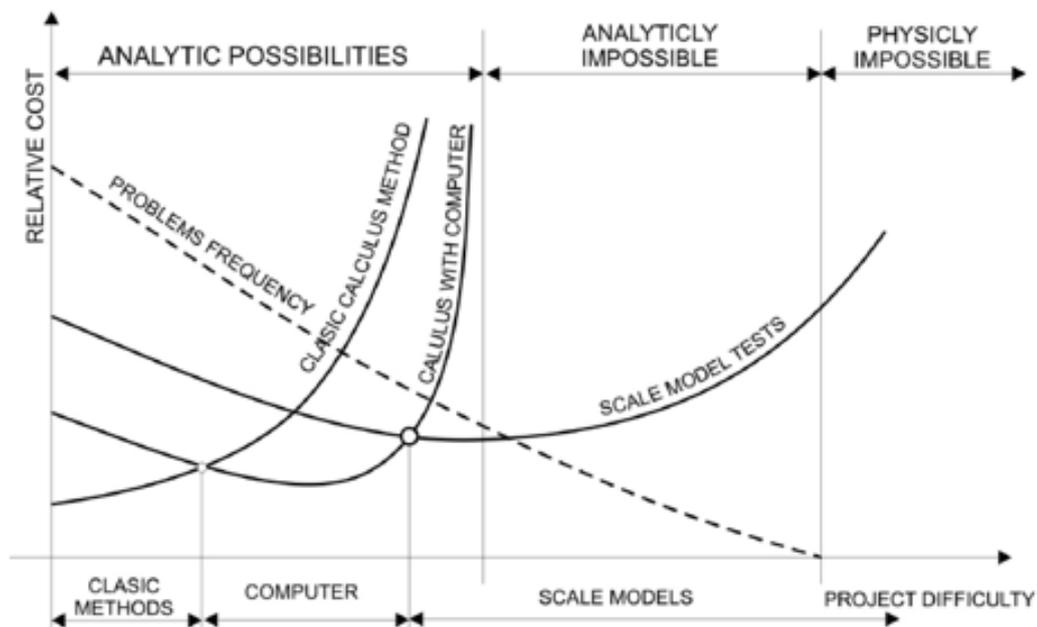


Figura 25 Gráfico que relaciona el costo y la dificultad de la evaluación física de una variable, para los tres tipos de métodos de evaluación: analítico, computacional y experimental.

Fuente: (Hossdorf, 1972)

#### 4.1 EVALUACIÓN ANALÍTICA

La evaluación analítica constituye el método usado cuando la dificultad de evaluación física en un proyecto es la más baja, pero a pesar de esto, se torna complicado en su procedimiento, debido que este consiste en el planteamiento y solución de ecuaciones matemáticas.

Las ecuaciones matemáticas que se usan en la presente tesis, son las de transferencia de calor, las cuales se dividen en estacionarias y no estacionarias.

Los parámetros de la evaluación analítica en una edificación, en la mayoría de sus casos son valores aproximados, como en el caso del cálculo de los parámetros térmicos de los elementos de una edificación, los cuales, al medirse en campo, se obtienen diferentes valores, para el cual se usa un valor aproximado.

El sistema de techo verde es afectado por diversos elementos del clima (temperatura, precipitación, humedad, presión atmosférica, nubosidad, viento, radiación solar), en donde muchos de estos varían respecto del tiempo, lo cual hace que las ecuaciones matemáticas que busquen representar el comportamiento de estos elementos del clima sean complejas; para el objetivo de la tesis, que es la evaluación de la temperatura al interior del modelo y del prototipo, no se requiere analizar todos los elementos del clima ni tampoco a todas las horas, sino solo las predominantes y a las horas de menor temperatura. Para la evaluación térmica de una vivienda, las ecuaciones que predominan son las ecuaciones de transferencia de calor y en estado estacionario, según se indica en el subcapítulo 2.6.

Con ello se determina el flujo de transferencia de calor de cada escenario para la conducción, convección y radiación, para el instante de temperatura mínima del día (5 a.m. – 6 a.m.).

Además, se compara el flujo de transferencia de calor en el escenario 1, escenario 2 y escenario 3, cuyo menor valor de transferencia de calor corresponde al escenario con mayor aislamiento térmico, y la mayor transferencia de calor corresponde al que cuenta con menor aislamiento térmico.

#### 4.2 EVALUACIÓN COMPUTACIONAL

Es el procedimiento que utiliza algún software de cálculo térmico para obtener el comportamiento térmico en diferentes zonas térmicas de una vivienda. Usualmente este tipo de evaluación es empleado para casos complejos de

transferencia de calor, donde establecer las ecuaciones de cálculo se hace complejo.

Actualmente, para evaluar el desempeño térmico de una vivienda hay variedad de softwares como OpenStudio, DesignBuilder, Ecotect y EnergyPlus, dichos softwares son recomendables para cada cierto tipo de evaluación.

OpenStudio, es más utilizado para el análisis del comportamiento energético de edificios para los servicios de calefacción, refrigeración, iluminación y ventilación y se basa en el motor de cálculo EnergyPlus. Permite obtener y analizar datos meteorológicos de cualquier lugar del mundo, con dichos resultados se puede generar diagramas bioclimáticos y plantear estrategias de diseño pasivo en una edificación.

DesignBuilder, es mayormente utilizado en el cálculo del consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> del edificio, para unos sistemas de climatización concretos y para el uso de luminarias y otros equipos, así como evaluar el comportamiento térmico de una configuración determinada. Este software es muy recomendado para un estudio preliminar del comportamiento bioclimático en el diseño eficiente de edificios.

Ecotect, es frecuentemente usado para diseños de construcción sustentable, por ser un software intuitivo, de cálculo rápido y aproximado, que puede realizar análisis de la energía total del edificio, estudios térmicos, consumo de agua, radiación solar, luz natural, sombras y reflejos.

EnergyPlus, es el software que se utiliza para la evaluación computacional en la presente tesis, además es el más utilizado por el mercado, debido a sus resultados positivos en diferentes proyectos complejos. Puede realizar simulación de energía de edificios para modelar el consumo de energía, así como también cuenta con un módulo de análisis de energía en edificaciones con techos con cobertura vegetal.

#### 4.3 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

La evaluación experimental de una vivienda altoandina se basa en la obtención de la temperatura externa e interna de esta, con ayuda de instrumentos de medición de temperatura.

Para la evaluación experimental de las viviendas altoandinas se requiere hacer evaluaciones térmicas en viviendas a escala de tamaño real, sin embargo,

presenta desventajas en los costos y área ocupada. Por ese motivo se plantea la evaluación térmica en modelos experimentales de escala reducida, que son menos costosos y espaciosos que los modelos a escala de tamaño real.

Las evaluaciones experimentales deben ser realizadas en la zona del proyecto, para obtener resultados que consideren las condiciones climáticas de la zona del proyecto. Esta información del clima se obtiene a través de una estación meteorológica cercana a la zona del proyecto.

Los instrumentos de medición de temperatura recomendados son los sensores colectores de datos (Data Logger), los cuales son resistentes a las bajas temperaturas y no requieren de conexión eléctrica, dado que la zona del proyecto se encuentra en un ambiente de bajas temperaturas y con dificultad de acceso a algún suministro eléctrico.

Debido a que el análisis térmico de la vivienda se realiza con las ecuaciones de transferencia de calor, se requiere obtener las temperaturas al interior y exterior de las superficies de los elementos de la envolvente de la vivienda, los cuales se pueden realizar solo con los sensores o también con el uso de algún software de balance de energía.

#### 4.3.1 PARÁMETROS DE AJUSTE Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

Según menciona (Reyes Rosas, 2012), para la calibración del modelo de simulación de temperatura, se requiere una evaluación estadística de estos valores obtenidos.

Según (Cabrera, 2017), la calibración de los modelos se suele enfocar en un criterio de exactitud, los cuales deben lograr una proximidad a las mediciones tomadas, que requiere la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo, y para esto se hace uso de varias “medidas de bondad de ajuste” o “medidas de error”.

Mediante la calibración se pretende minimizar la diferencia entre las temperaturas registradas (medidas en campo) y las simuladas (obtenidas del EnergyPlus), optimizando el ajuste a nivel de temperaturas medias horarias.

Las temperaturas registradas se les denomina “x”, y a las temperaturas simuladas, “y”, para evaluar el ajuste de dichas temperaturas, se utiliza diferentes coeficientes estadísticos, los cuales son los siguientes:

a) Coeficiente de Correlación (r)

Expresa la dependencia lineal entre las temperaturas registradas y las temperaturas simuladas.

La ecuación se muestra a continuación:

$$COV_{reg,sim} = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})$$

$$\sigma_{reg} = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\sigma_{sim} = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$r = \frac{S_{reg,sim}}{\sigma_{reg} * \sigma_{sim}}$$

Donde:

$COV_{reg,sim}$ : es la covarianza entre las temperaturas registradas y simuladas,

$\sigma_{reg}$ : es la desviación típica entre las temperaturas registradas.

$\sigma_{sim}$ : es la desviación típica entre las temperaturas simuladas.

#### b) Error medio absoluto (EMA)

Representa la desviación media de las temperaturas simuladas respecto de las registradas en forma de error, la ecuación se muestra en la Tabla 17.

#### c) Coeficiente de eficiencia (E)

Este coeficiente de eficiencia se define mediante la ecuación especificada en la Tabla 17, con valores iguales a 1 muestra un mejor ajuste.

Tabla 16. Valores referenciales de los coeficientes de eficiencia

E	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy Bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: (Cabrera, 2017)

#### e) Error relativo medio absoluto (ERMA)

Expresa en porcentaje la relación entre las temperaturas registradas y las simuladas, según se muestra en la Tabla 17.

El coeficiente ERMA varía entre el valor “0” al “1”, cuya clasificación depende del ajuste que tenga, el valor de cero “0” representa un ajuste perfecto.

f) Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

La raíz del error cuadrático medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores de temperatura simulados respecto de las temperaturas registradas. El coeficiente RMSE tiene una variación de cero (0) a uno (1), el cual mientras tenga mejor ajuste, le corresponderá un valor cercano al cero (0).

Tabla 17. Ecuaciones de cálculo de los coeficientes estadísticos para ajuste de modelo.

Índice de ajuste	Ecuación	Rango de Variación	Valor Óptimo
Coeficiente de calibración (r)	$r = \frac{S_{reg,sim}}{\sqrt{S_{reg} * S_{sim}}}$	$0 \leq r \leq 1$	1
Error Medio Absoluto (EMA)	$EMA = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n  x_i - y_i $	$0 \leq EMA \leq 1$	0
Coeficiente de eficiencia (E)	$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}_i)^2}$	$-\infty \leq E \leq 1$	1
Error relativo medio absoluto (ERMA)	$ERMA = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \frac{ x_i - y_i }{ x_i }$	$0 \leq ERMA \leq 1$	0
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}$	$0 \leq RMSE \leq \infty$	0

Fuente: (Reyes Rosas, 2012)

#### 4.4 GANANCIA DE TEMPERATURAS CON OTROS PROYECTOS DE REGULACIÓN TÉRMICA

Así como en la presente tesis se obtuvo los valores de temperatura °C que ganaba una vivienda en su interior al contar con un sistema techo verde, pues en el libro *Abrigando Hogares* (Ministerio de Vivienda, 2016) cuenta con sistemas de regulación de temperatura en la vivienda, clasificadas en sistemas para vanos, techos, muros, pisos y de captación de calor, como se muestra en la Tabla 2.

En la Tabla 18 se muestran los valores de ganancia de temperatura °C al interior de la vivienda con distintos sistemas de regulación de temperatura aplicados en varios elementos de la vivienda.

Tabla 18 Valores de ganancia de temperaturas °C de calificación baja en el interior de viviendas que cuentan con sistemas de regulación de temperatura.

<b>Vivienda</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Elementos reguladores de temperatura</b>	<b>Aumento de T °C interna</b>	<b>Calificación</b>
<b>Vivienda 1 CARE PERU</b>	Pacococha Castrovirreyna	1) Muro trombe 2) Claraboya en techo	Aumenta en 3 °C	Baja
<b>Vivienda 2 CARE PERU</b>	Pacococha Castrovirreyna	1) Muro trombe en la pared del dormitorio 2) Cielo raso de tela tratada	Aumenta en 3 °C	Baja
<b>Vivienda 3 CARE PERU</b>	Barrio el Molino - Castrovirreyna	1) Cielo raso de triplay 2) Piso de madera con cama de piedra	Aumenta en 5 °C	Media
<b>Vivienda 4 CARE PERU</b>	Tambo - Huaytara	1) techo con fibrocemento, barro con paja, plástico polietileno y caña 2) Piso de madera con cama de piedra	Aumenta en 6 °C	Media
<b>Vivienda 5 CARE PERU</b>	Tambo - Huaytara	1) techo de fibrocemento, paja, estera, y plástico polietileno 2) Piso de madera con cama de piedra 3) Invernadero 4) Claraboya	Aumenta en 6 °C	Media
<b>Vivienda 6 CARE PERU</b>	Pilpichaca - Huaytara	1) Techo de Calamina-Ichu-Calamina 2) Piso de madera con cama de piedra	Aumenta en 6.5 °C	Media
<b>Vivienda 7 CARE PERU</b>	Barrio el Molino y Pacococha - Castrovirreyna	1) Claraboya en cada ambiente 2) Cielo Raso de triplay 3) Piso de madera con cama de piedra 4) Invernadero adosado a dormitorio	Aumenta en 7 °C	Alta
<b>Vivienda 8 CARE PERU</b>	Tambo - Huaytara	1) techo de tela-aire-tela-paja-plástico y fibrocemento 2) Claraboya en cada ambiente 3) Piso de madera con cama de piedra 4) Doble Ventana	Aumenta en 8 °C	Alta

		5) Invernadero y claraboya		
<b>Vivienda 9 CARE PERU</b>	Pilpichaca - Huaytara	1)Techo de fibrocemento, paja y calamina. 2) Piso de madera con cama de piedra 3)Invernadero y claraboya	Aumenta en 7 °C	Alta
<b>Vivienda 10 CARE PERU</b>	Barrio el Molino y Pacococha - Castrovirreyna	1) Claraboya en cada ambiente 2) Cielo Raso de triplay 3) Piso de madera con cama de piedra 4)Invernadero adosado a dormitorio	Aumenta en 7 °C	Alta

Fuente: (Ministerio de Vivienda, 2016)

## CAPÍTULO V: RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 5.1 PARÁMETROS DE CLIMA DE LA ZONA

Para el desarrollo de la presente tesis, se optó por el uso de datos meteorológicos correspondientes al periodo 2017 y 2018. A partir de la información meteorológica obtenida del proyecto de investigación del IIFIC (IIFIC-UNI, 2019), que se observa en la Tabla 19, la cual indica los valores de temperatura, humedad relativa %, presión atmosférica, radiación solar, velocidad y dirección de viento, y cobertura de nubes, durante todo un año completo. Se resalta que la temperatura ambiental mínima mensual va desde -20.80°C hasta 0.55°C, y la Irradiación solar difusa máxima varía entre 11970 W/m<sup>2</sup> y 1399 W/m<sup>2</sup>.

Tabla 19. Valores de parámetros climáticos utilizados en el software EnergyPlus

Mes	Descripción	Temp. Bulbo Seco (°C)	HR (%)	Presión Atmosférica (Pa)	Irrad. Solar Directa Normal (W/m <sup>2</sup> )	Irrad. Solar Difusa (W/m <sup>2</sup> )	Dirección viento (°E)	Velocidad viento (m/s)	Cobertura de nubes (fracción)
Enero	Mínimo	2.60	51	439	0	0	0	0.0	10.00
	Máximo	15.02	97	439	0	1338	330	9.4	10.00
	Promedio	8.81	87	439	0	157	169	2.3	10.00
Febrero	Mínimo	2.30	51	439	0	0	0	0.0	10.00
	Máximo	13.96	100	439	0	1338	360	9.4	10.00
	Promedio	8.13	87	439	0	115	160	1.9	10.00
Marzo	Mínimo	4.00	43	439	0	0	0	0.0	10.00
	Máximo	16.40	97	439	0	1389	330	9.4	10.00
	Promedio	10.20	87	439	0	155	191	2.1	10.00
Abril	Mínimo	3.50	35	439	0	0	0	0.0	10.00

Mes	Descripción	Temp. Bulbo Seco (°C)	HR (%)	Presión Atmosférica (Pa)	Irrad. Solar Directa Normal (W/m²)	Irrad. Solar Difusa (W/m²)	Dirección viento (°E)	Velocidad viento (m/s)	Cobertura de nubes (fracción)
	Máximo	15.33	97	439	0	1375	330	8.9	10.00
	Promedio	9.42	84	439	0	197	199	2.1	10.00
Mayo	Mínimo	1.80	40	439	0	0	0	0.0	10.00
	Máximo	17.23	97	439	0	1224	330	9.4	10.00
	Promedio	9.51	83	439	0	185	190	2.2	10.00
Junio	Mínimo	0.70	15	439	0	0	0	0.0	10.00
	Máximo	17.31	97	439	0	1239	330	7.2	10.00
	Promedio	9.01	73	439	0	232	188	2.1	10.00
Julio	Mínimo	1.50	17	439	0	0	0	0.0	10.00
	Máximo	18.54	97	439	0	1170	330	8.5	10.00
	Promedio	10.02	72	439	0	248	204	2.1	10.00
Agosto	Mínimo	1.40	8	439	0	0	0	0.0	10.00
	Máximo	18.56	97	439	0	1236	330	8.5	10.00
	Promedio	9.98	69	439	0	248	176	2.1	10.00
Septiembre	Mínimo	3.10	32	439	0	0	0	0.0	10.00
	Máximo	18.32	97	439	0	1391	330	9.8	10.00
	Promedio	10.71	79	439	0	200	199	2.3	10.00
Octubre	Mínimo	3.40	15	439	0	0	0	0.0	10.00
	Máximo	17.57	97	439	0	1399	330	10.3	10.00
	Promedio	10.49	79	439	0	218	195	2.3	10.00
Noviembre	Mínimo	3.70	28	439	0	0	0	0.0	10.00
	Máximo	16.42	100	439	0	1254	360	11.2	10.00
	Promedio	10.06	79	439	0	181	183	2.1	10.00
Diciembre	Mínimo	3.20	28	439	0	0	0	0.0	10.00
	Máximo	14.71	97	439	0	1254	330	11.2	10.00
	Promedio	8.95	79	439	0	183	181	2.2	10.00

Fuente: (SENAMHI-PERÚ, 2018)

## 5.2 TRANSFERENCIA DE CALOR

### 5.2.1 ESCENARIO 1

En este escenario se obtuvo los valores de transferencia de calor del prototipo y modelo en las condiciones iniciales, sin cobertura de techo verde, cuyos valores de flujo de calor para cada tipo de transferencia de calor se muestran en la Tabla 20, Tabla 21 y

Tabla 22. El elemento por el que se transmite el mayor flujo de calor es el techo de calamina (706.73 W). En la Tabla 23, se muestra el resumen de flujos de calor total para el modelo y prototipo de este escenario.

En este escenario, se observa que el flujo de calor total en el prototipo es casi seis (06) veces la del modelo, ver Tabla 23.

Además, se muestra que la conducción, es el tipo de transferencia de calor que produce el mayor flujo de calor total, con respecto a la Convección y Radiación, que cuentan similar flujo de calor total, tanto en el modelo como en el prototipo.

Tabla 20. Obtención de flujos de calor por Conducción en el prototipo y modelo.

Conducción							
Vivienda	Elementos	K (W/m.°C)	A (m <sup>2</sup> )	T1 (°C)	T2 (°C)	dx (m)	dQ/dt (W)
Prototipo (Escala Real)	Muros	0.90	57.02	3.50	5.25	0.60	149.68
	Techo Calamina	237.00	29.82	0.4388	0.4391	0.0003	7067.34
	Ventana	1.00	1.13	0.99	1.06	0.006	13.18
	Puerta	0.12	2.21	0.95	1.62	0.036	4.94
Modelo (Escala Reducida)	Muros	0.90	6.34	3.54	6.08	0.2	72.47
	Techo Calamina	237.00	3.31	0.5252	0.5256	0.0003	1045.96
	Ventana	1.00	0.13	1.02	1.09	0.006	1.52
	Puerta	0.12	0.25	0.73	2.23	0.012	3.75

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 21. Obtención de flujos de calor por Convección en el prototipo y modelo.

Convección						
Vivienda	Elementos	h (W/m <sup>2</sup> . °C)	A (m <sup>2</sup> )	T1 (°C)	T2 (°C)	dQ/dt (W)
Prototipo (Escala Real)	Muros	1.95	58.14	3.50	5.25	198.40
	Techo Calamina	0.19	29.82	0.4388	0.4391	0.00
Modelo (Escala Reducida)	Muros	2.36	6.46	3.54	6.08	38.72
	Techo Calamina	0.24	3.31	0.5252	0.5256	0.000

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 22. Obtención de flujos de calor por Radiación en el prototipo y modelo.

Radiación							
Vivienda	Elementos	ε	σ (W/ m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	T1 (K)	T2 (K)	dQ/dt (W)
Prototipo (Escala Real)	Muros	0.41	5.67x10 <sup>-8</sup>	57.02	276.50	278.25	198.02
	Techo Calamina	0.94	5.67x10 <sup>-8</sup>	29.82	273.4388	273.4391	0.04
	Ventana	0.94	5.67x10 <sup>-8</sup>	1.13	273.99	274.06	0.35

Radiación							
Vivienda	Elementos	$\epsilon$	$\sigma$ (W/ m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	T1 (K)	T2 (K)	dQ/dt (W)
	Puerta	0.90	5.67x10 <sup>-8</sup>	2.21	273.95	274.62	6.24
Modelo (Escala Reducida )	Muros	0.41	5.67x10 <sup>-8</sup>	6.34	276.54	279.08	32.11
	Techo Calamina	0.94	5.67x10 <sup>-8</sup>	3.31	273.5252	273.5256	0.01
	Ventana	0.94	5.67x10 <sup>-8</sup>	0.13	274.02	274.09	0.04
	Puerta	0.90	5.67x10 <sup>-8</sup>	0.25	273.73	275.23	1.58

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 23. Resumen de flujos de calor en el modelo y prototipo para el escenario 1.

Tipo de Transferencia de Calor	Modelo dQ/dt Total (W)	Prototipo dQ/dt Total (W)
Conducción	1,123.70	7,235.14
Convección	38.72	198.40
Radiación	33.74	204.64
<b>TOTAL</b>	<b>1,196.16</b>	<b>7638.18</b>

Fuente: Elaboración Propia

### 5.2.2 ESCENARIO 2

En el escenario 2 se obtuvo los valores de transferencia de calor de los tres modelos y sus tres prototipos acondicionados con una cobertura de techo verde de espesor de 18cm y de 8cm para el modelo, la cual es factible su implementación en una vivienda altoandina típica.

Los resultados de transferencia de calor en este escenario, se muestran en la Tabla 24, Tabla 25 y Tabla 26. Se observa que, en el prototipo, el elemento por el cual se transmite mayor flujo de calor es el techo verde (445.51 W). En los modelos, los elementos por los cuales se transmiten mayor flujo de calor son los muros (87.02 W). El resumen de flujos de calor totales en el modelo y prototipo del escenario 2, se muestra en Tabla 27.

En este escenario, se observa que el flujo de calor total en el prototipo es casi seis (06) veces la del modelo, ver la Tabla 27.

Para el modelo, la transferencia de calor por conducción produce el mayor flujo de calor total, con respecto a la convección y radiación.

Para el prototipo, la transferencia de calor por radiación produce el mayor flujo de calor total, con respecto a la conducción y la convección, que cuentan similar flujo de calor total.

Tabla 24. Flujos de calor totales por conducción en el prototipo y modelo del escenario 2.

Conducción							
Vivienda	Elementos	K (W/m.°C)	A (m <sup>2</sup> )	T1 (°C)	T2 (°C)	dx (m)	dQ/dt (W)
Prototipo (Escala Real)	Muros	0.90	57.02	3.56	6.61	0.60	260.87
	Techo Verde	0.87	29.82	4.071	7.067	0.18	445.51
	Ventana	1.00	1.13	1.91	2.04	0.006	24.48
	Puerta	0.12	2.21	1.12	3.96	0.036	20.92
Modelo (Escala Reducida)	Muros	0.90	6.34	3.56	6.61	0.2	87.02
	Techo Verde	0.66	3.31	4.071	7.067	0.08	86.74
	Ventana	1.00	0.13	1.91	2.04	0.006	2.82
	Puerta	0.12	0.25	1.12	3.96	0.012	7.10

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 25. Flujos de calor totales por convección en el prototipo y modelo del escenario 2.

Convección						
Vivienda	Elementos	h (W/m <sup>2</sup> . °C)	A (m <sup>2</sup> )	T1 (°C)	T2 (°C)	dQ/dt (W)
Prototipo (Escala Real)	Muros	2.32	58.14	3.56	6.61	411.40
	Techo Verde	2.25	29.82	4.07	7.07	201.29
Modelo (Escala Reducida)	Muros	2.50	6.46	3.56	6.61	49.26
	Techo Verde	2.39	3.31	4.07	7.07	23.73

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 26. Flujos de calor totales por radiación en el prototipo y modelo del escenario 2.

Radiación							
Vivienda	Elementos	ε	σ (W/ m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	T1 (K)	T2 (K)	dQ/dt (W)
Prototipo (Escala Real)	Muros	0.41	5.67x10 <sup>-8</sup>	57.02	276.56	279.61	347.78
	Techo Verde	0.94	5.67x10 <sup>-8</sup>	29.82	277.07	280.07	412.30
	Ventana	0.94	5.67x10 <sup>-8</sup>	1.13	274.91	275.04	0.65
	Puerta	0.90	5.67x10 <sup>-8</sup>	2.21	274.12	276.96	26.80
Modelo (Escala Reducida)	Muros	0.41	5.67x10 <sup>-8</sup>	6.34	276.56	279.61	38.67
	Techo Verde	0.94	5.67x10 <sup>-8</sup>	3.31	277.07	280.07	45.77

Radiación							
Vivienda	Elementos	$\varepsilon$	$\sigma$ (W/ m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	T1 (K)	T2 (K)	dQ/dt (W)
	Ventana	0.94	5.67x10 <sup>-8</sup>	0.13	274.91	275.04	0.07
	Puerta	0.90	5.67x10 <sup>-8</sup>	0.25	274.12	276.96	3.03

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 27. Resumen de flujos de calor totales en el modelo y prototipo del escenario 2.

Tipo de Transferencia de Calor	Modelo dQ/dt Total (W)	Prototipo dQ/dt Total (W)
Conducción	183.67	751.78
Convección	72.99	612.68
Radiación	87.54	787.53
<b>TOTAL</b>	<b>344.20</b>	<b>2151.99</b>

Fuente: Elaboración Propia

### 5.2.3 ESCENARIO 3

En este tercer escenario se obtuvo los valores de transferencia de calor de los tres modelos y sus tres prototipos acondicionados con una cobertura de techo verde de espesor de 48cm para el prototipo, y de 18cm para el modelo (MV-3) usado en el proyecto de investigación (IIFIC-UNI, 2019).

Los resultados de este escenario para cada tipo de transferencia de calor se muestran en la Tabla 28, Tabla 29, Tabla 30 y Tabla 31. Siendo el elemento muro por el cual se transmite mayor flujo de calor (260.87 W para el prototipo y 59.34 W para el modelo). En este escenario, el flujo de calor total en el prototipo es casi nueve veces a la del modelo, ver la Tabla 31.

Para el modelo, se observa que la conducción es el tipo de transferencia de calor que produce el mayor flujo de calor total, con respecto a la Convección y Radiación. Para el prototipo, se observa que la radiación es el tipo de transferencia de calor que produce el mayor flujo de calor total, con respecto a la conducción y la convección.

Tabla 28. Obtención de flujos de calor por Conducción en el prototipo y modelo.

Conducción							
Vivienda	Elementos	k (W/m.°C)	A (m <sup>2</sup> )	T1 (°C)	T2 (°C)	dx (m)	dQ/dt (W)
Prototipo (Escala Real)	Muros	0.90	57.02	3.56	6.61	0.60	260.87
	Techo Verde	1.03	29.82	4.16	7.31	0.48	204.58
	Ventana	1.00	1.13	1.94	2.07	0.006	24.48
	Puerta	0.12	2.21	1.12	3.99	0.036	21.14

Conducción							
Vivienda	Elementos	k (W/m. °C)	A (m <sup>2</sup> )	T1 (°C)	T2 (°C)	dx (m)	dQ/dt (W)
Modelo (Escala Reducida)	Muros	0.90	6.34	3.53	5.61	0.2	59.34
	Techo Verde	0.87	3.31	4.14	7.05	0.18	48.03
	Ventana	1.00	0.13	1.82	1.95	0.006	2.82
	Puerta	0.12	0.25	1.55	2.83	0.012	3.20

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 29. Obtención de flujos de calor por Convección en el prototipo y modelo.

Convección						
Vivienda	Elementos	h (W/m <sup>2</sup> . °C)	A (m <sup>2</sup> )	T1 (°C)	T2 (°C)	dQ/dt (W)
Prototipo (Escala Real)	Muros	2.32	58.14	3.56	6.61	411.40
	Techo Verde	2.29	29.82	4.16	7.31	215.11
Modelo (Escala Reducida)	Muros	2.22	6.46	3.53	5.61	29.83
	Techo Verde	2.37	3.31	4.14	7.05	22.83

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 30. Obtención de flujos de calor por Radiación en el prototipo y modelo.

Radiación							
Vivienda	Elementos	ε	σ (W/ m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	T1 (K)	T2 (K)	dQ/dt (W)
Prototipo (Escala Real)	Muros	0.41	5.67x10 <sup>-8</sup>	57.02	276.56	279.61	347.78
	Techo Verde	0.94	5.67x10 <sup>-8</sup>	29.82	277.16	280.31	433.69
	Ventana	0.94	5.67x10 <sup>-8</sup>	1.13	274.94	275.07	0.65
	Puerta	0.90	5.67x10 <sup>-8</sup>	2.21	274.12	276.99	27.09
Modelo (Escala Reducida)	Muros	0.41	5.67x10 <sup>-8</sup>	6.34	276.53	278.61	26.22
	Techo Verde	0.94	5.67x10 <sup>-8</sup>	3.31	277.14	280.05	44.40
	Ventana	0.94	5.67x10 <sup>-8</sup>	0.13	274.82	274.95	0.07
	Puerta	0.90	5.67x10 <sup>-8</sup>	0.25	274.55	275.83	1.36

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 31. Valores resultantes de los flujos de calor en el modelo y prototipo

Tipo de Transferencia de Calor	Modelo dQ/dt Total (W)	Prototipo dQ/dt Total (W)
Conducción	113.39	511.07
Convección	52.66	626.51
Radiación	72.06	809.20
<b>TOTAL</b>	<b>238.11</b>	<b>1946.78</b>

Fuente: Elaboración Propia

## 5.2.4 COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS EN LOS MODELOS Y PROTOTIPOS

### 5.2.4.1 VALORES EXPERIMENTALES

Las lecturas de los sensores en los modelos (MC-0 y MV-3) son representadas en la Figura 26, en la que se muestra la temperatura ambiental, la temperatura medida al interior de los modelos; y se observa que la temperatura interna del modelo MC-0 tiene mayor variación de temperatura respecto al modelo MV-3.

Los valores máximos, mínimos y promedios de temperatura al interior de los modelos MC-0 y MV-3, que corresponde al periodo de 19/12/2017 al 21/12/2017 son mostrados en la Tabla 32. Los datos de temperatura mínima en el Modelo MC-0, va desde 1.6 °C a 3.1 °C, y en el modelo MV-3, va desde 3.5 °C a 4.6 °C. En el modelo MC-0, se observa que presenta picos menores de temperatura en comparación con el modelo MV-3, cuya variación es de 2.3 °C en promedio, y el modelo MC-0 presenta picos de temperatura máxima en comparación con el modelo MV-3, que varían en 3 °C en promedio.

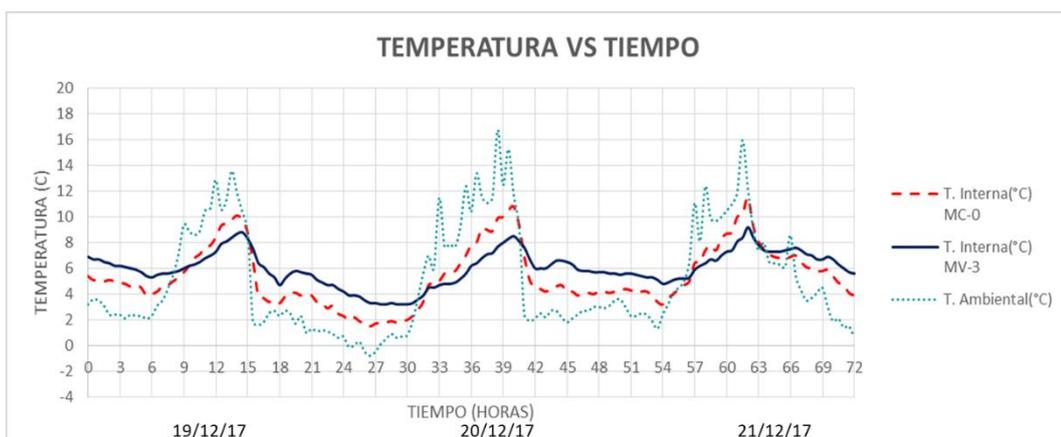


Figura 26 Gráfica de temperatura interna del modelo MC-0, temperatura interna del modelo MV-3, y la temperatura ambiental, en el periodo de 19 al 21 de diciembre del 2017.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 32. Temperaturas medidas al interior del modelo de vivienda MV-3

		19/12/17	20/12/17	21/12/17
Temperatura Ambiental (°C)	Máxima	13.6	16.7	16.0
	Mínima	0.5	-0.7	1.2
	Promedio	4.7	5.0	5.7
Temperatura Interior del Modelo MC-0 (°C)	Máxima	10.1	10.9	13.6
	Mínima	2.2	1.6	3.1
	Promedio	5.3	4.9	6.0
Temperatura Interior del Modelo MV-3 (°C)	Máxima	8.8	8.6	9.1
	Mínima	4.3	3.5	4.6
	Promedio	5.7	5.1	6.1

Fuente: Elaboración Propia

#### 5.2.4.2 CALIBRACIÓN

Luego, según la metodología explicada en el subcapítulo 4.6.1 METODOLOGÍA, una vez que se cuenta con los valores de temperaturas internas de los modelos y prototipos en los tres escenarios, se procede con la calibración de los modelos del escenario 1 y 3 simulados en el EnergyPlus, mostrados en la Figura 26.

En la Figura 27 se muestra la temperatura interna del modelo experimental del escenario 1, así como del modelo simulado calibrado.

La calibración del modelo simulado fue realizada mediante la adecuación de los parámetros térmicos de los elementos del modelo y otras variables del EnergyPlus, las cuales serán mostradas en el anexo de la presente tesis. La validez de las temperaturas simuladas se realizó mediante la aproximación al valor óptimo de los coeficientes estadísticos, ver Tabla 33 (Reyes Rosas, 2012), la cual indica el rango de variación de dichos coeficientes y cercanía al valor óptimo, a partir de ello se concluye, que los valores de temperaturas simuladas son válidos.

Tabla 33. Tabla de coeficientes estadísticos obtenidos de los valores de temperatura registradas y simuladas del escenario 1.

DESCRIPCIÓN	COEFICIENTE	VALOR	RANGO	ÓPTIMO
Coeficiente de calibración	r	0.91	$0 \leq r \leq 1$	1
Error Medio Absoluto	EMA	0.96	$0 \leq EMA \leq 1$	0
Coeficiente de eficiencia	E	0.84	$-\infty \leq E \leq 1$	1
Error relativo medio absoluto	ERMA	0.21	$0 \leq ERMA \leq 1$	0
Raíz del error cuadrático medio	RMSE	1.23	$0 \leq RMSE \leq \infty$	0

Fuente: Elaboración Propia

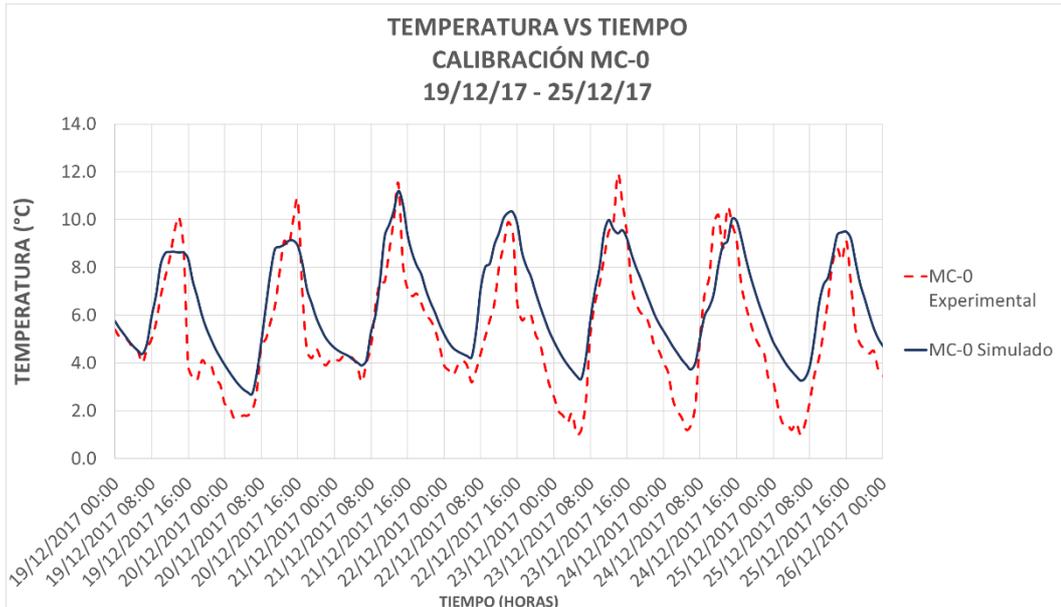


Figura 27. Gráfica de temperatura vs tiempo del modelo construido MC-0 con el modelo simulado en el EnergyPlus, del escenario 1.

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 28, se muestra las temperaturas internas registradas en el modelo del escenario 3, así como las temperaturas internas simuladas del modelo calibrado.

Los coeficientes estadísticos calculados se muestran en la Tabla 34, tomando en cuenta su rango de variación y cercanía al valor óptimo, se concluye que, los valores de temperaturas internas simuladas son válidas.

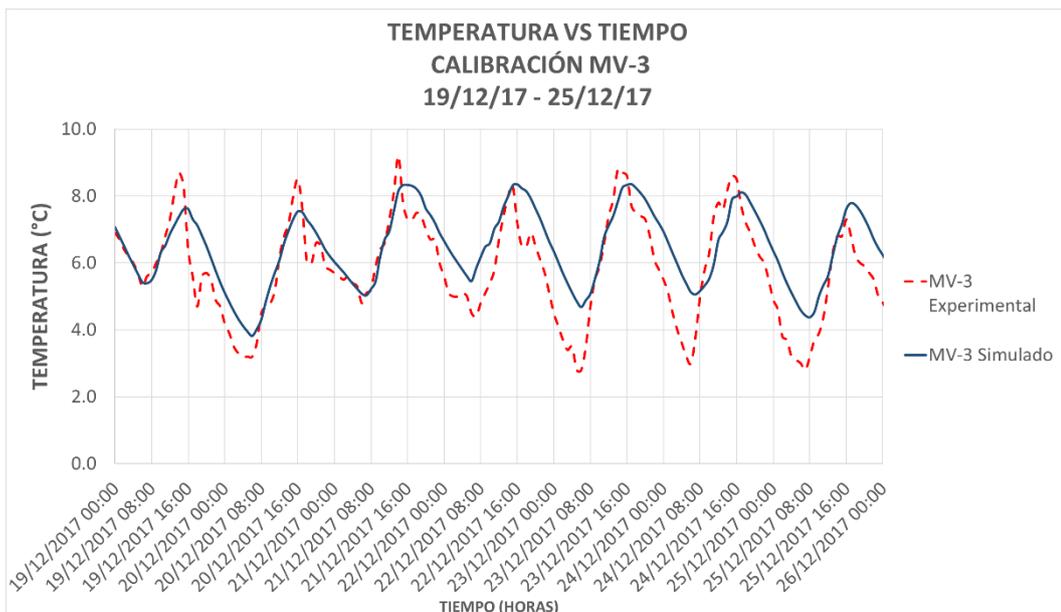


Figura 28. Gráfica de temperatura vs tiempo del modelo construido MV-3 con el modelo simulado en el EnergyPlus, del escenario 3.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 34. Tabla de coeficientes estadísticos obtenidos de los valores de temperatura registradas y simuladas del escenario 3.

DESCRIPCIÓN	COEFICIENTE	VALOR	RANGO	ÓPTIMO
Coeficiente de calibración	r	0.84	$0 \leq r \leq 1$	1
Error Medio Absoluto	EMA	0.76	$0 \leq EMA \leq 1$	0
Coeficiente de eficiencia	E	0.69	$-\infty \leq E \leq 1$	1
Error relativo medio absoluto	ERMA	0.14	$0 \leq ERMA \leq 1$	0
Raíz del error cuadrático medio	RMSE	0.90	$0 \leq RMSE \leq \infty$	0

Fuente: Elaboración Propia

### 5.2.4.3 TEMPERATURAS EN MODELOS Y PROTOTIPOS

Debido a que se logró una calibración válida de la simulación de las temperaturas internas de los modelos, por lo que se utiliza esa misma calibración para la simulación de las temperaturas internas del prototipo.

En la Figura 29 se muestra las temperaturas simuladas calibradas del prototipo y del modelo del escenario 1.

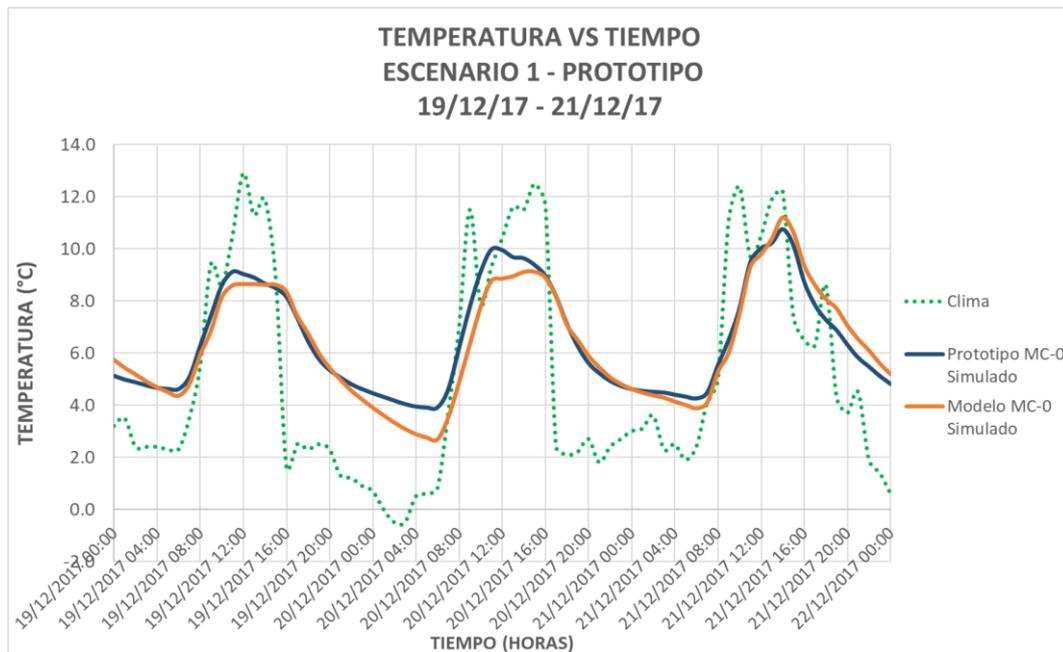


Figura 29. Gráfica de temperatura interna del modelo y del prototipo simulados del escenario 1, y la temperatura ambiental, en el periodo del 19 al 21 de diciembre del 2017.

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 30, se muestra las temperaturas simuladas calibradas del prototipo del escenario 2. No se muestra el modelo del escenario 2, debido que este no se construyó en el proyecto de investigación del IIFIC (IIFIC-UNI, 2019).

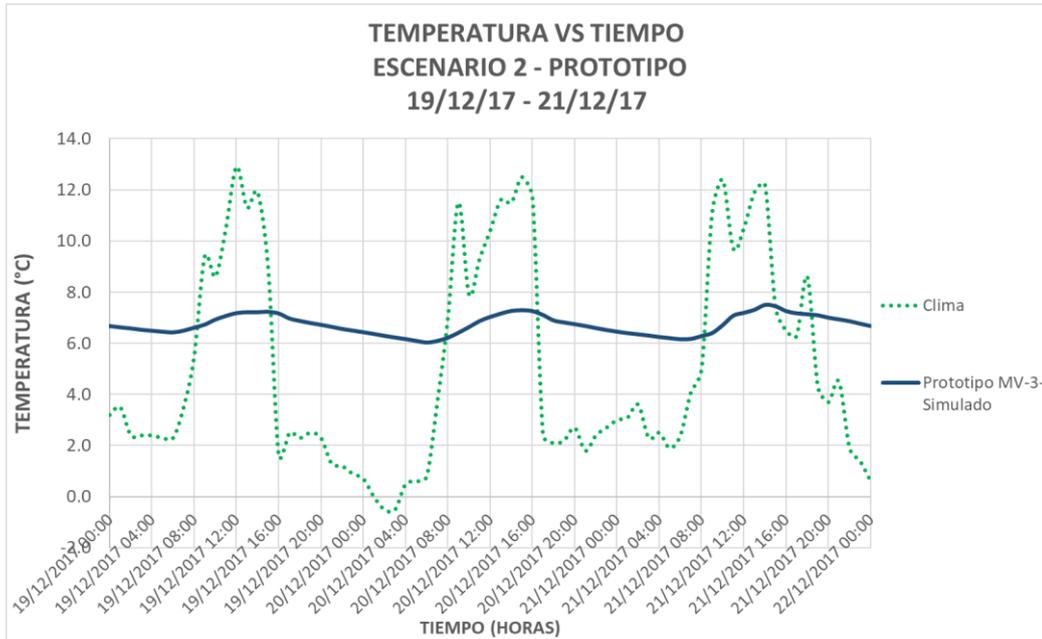


Figura 30. Gráfica de temperatura interna del prototipo simulado del escenario 2, y la temperatura ambiental, en el periodo del 19 al 21 de diciembre del 2017.

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 31 se muestran las temperaturas simuladas calibradas del prototipo y del modelo del escenario 3.

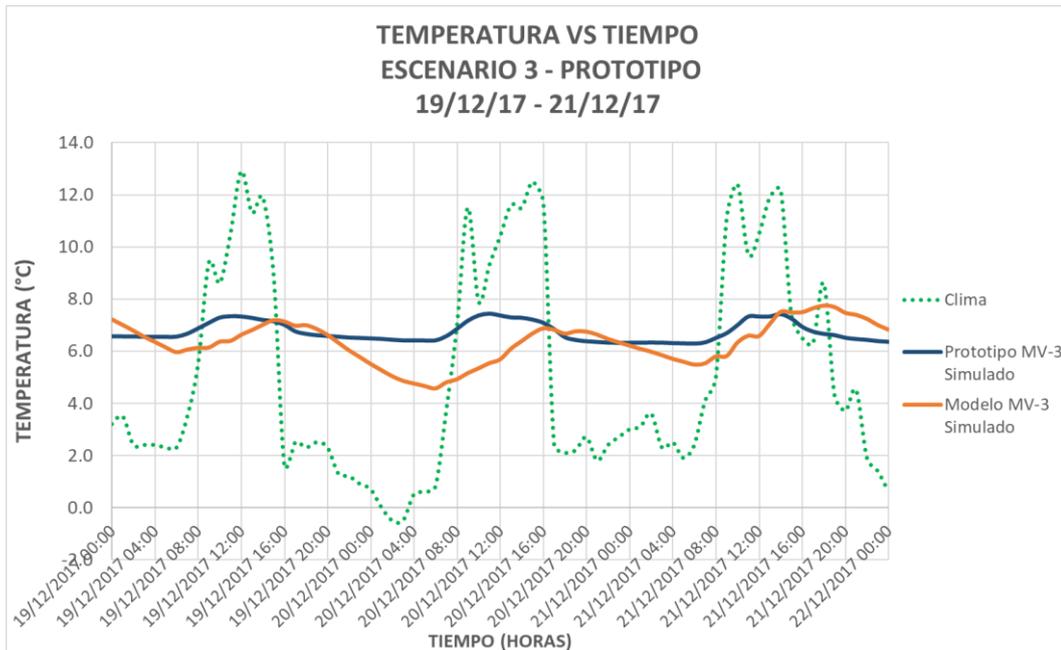


Figura 31. Gráfica de temperatura interna del modelo y del prototipo simulados del escenario 3, y la temperatura ambiental, en el periodo de 19 al 21 de diciembre del 2017.

Fuente: Elaboración Propia

Para poder establecer una relación cuantitativa entre el comportamiento térmico de las temperaturas internas obtenidas en cada escenario simulado, se modelan los valores de las temperatura simuladas y calibradas, que se muestran en la Figura 32.

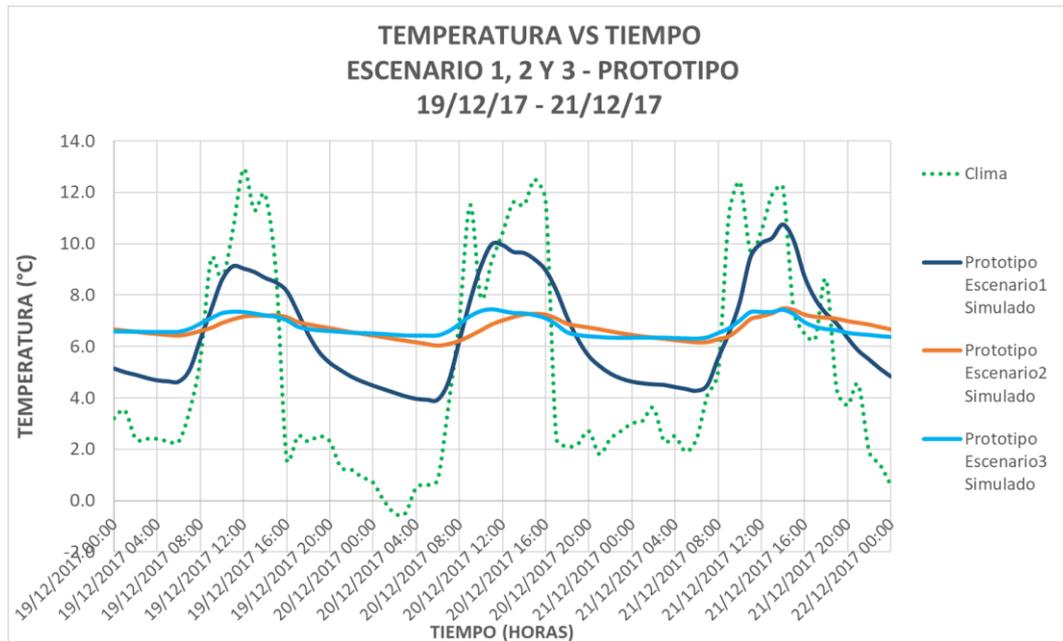


Figura 32. Gráfica de temperatura interna de los prototipos simulados del escenario 1, 2 y 3, y la temperatura ambiental, en el periodo de 19 al 21 de diciembre del 2017.

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 32 se observa que los valores de temperatura interna del escenario 3, tienden a tener mejor comportamiento térmico que el escenario 2, se muestra además que, en las horas de menor temperatura, hay una variación de 0.5 °C.

En las horas de mayor temperatura, las temperaturas del escenario 3 también logran ser mayores que las temperaturas del escenario 2, con una variación de 0.5 °C.

### 5.3 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los valores de temperatura que se midieron al interior y exterior de modelos de los 3 escenarios, se modelaron y calibraron en el software EnergyPlus, los cuales fueron validados a través de métodos de calibración, usando los coeficientes estadísticos y comprobando que se encuentran dentro del rango de calibración. Lo cual es aceptable en los modelos de coeficientes estadísticos, lo que nos indica que los datos que van ser proporcionado por el software van ser valores confiables, lo que nos permite realizar una interpretación certera. Y esto se debe a que el software utilizado esta validado para realizar este tipo de simulaciones de temperatura.

La temperatura externa en el prototipo y el modelo son los mismo y esto se debe a que los elementos de los modelos y prototipos son de los mismos materiales y

esto se debe a que se midieron dentro de la misma zona y distancia mínima entre ellas.

Los prototipos con techo verde que se simularon en el EnergyPlus, obtuvieron un incremento de temperatura de hasta 3 °C en su pico de menor temperatura, cabe señalar que en otros tipos de sistemas de regulación de temperatura, ver Tabla 18, se aprecia aumentos de temperatura que llegan hasta los 8.5 °C, cabe señalar que en este último caso, los sistemas de regulación de temperatura no solo han acondicionado el techo de la vivienda, sino también los otros elementos de la envolvente de la vivienda, que son los vanos, el piso y los muros, y debido a esto, es que se presenta una mayor regulación de temperatura. (Ministerio de Vivienda, 2016).

Adicionalmente, otros factores que pueden influir en la atenuación de la temperatura del techo son el riego, el agua y el sustrato, evotranspiración y aumento de la reflexión que produce las plantas, la biomasa, el sustrato y el riego. La unión de todos estos procesos hace que la temperatura disminuya. (De Rhodes, 2012)

Además, se debe tener en cuenta que los modelos con techo verde experimentales de la presente tesis no consideran las ganancias de calor internas proveniente por personas, luces, proceso de cocinar, equipos eléctricos, equipos a gas u otros equipos y la masa térmica interna de objetos porque no se colocó dentro de la vivienda.

En toda la muestra de datos de temperatura medidas en el periodo noviembre 2017 – diciembre 2017, se observó que los valores de temperatura más bajos ocurren entre las 5:00 am a 6:00 am aproximadamente, por ello se hizo los análisis transferencia de calor en estado estacionario con la temperatura registrada en ese rango de horas.

En el modelo MV-3, se observó que la temperatura interna aumentó con respecto del modelo de control MC-0, debido que el sistema techo verde amortiguó la transferencia de calor por este elemento, así como se ocurre también en la investigación de techos verdes. (De Rhodes, 2012).

## CONCLUSIONES

En las zonas altoandinas, se identificó que el techo de calamina es el elemento de la envolvente de la vivienda típica altoandina que tiene la mayor pérdida de calor, lo cual es debido a su alto valor de conductividad térmica.

La implementación del techo verde en las viviendas altoandinas en el periodo de noviembre y diciembre 2017, logró aumentar la temperatura en el interior de la vivienda en 2°C aproximadamente en su instante más frío entre las horas 5:00am y 6:00am.

La regulación térmica lograda en los modelos de escala reducida con techo verde, influyó más por sustrato que por las plantas, debido que las plantas se encuentran muy espaciadas.

El techo verde del escenario 3, logra mayor cercanía a la zona de confort del interior de la vivienda.

Al aumentar considerablemente el espesor del sustrato de techo verde, no se obtiene un incremento notorio de la temperatura al interior de la vivienda, por ello se estima que debe existir un espesor de techo verde óptimo.

Según el gráfico psicrométrico de Givoni, la implementación del techo verde logró ser equivalente a un sistema de calefacción solar activa.

## RECOMENDACIONES

Analizar las construcciones existentes (Kullpis) en la zona de los Atavillos, ubicado en el distrito de Atavillos bajo, Provincia de Huaral, para obtener información para siguientes evaluaciones.

Evaluar la implementación del techo verde en las viviendas altoandinas en el periodo de junio - julio para conocer la variación de la temperatura en el interior de la vivienda entre las horas 5:00am y 6:00am, y obtener más datos de investigaciones futuras.

Se recomienda continuar con las investigaciones, y usar el césped de puna como la parte vegetal del techo verde, debido que se espera que tenga mejor comportamiento regulador térmico, ya que experimentalmente se observa que pueden crecer a distancias muy cercanas entre estas.

Evaluar térmicamente una vivienda de la zona altoandina, acondicionado con otros sistemas de regulación térmica como Muro trombe, suelo caliente, techo interior de totora, sellado de puertas, ventanas y/o juntas de techos con muros, y analizar su interacción.

Para un procedimiento de experimentación similar, tener un personal que frecuentemente verifique el proceso de toma de datos, debido a que puede ocurrir algún daño en el sensor de medición o en la sonda externa.

Se recomienda utilizar una estación meteorológica portátil, aledaña a la zona del proyecto, debido que darían una mejor precisión en los datos en comparación a las estaciones meteorológicas existentes cercanas al proyecto.

Investigar sobre el espesor óptimo de techo verde que con menos recursos pueda obtener un considerable aumento de temperatura.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (23 de diciembre de 2009). *ACUERDO 418 DE 2009*. Bogotá D.C.: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. Obtenido de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=38262>
- Arquitectura & Energía. (10 de marzo de 2015). *La transmisión del calor en edificios*. Obtenido de Arquitectura & Energía: <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/la-transmision-del-calor/>
- ASTM E2396 / E2396M-15. (2015). *Standard Test Method for Saturated Water Permeability of Granular Drainage Media [Falling-Head Method] for Vegetative (Green) Roof Systems*. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM E2397 / E2397M-15. (2015). *Standard Practice for Determination of Dead Loads and Live Loads Associated with Vegetative (Green) Roof Systems*. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM E2398 / E2398M-15a. (2015). *Standard Test Method for Water Capture and Media Retention of Geocomposite Drain Layers for Vegetative (Green) Roof Systems*. West Conshohocken, PA: ASTM International. doi:10.1520/E2398\_E2398M-15A
- ASTM E2399 / E2399M-15. (2015). *Standard Test Method for Maximum Media Density for Dead Load Analysis of Vegetative (Green) Roof Systems*. West Conshohocken, PA: ASTM International. doi:10.1520/E2399\_E2399M-15
- ASTM E2400 / E2400M-06(2015)e1. (2015). *Standard Guide for Selection, Installation, and Maintenance of Plants for Green Roof Systems*. West Conshohocken, PA: ASTM International. doi:10.1520/E2400\_E2400M-06R15E01
- ASTM E2788 / E2788M-18. (2018). *Standard Specification for Use of Expanded Shale, Clay and Slate (ESCS) as a Mineral Component in the Growing Media and the Drainage Layer for Vegetative (Green) Roof Systems*. West Conshohocken, PA: ASTM International. doi:10.1520/E2788\_E2788M-18
- ASTM International. (2014). *Norma ASTM E2777, Standard Guide for Vegetative (Green) Roof Systems*.
- Cabrera, J. (2017). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. Lima-Perú: Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Civil.
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa*. Mexico: McGraw-Hill. Obtenido de [https://www.u-cursos.cl/usuario/cfd91cf1d8924f74aa09d82a334726d1/mi\\_blog/r/Transferencia\\_de\\_Calor\\_y\\_Masa\\_-\\_Yunus\\_Cengel\\_-\\_Tercera\\_Edicion.pdf](https://www.u-cursos.cl/usuario/cfd91cf1d8924f74aa09d82a334726d1/mi_blog/r/Transferencia_de_Calor_y_Masa_-_Yunus_Cengel_-_Tercera_Edicion.pdf)

- De Rhodes, V. M. (2012). IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE TECHO VERDE Y SU BENEFICIO TÉRMICO EN UN HOGAR DE HONDA, TOLIMA (COLOMBIA). España: PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.
- Del Aguila Arcentales, S. M. (2017). *Propuesta de implementación del uso de techos verdes con geomembrana importada de Estados Unidos en el distrito de San Miguel, para cumplir con la meta 8 de biodiversidad de Aichi*. Lima: Universidad San Martín de Porres.
- DOE, U. (s.f.). *Weather Data*. Obtenido de EnergyPlus. Weather Data: <https://energyplus.net/weather>
- EnergyPlus, Copyright (c)*. (2017). (U.S. Dept. of Energy) Obtenido de <https://energyplus.net/licensing>
- Espinoza P., R. L. (2014). "Evaluación experimental de la performance de dos componentes bioclimáticas de calentamiento aplicadas en un módulo de vivienda de San Francisco de Raymina - Ayacucho". Lima - Perú: UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA.
- Fernández García, F. (1994). Clima y confortabilidad humana. Aspectos Metodológicos. *Serie Geográfica*, 4, 109-125. Obtenido de [https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/1030/Clima%20y%20Confortabilidad%20Humana.%20Aspectos%20Metodol%C3%B3gicos.p  
df?sequence=1](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/1030/Clima%20y%20Confortabilidad%20Humana.%20Aspectos%20Metodol%C3%B3gicos.pdf?sequence=1)
- Gobierno Francés. (2016). *Código de Urbanismo - Artículo L111-19*. París: Gobierno Francés. Obtenido de <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT00006074075&idArticle=LEGIARTI000033034434&dateTexte=&categorieLien=id>
- Hanna, E., Trausti, J., & Box, J. E. (2004). An Analysis of Icelandic climate since the nineteenth century. *International Journal of Climatology*, 1193-1210.
- Hossdorf, H. (1972). Modelos reducidos. Método de cálculo. *Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento*.
- IIFIC-UNI. (2019). *Propuesta de techos verdes acondicionados a viviendas rurales de las zonas altoandinas del Perú (altitud > 3500 msnm)*. Lima: IIFIC-UNI.
- Incropera, F. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de Calor, 4ta Ed* (Cuarta ed.). México, México: PRENTICE HALL.
- Inga Caqui, J. M. (2018). *Evaluación de la reducción del consumo de la energía eléctrica, mediante la implementación de un techo verde de tipo indirecto al interior de la I.E.P. Peruano – Alemán*. Huánuco: Universidad de

- Huánuco. Obtenido de [http://distancia.udh.edu.pe/bitstream/handle/123456789/965/T\\_047\\_72361661T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://distancia.udh.edu.pe/bitstream/handle/123456789/965/T_047_72361661T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Íñigo Cruz, A. (2017). *La cubierta verde como mejora del comportamiento energético en Alicante*. Alicante: Universidad de Alicante.
- Lirola, J. M. (2017). A review on experimental research using scale models for buildings: Application and methodologies. *Energy and Buildings*.
- Marengo, J. (1983). *Estudio Agrocimático de la zona de la Generao Herrera (Requena-Loreto) y climático en la selva baja norte del Perú. Tesis de Ingeniero meteorólogo*. Lima: UNALM.
- Ministerio de Vivienda, C. y. (2016). *ABRIGANDO HOGARES*.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2014). *Norma Técnica EM.110 Confort térmico y lumínico con eficiencia energética*. Lima: El Peruano.
- MINSA, D. (Enero de 2018). Boletín Epidemiológico del Perú. 27. Lima, Lima, Perú. doi:ISSN 2415-0762
- Molina Castillo, J. R. (2016). "EVALUACIÓN BIOCLIMÁTICA DE UNA VIVIENDA RURAL ALTO ANDINA DE LA COMUNIDAD DE SAN FRANCISCO DE RAYMINA DE AYACUCHO". Lima - Perú: UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA.
- Müller, E. A. (2002). *Termodinámica Básica*. Sevilla: Publidisa.
- Pérez, C., & Ritondo, C. (2012). *Ley N° 4428: Techos o Terrazas Verdes*. Buenos Aires: Legislatura de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Obtenido de <http://www2.cedom.gob.ar/es/legislacion/normas/leyes/ley4428.html>
- Qingyan, C. (2009). Ventilation performance prediction for buildings: a method overview and recent applications. *Build. Environ*, 848-858.
- Quispe, N. (2005). *Condiciones sinópticas de la incursión de una masa de aire frío en Sudamérica y su impacto en los cultivos de la selva caso específico: verano de 1996 e invierno de 2000. Tesis UNALM, Ing. meteorólogo*. Lima: UNALM.
- Reyes Rosas, A. (2012). Evaluación de un modelo para estimar la temperatura y humedad relativa en el interior de invernadero con ventilación natural. *Rev. Chapingo Ser.Hortic [online]*, 18, n.1, 125-140.
- Rodríguez Perez, M. B. (2017). *Propuesta de diseño de techo verde en azotea para vivienda en zona de expansión urbana en el Distrito de Nuevo Chimbote*. Nuevo Chimbote: Universidad César Vallejo. Obtenido de

- [http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/12237/rodriguez\\_pm.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/12237/rodriguez_pm.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Sailor, D. J. (2008). A green roof model for building energy simulation programs. 1466-1478.
- SENAMHI-Perú. (2005). *Estudio de la frecuencia de nevadas en el Perú*. Lima: SENAMHI.
- SENAMHI-PERÚ. (2018). *Monitoreo de las Temperaturas Extremas del Aire a Nivel nacional durante la temporada de Bajas temperaturas 2018*. Lima: SENAMHI.
- Toronto Municipal Code. (2009). *Green Roofs*. Toronto: Toronto Municipal Code. Obtenido de <https://www.partnershipagainstcancer.ca/preventionpoliciesdirectory/ppd582/>
- Van Dalen Luna, P. D. (2014). *Apuntes para el estudio de la arqueología e historia de la comunidad campesina de San José de Baños, Distrito de Atavillos Alto, Provincia de Huaral*. Lima: Juan Gutemberg Editores Impresores EIRL.
- Victorio Toribio, C. M. (2017). *Valoración económica y ambiental de los servicios que ofrecen los techos verdes a las familias de la urbanización el Pinar - Comas*. Lima: Universidad César Vallejo.

## ANEXO A. INGRESO DE DATOS AL SOFTWARE ENERGYPLUS

### A.1. Propiedades de las Plantas

Parámetros	Unidad	Escala	Valor Defecto	Símbolo
Altura de plantas	m	0.005 < <= 1	0.2	h
Índice de Área foliar	s.d.	0.001 < <= 5	1	LAI
Reflectividad foliar	s.d.	0.05 < <= 0.5	0.22	RF
Emisividad foliar		0.8 < <= 1	0.95	EF
Resistencia mínima estomática	s/m	50 < <= 300	180	Rs, min

### A.2. Propiedades del Suelo

Parámetros	Unidad	Escala	Valor	Sím bolo
Rugosidad	-	muy suave - medio suave - suave - rugoso - medio rugoso - muy rugoso	medio rugoso	R
Espesor	m	0.06 < < 0.7	0.1	
Conductividad térmica de suelo seco	W/m-K	0.2 < <= 1.5	0.35	K
Densidad del suelo seco	kg/m <sup>3</sup>	300 < <= 2000	1100	
Calor específico del Suelo Seco	J/kg-K	500 < <= 2000	1200	

### A.3. Propiedades de la Radiación

Parámetros	Escala	Valor	Símbolo
Absortancia térmica	0.8 < <= 1	0.9	At
Absortancia solar	0.4 < <= 0.9	0.7	As
Absortancia visible	0.5 < <= 1	0.75	Av

### A.4. Propiedades de la Humedad

Parámetros	Escala	Valor
Contenido de humedad saturada	0.1 < <= 0.5	0.3
Contenido de humedad residual	0.01 < <= 0.1	0.01
Contenido de humedad inicial	0.05 < <= 0.5	0.1
Método de cálculo de difusión de humedad	simple - avanzado	avanzado

### A.5. Clase: Simulation Control

Tipos de Simulación de Control	Descripción
Do Zone Sizing Calculation	NO
Do System Sizing Calculation	NO
Do Plant Sizing Calculation	NO
Run Simulation for Sizing Periods	YES
Run Simulation for Weather File Run Periods	YES

### A.6. Clase: Building

Características de la edificación	Unidad	Valor
Name	-	Untitled
North Axis {deg}	deg	0
Terrain	-	City
Loads Convergence Tolerance Valor	-	0.04

Características de la edificación	Unidad	Valor
Temperature Convergence Tolerance Valor {deltaC}	ΔC	0.4
Solar Distribution	-	Full Interior and Exterior
Maximum Number of Warmup Days	-	25
Minimum Number of Warmup Days	-	-

#### A.7. Clase: Shadow Calculation

Características de cálculo de sombras	Valor
Calculation Method	Average Over Days In Frequency
Calculation Frequency	20
Maximum Figures in Shadow Overlap Calculations	15000

#### A.8. Clase: Surface Convection Algorithm: Inside

Descripción	Valor
Algorithm	TARP

#### A.9. Clase: Surface Convection Algorithm: Outside

Descripción	Valor
Algorithm	DOE-2

#### A.10. Clase: Heat balance algorithm

Característica del algoritmo de transferencia de calor	Unidad	Valor
Surface Temperature Upper Limit	C	200
Minimum Surface Convection Heat Transfer Coefficient Valor	W/m2-K	0.1
Maximum Surface Convection Heat Transfer Coefficient Valor	W/m2-K	1000

#### A.11. Clase: Timestep

Descripción del intervalo de tiempo	Valor
Number of Timesteps per Hour	4

#### A.12. Clase: Location

Descripción de la Localización	Unidad	Valor
Name	-	CHICAGO_IL_USA TMY2-94846
Latitude	deg	41.78
Longitud	deg	-87.75
Time Zone	hr	-6
Elevation	m	190

#### A.13. Clase: Run period

Descripción del periodo de procesamiento	Valor
Name	Periodo1
Begin Month	12
Begin Day of Month	11
End Month	12
End Day of Month	31
Day of Week for Start Day	Use Weather File
Use Weather File Holidays and Special Days	Yes
Use Weather File Daylight Saving Period	Yes
Apply Weekend Holiday Rule	No
Use Weather File Rain Indicators	Yes

Descripción del periodo de procesamiento	Valor
Use Weather File Snow Indicators	Yes
Number of Times Runperiod to be Repeated	1
Increment Day of Week on repeat	Yes

#### A.14. Clase: Schedule: Compact

Descripción del horario compacto	Valor
Name	Siempre
Schedule Type Limits Name	Any Number
Field 1	Through: 12/31
Field 2	For: All Days
Field 3	Until: 24:00
Field 4	1

#### A.15. Clase: Material

Descripción	Unidad	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5
Name		Vidrio	Calamina	Adobe	Tierra	Madera
Roughness		Smooth	Medium Smooth	Rough	Very Rough	Medium Rough
Thickness	m	0.006	0.0003	0.2	0.15	0.018
Conductivity	W/m. K	0.93	110	0.93	0.52	0.14
Density	kg/m3	2200	7200	1800	2050	620
Specific Heat	J/kg. K	750	380	920	1840	1300

#### A.16. Clase: Window material: Glazing

Características del vidrio de la ventana	Valor
Name	Luna
Optical Data Type	Spectral Average
Window Glass Spectral Data Set Name	
Thickness {m}	0.006
Solar Transmittance at Normal Incidence	0.837
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence	0.075
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence	0.075
Visible Transmittance at Normal Incidence	0.898
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence	0.081
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence	0.081
Infrared Transmittance at Normal Incidence	0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity	0.84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity	0.84
Conductivity {W/m	0.9

#### A.17. Clase: Construction

Capa Exterior	Piso – Material externo	Muro – Material externo	Techo – Material externo	Ventana – Material externo	Puerta – Material externo
Construction	Tierra	Adobe	Calamina	Vidrio	Madera

#### A.18. Clase: Global geometry rules

Características de la geometría de la edificación	Valor
Starting Vertex Position	Upper Left Corner

Vertex Entry Direction	Counter clockwise
Coordinate System	Relative

#### A.19. Clase: Zone

Descripción de la Zona	Valor
Name	B457EB
Direction of Relative North {deg}	0
X Origin {m}	0
Y Origin {m}	0
Z Origin {m}	0
Type	
Multiplier	1

#### A.20. Clase: Building surface: Detailed

Descripción detallada de la superficie de la edificación	Unidad	Valor
Name	-	Piso
Surface Type	-	Floor
Construction Name	-	Exterior Floor
Zone Name	-	B457EB
Outside Boundary Condition	-	Ground
Outside Boundary Condition Object	-	-
Sun Exposure	-	NoSun
Wind Exposure	-	NoWind
View Factor to Ground	-	0
Number of Vertices	-	4
Vertex 1 X	m	2.536611525
Vertex 1 Y	m	1.968113625
Vertex 1 Z	m	0
Vertex 2 X	m	2.536611525
Vertex 2 Y	m	0.568113625
Vertex 2 Z	m	0
Vertex 3 X	m	0.536611525
Vertex 3 Y	m	0.568113625
Vertex 3 Z	m	0
Vertex 4 X	m	0.536611525
Vertex 4 Y	m	1.968113625
Vertex 4 Z	m	0

#### A.21. Clase: Fenestration surface: Detailed

Características de las aberturas en la superficie de la edificación	Unidad	Valor
Name	-	Puerta
Surface Type	-	Door
Construction Name	-	Exterior Door
Building Surface Name	-	Front
Outside Boundary Condition Object	-	-
View Factor to Ground	-	-
Shading Control Name	-	-
Frame and Divider Name	-	-
Multiplier	-	-
Number of Vertices	-	4

Características de las aberturas en la superficie de la edificación	Unidad	Valor
Vertex 1 X	m	0.86564533
Vertex 1 Y	m	0.568113625
Vertex 1 Z	m	0.6
Vertex 2 X	m	0.86564533
Vertex 2 Y	m	0.568113625
Vertex 2 Z	m	0
Vertex 3 X	m	1.21564533
Vertex 3 Y	m	0.568113625
Vertex 3 Z	m	0
Vertex 4 X	m	1.21564533
Vertex 4 Y	m	0.568113625
Vertex 4 Z	m	0.6

#### A.22. Clase: Thermostat

Características del termostato	Valor
Name	Constant Setpoint Thermostat
Heating Setpoint Schedule Name	-
Constant Heating Setpoint {C}	20
Cooling Setpoint Schedule Name	-
Constant Cooling Setpoint {C}	25

#### A.23. Clase: Variable dictionary

Descripciones del diccionario de variables	Valor
Key Field	IDF

#### A.24. Clase: Output: Constructions

Tipos de resultados de construcciones	Valor
Details Type 1	Constructions
Details Type 2	Materials

#### A.25. Clase: Output: Variable

Características de variables	Variable 1	Variable 2	Variable 3	Variable 4	Variable 5
Key Valor	*	*	*	*	*
Variable Name	Zone Mean Air Temperature	Surface Inside Face Temperature	Surface Outside Face Temperature	Site Outdoor Air Drybulb Temperature	Zone Air Relative Humidity
Reporting Frequency	Hourly	Hourly	Hourly	Hourly	Hourly
Schedule Name	Siempre	Siempre	Siempre	Siempre	Siempre

#### A.26. Clase: Output: Sqlite

Características de tipo de resultado	Valor
Option Type	Simple

**ANEXO B. TABLAS DE VALORES DEL CLIMA INGRESADOS EN EL ENERGYPLUS**

Month	Day of month	Hour	Dry-bulb temperature (°C)	Relative humidity (%)	Atmospheric pressure (hPa)	Global horizontal solar irradiance (W/m²)	Direct normal solar irradiance (W/m²)	Diffuse horizontal solar irradiance (W/m²)	Wind direction (° E of N)	Wind Speed (m/s)	Cloud Cover (OKtas)
M	DM	H	T	RH	PAT	GH	IDIRN	IDIFF	WD	WS	CLD
12	19	1	3.5	80	438.7	0	0	0	45	1.8	10
12	19	2	2.4	72	438.7	0	0	0	67.5	2.7	10
12	19	3	2.4	74	438.7	0	0	0	45	1.3	10
12	19	4	2.4	70	438.7	0	0	0	67.5	4.9	10
12	19	5	2.3	69	438.7	0	0	0	67.5	6.7	10
12	19	6	2.3	70	438.7	38	0	38	330	0.4	10
12	19	7	3.5	69	438.7	196	0	196	330	0.4	10
12	19	8	5.5	60	438.7	439	0	439	30	2.2	10
12	19	9	9.4	58	438.7	517	0	517	0	4.5	10
12	19	10	8.6	57	438.7	894	0	894	330	1.8	10
12	19	11	10.5	54	438.7	333	0	333	330	3.6	10
12	19	12	12.9	51	438.7	420	0	420	0	4.5	10
12	19	13	11.3	54	438.7	160	0	160	30	2.2	10
12	19	14	11.9	64	438.7	247	0	247	45	3.6	10
12	19	15	8.9	65	438.7	150	0	150	67.5	3.6	10
12	19	16	1.6	78	438.7	295	0	295	67.5	4.9	10
12	19	17	2.5	77	438.7	77	0	77	90	6.7	10
12	19	18	2.3	79	438.7	18	0	18	90	3.1	10
12	19	19	2.5	78	438.7	0	0	0	90	3.6	10
12	19	20	2.3	79	438.7	0	0	0	90	2.7	10
12	19	21	1.3	79	438.7	0	0	0	67.5	5.4	10
12	19	22	1.2	75	438.7	0	0	0	90	2.2	10
12	19	23	0.9	72	438.7	0	0	0	67.5	0.9	10
12	19	24	0.7	77	438.7	0	0	0	330	0.4	10

Month M	Day of month DM	Hour H	Dry-bulb temperature (°C) T	Relative humidity (%) RH	Atmospheric pressure (hPa) PAT	Global horizontal solar irrad. (W/m <sup>2</sup> )	Direct normal solar irrad. (W/m <sup>2</sup> ) IDRN	Diffuse horizontal solar irrad. (W/m <sup>2</sup> ) IDIFF	Wind direction (° E of N) WD	Wind Speed (m/s) WS	Cloud Cover (Oktas) CLD
12	20	1	0	73	438.7	0	0	0	330	0.9	10
12	20	2	-0.5	70	438.7	0	0	0	67.5	1.8	10
12	20	3	-0.5	67	438.7	0	0	0	135	0.4	10
12	20	4	0.5	57	438.7	0	0	0	67.5	0.9	10
12	20	5	0.6	56	438.7	0	0	0	112.5	0.4	10
12	20	6	0.8	53	438.7	35	0	35	0	0.4	10
12	20	7	3.7	52	438.7	260	0	260	150	0.9	10
12	20	8	7	33	438.7	518	0	518	0	0.9	10
12	20	9	11.5	32	438.7	736	0	736	330	3.1	10
12	20	10	7.9	31	438.7	883	0	883	30	2.2	10
12	20	11	9.3	35	438.7	1026	0	1026	315	1.8	10
12	20	12	10.4	42	438.7	353	0	353	0	1.8	10
12	20	13	11.6	43	438.7	630	0	630	300	1.3	10
12	20	14	11.5	47	438.7	355	0	355	225	3.1	10
12	20	15	12.5	60	438.7	421	0	421	270	3.1	10
12	20	16	11.7	69	438.7	75	0	75	300	4.9	10
12	20	17	2.4	78	438.7	36	0	36	225	2.7	10
12	20	18	2.1	83	438.7	14	0	14	135	0.9	10
12	20	19	2.2	81	438.7	0	0	0	30	0.9	10
12	20	20	2.7	85	438.7	0	0	0	315	1.8	10
12	20	21	1.8	87	438.7	0	0	0	315	0	10
12	20	22	2.4	87	438.7	0	0	0	0	0	10
12	20	23	2.7	88	438.7	0	0	0	315	0.9	10
12	20	24	3	91	438.7	0	0	0	0	0	10

Month M	Day of month DM	Hour H	Dry-bulb temperature (°C) T	Relative humidity (%) RH	Atmospheric pressure (hPa) PAT	Global horizontal solar irradiance (W/m <sup>2</sup> )	Direct normal solar irradiance (W/m <sup>2</sup> ) IDIRN	Diffuse horizontal solar irradiance (W/m <sup>2</sup> ) IDIFF	Wind direction (° E of N) WD	Wind Speed (m/s) WS	Cloud Cover (Oktas) CLD
12	21	1	3.1	91	438.7	0	0	0	247.5	0.4	10
12	21	2	3.6	93	438.7	0	0	0	247.5	0	10
12	21	3	2.3	95	438.7	0	0	0	247.5	0.4	10
12	21	4	2.5	95	438.7	0	0	0	330	1.3	10
12	21	5	1.9	96	438.7	0	0	0	330	0.9	10
12	21	6	2.4	96	438.7	11	0	11	0	1.3	10
12	21	7	4.1	95	438.7	90	0	90	45	0.4	10
12	21	8	5	85	438.7	420	0	420	0	0.4	10
12	21	9	11.1	83	438.7	165	0	165	330	1.3	10
12	21	10	12.4	67	438.7	804	0	804	315	4.9	10
12	21	11	9.7	59	438.7	1197	0	1197	315	4.5	10
12	21	12	10.5	55	438.7	596	0	596	247.5	5.4	10
12	21	13	11.9	54	438.7	1097	0	1097	270	4.9	10
12	21	14	12.2	46	438.7	932	0	932	315	4.9	10
12	21	15	7.4	55	438.7	238	0	238	315	6.3	10
12	21	16	6.5	56	438.7	150	0	150	270	6.3	10
12	21	17	6.3	62	438.7	115	0	115	247.5	4.9	10
12	21	18	8.6	64	438.7	17	0	17	225	4.5	10
12	21	19	4.3	73	438.7	0	0	0	180	1.8	10
12	21	20	3.7	76	438.7	0	0	0	135	0.9	10
12	21	21	4.5	84	438.7	0	0	0	247.5	0	10
12	21	22	1.9	87	438.7	0	0	0	0	0	10
12	21	23	1.4	89	438.7	0	0	0	0	0	10
12	21	24	0.6	89	438.7	0	0	0	247.5	0	10

## ANEXO C. FICHA TÉCNICA DE GEOCOMPUESTO DE DRENAJE UTILIZADO EN EL TECHO VERDE

# MacDrain® 2L FP

## Geocompuesto para drenaje

### Características técnicas

MacDrain® 2L FP es un geocompuesto para drenaje liviano y flexible, cuyo núcleo drenante es formado por una geomanta tridimensional, fabricada con filamentos de polipropileno. El núcleo es termosoldado entre dos geotextiles no tejidos en todos los puntos de contacto, siendo un geotextil de poliéster e el otro laminado de polipropileno.

Los geotextiles sobresalen 100 mm del núcleo en las extremidades longitudinales del MacDrain® 2L FP, para garantizar la perfecta continuidad del sistema en las juntas y permitir la ejecución de los traslapes.



### Caudal

ASTM D 4716	Drenaje horizontal										Drenaje vertical	
	i = 0.01		i = 0.02		i = 0.03		i = 0.10		i = 0.50		i = 1.00	
	l/s.m	l/h.m	l/s.m	l/h.m	l/s.m	l/h.m	l/s.m	l/h.m	l/s.m	l/h.m	l/s.m	l/h.m
10 kPa	0,32	1152	0,40	1440	0,46	1692	0,95	3420	1,96	7092	2,76	9972
20 kPa	0,28	1008	0,35	1260	0,40	1476	0,89	3240	1,82	6588	2,53	9144
50 kPa	0,16	576	0,20	720	0,23	864	0,54	1980	1,12	4068	1,53	5508
100 kPa	0,05	180	0,06	252	0,07	252	0,19	720	0,35	1260	0,51	1836
200 kPa	0,03	144	0,04	180	0,05	180	0,12	468	0,25	900	0,38	1368

Propiedades hidráulicas	Geocompuesto		Geotextil	
Abertura de filtración	mm	AFNOR G 38017	---	
Permisividad	s <sup>-1</sup>	ASTM D 4491	---	
Permeabilidad	cm/s	ASTM D 4491	---	
			1,1 x 10 <sup>-1</sup>	

Propiedades mecánicas		Geocompuesto	Geotextil en poliéster		Geotextil laminado en polipropileno	
			Dirección longitudinal	Dirección transversal	Dirección longitudinal	Dirección transversal
Resistencia a la tracción	kN/m	ABNT NBR 12824 ASTM D 4595	14,00	8,00	5,26	3,06
Deformación a la rotura	%	ABNT NBR 12824 ASTM D 4595	30,00	30,00	37,38	50,00
Punzonamiento	N	ABNT NBR 13359 ASTM D 4833	---		602,50	---

Características físicas	Geocompuesto		Geotextil en poliéster	Geotextil laminado en polipropileno
Espesor	mm	ABNT NBR 12569 ASTM D 5199	11,00	0,15
Gramaje	g/m <sup>2</sup>	ABNT NBR 12563 ASTM D 5261	750	135

Presentación del rollo	Geocompuesto	
Ancho	m	1
Largo	m	10 ou 30
Area	m <sup>2</sup>	10 ou 30
Diámetro promedio	m	0,40 ou 0,70
Peso	kg	7,5 ou 22,5

## ANEXO D. FICHA TÉCNICA DE SENSOR HIGROTÉRMICO UTILIZADO EN LOS MODELOS DE VIVIENDA DE ESCALA REDUCIDA

# SSN-22ET

Humedad, temperatura y punto de rocío  
Data Logger con sonda de temperatura externa

YUWESE®

### Introducción

Este Termohigrómetro con registrador de datos puede medir y almacenar lecturas de temperatura (Un canal para la sonda interna y otro canal para la sonda externa) y humedad automáticamente. El software único PC DGraph compatible con Windows XP / 7/8 (32/64 bits) Proporcionan, el punto de rocío y aplicaciones profesionales avanzadas.

El usuario puede utilizar fácilmente el software para configurar y descargar datos a la PC a través de la conexión USB. El usuario puede ver, analizar e imprimir los datos, o exportarlos a otros formatos (txt, xls, csv, bmp, jpg). El estado del registrador, la indicación de alarma e indicación de batería baja se muestran a través del LED intermitente rojo / verde y el LED amarillo. El botón en la carcasa se puede utilizar para iniciar el registro o confirmar y borrar la alarma LED.



- Sonda externa de temperatura de 2 metros
- Alta fiabilidad y estabilidad para aplicaciones industriales
- Múltiples registros de datos pueden ser graficados juntos
- Muy fácil de usar

Especificaciones		SSN-22E
Humedad relativa	Rango de medida	0 ~ 100%RH
	Precisión (Typ.)	±3%RH
	Resolución (Typ.)	0.1%RH
Temperatura	Rango de medida	-35 ~ 80°C (-31 ~ 176°F)
	Precisión (Typ.)	±0.3°C (±0.5°F)
	Resolución (Typ.)	0.1°C (0.2°F)
Temperatura Externa	Rango de medida	-40 ~ 125°C (-40 ~ 257°F)
	Precisión (Typ.)	±0.5°C (±0.9°F)
	Resolución (Typ.)	0.1°C (0.2°F)
Localización del Sensor	Externo	
Pantalla LCD	Incluye	
Memoria	64KBytes(Total de 32,000 lecturas por todos los canales)	
Tiempo de muestreo	Seleccionable por el usuario de una vez cada 2 segundos a una vez cada 12 horas	
PC Software	DGraph software y driver USB requerido (Se incluye en el CD)	
Fuente de energía	Reemplazable por el usuario 1/2AA 3.6V Batería de litio, 1200mAh	
Vida útil de la batería	Aprox.3 años con un minuto de tiempo de muestreo	
Dimensiones	120mmx37mmx23mm(4.8"x1.5"x0.9")	
Material de la carcasa y peso	ABS; Aprox. 80 gramos(2.82 oz)	

### Aplicaciones

Este termo-higrómetro con registrador de datos se utiliza principalmente para controlar y verificar humedad y temperatura de bienes, equipos sensibles a la temperatura o áreas, como por ejemplo:

- Cadena de Frío
- Almacén
- Refrigeración
- HVAC
- Alimentación y farmacia
- Transporte

### Características

- Portátil, preciso, compacto y de bajo costo
- Interfaz USB, comunicación directa con la PC para la configuración y descarga de datos
- Software de control de PC único y uniforme: DGraph
- Cada unidad cuenta con un número de serie único
- El usuario puede configurar la contraseña de acceso para cada registrador de datos
- Alarma e indicación de estado mediante LED
- Método de Inicio de registro: Inmediatamente, botón, Comience en
- Batería de litio reemplazable y los datos no se pierden si se agota
- Calibración de dos puntos para cada canal
- Ajustes de límite de alarma para todos los canales
- El usuario puede personalizar el gráfico compuesto
- El usuario puede personalizar fácilmente la nueva unidad
- El usuario puede nombrar cada canal y activar / desactivarlo



**ANEXO E. PLANOS DE VISTA EN PLANTA Y ELEVACIÓN DEL MODELO Y PROTOTIPO DE VIVIENDA SIN TECHO VERDE.**

