

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PUCP**

**“ANÁLISIS DEL CONFORT TÉRMICO EN ESCUELA MODELO DE  
LA SIERRA PERUANA Y EVALUACIÓN DE MEJORAMIENTO  
TÉRMICO MEDIANTE EL USO DE PRINCIPIOS  
BIOCLIMÁTICOS”**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil**

**AUTOR:**

Ivan Noel Chumbiray Alonso

**ASESOR:**

Ramzy Francis Kahhat Abedrabbo

Lima, Abril, 2021

## RESUMEN

La investigación consiste en la evaluación del confort térmico en las aulas de una escuela modelo tipo Sierra, ubicada en la ciudad de Cusco, así como una propuesta de mejora térmica basada en un diseño bioclimático.

En la introducción, se presentan los antecedentes de la arquitectura vernácula. Se explica la problemática energética producto de la masificación de sistemas constructivos y la aparición de sistemas de aire acondicionado cuyo fin se justifica en satisfacer requerimientos de confort interno.

La revisión de literatura presenta los estudios relacionados al confort interno de edificaciones así como estrategias bioclimáticas que permitan alcanzar la zona de confort según las variables climáticas de los emplazamientos.

Para la evaluación del confort en el caso práctico se utiliza el programa computacional “Design Builder” que brinda resultados del confort para ser analizados.

Finalmente, en la evaluación de resultados se discute el análisis del confort del caso práctico y cómo la propuesta de diseño bioclimático contribuye a alcanzar los niveles de confort deseados en la escuela.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	4
1.1. Antecedentes	
1.2. Justificación del problema	
1.3. Objetivo general	
1.4. Objetivos específicos	
1.5. Hipótesis	
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b> .....	10
2.1. CONFORT TÉRMICO EN EDIFICACIONES	
2.1.1. Enfoques de confort térmico	
2.1.2. Estandarización del confort	
2.2. DESARROLLO DE DISEÑO BIOCLIMÁTICO	
2.2.1. Diagramas bioclimáticos	
2.2.2. Desarrollo de estrategias generales del diseño bioclimático	
2.2.3. Desarrollo de estrategias específicas del diseño bioclimático	
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	26
3.1 PROPUESTA METOLÓGICA	
3.2 ESTUDIO DE CASO	
3.2.1. Delimitación y caracterización de la ciudad de Cusco	
3.2.2. Delimitación y caracterización de zonas bioclimáticas en el Perú	
3.2.3. Interpretación de las características de la zona de trabajo	
3.2.4. Arquitectura de caso práctico	
3.3 SIMULACIÓN TÉRMICA	
3.3.1. Modelamiento de caso práctico	
3.3.2. Modelamiento de caso bioclimático	
<b>4. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN</b> .....	40
4.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
4.1.1. Discusión del caso práctico	
4.1.2. Discusión del caso bioclimático	
4.1.3. Comparación del caso práctico y caso bioclimático	
4.2 ANÁLISIS DEL CONFORT INTERNO	
4.2.1. Análisis de caso práctico	
4.2.2. Análisis de caso bioclimático	
<b>5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES</b> .....	50
5.1. Conclusiones	
5.2. Mejoras	
5.3. Comentarios finales	
<b>6. REFERENCIAS</b> .....	52
<b>7. APÉNDICE</b> .....	55
7.1 Apéndice A : Tablas	
7.2 Apéndice B : Figuras	
7.3 Apéndice C : Resultados Design Builder	

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes

La búsqueda del confort estuvo presente desde el origen de la civilización, desde que los seres humanos nos agrupábamos como cazadores nómades hasta que pasamos a ser sedentarios por medio de la revolución agrícola (Harari, 2015). En el principio, los humanos buscamos instintivamente refugio ante las adversidades del clima que raramente estaban en sincronía conforme a nuestras necesidades fisiológicas y sociales (Allen, 1997).

Cada civilización adoptó sus viviendas y edificaciones a las características climáticas de cada emplazamiento. Al respecto Vitrubio afirmaba en *De Arquitectura* : “El estilo de los edificios debe ser manifiestamente diferente en Egipto que en España, en Pontus y en Roma, y en países y regiones de características diferentes. Una parte de la tierra se encuentra abrumada por el sol en su recorrido; otra, se encuentra muy alejada de él; y por último, existe una afectada por su radiación pero a una distancia moderada.” Por ello, mucho de antes del aire acondicionado, las primeras civilizaciones ya conocían estrategias de ventilación natural, masa térmica y sombras para alcanzar el confort (Raish, 2003).

Por ejemplo, desde el año 2000 a.C, los antiguos babilonios utilizaban enfriamiento por evaporación para acondicionar sus viviendas. Las personas rociaban agua sobre las superficies expuestas al interior por la noche. El efecto combinado de la evaporación y la caída de temperatura proporcionaron un método efectivo para obtener alivio al calor (Binggeli, 2003). También, los antiguos indios colgaban esteras de hierba húmeda en el lado de barlovento de sus hogares para obtener una temperatura interior más fresca (Levy, 2003).

Asimismo, en el ámbito nacional, Machu Picchu sería la ciudad solar originaria de América dado que tendría el laboratorio más avanzado de radiación y arquitectura solar. Entre las características bioclimáticas más resaltantes se incluye que la ciudad se orienta en dirección al este, así aprovecha eficientemente la radiación solar por las mañanas, con los componentes de su envolvente inclinados en la misma orientación. También, se utilizó materiales cuyas características térmicas permitían manipular las condiciones climáticas a fin de generar confort interno (Jiménez, 1984). Además, la ubicación en la montaña base está circundada por picos altos. Así, en verano Machu Picchu en verano está cubierta por un colchón de nubes que impiden la acumulación excesiva de calor, y por las noches preservan el calor absorbido durante el día. Durante el invierno, se absorbe el calor de los rayos solares aprovechando la baja nubosidad, y por la noche las nubes cubren la ciudad para retener las ganancias internas en los muros (Jiménez, 1984).

La arquitectura vernácula se basó en principios bioclimáticos que tomaron en cuenta el factor climático, urbano, social y cultural. No obstante, la arquitectura vernácula fue extinguiéndose en la medida que la revolución industrial y el capitalismo tomaron su lugar en el orden mundial en el siglo XVIII. Al respecto la Dra. Tillería (2017) escribe sobre la transformación de materiales, la migración del territorio rural al urbano, la desaparición de técnicas constructivas y relaciones particulares del hombre con su territorio. Ante este contexto, las ciudades y viviendas empezaron a valorarse en términos económicos y de productividad; es decir, se priorizó la rentabilidad de los proyectos y la masificación de métodos constructivos a una escala global (Pons, F; Rubio, I, 2020).

Las sociedades modernas continuaron alejándose de lo rural construyendo lo urbano con materiales industriales como el acero, cemento, concreto y la albañilería. En 1902, se crea el primer sistema de ventilación mecánica; posterior a este suceso, en 1929 se promociona este sistema para uso en los hogares haciendo hincapié en el bienestar térmico. Finalmente, en 1947 se produce de forma masiva la ventana de aire acondicionado, la cual hacia posible obtener temperaturas internas confortables independientemente de las características del lugar, diseño de edificación y materiales de construcción (Ross,2020).

La masificación originó un nuevo problema energético dado que las edificaciones consumían grandes cantidades para satisfacer las nuevas demandas de confort (Raish,2003). Aquella situación encontró un punto de inflexión cuando en el año 1970, se da la crisis energética y ,posteriormente, en el año 1987 ,a través de la Comisión de Brundtland, se define Desarrollo Sostenible por primera vez. El Desarrollo Sostenible se define como un “desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades” (United Nations, 1987). Esta concepción tiene un impacto en la forma de diseñar, construir y operar las edificaciones teniendo como pilares el ahorro de recursos, ciclo de vida de edificios y diseño a nivel humano (Wieser, 2008). Al margen de estas circunstancias, se desarrollan significativos avances en la teoría del confort térmico y en el desarrollo de la arquitectura bioclimática, esto con miras a un desempeño más sostenible de las edificaciones.

La capacidad de brindar confort interno fue la causa del consumo energético en edificaciones, no obstante, la importancia del confort térmico se justifica en el impacto que tiene en el bienestar, salud y productividad de los usuarios. Por ello, a fin de reducir el consumo energético e incorporar la eficiencia se tuvo que ampliar los conocimientos en el área del confort humano. Fanger (1973) fue uno de los precursores en el área al proponer su modelo racional y establecer la influencia del ambiente térmico sobre el ser humano. Las teorías de Fanger fueron utilizadas en el desarrollo de los primeros estándares internacionales y posteriores teorías de modelo adaptativo. Mientras el modelo racional era considerado estático, el modelo adaptativo recoge información del campo. Al respecto, uno de los descubrimientos más significativos en el modelo adaptativo fue el de establecer una relación lineal entre la temperatura de neutralidad térmica y la temperatura externa (R. De Dear et al. 1998). Este descubrimiento está en sincronía con lo que previamente se postulaba en los estudios bioclimáticas cuyo objetivo es alcanzar la zona de confort para sus ocupantes.

Uno de los pioneros en revalorizar la arquitectura vernácula y desarrollar la arquitectura bioclimática como una ciencia fue Olgay. Olgay (1950) planteaba utilizar los elementos de la naturaleza y sacar ventaja de sus capacidad para crear condiciones de vida adecuada. Resultado de sus estudios en los que interrelacionó el clima, la biología, arquitectura y tecnología publica el primer gráfico bioclimático. Este gráfico caracterizaba las variables climáticas de los emplazamientos y sugería estrategias para alcanzar el confort. Posteriormente, Givoni (1970) amplía las estrategias presentadas por Olgay al utilizar un ábaco psicrométrico para caracterizar las condiciones climáticas. Estos personajes sentaron las bases del bioclimatismo y sus gráficos aún son manejados de forma recurrente en la concepción de proyectos sostenibles; no obstante, se reconoce que cada estrategia seleccionada dependerá de la singularidad de los emplazamientos.

Actualmente, en Europa, los esfuerzos por contribuir a un desarrollo sostenible en el sector de edificaciones se da por medio de “Zero-Energy Buildings”(ZEB) y “Passive house standards”. Ambos basan su diseño y construcción en principios bioclimáticos que reducen la demanda energética de las edificaciones ; no obstante, cualquier demanda de energía adicional es satisfecha por medio de energías renovables que encuentran su fuente en el clima (ECOFYS, 2014).

Por otro lado, en el año 2000, se crea en Estados Unidos la certificación “Leadership in energy and environmental design” (LEED) a través del U.S. Green Building Council (USGBC). LEED brinda aprobación por terceros sobre las cualidades sustentables de un proyecto, ofrece puntajes al satisfacer requisitos en diferentes categorías tales como eficiencia de agua, uso de energía y atmósfera, materiales y recursos, calidad ambiental interior, innovación en diseño y operaciones por mencionar algunos (USGBC,2016). De esta forma, se concluye la revisión histórica de la interrelación del confort térmico y el bioclimatismo, una historia que cuenta con un inicio, nudo y cuyo desenlace depende de nuestra generación.

## **EL CASO PERUANO**

El caso peruano de masificación de la construcción no se da en paralelo como en países de desarrollo. En el Perú, la primera fábrica de ladrillos fue construida en Lima en el año 1856, en época de colonia española (Gallegos, 1989) . Con respecto al uso del ladrillo para edificar en la primera mitad del siglo XX, el Arq. Velarde (1946) escribe:” se habían olvidado de trescientos años de auténtica arquitectura en relación con nuestro suelo. Todo el barroco español, admirablemente adaptado al medio, es decir, a la inocencia del adobe, al clima, a nuestra visión plástica y de fondo, se había pasado por alto como inexistente”.

Pasados los mediados del siglo XX, nuestro país experimentó la mayor migración de su historia; posteriormente, fue seguido por una creciente autoconstrucción de vivienda sin ningún tipo de respaldo técnico u arquitectónico. Al respecto, el arquitecto Kahatt (2014) escribe “el crecimiento poblacional y territorial estaba absolutamente descontrolado”. Este tendencia se dio mayormente entre los años 1940 a 1980. En el caso de Lima, desde 1980 hasta la actualidad se contempla un crecimiento desordenado que apuesta por la masificación y la rentabilidad en los proyectos.

Se ha mencionado el punto de inflexión en el que posiblemente inicia la dejadez de la arquitectura vernácula y se inicia a construir la ciudad “moderna”. Actualmente, haciendo un diagnóstico de la situación, se indica que el 79.3% de la población vive en centros urbanos y el 20,7% en los centros poblados rurales. Asimismo, según concluye el censo realizado en 2017 (INEI,2017), el material predominante en territorio urbano es el ladrillo o bloque de cemento con una presencialidad del 70,6% en muros mientras que en territorio rural el material predominante es el adobe o tapial con 69,5 %; esto indistintamente de la región en que se construya la edificación.

No obstante a esta realidad, en los últimos años se ha reconocido que este crecimiento resulta insostenible y tiene un impacto en el cambio climático. Por ello, se han desarrollado diferentes impulsos desde el sector público y privado que permitan revalorizar la arquitectura vernácula a través de la arquitectura bioclimática y poder brindar mejores niveles de calidad de ambiente interior.

Desde hace 50 años, investigadores de la PUCP realizan trabajos en relación a la construcción cuyo material es la tierra armada. Tras un largo periodo de investigación, se ha concluido que se puede construir muros de tierra sismorresistentes al incorporar refuerzos como cañas embutidas horizontal y verticalmente, mallas electrosoldadas al exterior por mencionar algunos ejemplos (Blondet et al, 2011). Además, en el año 1984, la Arq. Jiménez desarrollaba la investigación titulada “Diseño bioclimático en la ciudad de Cusco” cuyo tema principal es la conceptualización, descripción y evaluación del diseño bioclimático y sus formas de aplicación para la realidad peruana y más específicamente la ciudad de Cusco (Jiménez, 1984).

Con respecto al desarrollo de tecnologías para el sector rural, el Grupo de Apoyo al Sector Rural ha investigado y promovido tecnologías para conservar el medio ambiente desde el año 1992. Actualmente, cuentan con más de 55 tecnologías en su campo científico demostrativo llamado: “La Casa Ecológica”. Estas tecnologías responden a fuentes energía solar, eólica, hidráulica y biomasa que pueden ser transformadas en energía eléctrica, mecánica, térmica para que sean aprovechadas. Entre los principales proyectos desarrollados por el grupo se tiene K’oñichuyawasi- Casa Caliente Limpia. La Casa Caliente Limpia presenta la propuesta de implementación de un paquete tecnológico que consta de una pared caliente, cocina mejorada, sistema de aislamiento de techo, puertas y ventanas. Este paquete tiene como objetivo el incremento de la temperatura dentro de la vivienda y mitigar el impacto negativo que tienen las emisiones de humo de los fogones abiertos (Hadzich, 2000).

En los últimos 3 años, este paquete tecnológico ha sido la base del programa “Mi Abrigo” del Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social. En respuesta a la vulnerabilidad frente a las heladas, entre los años 2017-2018 se intervino 3,290 hogares rurales en el ámbito Sierra. Además, en el año 2019 se intervino 4,055 hogares rurales en el ámbito Sierra (FONCODES, 2020).

En el año 2008, el Ministerio de Educación publica la “Guía de aplicación de arquitectura bioclimática en locales educativos”. En esta guía se reconoce la necesidad de brindar un aula confortable que promueva el aprendizaje y la producción a través de diferentes estrategias bioclimáticas que vayan en sincronía con el clima (MINEDU, 2008).

En el año 2011, el Arq. Wieser publica su libro “Consideraciones bioclimáticas en el diseño arquitectónico: El caso peruano”. Esta publicación viene motivada por el escaso interés que se le da a las consideraciones climáticas en el diseño del proyecto arquitectónico. Además, en respuesta a la poca información vincula al confort en el ámbito nacional (Wieser,2011).

En el año 2014, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento publica la norma “EM.110 Confort térmico y lumínico con eficiencia energética”. Esta norma se publica en vista de que no existen lineamientos técnicos nacionales para el diseño y la construcción de edificaciones o habilitaciones urbanas que aspiren a mejorar el confort. A través de esta norma fomenta la construcción de edificaciones bioclimáticas y con eficiencia energética a través de lineamientos técnicos de diseño y uso de materiales (MVCS,2014).

En el año 2016, el Centro Tierra publica el “Manual del Promotor Técnico, para la construcción de la vivienda altoandina segura y confortable”. Por medio de este manual se busca la integración del diseño bioclimático con técnicas que recuperen materiales como la totora para el aislamiento térmico. Asimismo, integra técnicas vernáculas para la construcción de las nuevas viviendas (Rodríguez et al, 2016).

En el año 2017, se actualiza la norma “E.080 Diseño y construcción con tierra reforzada”. La actualización incorpora las técnicas constructivas de tapial y el énfasis en el refuerzo de las edificaciones de tierra. En el año 2017, el Ministerio de Educación presenta el Plan Selva con el objetivo de reducir las brechas de infraestructura y asegurar condiciones básicas de habitabilidad en las escuelas de la Amazonía. Este proyecto en líneas generales promueve edificaciones de módulos prefabricados diseñados con consideraciones bioclimáticas que permiten el aprovechamiento de la ventilación cruzada y mayores superficies cubiertas (MINEDU, 2017).

En el año 2018, el Programa Nacional de Infraestructura Educativa (PRONIED), instaló acondicionamiento térmico a 62 instituciones educativas, ubicadas en zonas altoandinas y en la selva baja. Los trabajos incluyeron el aislamiento térmico de muros, pisos, cielo raso, elevación del nivel del cielo raso, instalación de ventanas dobles de vidrio laminado y cambios en la cobertura.

Ante este creciente interés de revalorizar materiales autóctonos, implementar estrategias bioclimáticas para garantizar el confort y realización de investigaciones y proyectos que promuevan la sostenibilidad que se desarrolla la presente tesis, con el anhelo de fomentar el interés de estos temas a los jóvenes estudiantes y reconociendo la deuda que tenemos con el sector rural, ampliamente invisibilizado e ignorado en el Perú.

## **1.2. Justificación del problema**

En la actualidad, las personas pasan cerca del 90% del tiempo dentro de edificaciones; en el ámbito educativo, los estudiantes pasan la mayor parte de su tiempo atendiendo a clases en escuelas cercanos a su localidad (Landrigan,1998). Estudios han comprobado que condiciones fuera de la zona de confort tales como un incremento en la temperatura del aula o una baja tasa de ventilación pueden afectar negativamente el desempeño académico y la salud de los estudiantes (Mendell & Heath,2005; Teli, D.,James, P.A.B., & Jentsch, M. F. ,2013). Además, se ha demostrado que los niños tienen mayor susceptibilidad al medio ambiente que los adultos debido a los grandes volúmenes de aire que respiran con respecto a su peso y dimensión de órganos (Mendell & Heath,2005). Es por lo explicado que alcanzar el confort térmico dentro de las aulas se ha convertido en un importante desafío para todos los involucrados en el diseño y realización de proyectos de infraestructura educativa.

El diseño bioclimático se presenta como una excelente alternativa para alcanzar los niveles de confort térmico en las escuelas. La condición térmica dentro de un edificio es un factor relacionado directamente con las características constructivas de las edificaciones; es decir, hay una gran influencia entre la arquitectura, constructibilidad y mecánica del edificio en relación al confort de los estudiantes (Manzano et al.,2015). Nuestro país cuenta con 28 de los 32 tipos de clima establecidos por Thornthwaite en el siglo XX, este recurso debe ser aprovechado para acceder al bienestar dentro de las escuelas. Por medio de estrategias bioclimáticas se prevé mejorar desde el diseño arquitectónico las condiciones del confort térmico en las escuelas. En consecuencia, brindar un ambiente confort resulta primordial para el aprendizaje y la productividad de maestros y alumnos.

Paralela a esta problemática, el sector rural permanece muchas veces invisibilizado e ignorado. Según Instituto Peruano de Economía (IPE), el 80% de escuelas rurales no cuentan electricidad ni servicios de agua y desagüe (RPP,2019). Además, según el Plan Nacional de Infraestructura Educativa (PNIE), el déficit de infraestructura educativa en el Perú suma 100,000 millones de soles para la implementación de infraestructuras adecuadas al 2031(Gestión, 2018).



Es ante estas circunstancias que el diseño bioclimático responde a las carencias que nuestro país enfrenta. La arquitectura bioclimática no solo involucra el entorno natural sino el aspecto cultural, social y urbano que permite a una comunidad poder desarrollarse. Además, se cuenta con otros beneficios tales como la revalorización de materiales y técnicas de construcción tradicionales (Reiser et al., 2012).

### **1.3. Objetivo general**

Se tiene como objetivos principales la evaluación del confort térmico de una escuela tipo Sierra ubicada en el departamento de Cusco; asimismo, sobre la escuela base, se proporcionan mejoras bajo lineamientos bioclimáticos a fin de predecir un ambiente térmico más confortable. Finalmente, se busca desarrollar modelos térmicamente eficientes y sostenibles que prescindan de sistemas complejos de calefacción para atender las necesidades de confort en los estudiantes.

### **1.4. Objetivos específicos**

Para lograr los objetivos generales presentados se presentan los siguientes objetivos específicos:

- Revisar la literatura en referencia a temas de confort interno en edificaciones y estrategias bioclimáticas.
- Simular y evaluar el confort térmico en las aulas de una escuela tipo Sierra por medio del programa computacional “Design Builder”.
- Implementar estrategias bioclimáticas sobre modelo base ; posteriormente, simular y evaluar el confort térmico de la escuela bioclimática por medio del programa computacional “Design Builder”.
- Discutir los resultados obtenidos bajo estándares y normas nacionales e internacionales.

### **1.5. Hipótesis**

El diseño bioclimático en escuelas altoandinas genera un mejor confort térmico dentro de la edificación en comparación a otras diseñadas y construidas sin tomar en cuenta el factor climático. Asimismo, se verifica que desarrollar e implementar este tipo de diseños es una alternativa realista y beneficiosa para las comunidades involucradas en el caso. Finalmente, se plantea que incorporar el diseño bioclimático en la concepción de un proyecto de infraestructura educativa sea una respuesta sostenible a la carencia de centros educativos presente en nuestro país.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

### **2.1. Confort térmico de edificaciones**

Tanto la International Organization for Standardization (ISO 7730, 2005) y la American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE, 2010) definen al confort térmico como “la condición de la mente en la que se expresa satisfacción con respecto al ambiente térmico”. Por otro lado, Givoni (1998) la define como “la ausencia de irritación o malestar térmico” a fin de proponer una zona de confort. Asimismo, el investigador Hensen (1991) lo describe como “un estado en el cual no existen impulsos por corregir el ambiente mediante algún comportamiento”.

Por consiguiente, una condición mental o un estado expresado por un individuo resulta sumamente subjetivo. Por consiguiente, se ha comprobado que el estado de satisfacción creado en la mente es un proceso cognitivo que involucra variables físicas, fisiológicas, psicológicas entre otros (Lin Z ;Deng S, 2008). Dicho en términos sencillos, ninguna persona experimenta el confort de la misma forma aun cuando estos se encuentren bajo las mismas condiciones y cuenten con antecedentes y características fisiológicas similares.

A fin de simplificar el análisis, en líneas generales, se atribuye el disconfort como un tema subjetivo mientras que la sensación térmica se plantea como un problema objetivo (Hensen,1991). En consecuencia, se desarrollan estudios a fin de identificar las variables internas y externas que afectan la sensación térmica. En el año 1962, Macpherson presenta las variables climáticas del medio que afectan al confort térmico (Macpherson, 1962) : la temperatura del aire, la temperatura de radiación, la humedad relativa del aire, la velocidad del aire. Además, definió la actividad física de la persona y la resistencia y permeabilidad de la ropa como variables personales que afectan la sensación térmica.

A fin de establecer las relaciones que existen entre las variables climáticas y la sensación de confort humano se desarrollaron un mayor número de investigaciones que se centraban en modelos e índices, experimentos en cámaras climáticas, encuestas y observaciones del comportamiento. Dichas investigaciones se pueden sintetizar en dos enfoques : Racional y Adaptativo (Djongyang et al, 2010).

#### **2.1.1. Modelos de confort térmico**

##### **2.1.1.1. Modelo Racional**

Este enfoque se construye en base a los experimentos realizados bajo condiciones térmicas controladas que se iban modificando hasta generar una reacción en los participantes. El científico que llevo a cabo estos experimentos fue P.O.Fanger quien recogió las seis variables expuestas por McPherson a fin de construir un modelo que brindara una relación directa de las susodichas y la reacción térmica esperada por un individuo (Fanger, 1970).

En algunos experimentos, tras seleccionar ciertas condiciones térmicas se solicitó a los participantes registrar la sensación térmica a través de la escala de 7 puntos de la ASHRAE, la cual varía desde frío (-3) hasta muy caluroso (+3) ; estando en el medio: fresco(-2), ligeramente fresco(-1) , (0) neutro, (+1) ligeramente caluroso, (+2) caluroso (Fanger,1970).

En otros experimentos, los participantes pudieron controlar el ambiente térmico por sí mismo hasta obtener la temperatura que los hiciera sentir térmicamente neutros. Fanger (1970) combinó las teorías de balance térmico- intercambios de calor (conducción, convección y radiación) con la fisiología y termorregulación humana para determinar el rango de temperaturas en el que los usuarios de una edificación se sientan confortables. Del mismo modo, estudió los procesos fisiológicos cuando estos se encuentren cercanos a la temperatura neutra, previamente establecida por los ocupantes. Como resultado, determinó que los únicos procesos fisiológicos que influyen el equilibrio térmico son la tasa de sudoración y la temperatura media de la piel, los cuales están en función del nivel de actividad. Al utilizar la data de 183 estudiantes que participaron de un experimento que los expuso a diferentes condiciones térmicas mientras utilizaban ropa estandarizada, desarrolló una relación lineal entre el nivel de actividad y la tasa sudoración. Además, en un estudio con 20 participantes que utilizando ropa estandarizada y realizando diferentes niveles de actividad (sedentaria, baja, media y alta), ubicados en cámaras térmicas, determinó la relación lineal entre el nivel de actividad y la temperatura media de la piel. Al sustituir estas relaciones dentro de la ecuación de balance de calor se obtiene la primera ecuación de confort. Esta ecuación de confort predice las condiciones en las que los ocupantes se sentirán térmicamente neutros (Fanger, 1970).

Esta ecuación fue posteriormente ampliada al utilizar la información de 1296 participantes. La ecuación final describe al confort térmico como el “desequilibrio entre el flujo de calor real del cuerpo en un ambiente térmico dado y el flujo de calor requerido para un confort óptimo (es decir, neutral) para una actividad determinada”. La ecuación resultante relaciona las condiciones térmicas a la escala de sensación térmica presentada por la ASHRAE y se presenta como el “Voto medio estimado” (PMV, por sus siglas en inglés). Finalmente, se utilizó el PMV para estimar el índice de “Porcentaje estimado de insatisfechos” (PPD, por su siglas en inglés) (Fanger, 1988).

Los modelos de PMV-PPD establecidos por Fanger sentaron las bases para la concepción de la ISO 7730, también, significaron un avance significativo de las teorías del confort térmico y la evaluación de la calidad del ambiente térmico interior en edificaciones. No obstante es preciso reconocer las limitaciones de este estudio dado que las condiciones evaluadas son estáticas, con objeto de estudio de edad adulta, vestimenta y actividades controladas.

### 2.1.1.1.1. El voto medio estimado (PMV)

Como se ha explicado de forma general, el índice PMV presentado por Fanger, predice la respuesta media de un largo grupo de personas respecto a la sensación térmica de 7 niveles propuesta por la ASHRAE. Se plantea que el balance térmico se da cuando la producción de calor interna del cuerpo es igual a su pérdida hacia el ambiente. Esta condición se logra a través del desbalance entre el calor generado por el cuerpo humano en cualquier ambiente y el calor requerido para un óptimo confort durante una actividad específica (Lin Z; Deng S, 2008). Se sintetiza en la ecuación :

$$PMV = (0.303 \exp(-0.036M) + 0.028)L = \alpha L \dots (1)$$

Donde “M” es la tasa metabólica de calor humana, donde “L” es la carga térmica del cuerpo, definida como la diferencia entre el calor interno producido y el calor perdido hacia el ambiente para una persona que hipotéticamente mantiene el confort para valores de temperatura media de la piel ( $T_{sk}$ ) y evaporación por sudoración ( $E_{rsw}$ ) a cierto nivel de actividad, “ $\alpha$ ” es el coeficiente térmico.

El PMV se computa ante distintos escenarios de la temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad relativa del aire, humedad del aire, tasa metabólica y aislamiento de la ropa. Asimismo, se hace la anotación de que este índice se ha obtenido para condiciones estacionarias, sin embargo, se ha comprobado que puede aplicarse en presencia de pequeñas fluctuaciones de las variables (ISO 7730, 2005).

Finalmente, la estandarización del PMV permite verificar si un ambiente térmico en particular satisface los criterios de confort y brinda comodidad a los usuarios. Si se tiene como meta el obtener un  $PMV = 0$ , se da la relación que predice la combinatoria de actividad, vestimenta y parámetros ambientales que, en promedio, dará una sensación térmica neutra.

### 2.1.1.1.2. El porcentaje estimado de insatisfechos (PPD)

En un grupo numeroso de personas siempre existirán casos individuales que están dispersos respecto al nivel PMV y que posiblemente sientan disconfort debido a calor o frío (Fanger, 1982). Bajo esta premisa, se reconoce al porcentaje estimado de insatisfechos como “el porcentaje de personas que se sentirán insatisfechas por notar demasiado frío o calor”. En la escala de 7 niveles de la ASHRAE este nivel sería el que calificarán como muy caluroso, caluroso, fresco o frío (ISO 7730, 2005). Habiéndose calculado el valor del PMV, se calculará el PPD por medio de la expresión:

$$PPD = 100 - 95 \exp(-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)) \dots (2)$$

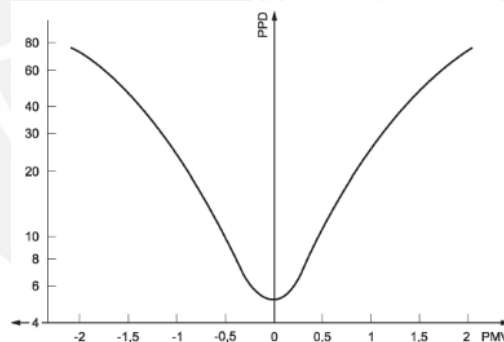


Figura 2.1: PPD en función del PMV  
Fuente: ISO 7730, 2005

Los puntos más importantes a destacar en la figura 2.1 son la simetría y el hecho de que no existe un valor de PMV para  $PPD = 0$ . Se muestra que para un valor de  $PMV = 0$ , se cuenta con aproximadamente un  $PPD = 5\%$ ; es decir, en todo grupo de personas, siempre existirá un grupo de personas que experimente disconfort con las temperaturas de un ambiente (Hwang et al, 2009).

### 2.1.1.2. Modelo Adaptativo

Nicol y Humphrey (1973) postularon que los usuarios dentro de un espacio respondían de forma activa al ambiente térmico y se adaptaban al mismo al modificar su comportamiento, esto les permitía considerar rangos de temperatura de confort que se encontraban fuera de los rangos de temperatura operativa predichos por el modelo de Fanger (Nicol JF, Humphreys MA; 1973).

Mientras que el enfoque racional se basa en resultados de laboratorio, el enfoque adaptativo se basa en estudios térmicos realizados in situ a fin de evaluar la aceptación térmica de los ocupantes (Djongyang et al, 2010). Dichos estudios contienen información de diferentes zonas climáticas y refuerzan la hipótesis de que en edificaciones con ventilación natural, la respuesta adaptativa de los ocupantes era superior a la presentada por edificios con aire acondicionado (Humphreys, 1975).

La propuesta adaptativa surge en un contexto en el cual se incrementa el consumo energético a fin de obtener las temperaturas operativas que establecen los rangos de confort presentado en la ISO7730. Su aplicación resulta importante al considerar la eficiencia de la envolvente y la mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub> por causa de edificaciones (Raish, 2003).

Dentro del desarrollo de los modelos adaptativos, posiblemente, la contribución más importante y aceptada es propuesta por De Dear y Brager (1995). Su investigación consistió en revisar y analizar la información de cientos de investigaciones del campo referente al confort térmico de ocupantes para el informe ASHRAE RP-884. Se logró procesar la información en una base de datos con aproximadamente 21'000 muestras de 160 edificios de oficinas situados en distintos escenarios climáticos para 4 continentes (ASHRAE- RP884, 1997).

La información contenida en los estudios incluye la meteorología del ambiente exterior, medidas del clima interior, cuestionarios térmicos, nivel de vestimenta y estimaciones metabólicas. Asimismo, se hizo una distinción entre edificios que operaban con sistemas de ventilación mecánicos y aquellos que solo contaban con ventanas para ventilación natural, esto debido al grado de operabilidad que permitía el control de los usuarios para abrir o cerrar las ventanas (ASHRAE- RP884, 1997).

Tras múltiples cruces de información relevante entre los parámetros previamente mencionados, se obtuvo la interrelación más significativa en la que se relacionó la temperatura media exterior con la temperatura operativa al interior de los ambientes estudiados. Véase figura 2.2:

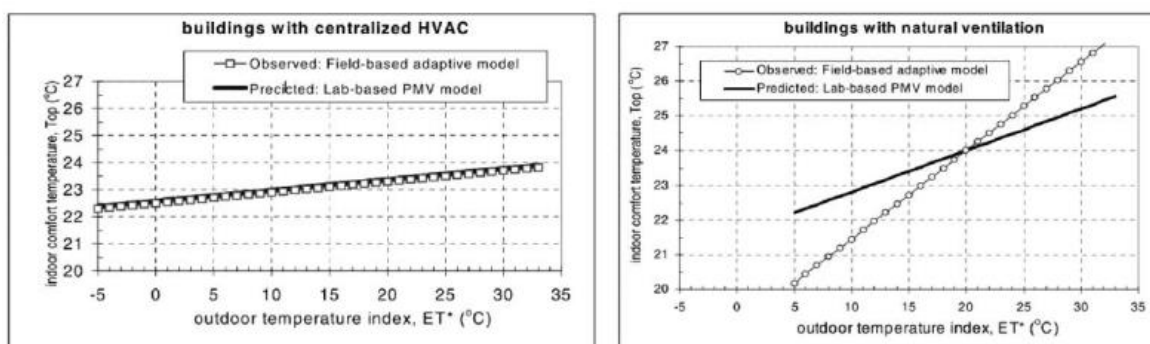


Figura 2.2: Regresión lineal de modelo racional y adaptativo.

A la izquierda, edificios con ventilación mecánica. A la derecha, edificio con ventilación natural.

Fuente: ASHRAE RP-884.

La figura 2.2 refleja la tendencia en la que conforme la temperatura media exterior aumenta, la temperatura de confort interior también aumenta, esto para ambos edificios con sistema de ventilación mecánica o natural. Asimismo, se aprecia la regresión lineal del modelo adaptativo y el modelo racional (PMV=0). Se observa que para edificios de ventilación mecánica existe una muy estrecha semejanza en los resultados a diferencia del caso de los edificios con ventilación natural.

La variación en la neutralidad se da parcialmente a la respuesta adaptativa del comportamiento de los ocupantes al modificar su vestimenta. No obstante, la parte más significativa de la desviación se da debido a un proceso de adaptación psicológico derivado del nivel de expectativa (ASHRAE- RP884,1997). En otras palabras, se afirma que la temperatura de confort está influenciada directamente por la expectativa térmica originada subconscientemente por los niveles de control percibidos.

El modelo adaptativo planteado en el reporte final de la RP884 es la base teórica del modelo adaptativo presentado por primera vez, en el estándar ASHRAE 55:2004 y posteriores actualizaciones. La expresión de la regresión lineal es :

$$T_{comf} = 0.31T_{out} + 17.8 \dots (3)$$

Donde “ $T_{conf}$ ” es la temperatura de neutralidad térmica o temperatura de confort, “ $T_{out}$ ” es la temperatura media exterior.

A fin de obtener los rangos para la temperatura neutra, De Dear (1997) aceptó la relación entre PMV y PPD establecidos por Fanger para obtener niveles de aceptabilidad de 80 % y 90% para la temperatura neutral resultado de la ecuación. A raíz del desarrollo del enfoque adaptativo, varios autores han propuesto sus propios modelos con la misma expresión lineal :

$$T_c = a \cdot T_o + b \dots (4)$$

Donde “ $T_c$ ” es la temperatura operativa de confort interior , “ $T_o$ ” es la temperatura media exterior, “ $a$ ” es la pendiente proporcional al grado de adaptación a las condiciones climáticas regionales y “ $b$ ” es la intersección en el eje “ $y$ ”. Tanto “ $a$ ” como “ $b$ ” son determinados de forma estadística en base a los resultados obtenidos en campo y pueden ser influenciados de un modelo a otro por factores culturales, condiciones climáticas y otros factores contextuales. Múltiples autores presentaron sus propuestas de modelos adaptativos en base a lo comprobado, véase Apéndice A , tabla 7.1.

El enfoque adaptativo tiene un alcance mucho más amplio que el presentado por De Dear. Los estudios realizados en campo permiten estudiar a los ocupantes en sus hábitats cotidianos, con su vestimenta diaria y comportamiento sin ningún tipo de restricción. Habiendo una gran cantidad de literatura con respecto al enfoque adaptativo desde 1998 , estos pueden sintetizarse en : Modelos de confort térmico, estudios comparativos entre espacios modernos y tradicionales, métodos de evaluación de desempeño, sistemas de consumo energético eficientes, estudios comparativo respecto al sexo, efectos de clima interior en percepciones térmicas, confort térmico en aulas, algoritmos adaptativos , confort térmico de pacientes en hospitales, confort térmico en ambientes exteriores , entre otros (Djongyang et al, 2010).

Tanto el modelo adaptativo como el modelo racional presentan sus potencias y limitaciones. Existen científicos que apoyan el modelo de Fanger y otros que complementan y comprueban la hipótesis de De Dear. Ambas teorías forman parte de estándares internacionales y han sido tomados como referencias para la predicción y evaluación del confort térmico en edificaciones.

## **2.1.2. Marco normativo del confort térmico**

### **2.1.2.1. Estándares internacionales**

#### **2.1.2.1.1. ISO 7730:2005**

La Norma Internacional ISO7730 se actualizó en el año 2005 , revisada y aprobada por medio del “Comité Técnico ISO/TC, Ergonomía, Subcomité SC5, Ergonomía del ambiente físico”. La norma se basa en el modelo racional de Fanger que predice condiciones de bienestar para los usuarios en situaciones sedentarias. Tal cual se menciona en el alcance “esta norma internacional presenta métodos para la predicción de la sensación térmica general y del grado de incomodidad (insatisfacción térmica) de las personas expuestas a ambientes térmicos moderados. Facilita la determinación analítica y la interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD u de los criterios del bienestar térmico local, indicando las condiciones ambientes que se consideran aceptables para el bienestar térmico general, así como aquellas que dan lugar a incomodidad local”

La tercera edición del año 2005 añade un anexo que sintetiza los requisitos de bienestar térmico. En el subcapítulo “A.1” se establecen 3 categorías para el ambiente térmico deseado, cada categoría cuenta con un porcentaje máximo de insatisfechos. Según se menciona (ISO 7730,2005), los distintos porcentajes manifiestan un compromiso de que sean mínimos los insatisfechos. No obstante, se ha comprobado que satisfacer los requisitos de la categoría A puede resultar difícil en la práctica, véase Apéndice A, tabla 7.2.

Para cualquier ambiente, hay una temperatura operativa óptima que corresponde a  $PMV = 0$ , la misma que tiene una relación directa entre la actividad y vestimenta de los usuarios. Las 3 categorías presentan distintos rangos permitidos para una misma temperatura operativa. La norma recomienda que las variaciones de temperatura se encuentren siempre dentro del rango.

En el subcapítulo “A.4” se sintetizan los requisitos del confort para espacios según el tipo de edificios. Las temperaturas operativas responden a la teoría de que el nivel de actividad es típico en cada espacio y que la vestimenta es de 0,5 clo y 1,0 clo durante verano e invierno respectivamente, véase Apéndice A, tabla 7.3.

El presente trabajo plantea el análisis del confort para un edificio educativo por lo que se tiene como principal espacio de estudio a las aulas. Teniendo en cuenta las consideraciones presentadas en la norma, se ubica a las aulas dentro de la categoría B. Es decir , la temperatura operativa óptima para verano e invierno son de 24,5 °C y 22 °C con rangos de  $\pm 1,5$  y  $\pm 2,0$  respectivamente.

### 2.1.2.1.2. ASHRAE 55:2017

En los orígenes del confort térmico, tanto la norma ISO 7730 como el ASHRAE 55 basaban sus requisitos de bienestar térmico en el modelo racional de Fanger. Conforme las teorías iban ampliando su alcance, los estándares internacionales se iban actualizando y revisando a fin de complementar su contenido. En la actualidad, la última versión del ASHRAE 55 publicada en el año 2017 mientras que la ISO 7730 fue actualizada por última vez en el año 2005. No obstante, la actualización del año 2004 incorpora un modelo de confort adaptativo que identifica requisitos de bienestar específicos a edificaciones que cuentan con ventilación natural; es decir, edificaciones en que los usuarios pueden adaptarse al contexto térmico de un determinado espacio.

El objetivo principal de la norma es detallar las combinaciones de factores térmicos ambientales interiores y factores personales que producen circunstancias térmicas aceptables para la mayoría de usuarios dentro del ambiente. Sin embargo, es preciso mencionar que la norma cuenta con un enfoque racional y complementariamente incluye el enfoque adaptativo. Una de las limitaciones que presenta el utilizar el enfoque racional del confort es el hecho de que la mayoría de experimentos fue realizado a través de usuarios en actividades sedentarias o casi estáticas. No obstante, esta circunstancia encaja perfectamente en la situación de un grupo de estudiantes con un esquema de enseñanza tradicional.

En el subcapítulo 5.2 se define la zona de confort en términos de un rango de temperatura operativa que provee circunstancias de aceptabilidad térmica para valores dados de humedad, velocidad del aire, ratio metabólico y aislamiento de ropa. Siguiendo un modelo racional, el método gráfico para “ambientes interiores típicos” presenta la zona de confort de ocupantes cuyas actividades varían entre 1.0 met a 1.3 met y cuya vestimenta establezca un aislamiento de 0.5 clo y 1.0 clo durante verano e invierno respectivamente. Asimismo, el gráfico corresponde a un rango de PMV de  $\pm 0.5$ , ergo, un PPD  $< 10\%$ . En adición a estos criterios, el gráfico identifica la zona de confort en ambientes en donde la velocidad del aire no supera los 0.20 m/s. A fin de hacer una comparación respecto a los rangos de temperatura operativa presentados en la ISO 7730, se define la humedad relativa en 50%. Para las condiciones explicadas, se presenta tabla 2.1 :

Tabla 2.1:  
Recomendaciones del ASHRAE estándar

	<b>Temperatura operativa</b>	<b>Rango aceptable</b>
Invierno	22 °C	20-23 °C
Verano	24.5 °C	23-26°C

Fuente: Adaptado de la ASHRAE Standard 55 (2017)

Siguiendo un modelo adaptativo complementario, experimentos en campo han demostrado que en ambientes naturalmente ventilados, en aquellos donde los ocupantes tienen el control de ventanas, la subjetiva noción del confort es distinta debido al cambio de experiencias térmicas, operabilidad térmica, adaptación y cambio en la expectativa general del ambiente térmico (De Dear et al, 1998). Las condiciones de bienestar térmico para este específico caso se detallan en el subcapítulo 5.3. Para que un ambiente pueda ser evaluado utilizando los requisitos presentados, las condiciones térmicas deben ser reguladas primariamente a través del control sobre las ventanas. Asimismo, los usuarios deben estar en condiciones sedentarias y contar con la posibilidad de adaptar su vestimenta según el clima interior y exterior. La zona de confort térmica se muestra en la figura 2.3:



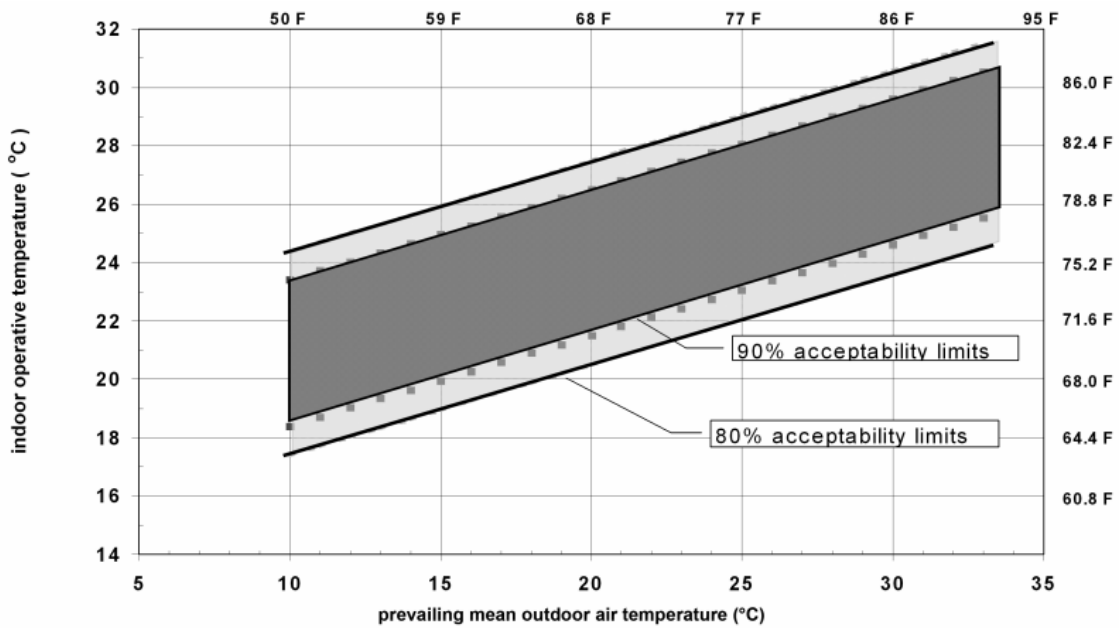


Figura 2.3: Rango aceptable de temperaturas operativas para edificios con ventilación natural.  
Fuente: ASHRAE 55,2017.

Este gráfico incluye dos rangos de temperatura operativa que corresponden a índices de aceptabilidad del 80 y 90%. Tal cual se observa en el gráfico, existe una relación lineal entre la temperatura operativa interior y la temperatura promedio exterior. Para calcular los rangos térmicos de la zona de confort para ambientes ventilados naturalmente se resumen las ecuaciones en la tabla 2.2:

Tabla 2.2:  
Límites de zona de confort para edificios naturalmente ventilados

	Límite superior (°C)	Límite inferior (°C)
Aceptable en 80%	$0.31T_m+21.3$	$0.31T_m+14.3$
Aceptable en 90%	$0.31T_m+20.3$	$0.31T_m+15.3$

Fuente: Adaptado de la ASHRAE Standard 55 (2017)

## **2.1.2.2. Estándar nacional**

### **2.1.2.2.1. EM .110**

En el Perú también se ha reconocido la problemática de confort térmico y los beneficios económicos, ambientales, sociales y en salud que se obtienen cuando la temperatura operativa se encuentra dentro de la zona de confort. Por ello, el “Código Técnico de Construcción Sostenible” incorpora a la norma EM.110 “Confort Térmico y Lumínico con Eficiencia Energética” como criterio para diseñar y construir edificaciones sostenibles. Según lo revisado, esta norma presenta dos objetivos: establecer zonas bioclimáticas para la construcción en el territorio peruano y establecer lineamientos técnicos de diseño para el confort térmico y lumínico por cada zona bioclimática.

A diferencia de las normas internacionales en las que se define el marco teórico de modelo térmico racional o adaptativo, la norma peruana no hace una síntesis de las teorías que son la base de sus lineamientos. Respecto a los requisitos térmicos de ambientes interiores para garantizar el confort, se indican temperaturas internas por cada tipo de ambientes, 20 °C para aulas, véase Apéndice A, tabla 7.4. También, se indican valores máximos de transmitancia térmica (U) que resultan sencillos de satisfacer para las diferentes zonas bioclimáticas, valores que resultan sencillos de cumplir en climas menos rigurosos.

Sin embargo, para las temperaturas internas señaladas, no se define humedad relativa, el tipo de actividad, el tipo de vestimenta o si se analiza un modelo racional o adaptativo. No obstante, esta es la primera norma que se publica para territorio peruano y está sujeta a revisiones y mejoras. Por consiguiente, es positivo resaltar el hecho de que la búsqueda del confort se da a través de edificaciones bioclimáticas.

## **2.2. Diseño bioclimático**

El diseño arquitectónico y los aspectos constructivos de una edificación influyen directamente en las condiciones de confort interno. Son características tales como el diseño, dimensiones en planta y altura, ratio de ventanas, tiempos de exposición solar y propiedades térmicas de los materiales los que determinan las temperaturas de radiación de pisos y muros y la temperatura del aire interior (Zomodorian et al, 2016)

Por ello, uno de los objetivos más importantes de la arquitectura es brindar seguridad y maximizar el confort a los usuarios. Sin embargo, en la actualidad, es indispensable la preservación de los recursos naturales como requisito previo para cumplir con este importante objetivo (Wieser, 2008). En consecuencia, el diseño bioclimático se presenta como una alternativa que permite diseñar con miras a la salud y la comodidad en armonía con el entorno y la naturaleza.

El diseño bioclimático se basa en principios que buscan implementar técnicas amigables con el medio ambiente a fin de minimizar el impacto ambiental y hacer uso de recursos renovables disponibles en el sitio. Se tienen en cuenta las condiciones climáticas, rindiendo los recursos disponibles (sol, vegetación, lluvia, vientos) para disminuir los impactos ambientales, intentando reducir los consumos de energía por medio de un diseño eficiente de la envolvente del edificio (Reynolds,2015).

### **2.2.1. Cartas bioclimáticas**

Una de las herramientas del diseño bioclimático son los diagramas bioclimáticos. Estos están basados en principios de la psicrometría; la cual se define como “una rama de la ciencia dedicada al estudio de las propiedades termodinámicas del aire húmedo y al efecto de la humedad atmosférica en los materiales y en el confort humano” (Raish, 2003).

Los gráficos bioclimáticos analizan de forma sencilla las características de un emplazamiento desde la perspectiva del confort humano dado que cuentan con la relación concurrente entre la temperatura y la humedad. Asimismo, en ellos se presentan estrategias para alcanzar la zona de confort sin requerir de algún tipo de ventilación mecánica (Sala et al, 1999). Finalmente, se acota que el uso de estos diagramas resulta una herramienta sencilla, no obstante, las estrategias utilizadas responden a la particularidad de cada emplazamiento.

#### **2.2.1.1. Diagrama de Olgyay**

Uno de los primeros esfuerzos en la revalorización de la arquitectura vernácula y la concepción del bioclimatismo se da por medio de Viktor Olgyay. En 1950 desarrollo un gráfico bioclimático que incorporaba las condiciones climáticas externas en el diseño arquitectónico. El gráfico denota la zona de confort humana en relación a la temperatura y humedad, temperatura radiante media, velocidad del aire, radiación solar y tasa de evaporación. En el Apéndice B, Figura 7.1, la ordenada corresponde a la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa a las abscisas. La zona de confort se ubica en el centro del gráfico con rangos especificados para las temporadas de verano e invierno. El límite inferior de la zona es también el límite por sobre el cual se requerirá de sombras. Las temperaturas sobre el límite superior del confort presentan el flujo de ventilación necesario para restaurar el confort en relación a la humedad relativa del emplazamiento. En climas que son cálidos y secos, se indica el enfriamiento por evaporación. Finalmente, se indican variaciones en la posición de confort con la temperatura radiante media (Olgyay, 1950).

Este gráfico se utiliza aun frecuentemente; sin embargo, presenta algunas limitaciones significativas que hacen que su grado de precisión en las recomendaciones sean limitadas. Por ejemplo, el gráfico no toma en cuenta el factor fisiológico ;es decir, el nivel de actividad de los individuos. Asimismo, se ha identificado que el gráfico subestima el factor de la inercia térmica de los materiales que componen la edificación (Wieser, 2011).

#### **2.2.1.2. Diagrama de Givoni**

El segundo diagrama bioclimático fue el publicado por Givoni en 1970. Este diagrama se basa en un ábaco psicrométrico convencional; sobre el diagrama, el autor propone las estrategias bioclimáticas correctivas respecto a las combinaciones de temperatura y humedad relativa que presenta cada emplazamiento. El gráfico de Givoni considera los límites de la zona de confort para edificios con ausencia de aire acondicionado, en su mayoría residenciales (Givoni,1998). En estudios posteriores (1998) el autor asume que los límites superiores de temperatura y humedad relativa pueden extenderse en las regiones cálidas de países en “vías de desarrollo”; también, presenta estrategias adicionales para para alcanzar la zona del confort interno; por ejemplo: la ventilación nocturna, véase Apéndice B, Figura 7.2.

### 2.2.1.3. Diagrama de Szokolay

Tras que Givoni publicará su diagrama en el año 1970, en 1978 Humphrey presentó su modelo adaptativo relacionando la temperatura interior con la temperatura media exterior. Posteriormente, Auliciemes publicó sus ecuaciones de neutralidad térmica en 1982. En 1986, Szokolay fusionó las investigaciones bioclimáticas con el modelo adaptativo y desarrolló el concepto de que existen dos zonas de confort que dependen principalmente de las características del emplazamiento y de las personas del lugar (Szokolay,1986). Las zonas del confort están basadas en las ecuaciones de neutralidad térmica correlacionadas con la temperatura media exterior , revítese el Apéndice B, Figura 7.3 :

$$T_n = 17.6 + 0.31T_m \dots (5)$$

Donde  $T_n$  es la temperatura de neutralidad térmica y  $T_m$  es la temperatura media exterior. La ecuación presentada solo es válida bajo las siguientes condiciones (Sala et al, 1999):

- $18.5 < T_n < 28.5$
- El ancho de la zona de confort es 2K al 50% de humedad relativa.
- Los límites de la humedad están basados en el ASHRAE 5581 , el cual establece que los límites inferior y superior son de 4 – 12 g kg<sup>-1</sup> contenido de humedad.
- La humedad relativa no debe exceder el 90%.

Se han presentado los distintos diagramas bioclimáticos desarrollados a lo largo de la historia. De los mismos, se reconocen las semejanzas y también las particularidades respecto a las estrategias presentadas y los límites sugeridos. No obstante, resulta evidente que el uso de diagramas bioclimático facilita comprender las características bioclimáticas, recomendar estrategias de diseño y predecir el confort térmico (Wieser,2011).

## 2.2.2. Estrategias generales del diseño bioclimático

De los gráficos bioclimáticos explicados, aquel que se ha consolidado como herramienta más utilizada para efectos de diseño es el propuesto por Givoni (1970). En la figura 2.4, el eje "X" es la temperatura seca exterior y el eje "Y" es la humedad absoluta del aire fresco exterior; además, las curvas psicométricas en el gráfico representan las humedades relativas. Se definen 14 zonas basadas en condiciones climáticas locales. Para cada zona se presenta una estrategia diferente para alcanzar el confort y estrategias pasivas para aminorar el consumo energético de ser necesario (Manzano et al, 2015).

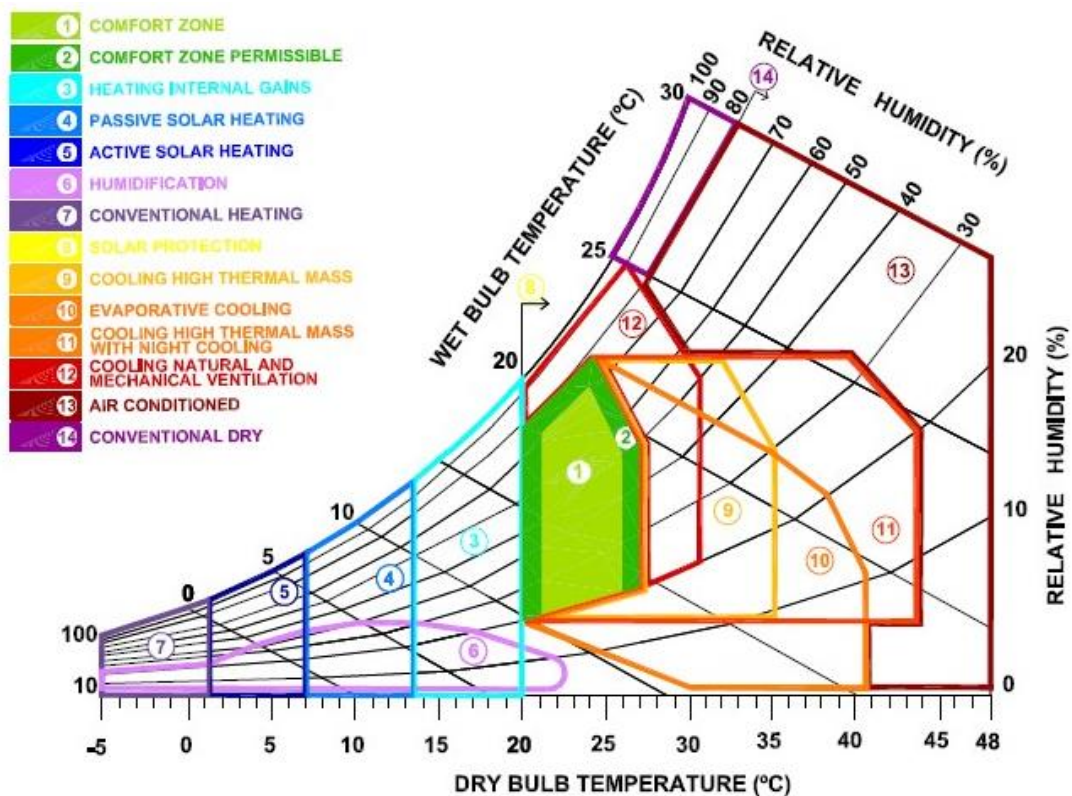


Figura 2.4: Diagrama bioclimático de Givoni.  
Fuente: Extraído de (Manzano et al, 2015).

A continuación, se detallan las estrategias que aplican a emplazamientos cuyas características climáticas corresponden a las 14 zonas delimitadas en la figura 2.4, estas estrategias deben ser vistas como sugerencias dado que cada emplazamiento consta de singularidades (Manzano et al, 2015).

### a) Zona Confort de y zona de confort permisibles

La zona de confort etiquetada como la zona 1 es estadísticamente una zona en el que el 70% de la población de siente confortable. Representa el área en el que el cuerpo humano con ropa ligera y poca actividad no necesita de ningún gasto energético para permanecer confortable. El rango de temperatura es desde 21 a 26 °C y la humedad relativa varía de 20% y 70%, esta zona no requiere se estrategias. La zona de confort permisible es una zona aceptada por el 80% de la población, la temperatura y la humedad resultan aceptables en base al sexo, metabolismo interno, talla y actividades adaptativas. El rango

de temperatura es desde 20 a 27 °C y la humedad relativa varía de 20% y 80%, esta zona no requiere se estrategias.

b) Ganancias de calor internas

Esta zona está comprendida por temperaturas externas entre 13.5°C a 20 °C. Las ganancias de calor interna se dan por medio de los usuarios que ocupan el mismo espacio, iluminación artificial, algún tipo de máquina que genera calor y cualquier proceso que pueda generar calor. Las ganancias de calor se dan por los diferenciales de temperatura y son descritos como cargas sensibles. A mayor ganancia de calor interna que varíe la temperatura, más la moverán hacia la zona de confort.

c) Calentamiento solar pasivo

Para moverse hacia la zona de confort es necesario desarrollar una estrategia de absorción que permita las ganancias energéticas en el espacio. Se tiene como intención el incrementar la temperatura de 7 °C a más de 13.5 °C. Para lograrlo, el objetivo fundamental es que el diseño del edificio favorezca la acumulación de radiación solar y que distribuya esta energía en otras dependencias o que regrese al edificio conforme pasa el tiempo. La distribución de energía puede ser directa por radiación o convección e indirecta a través del aire que circula en el espacio. Se cuenta con diversas soluciones dado que el que la energía puede ser capturada por cualquier parte de la envolvente del edificio incluyendo el piso, muros, techo o aberturas especiales.

d) Calentamiento solar activo

El objetivo es similar al del calentamiento pasivo, sin embargo, en el caso del solar activo un fluido es calentado y luego este calienta el interior de la casa. Ocasionalmente, se requiere de un consumo mínimo de energía para distribuir el calor a lo largo de la edificación. Las medidas pasivas en este caso no llegan al confort deseado pero reducen el consumo energético dado que las condiciones exteriores corresponden a temperaturas en el rango de 1 °C a 7 °C.

e) Humidificación

Falta de humedad conlleva a enfermedades respiratorias además de otro tipo de enfermedades como la dermatitis. El objetivo de esta estrategia es el conseguir el confort por medio del incremento en la humedad relativa. Esto se alcanza al incorporar aire que ha pasado por una superficie de agua. El aire puede ser movido por diferencias en las presiones o por equipos mecánicos. Es común el utilizar extractores eólicos, incorporar vegetación o fuentes para alcanzar conseguirlo.

f) Calentamiento convencional

Para climas de frío extremo, temperaturas exteriores de -5 °C a 1 °C, cuando los diseños pasivos resultan insuficientes para llegar a la zona de confort, es necesaria la utilización de equipo que consume energía eléctrica por medio de combustibles fósiles para incrementar la temperatura hasta un 20 °C; en invierno, esta temperatura supone un nivel de confort interno adecuado.

g) Protección solar

Esta área corresponde a valores de temperatura exterior mayores a los 20 °C. Se busca evitar las ganancias de calor y evitar los incrementos de temperatura para permanecer en la zona de confort. Se busca proteger a la edificación por medio de árboles o por elementos arquitectónicos como las pérgolas con vegetación.

h) Enfriamiento con masa térmica

Esta zona está delimitada por temperaturas de 20°C a 35°C y una línea que se extiende desde la intersección de 24°C y 80-50% de humedad relativa hasta la intersección de 35°C y 30% de humedad relativa. Esta estrategia compromete a la masa térmica de la envolvente del edificio que recibe el calor y lo transmite por irradiación al interior de la edificación con una diferencia de fases que permite alcanzar uniformidad de clima durante el día y disipar el calor mediante la noche.

i) Enfriamiento por evaporación

Esa zona está delimitada por temperaturas de 20°C y 40.5°C y una línea que se extiende desde la intersección de 25.5°C y 75% de humedad relativa a la intersección de 38.5°C y 20% de humedad relativa hasta una intersección de 40.5 °C y 10% de humedad relativa. Esta estrategia es recomendada en climas secos y áridos. Aspira alcanzar el confort al reducir la temperatura por medio de evaporación mientras que aumenta la humedad relativa. Se alcanza al incorporar vegetación al exterior, patios complementados por la presencia de agua y vegetación, rocío con agua en superficies de paredes y techos.

j) Enfriamiento con masa térmica y ventilación nocturna

Esta zona está delimitada por temperaturas entre 20 °C y 44 °C y un punto que pasa desde una intersección a 44 °C y 5% humedad relativa a través de otra intersección a 31.5 °C y 32% humedad relativa hasta una intersección final a 24 °C y 80% humedad relativa. El diseño de la envolvente debería contar con materiales que absorban y retengan el calor durante el día y lo liberen en la noche. Usualmente estos materiales tienen un desfase de 12 horas en lo que respecta a absorción y liberación.

k) Ventilación natural y mecánica

Esta zona está delimitada por temperaturas exteriores entre 20°C y 31.5°C, humedades relativas entre 95% a 20% y una línea que se extiende entre la intersección de 31.5°C y 50% de humedad relativa hasta la intersección de 26.5 °C y 95 % de humedad relativa. Se utilizan principios de ventilación cruzada del norte a sur entre las fachadas o dirección de vientos dominantes y se complementan con sistemas mecánicos. En esta estrategia se obtienen mejores niveles de confort térmico mientras el ambiente interior se limpia en simultáneo.

l) Aire acondicionado

Se alcanza el confort al instalar sistemas de aire acondicionado para reducir la temperatura y la humedad relativa. Se recomienda no utilizarlo en exceso y apagarse luego de haber alcanzado la temperatura de confort. Buenas prácticas de ahorro energético implican el uso de un termostato que indique cuando se ha alcanzado la temperatura de confort y así apagar el equipo oportunamente. La última zona está delimitada por temperaturas mayores a 25°C y humedades relativas por encima del 80%. Corresponde a un sistema integrado de aire acondicionado y sus recomendaciones. Dado que no se utilizará estos sistemas, no se ahondará en sus objetivos o recomendaciones.

### 2.2.3. Estrategias específicas del diseño bioclimático

En este caso en particular se discutirán las estrategias que podrían adoptarse para una escuela ubicada en la ciudad de Cusco. En primer lugar, se cuenta con el aporte de la arquitecta Jiménez quien propone una serie de medidas a adoptar para centros educativos y bibliotecas (Jiménez, 1984), estas medidas se sintetizan en la tabla 2.3:

Tabla 2.3:  
Recomendaciones de diseño bioclimático en la ciudad de Cusco para centros educativos

<b>Ubicación</b>	Terrenos planos de poca pendiente	
<b>Orientación exterior</b>	Edificaciones con eje N-S	
<b>Forma y volumen</b>	Agrupación compacta de unidades	
<b>Organización interior en planta</b>	Agrupación cerrada	
<b>Techos</b>	Pendiente mayor a 30% - Material de media inercia térmica	
<b>Muros</b>	Material no reflejante de media inercia térmica	
<b>Pisos</b>	Material absorbente térmico y acústico	
<b>Ventilación</b>	Cambios de aire necesarios en horas de clase: 2 a 3 veces/h	
<b>Iluminación</b>	Aulas: 500 luxes	
<b>Acústica</b>	Nivel máximo de ruido admisible 40-45 decibeles	
<b>Color</b>	Techos	:Tonos medios
	Muros	:Tonos oscuros
	Pisos	:Tonos claros a medio

Fuente: Adaptado de Jiménez, C (1984). *Diseño bioclimático en la ciudad de Cusco*. Universidad Ricardo Palma.

En segundo lugar, se cuenta con la propuesta del Ministerio de Educación en su “Guía de aplicación de arquitectura bioclimática en locales educativos”. En la guía mencionada se cuenta con una serie de medidas a adoptar para la región Mesoandino, en la cual se ubica la ciudad de Cusco (MINEDU, 2008). A fin de rescatar los principales aportes, se presenta la tabla 2.4:

Tabla 2.4:  
Recomendaciones específicas de diseño bioclimático para la región Mesoandino

<b>Partido Arquitectónico</b>	Cerrada y compacta, parte baja del terreno	
<b>Materiales y Masa térmica</b>	Masa térmica alta	
<b>Orientación</b>	Eje del edificio N-S / Aprovechamiento de radiación	
<b>Techos</b>	Pendientes de 40 a 70 %	
<b>Ventilación</b>	Protección del viento	
<b>Vegetación</b>	Árboles de hoja caduca: Permite pasar radiación en invierno	
	Árboles de hoja frondosa: Para protección de vientos	
	Uso de tonalidades mate	
<b>Colores y reflejancias</b>	Pisos	Semi oscuros (<20%)
	Paredes	Neutros (50-60%)
	Cielorraso	Blanco (70%)

Fuente: Adaptado de Oficina de infraestructura educativa (2008). *Guía de aplicación de arquitectura bioclimática en locales educativos*, Ministerio de Educación, Lima, Perú



En tercer lugar, se cuenta con el aporte del arquitecto Martin Wieser publicado en su libro “Consideraciones bioclimáticas en el diseño arquitectónico: El caso peruano”. En el mismo, se cuenta con una serie de medidas a adoptar para la región Continental frío, en la cual se ubica la ciudad de Cusco (Wieser, 2011). Las consideraciones se sintetizan por medio de la tabla 2.5:

Tabla 2.5:  
Recomendaciones generales de diseño bioclimáticos para la región Continental frío

Captación Solar	1
Ganancias internas	2
Protección de vientos	2
Inercia térmica	2
Ventilación diurna	-1
Ventilación nocturna	-1
Refrigeración evaporativa	0
Control de radiación	1
Imprescindible	2
Recomendable	1
Indistinto	0
No recomendable	-1
Peligroso	-2

Fuente: Adaptado de Wieser M (2009). Consideraciones bioclimáticas en el diseño arquitectónico: El caso peruano. PUCP, Lima, Perú.

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Propuesta metodológica**

Esta investigación presenta la evaluación del confort interno dentro de una escuela semirrural tipo sierra. Posteriormente, se modifica la escuela original incluyendo estrategias bioclimáticas a fin de obtener mejores niveles de confort. En los últimos años se ha tomado conciencia con respecto a la necesidad de diseñar edificios cada vez más cómodos, confortables y seguros para el usuario. A continuación, se presenta a detalle la metodología seguida:

En primer lugar se realizará la recolección de datos. Es necesario identificar los datos de entrada que utilizará el software para realizar el balance térmico. Se sabe que las variables climáticas tienen un rol importante en la temperatura interna dentro de la edificación. Por ello, se debe conocer las características del emplazamiento: latitud, longitud, elevación, temperatura anual promedio, máxima temperatura diaria promedio, mínima temperatura diaria promedio, ratio de humedad promedio, radiación solar en meses de verano e invierno, transmitancia térmica de los materiales de construcción.

En segundo lugar se elegirá el escenario climático. Para la elección del escenario bioclimático se requiere satisfacer con la información enlistada previamente; además, se toma particular interés en aquellos climas que cuenten con un potencial de aprovechamiento en energías renovables dado que estos conducen a la sostenibilidad de la edificación. La elección final de los escenarios será una intersección entre las características mencionadas previamente.

En tercer lugar se definirá la arquitectura básica de las escuelas. Es necesario establecer una arquitectura preliminar para el modelo de escuela a evaluar. Sin embargo, no es necesario que la misma sea sumamente compleja mas sí que refleje el uso de cada espacio, dimensiones y ubicación de vanos y ambientes, materiales utilizados. La arquitectura del modelo, de preferencia, se modelará según una escuela existente. Sobre este modelo predefinido, se realizarán modificaciones siguiendo las estrategias bioclimáticas para el emplazamiento.

En cuarto lugar se simulará la temperatura interior y se analizará el confort interno. El programa computacional a utilizar para la simulación térmica es "Design Builder". Este software cuenta con un complemento adicional "Energy Plus" para poder contar con la información climática relevante. Entre las ventajas que presenta este software es la realización del modelo en la plataforma 3D. De esta manera, se crea la geometría del modelo a utilizar, la misma que puede ser editada fácilmente. Asimismo, se establece la ubicación geográfica del emplazamiento, lo cual incluye la información climática del lugar.

Además, se puede añadir las propiedades térmicas de los materiales tales como los valores de transmitancia térmica (U) para las superficies. En caso no tener los valores U exactos, estos pueden ser estimados o asumidos por el software. Para finalizar la creación del modelo es necesario establecer su orientación y ubicación. Una vez definidas las propiedades térmicas de las superficies de los materiales así como de elementos tales como ventanas, se realiza la simulación donde se calculan resultados cuantitativos de temperaturas internas y parámetros del confort interno.

Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos. Se obtienen los resultados de temperatura operativa, ganancia interna en elementos constructivos, confort en la semana de diseño de invierno (semana más fría según data histórica) al finalizar el balance. En base a estos resultados, se analiza según normativa internacional el confort alcanzado para el modelo práctico y el modelo bioclimático.

A modo de resumen, se presenta la figura 3.1:

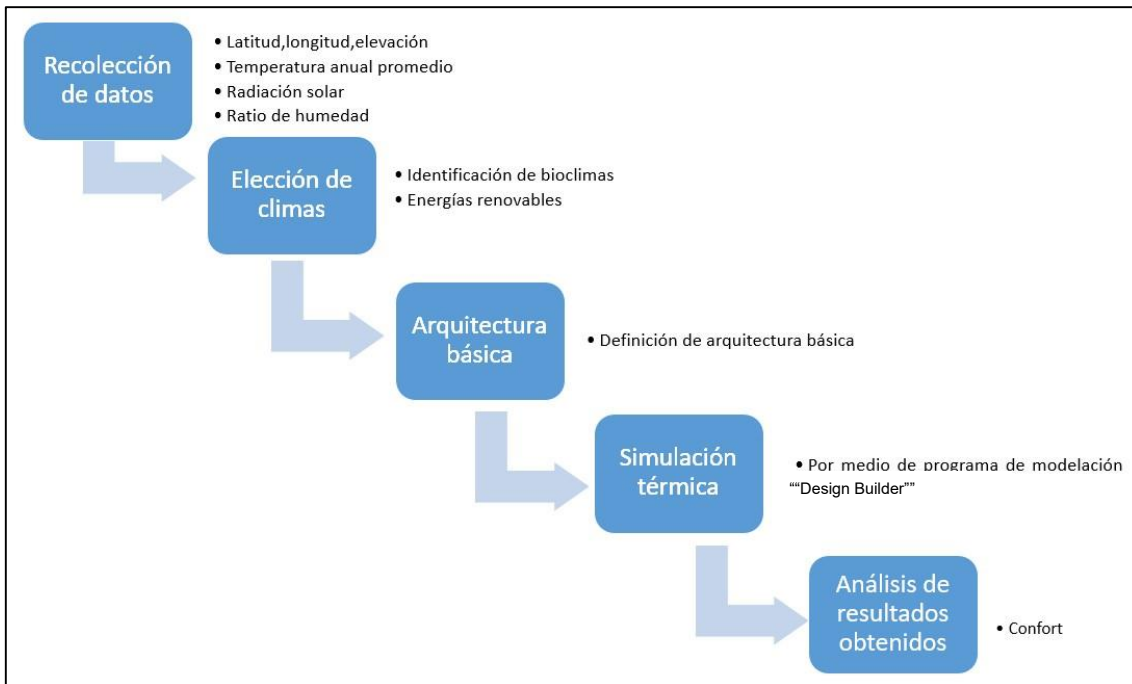


Figura 3.1: Flujo de trabajo – Metodología  
Fuente propia

## 3.2 Estudio de caso

Se delimita y caracteriza geográfica y climáticamente la ciudad de Cuzco. A continuación, se presenta información obtenida de múltiples fuentes entre las que destacan principalmente la investigación de la Arq. Jiménez (Jiménez, 1984), el libro escrito por el Arq. Wieser (Wieser, 2011) y el "Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú" (SENAMHI, 2017).

### 3.2.1. Delimitación y caracterización de la ciudad de Cusco

El departamento de Cusco se encuentra ubicado en la parte Sur- Este del Perú, a 13° 30' 45" de latitud sur y 71° 58' 33" de longitud oeste. Su territorio comprende la región andina en su mayoría y parte en la región selva. Por el norte, colinda con los departamentos de Junín y Ucayali; por el sur, con los departamentos de Arequipa y Puno; por el este con el departamento de Madre de Dios y por el oeste con los departamentos de Apurímac y Ayacucho, consta de 13 provincias. Asimismo, es uno de los departamentos más grandes del Perú con 72.104 Km<sup>2</sup>. Además, tiene una población de 1 171.403 habitantes (Censo 2007) y una densidad poblacional de 16,3 hab. /km<sup>2</sup>.

En cuanto a su morfología, son tres las cordilleras que definen el territorio cusqueño: la de Vilcabamba, situada al noreste del departamento, la de Vilcanota y la de Paucartambo. Respecto a la hidrografía, las cordilleras son atravesadas por el río Vilcanota; paralelamente, por el oriente, corre el río Paucartambo; y por el occidente, los ríos Apurímac y el Ene. Otros ríos importantes que recorren hacia el oriente son el de Madre de Dios e Inambari.

Además, su clima es frío y seco de mayo a diciembre y lluvioso en los meses de enero hasta abril. La temperatura media en la capital es de 12 °C siendo la máxima de 18 °C y la mínima alrededor de 4 °C más o menos.

### 3.2.2. Delimitación y caracterización de zonas bioclimáticas en el Perú

**Thornthwite:** Considera la vegetación nativa como expresión del clima, basando su clasificación en temperaturas medias anuales y mensuales, precipitaciones en cuanto a su cantidad y a estaciones en las que suceden. Sin embargo, esta clasificación es más apropiada para fines agrícolas. Actualmente es de uso más extendido, determinando que el Perú posee 28 de los 32 climas del Mundo, véase Apéndice B, figura 7.4.

**Köppen:** Se basa en la distribución de la Vegetación. Donde el Perú tiene 8 de los 11 climas del Mundo, véase Apéndice B, figura 7.5. Además, existen clasificaciones nacionales entre las que destacan las 8 regiones naturales de Pulgar Vidal y la Clasificación de Carlos Nicholson.

### 3.2.3. Interpretación de las características de la zona de trabajo

La zonificación tiene como sustento la clasificación de Köppen; sin embargo, se ha incluido parámetros de altura, radiación, inversión térmica, arquitectura tradicional. Se tiene entonces una equivalencia a pisos arquitectónicos. Esta zonificación tiene como base la clasificación primaria realizada por Rayter– Zúñiga en el 2005. A partir de ella, se presentan 9 zonas climáticas para el Perú. A partir de esta clasificación, se resumen las variables climáticas para las zonas citadas. En el caso de Cusco, nos encontramos en la ZONA 4 – MESOANDINO, véase Apéndice B, Figura 7.6.

#### DESCRIPCIÓN DE ZONA MESOANDINO

Clima Semi-frío a frío, de terreno Semi-Seco a lluvioso con Otoño, Invierno y Primavera secos (de los valles mesoandina). Este clima es usual de parte de la serranía, se extiende por lo general entre los 3000 y 4000 msnm; representa el 14.6% de la superficie total del país y se caracteriza por sus precipitaciones anuales promedio de 700 milímetros. La temperatura media anual promedio es de 12°C , presenta veranos lluviosos e inviernos secos con fuertes heladas.

Asimismo , las precipitaciones varían entre 751 a 1,000 milímetros para la provincia y ciudad de Cusco. Además, la humedad relativa oscila entre 30 % a 50 % mientras que el promedio anual de energía solar incidente diario varía de 6 a 6.5 Kw-h/m<sup>2</sup>. En adición, el promedio de horas de sol es 6, 8 a 10, 7 a 8 en el norte, centro y sur respectivamente y las velocidades de viento varían desde 4 a 7.5 m/s.

En el libro “Consideraciones bioclimáticas en el diseño arquitectónico: El caso peruano” también se realiza una síntesis en una clasificación climática que toma en cuenta las particularidades de la temperatura y la humedad relativa del aire así como la propia arquitectura tradicional como referente de la realidad climática de su emplazamiento, es decir, variables que se encuentran directamente relacionadas con la zona de confort del usuario, véase Apéndice A, tabla 7.5. La provincia de Cusco, así como su capital, se encuentra en la ZONA 5-CONTINENTAL FRIO.

## DESCRIPCIÓN DE ZONA CONTINENTAL FRIO

En la figura 3.2, se presenta el ábaco psicrométrico para la zona en la cual se realizará la simulación, se aprecia que las temperaturas medias oscilan principalmente entre 10 °C a 20 °C. Asimismo, para el caso de máximos de temperatura, se discierne que los mismos varían de 20 °C a 25 °C, mientras que los mínimos no sobrepasan el 0 °C de las heladas. En el caso de la humedad relativa, la misma es baja y en invierno la nubosidad es nula. Ergo, la radiación solar es más frecuente y puede ser aprovechada para retener ganancias internas dentro de las edificaciones.

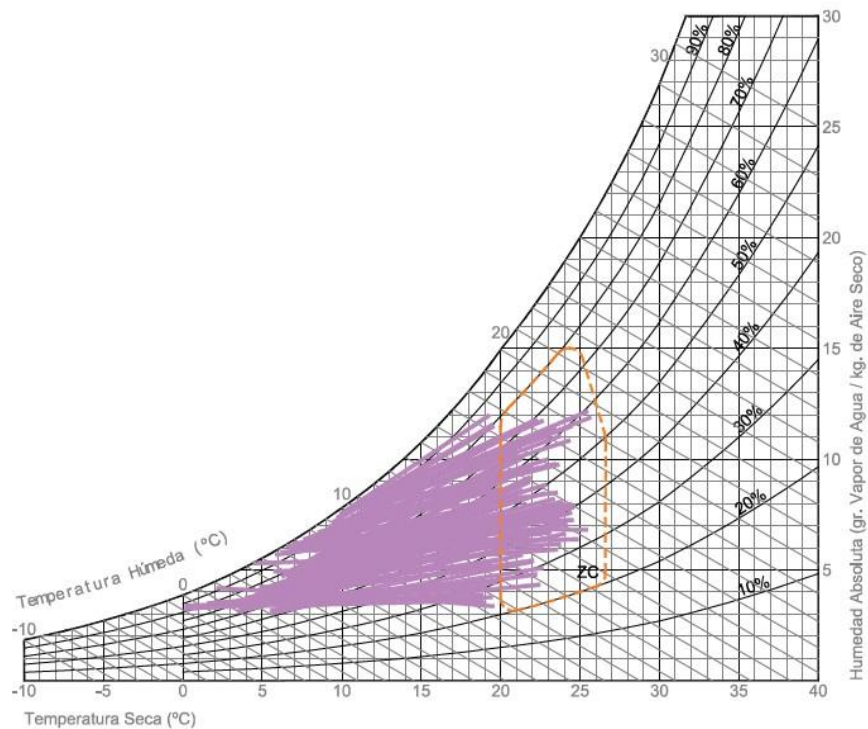


Figura 3.2: Ábaco Psicrométrico de la zona 5.

Fuente: Adaptado de Wieser M (2009). Consideraciones bioclimáticas en el diseño arquitectónico: El caso peruano. PUCP, Lima, Perú.

### 3.2.4. Arquitectura de caso práctico

Se toma como muestra de estudio una escuela del modelo tipo Sierra desarrollado por las oficinas de Blanco Ingenieros por encargo del gobierno peruano alrededor de los años '90 (Blanco, 2005). En esta década, el gobierno peruano inicia un plan de construcción de nuevos colegios, creando las oficinas de INFES, quienes tienen en su dirección el dirigir y organizar los proyectos de construcción de nuevos colegios (Blanco, 2005).

Se trabaja en base a bloques que poseen de dos a tres aulas por piso con algunas variantes en caso se presenten espacios administrativos, laboratorios o bibliotecas. Los proyectos se desarrollan de uno hasta tres pisos y se adoptan criterios para separar los bloques de los baños y escaleras. Así, se puede adaptar a diferentes configuraciones en forma y tamaño de terreno (Blanco, 2005).

Los muros de la fachada y en las divisiones de los espacios de aulas se construyen por medio de albañilería. En el eje longitudinal, se trata de albañilería armada y en el eje transversal, se trata de albañilería confinada. Para el primer techo, se trabajó con un aligerado de 20 cm en la dirección más corta y para el segundo techo, una cobertura de tejas de arcilla en combinación por viguetas de concreto que formaba el techo a dos aguas.

Las edificaciones escolares construidas según este modelo son de forma rectangular. La distribución corresponde a aulas contiguas que dan al patio en el primer piso y a un corredor en el piso superior. Se cuenta con aulas cuadradas de 7.8 m de lado aproximadamente y una altura de 3.35 m. En la fachada se cuenta con ventanas de altura 1.10 m y en la parte posterior, la altura es de 1.60 m. Además, el ancho de la tabiquería es de 25 cm en el eje transversal y longitudinal.

Para efectos de este trabajo de investigación, no se reconocen las características estructurales de la edificación puesto que el hacerlo no representa una fuente de error significativa. Esto debido a que la superficie expuesta por el esqueleto estructural (columnas y vigas de amarre) es mínima en comparación a la de los acabados arquitectónicos. Finalmente, se reconoce el problema de columna corta en el modelo de edificación adoptado ;no obstante, se sabe que se cuenta con una serie de medidas de reforzamiento y aislamiento de tabiquería a fin de que el comportamiento estructural de estas edificaciones sea óptimas en caso de un evento sísmico. El desarrollo, propuesta o implementación de tales medidas escapa del alcance de esta tesis pero se encuentra presente en otras de la misma casa de estudios.



Figura 3.3: Modelo tipo Sierra.  
Fuente: Blanco A. (2005)

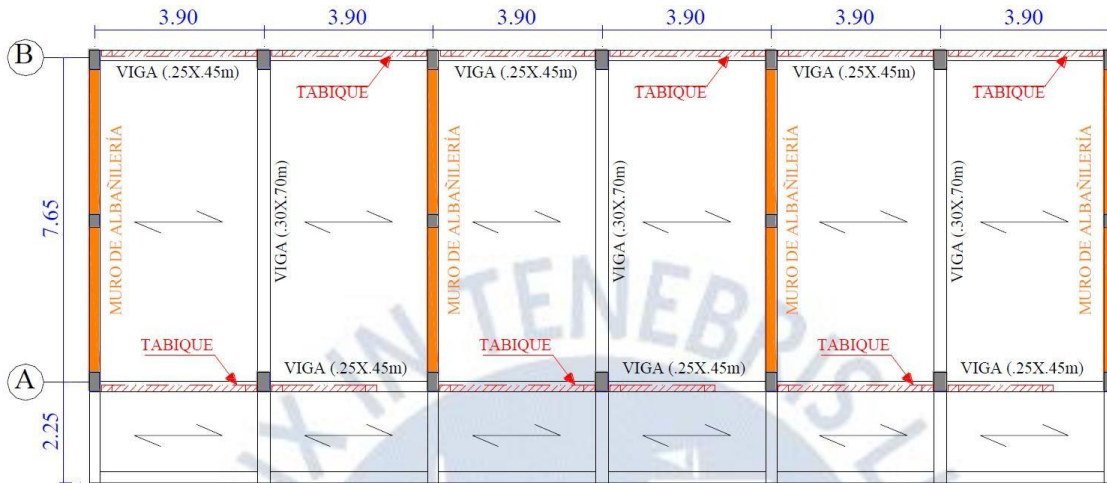


Figura 3.4: Planta de encofrado del primer techo.  
Fuente: Blanco A. (2005)

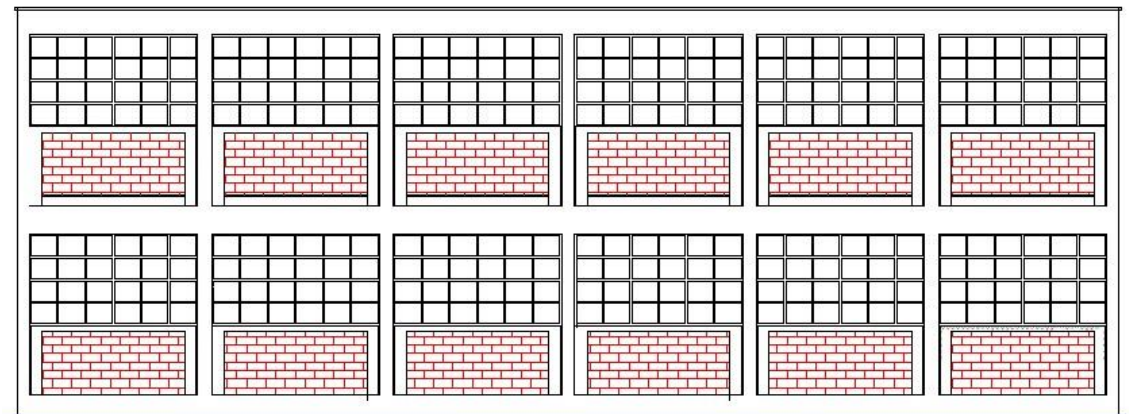


Figura 3.5: Elevación de la fachada posterior  
Fuente: Blanco A. (2005)

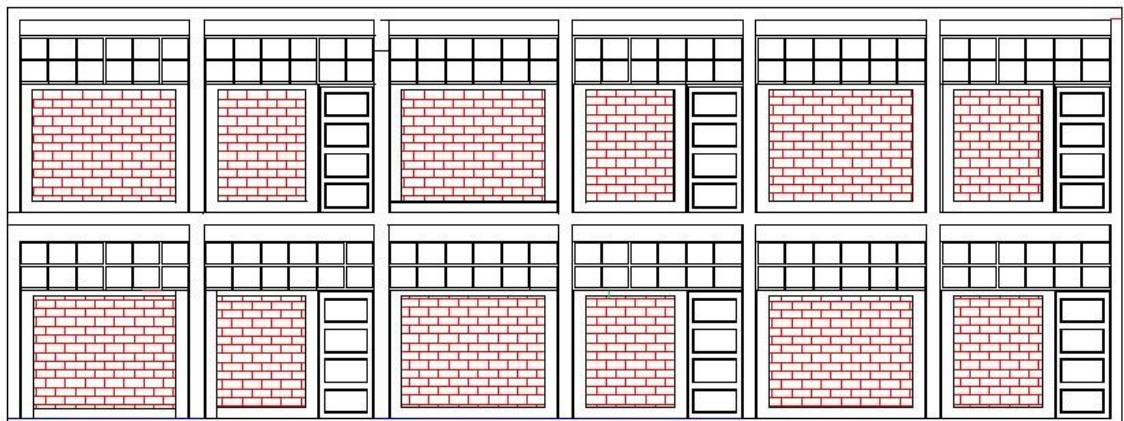


Figura 3.6 Elevación de la fachada frontal  
Fuente: Blanco A. (2005)

Para que la arquitectura planteada no sea vista desde un plano meramente teórico, se aprovecha su semejanza a una escuela construida y ubicada en la zona de estudio como es el caso del Colegio Fe y Alegría N° 21, ubicada en el distrito de San Jerónimo, ciudad y departamento de Cusco. Se aprovecha este ejemplar dado que se encuentra en una zona rural, lo que facilita el modelamiento pues no depende de edificaciones contiguas que varíen sus propiedades térmicas u obstaculicen su iluminación natural (Fe y Alegría, 2017).



Figura 3.7: Colegio Fe y Alegría N21.  
Fuente: <http://www.fevalegria.org.pe/>.  
Consulta: noviembre de 2017



### 3.3. Simulación térmica

#### 3.3.1. Modelamiento de caso práctico

En este capítulo se describe el flujo de trabajo realizado en el software tomando como referencia la arquitectura descrita en el capítulo anterior. También, se menciona los datos ingresados al ““Design Builder””, variables involucradas y datos asumidos. A continuación, se detalla el flujo de trabajo:

##### A. Modelamiento de la geometría según arquitectura

La información presentada en el acápite anterior permite modelar la geometría de la escuela en el software ““Design Builder””. La figura 3.8 muestra el modelo final en el programa, se puede observar que se pudo realizar un modelo aproximado a la construcción presentada en las figura 3.3, figura 3.4, figura 3.5, figura 3.6, figura 3.7.

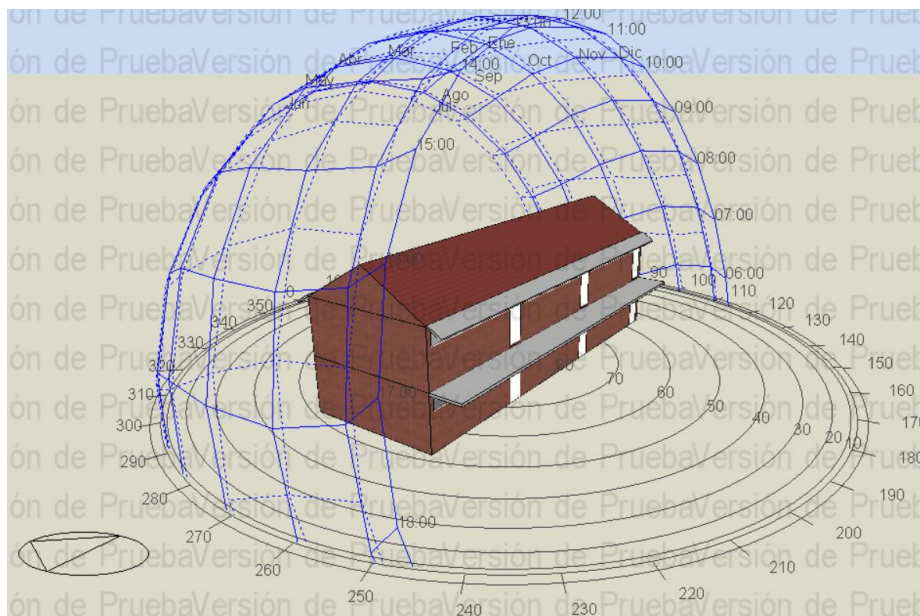


Figura 3.8: Recorrido solar en escuela de ladrillo en software ““Design Builder””

En la figura 3.9, se muestra la planta básica que cuenta con un largo de 23.65 m y un ancho de 8.1 m. Como se mencionó, las aulas tienen una forma cuadrada de 7.8 m de ancho. Dado que se trata de un pabellón de aulas que se encuentra separado arquitectónicamente de las escaleras se omitió el modelamiento de las escaleras ya que esto no representa una variable significativa para el análisis. Además, dado que se desconoce de la orientación del edificio se ha asumido que se encuentra en la situación más desfavorable con la fachada más larga perpendicular al norte; en la figura 3.8, se aprecia el recorrido solar en base a esta asunción. También, se señala en la leyenda una plantilla que corresponde a la actividad dentro de las aulas que corresponde a la enseñanza. Esto se traduce programar el calendario académico (clases de lunes a viernes), una densidad ocupacional de 0,55 personas por metro cuadrado, una vestimenta genérica de 0,5 clo en invierno y condiciones metabólicas de los ocupantes.

Teaching Areas

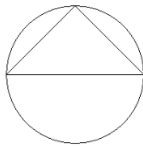
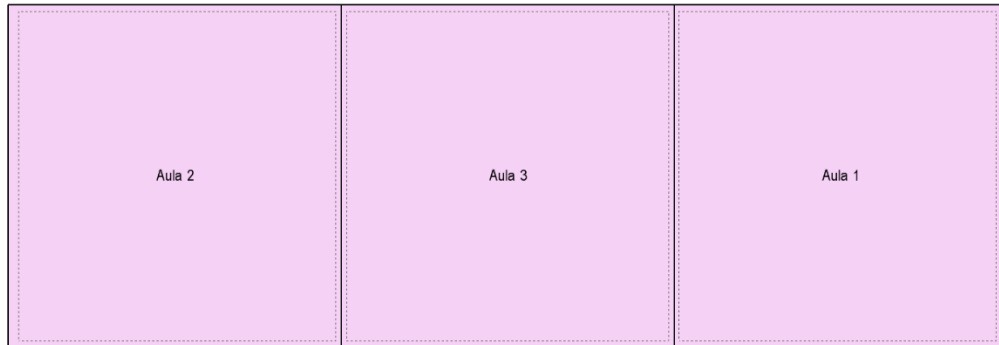


Figura 3.9: Planta básica de escuela con distribución de aulas

### B. Ubicación del modelo en sitio de estudio

La escuela a analizar se basa en el Colegio Fe y Alegría N° 21, este se ubica en la Calle Arica s/n - San Jerónimo – Cusco. Por información proporcionada por SENAMHI, se sabe que se cuenta con una estación meteorológica cercana a la escuela en mención, a 2.6 km de distancia. Esta nos proporcionará la data climática histórica presentada en intervalos de media hora. Ver figuras 3.10 y 3.11.

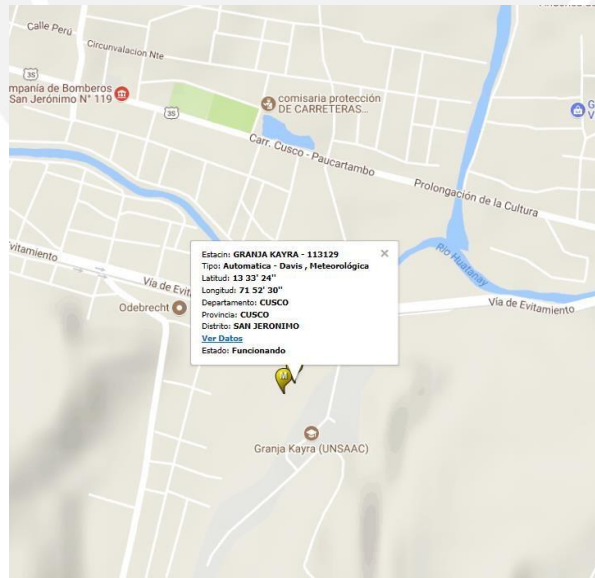


Figura 3.10: Estación Granja Kayra. Fuente: SENAMHI

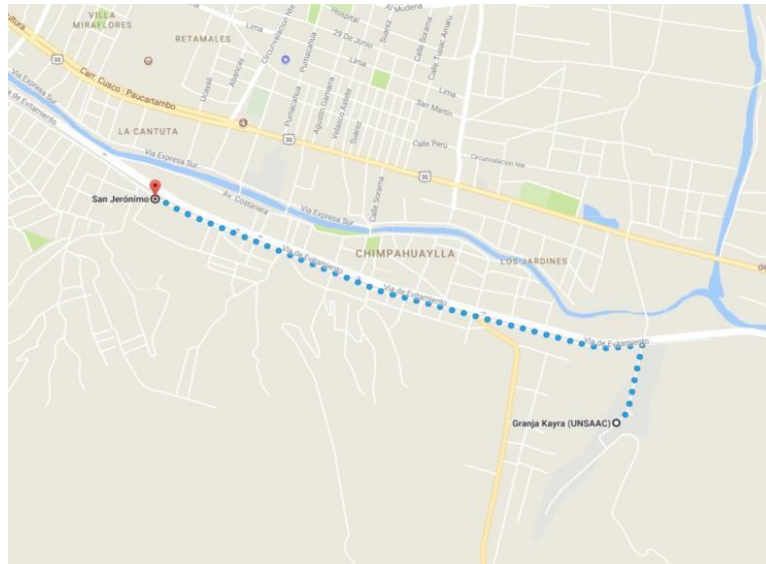
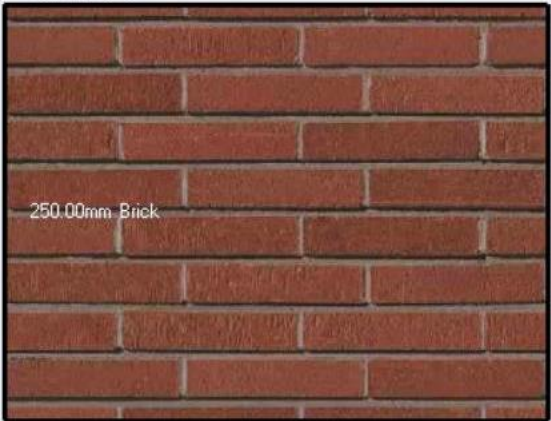


Figura 3.11: Distancia entre estación y sitio de estudio Fuente: Google Maps.

El programa “Design Builder” cuenta con la opción de utilizar la estación mencionada para facilitar el ingreso de la información meteorológica y el impacto que esta tendrá con respecto al modelo, esto a través de la incorporación del “Energy Plus” Plug-in para el desarrollo de los cálculos. Es importante el mencionar que la estación meteorológica lleva funcionando cerca de 50 años y que nos proveerá de data histórica significativa a la hora de analizar los resultados de la simulación, se aconseja a futuros usuarios del software que de no contar con una plantilla climática en el software, cuenten con una vasta cantidad de datos climatológicos a ingresar, dado que en caso contrario no se tendría una verdadera representación del clima del emplazamiento.

### C. Asignación de materiales y orientación del modelo

Los muros están compuestos por albañilería armada y albañilería confinada, siendo los muros transversales de un espesor de 25 cm y el resto de muros de albañilería con un espesor de 15 cm. Esta información es ingresada al programa, el cual nos brinda las propiedades térmicas del material en relación a su espesor, ver figura 3.12.

Outer surface		<b>Superficie interior</b>	
		Coefficiente de transferencia de cal...	2,152
Inner surface		Coefficiente de transferencia de cal...	5,540
		Resistencia superficial (m <sup>2</sup> ·K/W)	0,130
		<b>Superficie exterior</b>	
		Coefficiente de transferencia de cal...	19,870
		Coefficiente de transferencia de cal...	5,130
		Resistencia superficial (m <sup>2</sup> ·K/W)	0,040
		<b>Sin Puentes Térmicos</b>	
		Valor U de superficie a superficie (...)	2,880
		Valor R (m <sup>2</sup> ·K/W)	0,517
		Valor U (W/m <sup>2</sup> ·K)	1,933
		<b>Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)</b>	
		Espesor (m)	0,2500
		Límite superior de resistencia (m <sup>2</sup> ·K/...)	0,517
		Límite inferior de resistencia (m <sup>2</sup> ·K/...)	0,517
		Valor U de superficie a superficie (...)	2,880
		Valor R (m <sup>2</sup> ·K/W)	0,517
		<b>Valor U (W/m<sup>2</sup>·K)</b>	<b>1,933</b>

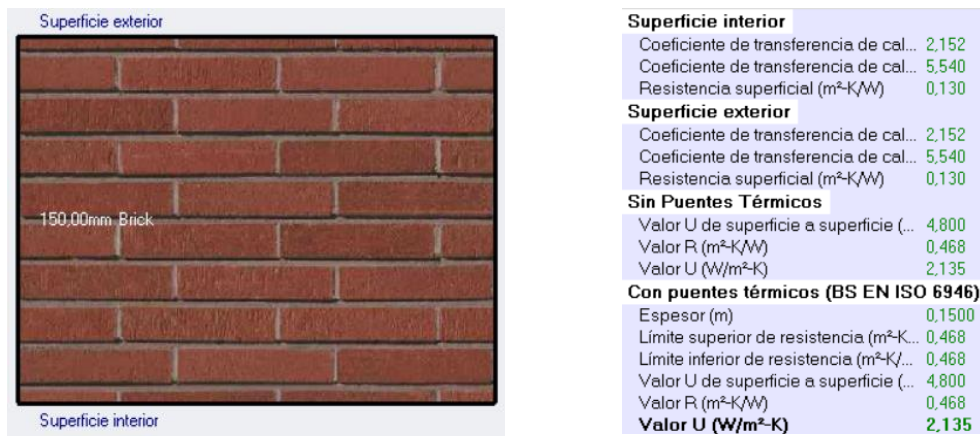


Figura 3.12: Sección de muros y propiedades térmicas

En el segundo piso, se cuenta con un techo a dos aguas y una pendiente de 40 grados. Este techo consta de una capa de concreto ligero de un espesor de aproximadamente 10 cm y de una cubierta de tejas de arcilla de 2,5 cm. Además, el techo del primer piso se compone de un techo aligerado (concreto y ladrillo hueco) de 20 cm de espesor. Finalmente, el piso del primer nivel se simplifica a una losa de concreto de 10 cm de espesor vaciada sobre terreno compactado que podría encontrarse en el emplazamiento. Ver figuras 3.13, 3.14 y 3.15

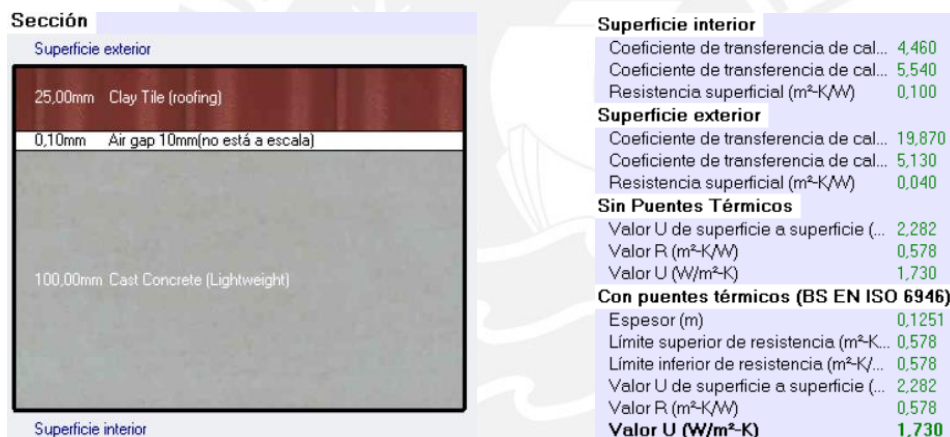


Figura 3.13: Sección de techo del segundo piso y propiedades térmicas

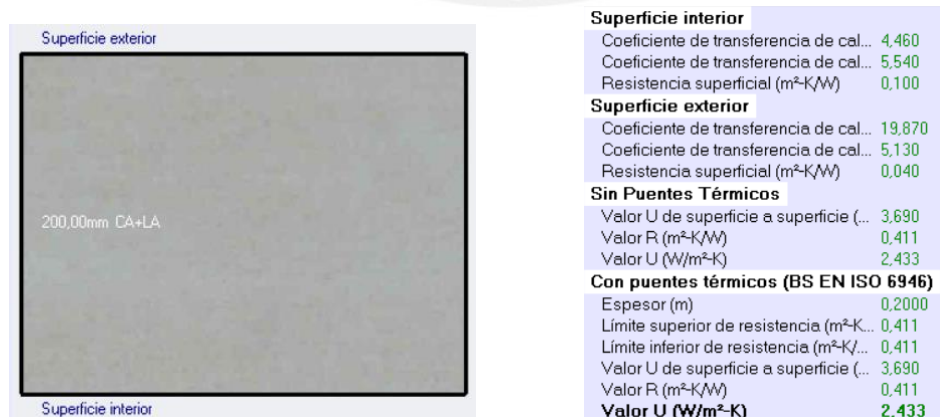


Figura 3.14: Sección de techo del primer piso y propiedades térmicas

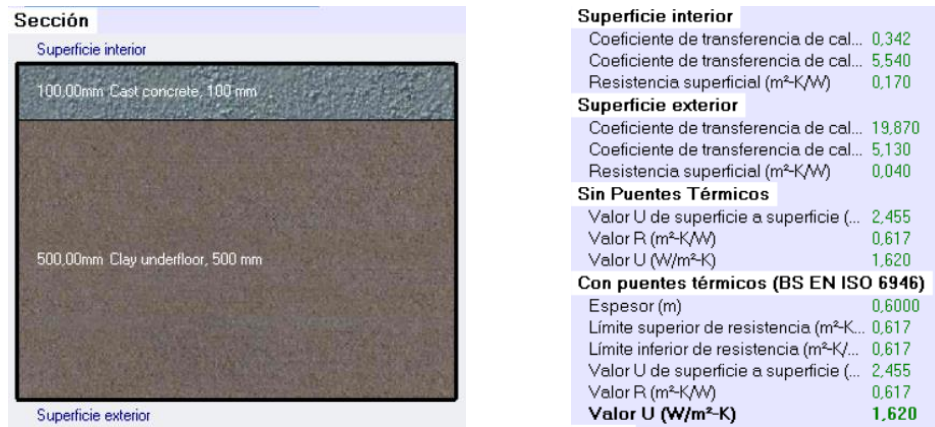


Figura 3.15: Sección del piso del primer nivel y propiedades térmicas

Por lo demás, las ventanas y puertas fueron asignadas en sus versiones más simples asumiendo que éstas serían del tipo económica. En adición, la información de estos elementos está contenida en el programa de forma predeterminada.

#### D. Condiciones de frontera a considerar



Figura 3.16: Modelo final

En la figura 3.16, a fin de simular las sombras que generan las pendientes del techo y el pasadizo del techo del primer piso se añaden “Component blocks”. Por medio de los mismos, se controla la iluminación y ganancias solares excesivas. Es recomendable el asignar una tasa de infiltración (*air changes per hour*, ACH) de 6 ACH según lo encontrado en la literatura, esto aplica a edificaciones construidas en entorno rural y con mano de obra de calidad media a baja (CERN, 2012). Sin embargo, se asigna una tasa de infiltración de 5 ACH que corresponde al máximo permitido a asignar por el programa según los reglamentos en los que desarrolla los cálculos. Se considera esta práctica como conservadora en vista de que no se sabe con certeza el nivel de calidad de la mano de obra, asimismo, se desconoce el año de ejecución de la obra. También, se limita los intercambios de aire debido a ventilación natural a los mínimos requeridos por persona a fin de que la temperatura interior no se reduzca a causa de esta interacción.

### 3.3.2. Modelamiento de caso bioclimático

En esta sección no se hará mención al flujo de trabajo, más bien, se hará mención a los cambios realizados en el modelo a fin de mejorar las temperaturas internas dentro de los rangos de confort establecidos. Se siguen las recomendaciones estudiadas en capítulos previos y se realizan las siguientes modificaciones:

#### A. Orientación

Se modificó la orientación de la edificación, el eje de la edificación se encuentra paralela al Norte y la longitud de muro recibe la mayor cantidad de radiación solar. En la figura 3.17 se aprecia el recorrido solar y como es que este permite una mayor ganancia a través de las ventanas ubicadas en las fachadas longitudinales, para aprovechar esta ganancia, pero evitar el deslumbramiento se modificó el alero del segundo piso a 50 cm.

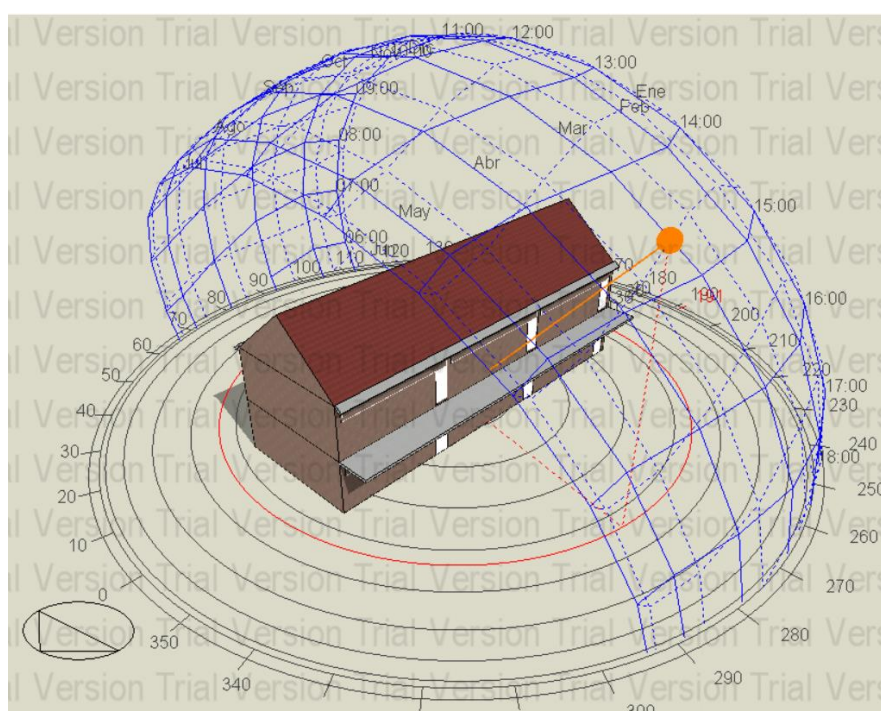


Figura 3.17: Recorrido solar en escuela de adobe en software "Design Builder"

#### B. Propiedades térmicas de materiales

A continuación, se detallan los cambios realizados a la envolvente de la escuela. Se reemplazaron los muros de albañilería y sistemas de techado a materiales tradicionales cuyos sistemas constructivos resulten sencillos para alcanzar calidad de mano de obra. Por consiguiente, se opta por utilizar muros de adobe de 40 cm de espesor. Además, los techos aligerados (concreto y ladrillo hueco) fueron reemplazados por un techo estructurado en vigas de madera y cuyas losas se componen por planchas de madera. Finalmente, el piso del primer piso se modeló utilizando piedras de granito sobre el terreno compactado. Véase figuras 3.18, 3.19, 3.20 y 3.21.



Superficie interior	
Coefficiente de transferencia de cal...	2,152
Coefficiente de transferencia de cal...	5,540
Resistencia superficial (m <sup>2</sup> ·K/W)	0,130
Superficie exterior	
Coefficiente de transferencia de cal...	19,870
Coefficiente de transferencia de cal...	5,130
Resistencia superficial (m <sup>2</sup> ·K/W)	0,040
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (...)	1,417
Valor R (m <sup>2</sup> ·K/W)	0,875
Valor U (W/m <sup>2</sup> ·K)	1,142
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,4000
Límite superior de resistencia (m <sup>2</sup> ·K...	0,875
Límite inferior de resistencia (m <sup>2</sup> ·K/...	0,875
Valor U de superficie a superficie (...)	1,418
Valor R (m <sup>2</sup> ·K/W)	0,875
<b>Valor U (W/m<sup>2</sup>·K)</b>	<b>1,142</b>

Figura 3.18: Sección de muros y propiedades térmicas



Superficie interior	
Coefficiente de transferencia de cal...	4,460
Coefficiente de transferencia de cal...	5,540
Resistencia superficial (m <sup>2</sup> ·K/W)	0,100
Superficie exterior	
Coefficiente de transferencia de cal...	19,870
Coefficiente de transferencia de cal...	5,130
Resistencia superficial (m <sup>2</sup> ·K/W)	0,040
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (...)	0,851
Valor R (m <sup>2</sup> ·K/W)	1,315
Valor U (W/m <sup>2</sup> ·K)	0,760
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,1260
Límite superior de resistencia (m <sup>2</sup> ·K...	1,315
Límite inferior de resistencia (m <sup>2</sup> ·K/...	1,315
Valor U de superficie a superficie (...)	0,851
Valor R (m <sup>2</sup> ·K/W)	1,315
<b>Valor U (W/m<sup>2</sup>·K)</b>	<b>0,760</b>

Figura 3.19: Sección de techo del segundo piso y propiedades térmicas



Superficie interior	
Coefficiente de transferencia de cal...	4,460
Coefficiente de transferencia de cal...	5,540
Resistencia superficial (m <sup>2</sup> ·K/W)	0,100
Superficie exterior	
Coefficiente de transferencia de cal...	19,870
Coefficiente de transferencia de cal...	5,130
Resistencia superficial (m <sup>2</sup> ·K/W)	0,040
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (...)	0,500
Valor R (m <sup>2</sup> ·K/W)	2,140
Valor U (W/m <sup>2</sup> ·K)	0,467
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,2000
Límite superior de resistencia (m <sup>2</sup> ·K...	2,140
Límite inferior de resistencia (m <sup>2</sup> ·K/...	2,140
Valor U de superficie a superficie (...)	0,500
Valor R (m <sup>2</sup> ·K/W)	2,140
<b>Valor U (W/m<sup>2</sup>·K)</b>	<b>0,467</b>

Figura 3.20: Sección de techo del primer piso y propiedades térmicas



Figura 3.21: Sección del piso del primer nivel y propiedades térmicas

En adición a los cambios mencionados, se cambia la tasa de infiltración de aire de 5 ACH a 3 ACH que corresponde a edificaciones que fueron construidas con mano de obra calificada y con especial atención a los cerramientos, esto se traduce en mayor hermeticidad de la escuela; en contraste, la tasa de ventilación natural, puertas y ventanas se mantienen en relación al modelo anterior. A fin de resumir los cambios realizados en la envolvente térmica de la escuela se presenta la figura 3.22, en la misma se discierne el uso de materiales con mayor aislamiento e inercia térmica tal cual se sugiere en acápite anteriores.

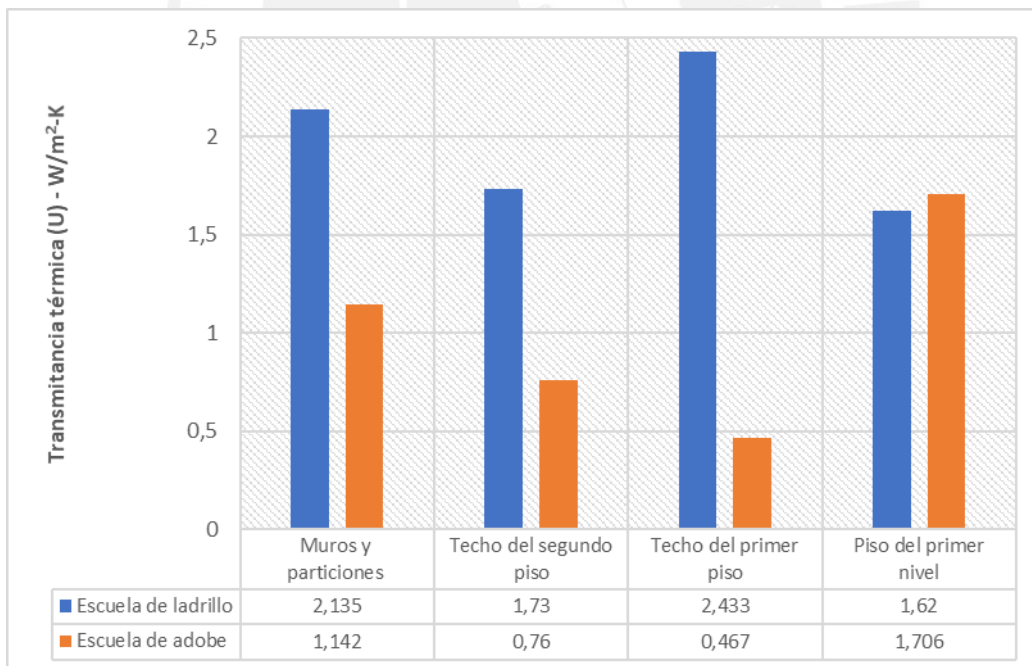


Figura 3.22: Transmitancia térmica en elementos de la envolvente



## 4. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

### 4.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos por medio del “Design Builder” se presentan detalladamente en el “Apéndice C”. A continuación, se discuten los resultados para el caso práctico y el caso bioclimático. En principio, se analizan de forma individual para analizar tendencias térmicas a nivel horizontal y vertical. Posteriormente, se comparan ambos casos para señalar las principales diferencias en los resultados obtenidos.

#### 4.1.1. Discusión del caso práctico

En el emplazamiento en el que se ubica la escuela, la temperatura media anual promedio es de 12 °C , la temperatura media máxima mensual es de 13.27 °C (noviembre), la temperatura media mensual mínima es 9.93 °C (julio) y la variación anual media es de 3.34 °C. En la figura 7.7, se observa que las temperaturas más bajas se presentan en los meses de junio y julio; además, las temperaturas más altas se dan en los meses de octubre, noviembre, diciembre. Asimismo, se reconoce que en el periodo más fríos se cuentan con mayor radiación solar, esto debido a la baja nubosidad. El resto de los meses (noviembre a marzo) corresponden al periodo de lluvias y esto se comprueba con la baja radiación solar presentada en estos meses por culpa de la nubosidad. Además, la velocidad del viento varía en un rango de 0.18 m/s a 1.84 m/s, presentándose direcciones del viento variadas según el mes en el que se encuentre. Estos resultados van en concordancia con lo presentado en el sub capítulo 3.2: ESTUDIO DE CASO.

Se sabe que el cronograma escolar en Perú es desde mediados de marzo hasta inicios de diciembre. En un principio, no se plantea clases en periodo de verano (enero y febrero) debido a que depende de la administración de la escuela; además, se considera que las temperaturas internas en verano no representarían un problema en el confort del estudiante dado que en este periodo se cuenta con mayores temperaturas externas y puede ser controlado por medios adaptativos operando las ventanas y adaptando su vestimenta. Por lo tanto, el objeto de discusión se centra en la semana de diseño para las temperaturas mínimas históricas en el periodo de invierno (17 de mayo al 23 de mayo), se discutirán los resultados dentro de la escuela para las aulas del primer y segundo piso. Se sintetiza la información presentada en gráficos en las Tablas 4.1 y 4.2:

Tabla 4.1: Resultados de confort para el primer piso

		L	M	X	J	V
Operative Temperature °C	Aula 1	18,6	18,8	19,9	20,8	20,8
	Aula 2	18,5	18,7	19,8	20,7	20,7
	Aula 3	18,7	19,0	20,1	21,0	21,0
	Desviación estándar	0,13	0,16	0,14	0,16	0,14

Tabla 4.2: Resultados de confort para el segundo piso

		L	M	X	J	V
Operative Temperature °C	Aula 1	17,6	18,0	19,2	19,8	19,4
	Aula 2	17,4	17,9	19,1	19,6	19,3
	Aula 3	17,6	18,2	19,3	19,8	19,5
	Desviación estándar	0,10	0,14	0,13	0,14	0,10

Se puede afirmar que no se evidencia mucha variabilidad entre los resultados encontrados en las aulas contiguas según el piso. Esto se evidencia en la baja desviación estándar presentada para los días de la semana de diseño, desviaciones que varían desde el orden 0.10 hasta 0.16 reflejan la estrecha relación entre los resultados de las aulas para un mismo día. Esto debido a que se cuentan con la misma geometría del aula, misma configuración constructiva y hasta cierto punto, mismo grado de exposición ante condiciones externas. Para analizar la variación de temperatura por piso se realiza una resta entre la temperatura del primer piso y el segundo piso.

Tabla 4.3: Variación de temperatura por piso

	L	M	X	J	V
Aula 1	1,0	0,8	0,7	1,0	1,4
Aula 2	1,0	0,8	0,8	1,1	1,5
Aula 3	1,1	0,8	0,8	1,2	1,5
MAX	1,1	0,8	0,8	1,2	1,5
MIN	1,0	0,8	0,7	1,0	1,4

En la Tabla 4.3, se puede comprobar que los primeros pisos cuentan con una mayor temperatura interna que el segundo piso. Existe una menor densidad en el segundo techo, ergo, una menor masa térmica. Se comprueba variaciones máximas de hasta 1.5 °C y mínimas de hasta 0.7 °C en aulas del primer piso en relación a las mismas aulas segundo piso. La Tabla 4.4 nos muestran las temperaturas máximas para las aulas del primer y segundo piso, siendo la temperatura máxima de 21.0 °C y mínima de 18.5 °C para el primer piso. En el caso del segundo piso, se tiene con una temperatura máxima de 19.8 °C y mínima de 17.4 °C. Se comprueba que la variación máxima del primer al segundo piso es de 3.6 °C. Para finalizar, se presenta el flujo de temperaturas de un día típico en la semana de diseño de invierno.

Tabla 4.4: Temperaturas máximas y mínimas

1ER PISO	MAX	MIN
Aula 1	20,8	18,6
Aula 2	20,7	18,5
Aula 3	21,0	18,7

2DO PISO	MAX	MIN
Aula 1	19,8	17,6
Aula 2	19,6	17,4
Aula 3	19,8	17,6

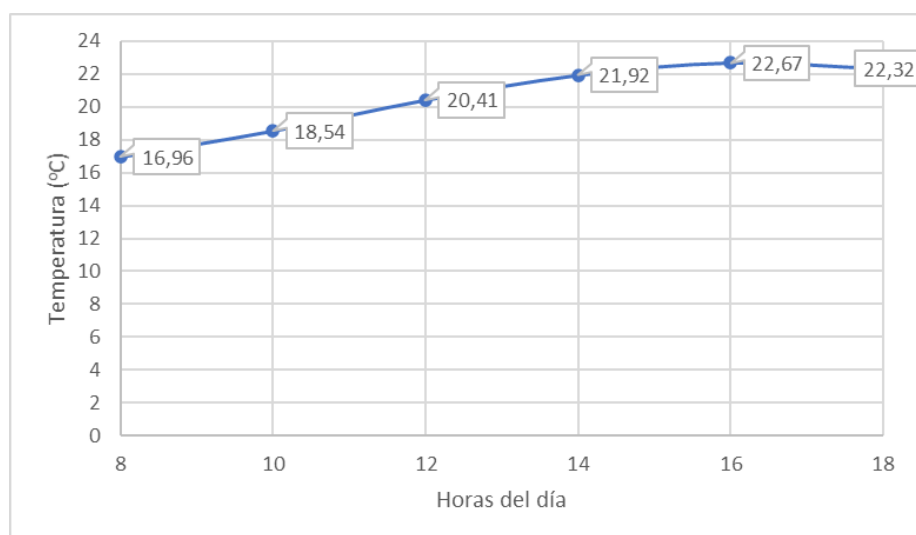


Figura 4.1: Flujo de temperatura en un día típico de invierno

En la Figura 4.1, se presenta para el Aula 2, ubicada en el segundo piso. Se puede apreciar cómo es que las temperaturas son menores durante las primeras horas del día en un periodo de 8 a 12 de la mañana y presentan un incremento hasta las 4 de la tarde, hora en la que la tendencia empieza a invertirse y la temperatura empieza a decrecer. Se analiza el intervalo de 8:00 a 18:00 horas con la premisa de que los alumnos tienen el horario escolar hasta las 16:00 horas y el personal administrativo y profesores podrían permanecer en los ambientes de la escuela hasta 18:00 finalizando labores.

#### 4.1.2 Discusión del caso bioclimático

Los resultados del emplazamiento permanecen constantes en comparación al modelo anterior dado que estos resultados dependen únicamente de la ubicación, la cual no ha sido modificada. El objeto de discusión se centra en la semana de diseño para las temperaturas mínimas presentadas en invierno, se discutirán los resultados encontrados dentro de la escuela para las aulas del primer y segundo piso. Para ello, se sintetiza la información presentada en gráficos en las Tablas 4.5 y 4.6:

Tabla 4.5: Resultados de confort para el primer piso

		L	M	X	J	V
Operative Temperature °C	Aula 1	19,9	20,2	20,9	21,2	21,3
	Aula 2	20,6	20,7	21,3	21,6	21,9
	Aula 3	20,5	20,7	21,3	21,6	21,9
	Desviación estándar	0,36	0,31	0,24	0,21	0,33

Tabla 4.6: Resultados de confort para el segundo piso

		L	M	X	J	V
Operative Temperature °C	Aula 1	19,8	20,1	21,2	22,0	21,9
	Aula 2	20,7	20,8	21,6	22,4	22,8
	Aula 3	21,0	21,2	22,1	22,9	23,1
	Desviación estándar	0,64	0,54	0,47	0,47	0,61

No se evidencia variabilidad entre los resultados encontrados en las aulas contiguas según el piso, esto se confirma en la baja desviación estándar presentada para los días de la semana de diseño; las desviaciones varían desde el orden 0.21 hasta 0.64 reflejan la estrecha relación entre los resultados de las aulas para un mismo día. Esto se da de forma similar al modelo anterior.

Tabla 4.7: Variación de temperatura por piso

	L	M	X	J	V
Aula 1	0,2	0,1	-0,3	-0,7	-0,6
Aula 2	-0,1	-0,1	-0,4	-0,9	-0,8
Aula 3	-0,5	-0,5	-0,8	-1,3	-1,2
MAX	0,2	0,1	-0,3	-0,7	-0,6
MIN	-0,5	-0,5	-0,8	-1,3	-1,2

Para analizar la variación de temperatura por piso se realiza una resta entre la temperatura del primer piso y el segundo piso. En la Tabla 4.7, se comprueba que el segundo piso cuenta con mayor temperatura interna que el primer piso, esto debido a que su techo esta hecho a base de madera con una transmitancia térmica menor que el enrocado de piedra presentado en el primer nivel. En este caso, el segundo piso retiene más calor que el primero por sus características térmicas. Además, se comprueban variaciones máximas de hasta 1.3 °C y mínimas de hasta 0.1 °C en aulas del primer piso en relación a las mismas aulas en el segundo piso. Por ello, se presenta mayor uniformidad en la temperatura de las aulas tanto del primer como segundo piso.

La Tabla 4.8 nos muestra las temperaturas máximas para las aulas del primer y segundo piso. Para el primer piso, la temperatura máxima es 21.9 °C y la mínima es 19.9 °C ; para el caso del segundo piso, la temperatura máxima es 23.1 °C y la mínima es 19.8 °C.. Finalmente, se comprueban variaciones máximas de 3.3 °C en relación del máximo al mínimo del segundo piso.

Tabla 4.8: Temperaturas máximas y mínimas

1ER PISO	MAX	MIN
Aula 1	21,3	19,9
Aula 2	21,9	20,6
Aula 3	21,9	20,5

2DO PISO	MAX	MIN
Aula 1	22,0	19,8
Aula 2	22,8	20,7
Aula 3	23,1	21,0

Para finalizar, se presenta el flujo de temperaturas de un día típico en la semana de diseño de invierno. Se presenta el flujo de temperatura para el Aula 2, ubicada en el segundo piso, ver figura 4.2. Se puede apreciar cómo es que las temperaturas son menores durante las primeras horas del día en un periodo de 8 a 12 de la mañana y presentan un incremento hasta las 2 de la tarde, hora en la que la tendencia empieza a invertirse y la temperatura empieza a decrecer. Este comportamiento es similar y en concordancia al modelo anterior.

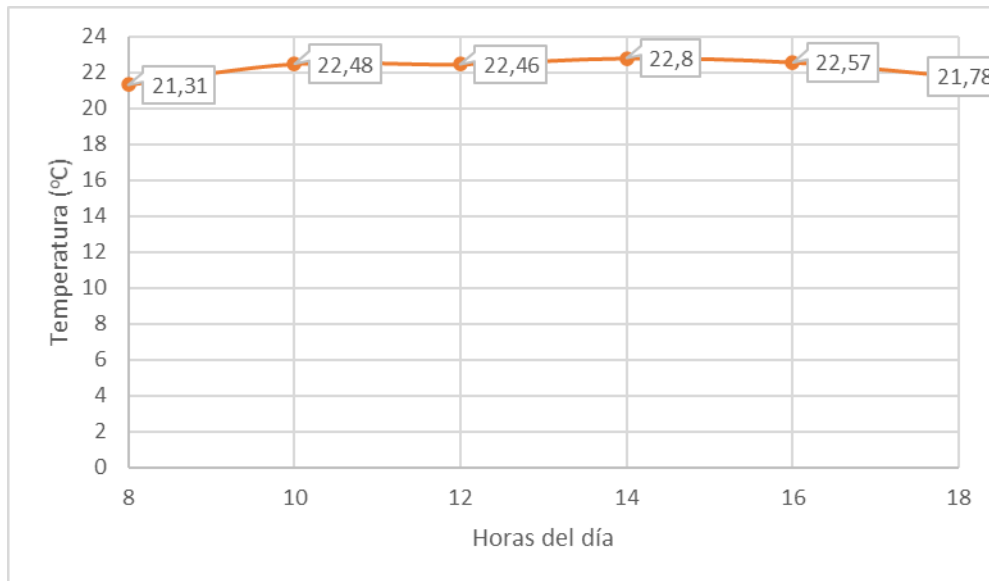


Figura 4.2: Flujo de temperatura en un día típico de invierno

#### 4.1.3. Comparación del caso práctico y caso bioclimático

Se realizará una comparación entre el caso práctico y el caso bioclimático a fin de identificar tendencias y comportamientos. En la figura 4.3 se muestra que las aulas de la propuesta bioclimática cuenta con mayores temperaturas en comparación con la escuela del caso práctico. En el caso bioclimático se cuenta con una temperatura operativa promedio de 21.3 °C y una humedad relativa promedio de 43% ; en paralelo, en el caso práctico ,se cuenta con una temperatura operativa promedio de 19.3 °C y una humedad relativa promedio de 43%. Asimismo, en el caso bioclimático se tiene una temperatura máxima de 23.1 °C y en el caso práctico se tiene una temperatura mínima de 17.4 °C, lo que representa una variación de temperaturas de hasta 5.7 °C. Con respecto a la humedad relativa, ambas edificaciones presentan un rango bien delimitado de 36 a 52 %.

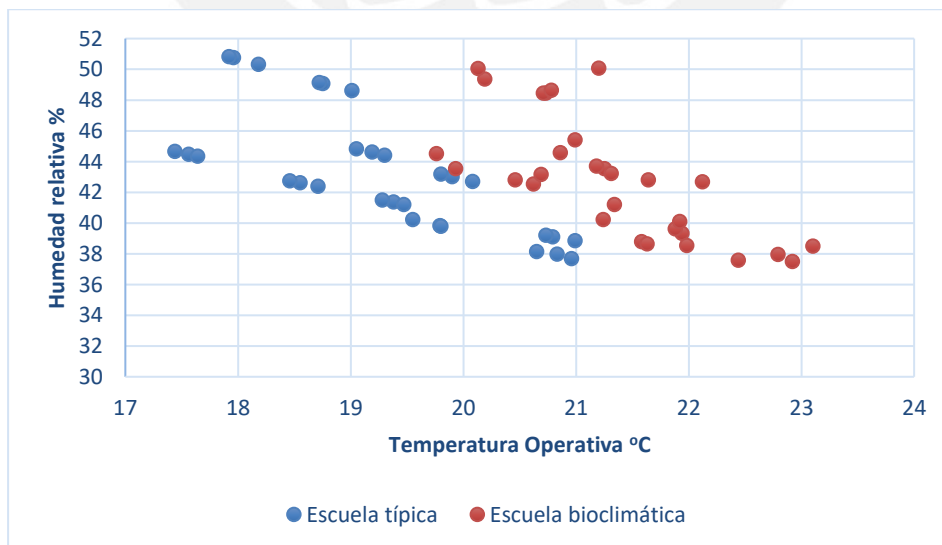


Figura 4.3: Resultados de ambientes interiores para el caso práctico y bioclimático

En la figura 4.4 se identifica que existe mayor variación entre las temperaturas del primer al segundo piso para el caso práctico en comparación con el caso bioclimático. Mientras que en el caso práctico se denota una tendencia de mayor temperaturas para el primer nivel, en el caso bioclimático se observa como las temperaturas se presentan indistintamente en ambos pisos. Esto puede ser explicado por la orientación en la que se encuentra la escuela en el caso bioclimático, dado que revise ganancias solares de manera uniforme en el eje más largo; asimismo, la envolvente presentada por los materiales permite que el calor se retenga en la edificación.

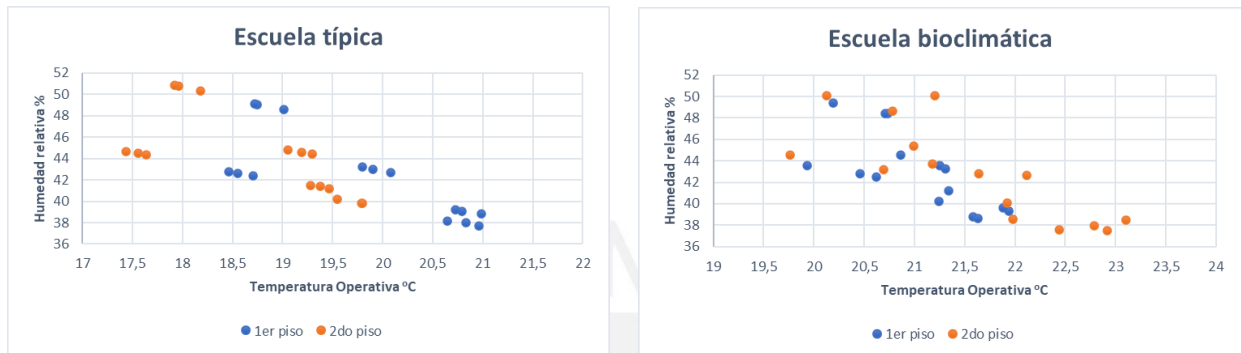


Figura 4.4: Resultados de ambientes interiores del primer y segundo piso para el caso práctico y bioclimático

Finalmente, en la figura 4.5, se comprueba que la temperatura interna durante el día típico de invierno es mayor y permanece más uniforme en la escuela bioclimática que en la escuela típica. Mientras que la temperatura oscila desde 21.3 °C a 22.8 °C para la escuela bioclimática, para la escuela típica oscila en un rango mayor de 17 °C a 22.67 °C para la escuela típica de ladrillo.

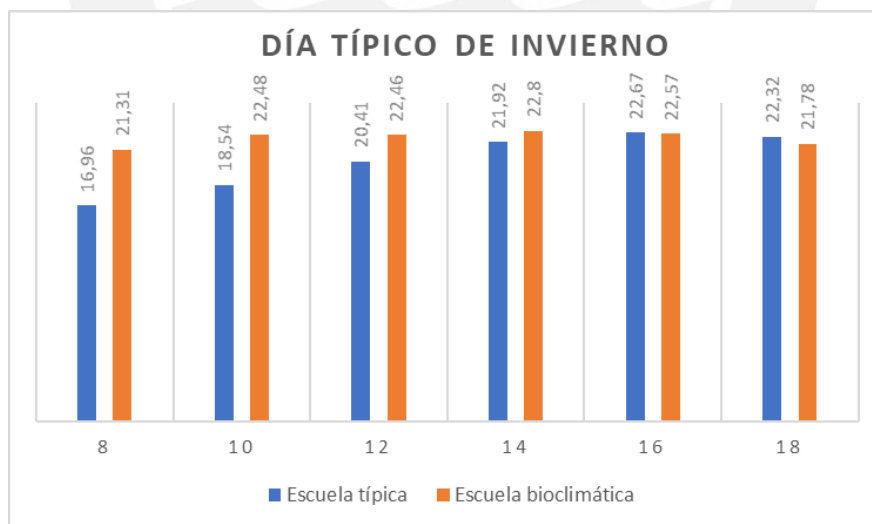


Figura 4.5: Comparación del día típico de invierno para el caso práctico y bioclimático

## 4.2 ANÁLISIS DEL CONFORT INTERNO

### 4.2.1. Análisis en caso práctico

Tabla 4.9: Rangos de zona de confort para edificios educativos

	Temperatura (°C)			PMV	PPD (%)
	Temp. inferior	Temp. neutra	Temp. superior		
ISO 7730	20	22	24	-0.5<PMV<+0.5	PPD< 10%
ASHRAE 55-Racional	Método gráfico			-0.5<PMV<+0.5	PPD< 10%
ASHRAE 55- Adaptativo	19.2	21.2	23.2		PPD< 10%
EM110	18	20	22		

En la tabla 4.9, se sintetiza la normativa para edificios educativos en relación al confort interno, los rangos de confort serán evaluados para la semana de diseño de invierno. En la Figura 4.5 se analizan los resultados de temperatura operativa y humedad relativa para las aulas del caso práctico, se subdivide en pisos para evaluar si sus condiciones satisfacen los requerimientos de la ISO 7730. Se aprecia que las temperaturas del segundo piso se ubican fuera de la zona de confort, además, el 77% de las temperaturas registradas en las aulas de la escuela se encuentran fuera de la zona de confort. Dado que las temperaturas se encuentran por debajo del límite inferior, esto implicaría que los estudiantes experimenten sensación de frío, encontrarse fuera de la zona de confort en el límite inferior es causa de déficit de atención, gripe y ausentismo en muchas ocasiones.

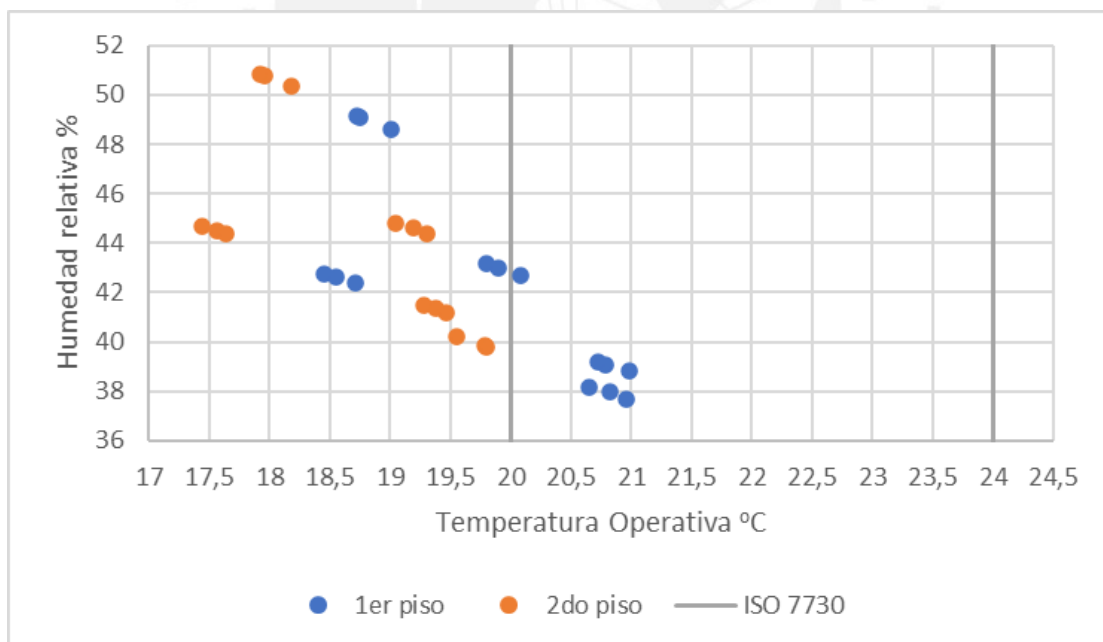


Figura 4.5: Evaluación del confort según ISO 7730- Caso práctico

En la Figura 4.6 se analizan los resultados según el método gráfico de la norma ASHRAE 55. Se aprecia que las temperaturas del segundo piso se ubican fuera de la zona de confort, además, el 80% de las temperaturas registradas en las aulas de la escuela típica se encuentran fuera de la zona de confort. Esta coherencia que se encuentra en la norma ISO 7730 y la norma ASHRAE 55 se da porque ambas normas se basan en el modelo racional. No obstante, se reconoce que utilizar el método gráfico implica un ligero mayor porcentaje de temperaturas fuera de la zona de confort, por lo que se concluye que es un enfoque ligeramente más rígido en comparación a la ISO 7730.

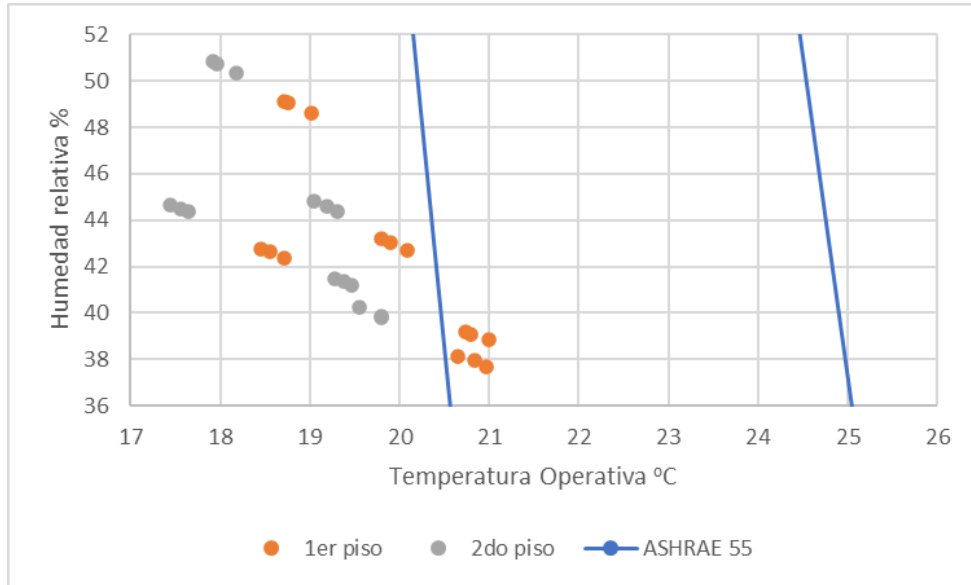


Figura 4.6: Evaluación del confort según ASHRAE 55- Caso práctico

La norma ASHRAE 55 presenta un modelo adaptativo que aplica a edificaciones con ventilación natural. Para las temperaturas registradas en la semana de invierno, se obtiene un promedio de 10.95 °C. Esta temperatura exterior nos permitirá obtener la temperatura de neutralidad térmica en el modelo adaptativo, la misma que resulta 21.2 °C. Para obtener el rango que satisfaga al 90% de los ocupantes, se establece un rango de +/- 2 °C .

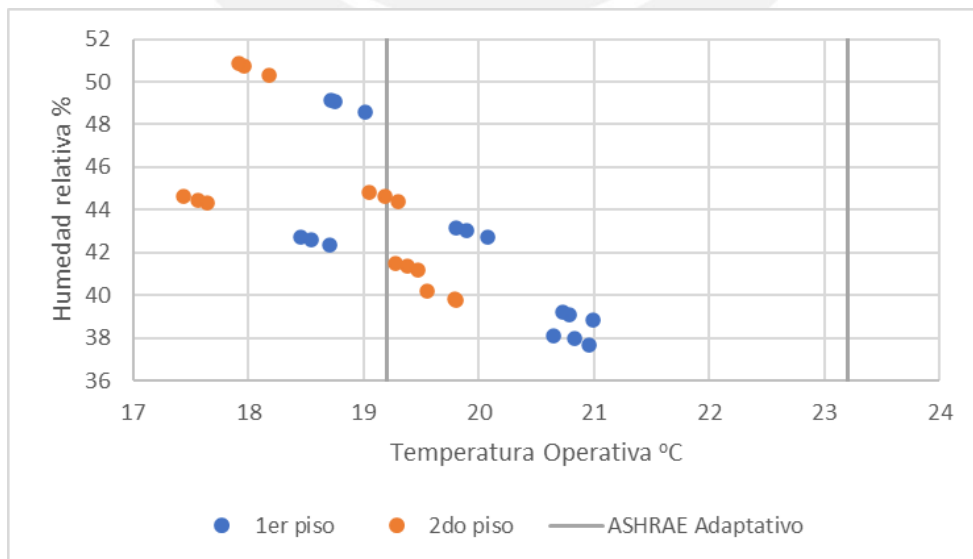


Figura 4.7: Evaluación del confort según ASHRAE 55- Caso práctico



En la Figura 4.7 , se analizan los resultados según el método adaptativo de la norma ASHRAE 55. Se aprecia como los rangos de confort se modifican en comparación con lo propuesto por los modelos racionales. En el método adaptativo , el usuario tiene la potestad de modificar su vestimenta y manipular los elementos de ventilación ; por ello, la expectativa del usuario modifica los rangos de confort. En base a estos nuevos límites, se aprecia que el 47% de las temperaturas operativas está fuera del rango de confort. Estos resultados van en contraste con el 77% y 80% presentados por el modelo racional de la ISO 7730 y ASHRAE 55.

Lamentablemente, a diferencia de lo presentado por el modelo racional y adaptativo, la normativa peruana no propone un análisis del confort interno en base a temperaturas operativas interiores y humedades relativas. No obstante, se analizará los valores de la envolvente en la escuela típica con respecto a los valores de transmitancia térmica máxima para la zona bioclimática Mesoandina. En la figura 4.8 se aprecia que la transmitancia térmica máxima es incumplida únicamente en el caso del techo del primer nivel.

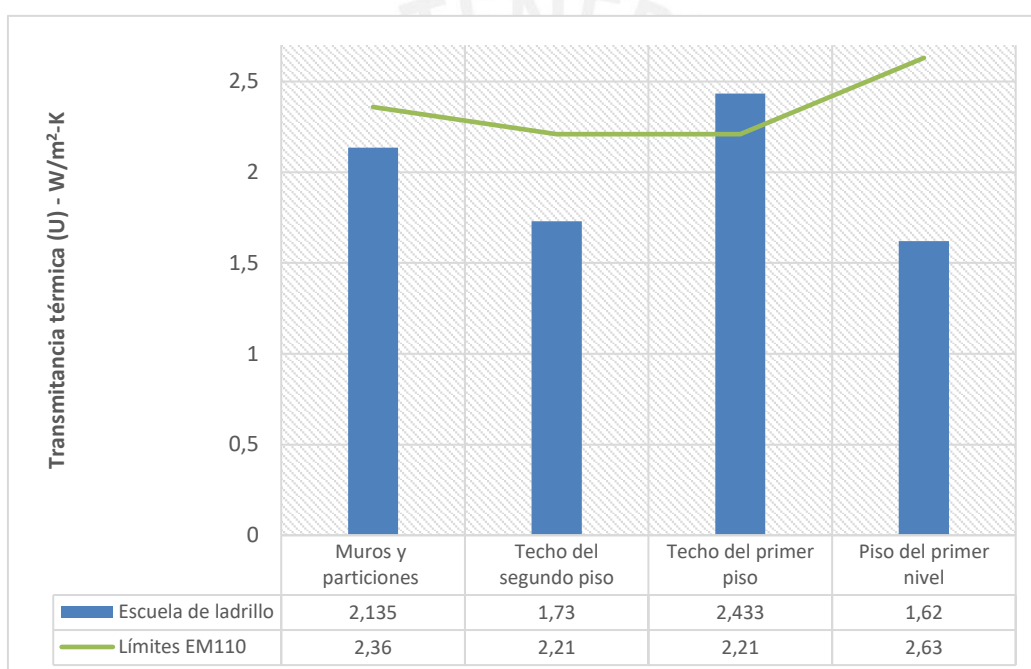


Figura 4.8: Evaluación del confort según EM110- Caso práctico

#### 4.2.2. Análisis en caso bioclimático

En la figura 4.9, se aprecia las temperaturas operativas y humedades relativas para las aulas modeladas con estrategias bioclimáticas. Se aprecia que el 93% de las temperaturas se encuentran dentro de los rangos del confort. Esto sugiere que los estudiantes experimentarán comodidad térmica y serán más susceptibles a mantener la atención y enfocarse en el aprendizaje. Además, en la Figura 4.10 se analizan los resultados según el método gráfico de la norma ASHRAE 55. En concordancia con lo evaluado con la norma ISO 7730, el 87% de las temperaturas y humedades relativas se encuentran dentro de la zona de confort.

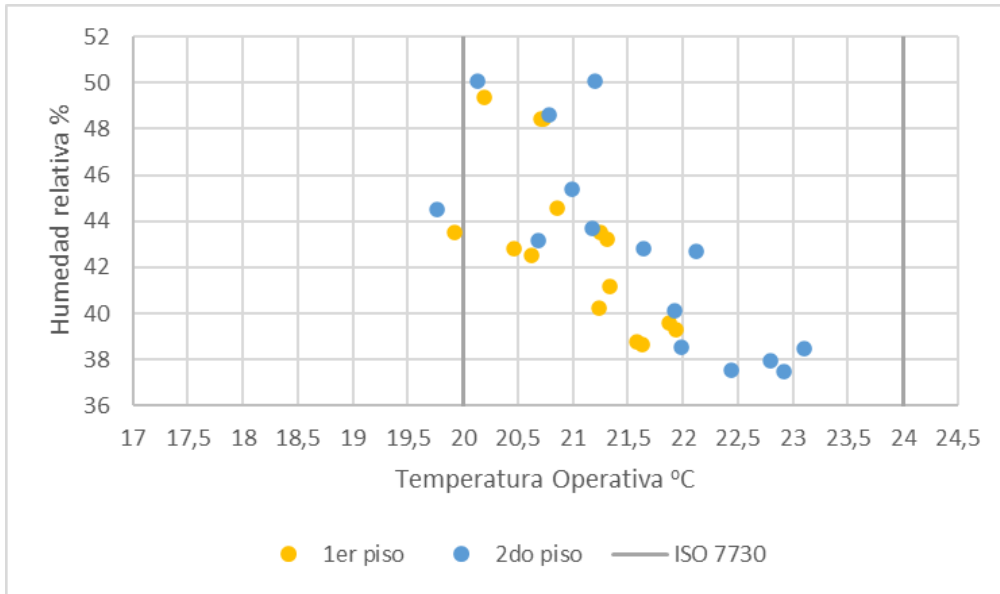


Figura 4.9: Evaluación del confort según ISO 7730- Caso bioclimático

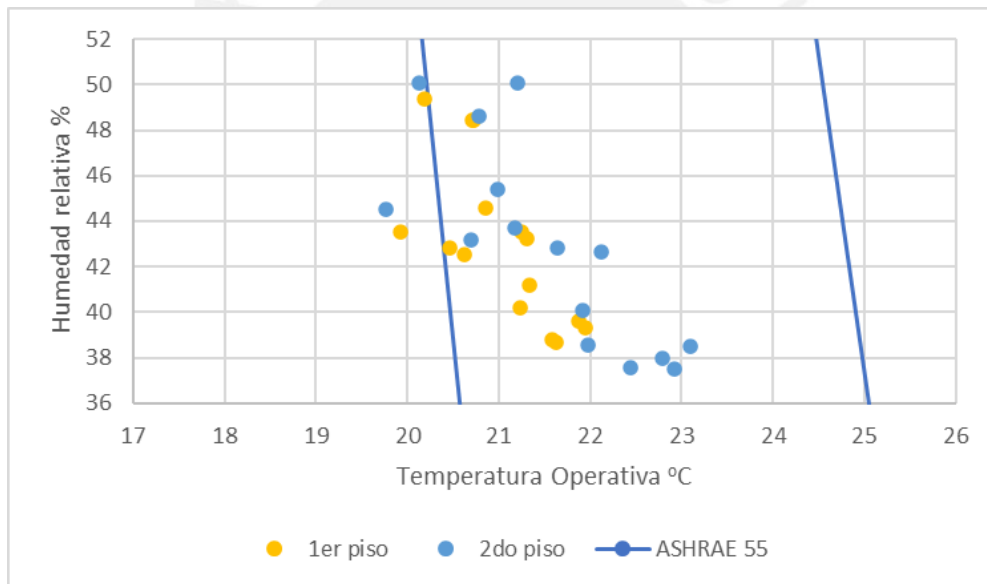


Figura 4.10: Evaluación del confort según ASHRAE 55- Caso bioclimático

En la Figura 4.11, se analizan los resultados según el método adaptativo de la norma ASHRAE 55. Se aprecia como los rangos de confort se modifican en comparación con lo propuesto por los modelos racionales. En base a estos nuevos límites, se aprecia que 100% de los resultados se encuentran dentro del rango del confort. Esto sugiere una mejora significativa con respecto al 93% y 87% presentados bajo el modelo racional presentado por la ISO 7730 y la ASHRAE 55.

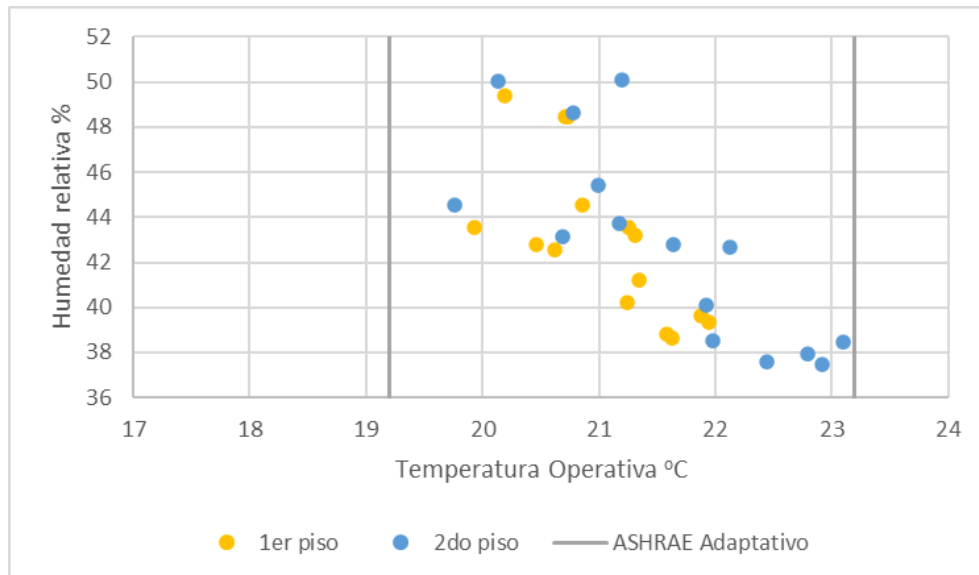


Figura 4.11: Evaluación del confort según ASHRAE 55- Caso bioclimático

Lamentablemente, a diferencia de lo presentado por el modelo racional y adaptativo, la normativa peruana no propone un análisis del confort interno en base a temperaturas operativas interiores y humedades relativas. No obstante, se analizará los valores de la envolvente en la escuela típica con respecto a los valores de transmitancia térmica máxima para la zona bioclimática Mesoandina. En la figura 4.12 se aprecia que la transmitancia térmica máxima es cumplida en el caso de muros, techos y pisos conforme a lo estipulado en la norma EM 110.

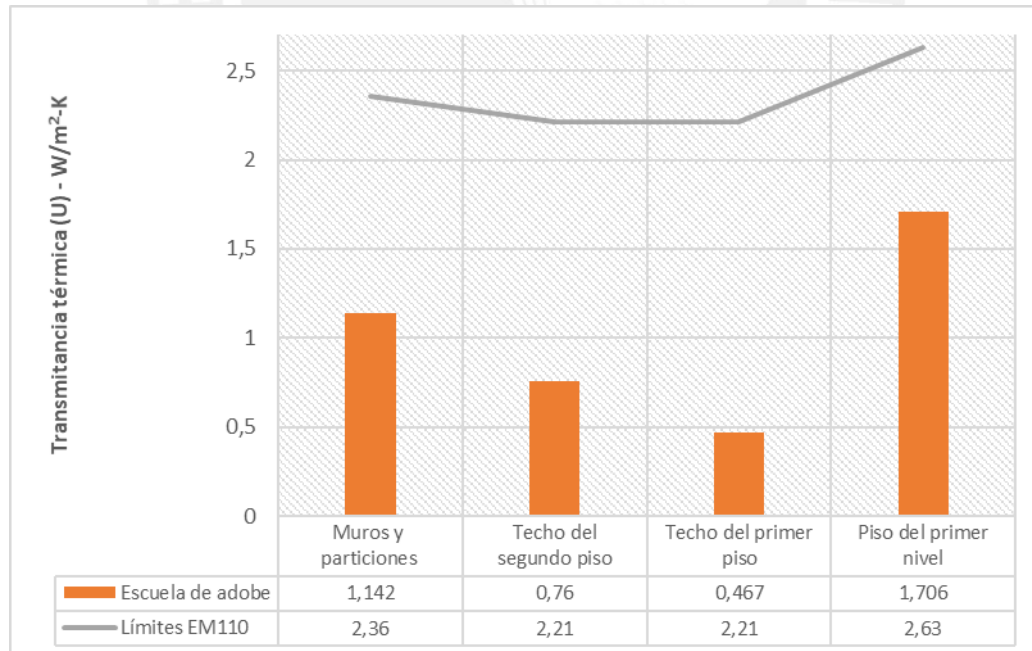


Figura 4.12: Evaluación del confort según EM110- Caso bioclimático

Finalmente, se presenta la figura 4.13 que resume el cumplimiento del confort interno bajo las diferentes normativas expuestas. Se aprecia claramente que el implementar estrategias bioclimáticas mejora las condiciones de confort térmico indistintamente del enfoque racional o adaptativo, se presentan mejoras del 23% al 93% para el análisis del confort por medio de la ISO 7730, mejoras del 20% al 87% desde el enfoque racional de la ASHRAE 55 y, finalmente, mejoras del 53% al 100% para el enfoque adaptativo de la ASHRAE 55. En conclusión, se obtuvo una significativa mejora del confort interno en la escuela al implementar las estrategias bioclimáticas sugeridas por los autores.

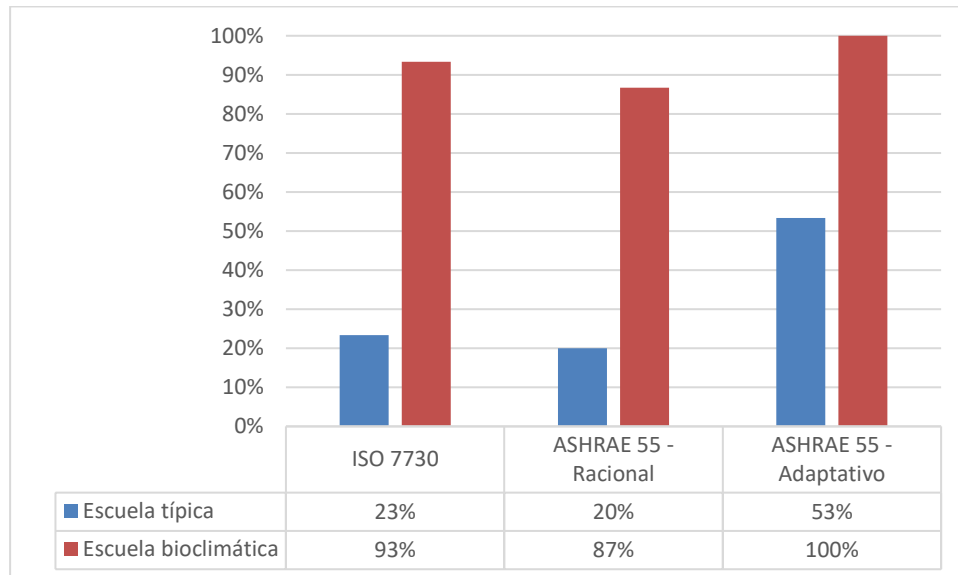


Figura 4.13: Análisis del confort interno en escuelas modeladas

## 5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

### 5.1. Conclusiones

De la evaluación realizada al caso práctico, se concluye que los ocupantes de los ambientes de clase analizados experimentan un *discomfort* en las horas de clase durante los meses de invierno. Por consiguiente, se sabe que la temperatura para la mayoría de los salones se encuentra bajo el límite inferior permitido y conlleva a sensación de frío en los usuarios. Asimismo, es importante recalcar que el permanecer fuera del rango de confort conlleva a una baja en la productividad, desconcentración, dolor de cabeza y ausentismo. Esto implica, a nivel pedagógico, que el rendimiento de los estudiantes se vea afectado a causa de la calidad de ambiente que frecuentan diariamente.

Se concluye que el planteamiento bioclimático de la escuela tuvo un impacto positivo en las condiciones de confort de las aulas. En consecuencia, las temperaturas internas de las aulas estudiadas se encuentran dentro de los rangos de confort establecidos en la normativa internacional. Además, no obstante, se aplique el modelo racional o adaptativo, se satisfacen los requerimientos de confort para el marco teórico presentado. El contar con un ambiente térmico cómodo y de bienestar contribuye al aprendizaje dentro de edificios educativos.

Se concluye que el clima presentado en la ciudad de Cusco presenta condiciones favorables para aplicar sencillas estrategias de diseño bioclimático que conduzcan a niveles de confort aceptables, ergo, se promueva un ambiente interior sano y de calidad. Las características climáticas favorecen al territorio peruano, se cuenta con recorridos solares similares durante todo el año y variaciones estacionales muy leves; además, solo en casos particulares se presentan climas extremos. Asimismo, se afirma que las estrategias implementadas: orientación, manipulación de masa térmica y hermeticidad, fueron las adecuadas pues contribuyeron a elevar la temperatura interna dentro de los ambientes interiores.

Se promueve mayor coordinación con respecto a los datos recopilados por las estaciones de SENAMHI para con los desarrolladores de programas de cómputo dado que esto contribuye a que exista información meteorológica disponible en las distintas regiones de nuestro país y se pueda realizar este tipo de simulación térmica desde la concepción de los proyectos. Además, el Perú cuenta con 80% de climas mundiales, el diseñar con el clima es una propuesta realista que debería ser incentivada en base a los beneficios que representa.

Se concluye que utilizar materiales locales de la región tales como la piedra, el adobe y madera aporta a la sostenibilidad de la localidad y su utilización es conveniente en comparación a materiales más comerciales como el caso del concreto o albañilería. En la presente tesis, no se ha considerado un análisis económico pero se presume que la alternativa mencionada puede resultar inclusive mucho más económica, funcional y constructivamente sencilla que el utilizar los segundos materiales en cuestión. No obstante, el aplicar este modelo teórico debe ser complementado con un análisis de reforzamiento estructural, capacitación en métodos constructivos y un enfoque social de transferencia de conocimiento.

Se concluye que el programa computacional “Design Builder” cuenta con las herramientas de cálculo necesarias para poder realizar este tipo de simulación térmica en edificaciones; resulta una herramienta confiable que ha sido validada académicamente por otros grupos de investigación. La predicción térmica debe ser complementada con

estudios de sitio a fin de calibrar y mejorar constantemente la confiabilidad de los resultados.

Se concluye que analizar el confort interno desde el enfoque racional y adaptativo no presenta una variación significativa a la hora de interpretar los resultados. Asimismo, se alienta la actualización de la norma técnica "E110. Confort térmico y lumínico" dado que en el desarrollo de esta tesis se comprobó que la información que proveen para los materiales resulta incompleta y existen vacíos en su base teórica; es decir, no amplían respecto a la información que sustenta lo que se afirma.

Finalmente, se reconoce que en nuestro país existe una deuda con respecto a la calidad de vida de los pobladores rurales y es nuestro deber el poder proveerlos de escuelas y viviendas dignas para que se desarrollen de forma holística. El invertir en investigaciones que apoyen el desarrollo del sector rural, es invertir en la descentralización de nuestro país, se recuerda que la educación es la inversión más rentable en toda nación.

## **5.2 Mejoras**

En la simulación realizada se obtuvieron resultados teóricos para la evaluación del caso de estudio, sería ideal el poder realizar estas mediciones de forma práctica para poder comprobar una vez más la precisión del programa con respecto a la realidad. En la simulación no se ha realizado un análisis detallado del confort lumínico dentro de la edificación, análisis que puede ser realizado con ayuda del programa utilizado. Se presume que de realizarlo se podría limitar el uso de las luminarias y hacer de la edificación más eficiente en términos energéticos. Asimismo, al contarse con los niveles de radiación en las superficies, se puede realizar el dimensionamiento de paneles fotovoltaicos que abastezcan de energía a la edificación y de esta manera volverla auto sostenible en términos energéticos.

Además, debe hacerse mención que en el desarrollo del modelo no se ha tomado en cuenta el análisis estructural de la escuela existente o de aquella con las modificaciones del diseño bioclimático. Se reconoce que nuestro país se encuentra en una zona de alta sismicidad por lo que alternativas de reforzamiento deben ser implementadas a fin de hacer que la escuela bioclimática no solo sea confortable y saludable en niveles de calidad de aire, sino también segura para los usuarios.

## **5.3 Comentarios finales**

Para finalizar, se busca hacer una reflexión acerca de la concepción de los proyectos para su etapa de uso y mantenimiento, con miras al confort de los usuarios finales. También, se anima a revalorar, promover e investigar las antiguas formas de diseño y construcción que antiguas civilizaciones en nuestro país practicaban dado que estas implican prácticas bioclimáticas que promueven el confort y bienestar de las personas, así como la sostenibilidad de las edificaciones. Además, en el caso de las escuelas, no se trata de brindarles a las personas el mismo servicio sino el servicio que requieren. De esta manera, con el desarrollo de esta tesis, se busca brindar a los estudiantes ambientes que tomen en cuenta las condiciones geográficas, climáticas y culturales en donde viven; allí es donde podrán estudiar con empeño, en confort y felices. Un país desarrollado tiene sus cimientos en educación de calidad que es brindada en infraestructura de calidad.

## 6. REFERENCIAS

Yuval Noah Harari. Sapiens. De animales a dioses: Breve historia de la humanidad. Barcelona, Editorial Debate, 2015, 496 págs.

ALLEN, Edward. "El concepto de refugio". Cómo funciona un edificio. Principios Elementales. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1997, pp. 33-37.

Raish, J. (2003). Thermal comfort: Designing for people. Lang, W., McClain, A., Eds.

VITRUBIO, Marco Lucio; Los diez libros de arquitectura. Editorial Iberia. Barcelona, 1997. Página 140-141.

Binggeli, Corky. Building Systems for Interior Designers. John Wiley and Sons, 2003; p.125

Levy, Joel. Really Useful: The Origins of Everyday Things. Firefly Books, 2003; p.120

JIMENEZ DIANDERAS, Cecilia (1984)  
Diseño bioclimático en la ciudad de Cusco. Lima. Universidad Ricardo Palma.

González, J. T. (2017). La arquitectura sin arquitectos, algunas reflexiones sobre arquitectura vernácula. AUS [Arquitectura/Urbanismo/Sustentabilidad], (8), 12-15.

PONS, Juan Felipe; RUBIO, Ivan (2019)  
Lean Construction y la planificación colaborativa. Madrid. Consejo General de la Arquitectura Técnica de España.

Air Conditioning and Refrigeration Timeline. Available at:  
<http://www.greatachievements.org/?id=3854>

United Nations, (1987) Our Common Future - Brundtland Report. Oxford University Press, p. 204.

WIESER, Martín. "La disciplina de la arquitectura y el reto de la sostenibilidad". En: Revista Arquitectos. Lima: FAU-URP, 2008, N° 23, pp. 42-51.

OLGYAY, Victor. "Entorno y formas edificatorias". Arquitectura y clima. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2008, pp. 84-93.

GIVONI, Baruch; Climate considerations in building and urban design. Van Nostrand Reinhold. New York, 1998

FANGER, P.O, OSTERGAARD, J., OLESEN, O. and MADSEN, Th , Lund (1974): The effect on man's comfort of a uniform air flow from different directions, ASHRAE Transactions, vol.80 ,2, pp.142-157

De Dear, R. et al., 1998. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference.

ASHRAE Transactions, 104(March), pp.145-167. Available at:  
<http://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6.pdf> [Accessed February 8, 2012].

Overview of Member States information on NZEBS, 2014. ECOFYS 2014.

Benefits of Green Building | U.S. Green Building Council. (2016). Retrieved April 23, 2020, from <http://www.usgbc.org/articles/green-building-facts>

Albañilería Estructural, H. Gallegos. Fondo Editorial PUCP, 1989.

VELARDE, H (1946). Arquitectura peruana. México: Fondo de Cultura Económica.

Kahatt, S. S. (2014). Lima: cinco siglos de orden y caos. Breve recuento de crecimiento y transformación socio-espacial. *rita\_revista indexada de textos académicos*, (2), 38-43.

BLONDET, J. M.; VARGAS, J.; TARQUE, S. N.; IWAKI, C. A.(2011). Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú. *Informes de la Construcción*. Volumen: 63. (pp. 41 - 50). Recuperado de:  
<http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/rt/metadata/1251/1336>

Hadzich, M. (2000). Renewable Energy Projects in Perú. *World Renewable Energy Congress VI*, 1677-1680. doi:10.1016/b978-008043865-8/50348-2

WIESER REY, Martin (2011)  
Consideraciones bioclimáticas en el diseño arquitectónico: El caso peruano. Lima. Ediciones PUCP.

MINISTERIO DE EDUCACIÓN (2008)  
Guía de aplicación de arquitectura bioclimática en locales educativos. Lima. Oficina de infraestructura educativa.

RODRIGUEZ LARRAIN, S.; ALVARIÑO, R. M.; ONNIS, S.; WIESER, M. F.; JIMENEZ, G. C.; MELI, G.; VARGAS, J. H.; SOSA, C. A.(2016). Manual del Promotor Técnico, para la construcción de la vivienda altoandina segura y saludable. LIMA. .... Recuperado de:  
[https://issuu.com/centrotierra/docs/1.\\_manual\\_del\\_promotor\\_t\\_cnico](https://issuu.com/centrotierra/docs/1._manual_del_promotor_t_cnico)

CBCA, BS EN ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment (Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria); 2013.

Hensen JLM. On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system. PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven; 1991

Lin Z, Deng S. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the Subtropics—developing a thermal comfort model for sleeping environments. *Building and Environment* 2008;43:70–80

Macpherson RK, The assessment of the thermal environment—a review. *Br. J. Indust. Med.*, 1962; 19.

Mendell MJ, Heath GA. Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air*2005; 15(1):27–52.

Landrigan, P. J., (1998) Environmental hazards for children in USA. *Int J Occup Med Environ Health*, 11: 189-194.

Djongyang, N., Tchinda, R., & Njomo, D. (2010). Thermal comfort: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2626–2640



Fanger PO. Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press; 1970.

Fänger, P.O. (1982). Thermal Comfort. Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.

Fanger, P. O. (1988). FUNDAMENTALS OF THERMAL COMFORT. Advances In Solar Energy Technology, 3056–3061.

ANSI/ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55 - Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers., Atlanta, GA, USA, 2017.

Hwang RL, Cheng MJ, Lin TP, Ho MC. Thermal perceptions, general adaptation methods and occupants idea about the trade-off between thermal comfort and energy saving in hot humid regions. Building and Environment 2009; 44:1128–34

Nicol JF, Humphreys MA. Thermal comfort as part of a self-regulating system. Building Research and Practice. 1973;6:191-7

De Dear R., Brager G.,ASHRAE RP884-Developing Adaptative Model of Thermal Comfort and Preference, California, USA, 1997.

Orosa, J. A. (2009). Research on general thermal comfort models. European Journal of Scientific Research, 27(2), 217-227.

E.M.110, n. (2014). Norma EM-110 “Confort térmico y lumínico con eficiencia energética”. Lima: el peruano

Zomorodian, Z. S., Tahsildoost, M., & Hafezi, M. (2016). Thermal comfort in educational buildings: A review article. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59, 895–906.

WIESER, Martín. “La disciplina de la arquitectura y el reto de la sostenibilidad”. En: Revista Arquitectos. Lima: FAU-URP, 2008, N° 23, pp. 42-51.

Reynolds, J. (2015). The Roots Of Bioclimatic Design. Design with Climate. doi:10.1515/9781400873685-003

Szokolay SV. Climate analysis based on psychrometric chart. Ambient Energy 1986;7(4):171-81.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)  
Consulta: Junio del 2020  
<http://www.senamhi.gob.pe/>

BLANCO BLASCO, Antonio (2005)  
Las estructuras de los centros educativos en el siglo XX en el Perú. Lima. PUCP.

FE Y ALEGRÍA  
Consulta: Junio del 2020 <http://www.feyalegria.org.pe/>

CENTRO DE ENERGÍAS RENOVABLES Y USO RACIONAL DE ENERGÍA (CERN)  
(2012) Acondicionamiento térmico para edificaciones rurales altoandinas. Tacna. Perú

## 7. Apéndice

### 7.1 Apéndice A : Tablas

Tabla 7.1:

Modelos adaptativos para calcular temperatura operativa

Nicol and Roaf	$T_{m,o} = 17 + 0.38 T_o$
Humphreys	$T_{n,l} = 2.6 + 0.831 T_i$
	$T_{m,o} = 11.9 + 0.534 T_o$
Auliciems	$T_{n,i} = 5.41 + 0.731 T_i$
	$T_{n,o} = 17.6 + 0.31 T_o$
	$T_{n,i,o} = 9.22 + 0.48 t_i + 0.14 T_o$

Fuente: "Research on general comfort models". *European Journal of Scientific Research* (Orosa, 2009)

Tabla 7.2:

Categorías de ambiente térmico

Categoría	Estado térmico del cuerpo en su conjunto	
	PPD %	PMV
A	< 6	$-0,2 < PMV < +0,2$
B	< 10	$-0,5 < PMV < +0,5$
C	< 15	$-0,7 < PMV < +0,7$

Fuente: Adaptado de International Organization for Standardization (ISO7730:2005)

Tabla 7.3:

Ejemplos de criterios de diseño para espacios en varios tipos de edificios

Tipo de edificio/espacio	Actividad W/m <sup>2</sup>	Categoría	Temperatura operativa °C		Máxima velocidad media del aire <sup>a</sup> m/s	
			Verano (época de refrigeración)	Invierno (época de calefacción)	Verano (época de refrigeración)	Invierno (época de calefacción)
Despacho individual	70	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,12	0,10
Oficina diáfana		B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,19	0,16
Sala de conferencias		C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,24	0,21 <sup>b</sup>
Auditórium	81	A	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0	0,11	0,10 <sup>b</sup>
Cafetería / restaurante		B	23,5 ± 2,0	22,0 ± 2,5	0,18	0,15 <sup>b</sup>
Aula		C	23,5 ± 2,5	22,0 ± 3,5	0,23	0,19 <sup>b</sup>
Aula de preescolar	93	A	23,0 ± 1,0	19,0 ± 1,5	0,16	0,13 <sup>b</sup>
		B	23,0 ± 2,0	19,0 ± 3,0	0,20	0,15 <sup>b</sup>
Gran almacén		C	23,0 ± 3,0	19,0 ± 4,0	0,23	0,18 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> La máxima velocidad media del aire está basada en una intensidad de turbulencia del 40% y la temperatura del aire es igual a la temperatura operativa, de acuerdo con 6.2 y con la figura A.2. La humedad relativa considerada es del 60% en verano y del 40% en invierno. Para determinar la máxima velocidad media del aire, en ambas estaciones se toma la temperatura más baja del rango.

<sup>b</sup> Por debajo del límite de 20 °C (véase la figura A.2).

Fuente: Adaptado de International Organization for Standardization (ISO7730:2005)

Tabla 7.4:  
Valores de temperaturas del ambiente interior por tipo de uso en edificaciones

Edificación o local	Temperatura del ambiente interior (T <sub>i</sub> ) en °C
Vivienda	18
Locales de trabajo	18 – 20
Salas de exposiciones	15 – 18
Bibliotecas, archivos	15 – 18
Oficinas	20
Restaurantes	20
Cantinas	18
Grandes almacenes	20
Cines y teatros	20

Zona bioclimática	Transmitancia térmica máxima del muro (U <sub>muro</sub> )	Transmitancia térmica máxima del techo (U <sub>techo</sub> )	Transmitancia térmica máxima del piso (U <sub>piso</sub> )
1. Desértico costero	2,36	2,21	2,63
2. Desértico	3,20	2,20	2,63
3. Interandino bajo	2,36	2,21	2,63
4. Mesoandino	2,36	2,21	2,63
5. Altoandino	1,00	0,83	3,26
6. Nevado	0,99	0,80	3,26
7. Ceja de montaña	2,36	2,20	2,63
8. Subtropical húmedo	3,60	2,20	2,63
9. Tropical húmedo	3,60	2,20	2,63

Fuente: Adaptado de la EM. 110 (2014)

Tabla 7.5:  
Zonas bioclimáticas

Zona	Denominación	Características climáticas	Extensión aproximada
1	Litoral tropical	Cálido húmedo todo el año. Amplitud térmica baja.	Costa litoral norte, desde Paita hasta la frontera.
2	Litoral subtropical	Moderado en temperatura y humedad relativa. Amplitud térmica baja.	Costa litoral, la franja de los primeros 15 km. ó 200 m.s.n.m.
3	Desértico	Cálido seco todo el año. Amplitud térmica media.	Costa entre la zona litoral y los 1000 m.s.n.m.
4	Continental templado	Templado todo el año, mayor humedad en verano. Amplitud térmica media.	Desde los 1000 m.s.n.m. en ambas vertientes de la cordillera. Límite superior coincide con la Región Natural Yunga (2300 m.s.n.m.).
5	Continental frío	Frío y seco todo el año, aunque mayor humedad en verano. Amplitud térmica entre media y alta.	Serranía entre los 2300 y los 3500 m.s.n.m., coincide con la Región Natural de Quechua.
6	Continental muy frío	Muy frío y seco todo el año. Amplitud térmica media y alta.	Serranía alta por encima de los 3500 m.s.n.m., coincide con las Regiones Naturales de Suni, Puna y Janca.
7	Selva tropical alta	Cálido húmedo. Amplitud térmica media con noches frescas.	Selva alta, entre los 500 y los 1000 m.s.n.m., cota que coincide con el límite de la Región Natural de Yunga Fluvial.
8	Selva tropical baja	Cálido húmedo todo el año con noches templadas y amplitud térmica baja.	Selva Baja, por debajo de los 500 m.s.n.m.

## 7.2 Apéndice B : Figuras

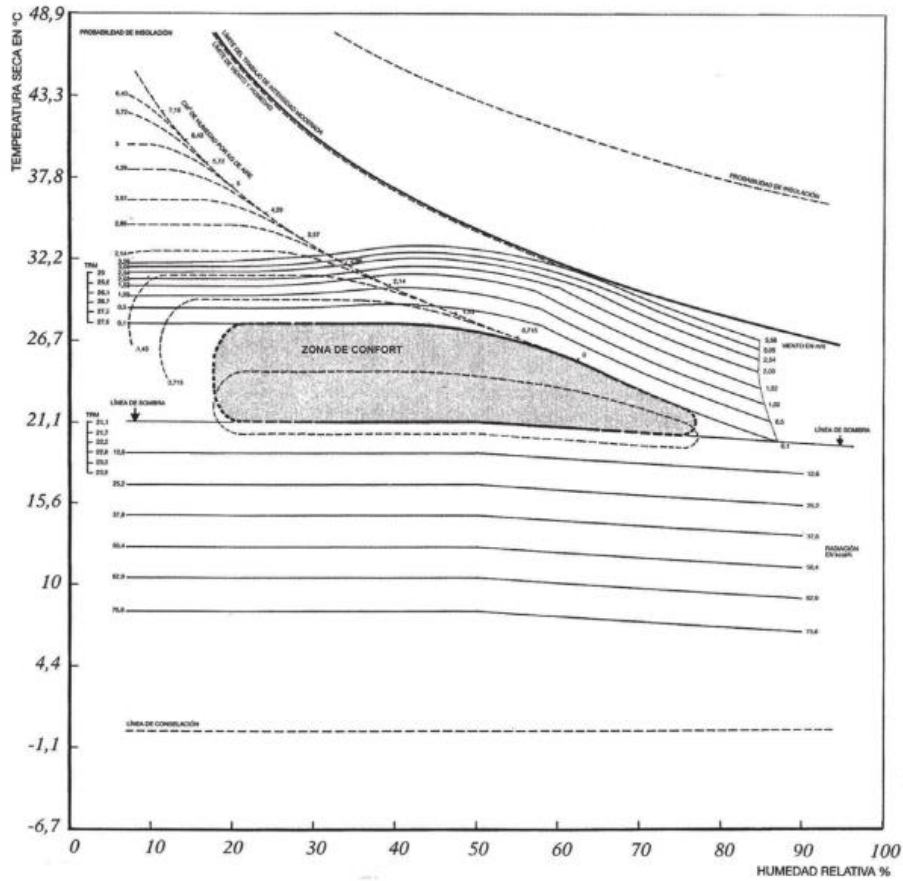


Figura 7.1: Gráfica bioclimática para habitantes de una zona moderada de los Estados Unidos (EE.UU).  
Fuente: (Olgay, 1998).

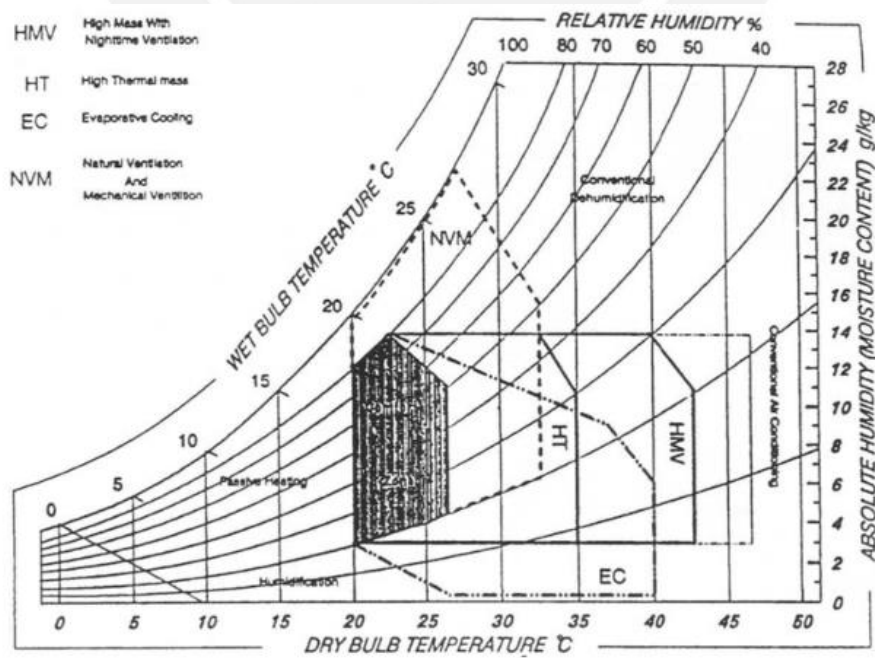


Figura 7.2: Límites para las estrategias e enfriamiento de diseño pasivo para países cálidos en vías de desarrollo.  
Fuente: (Givoni, 1998).

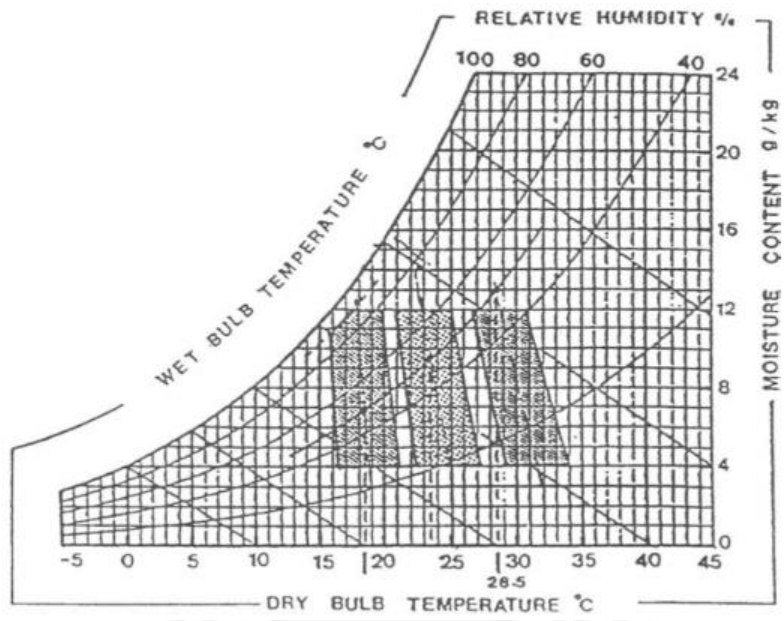
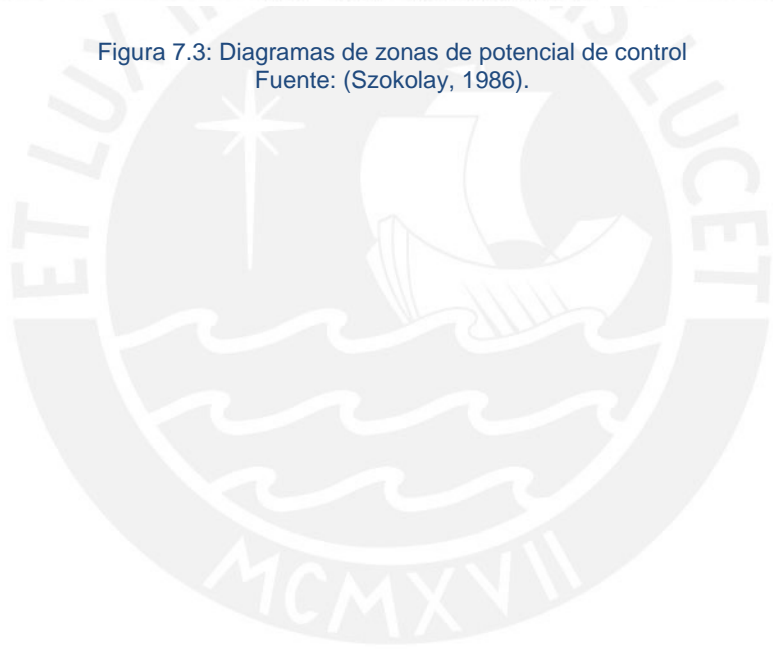


Figura 7.3: Diagramas de zonas de potencial de control  
 Fuente: (Szokolay, 1986).



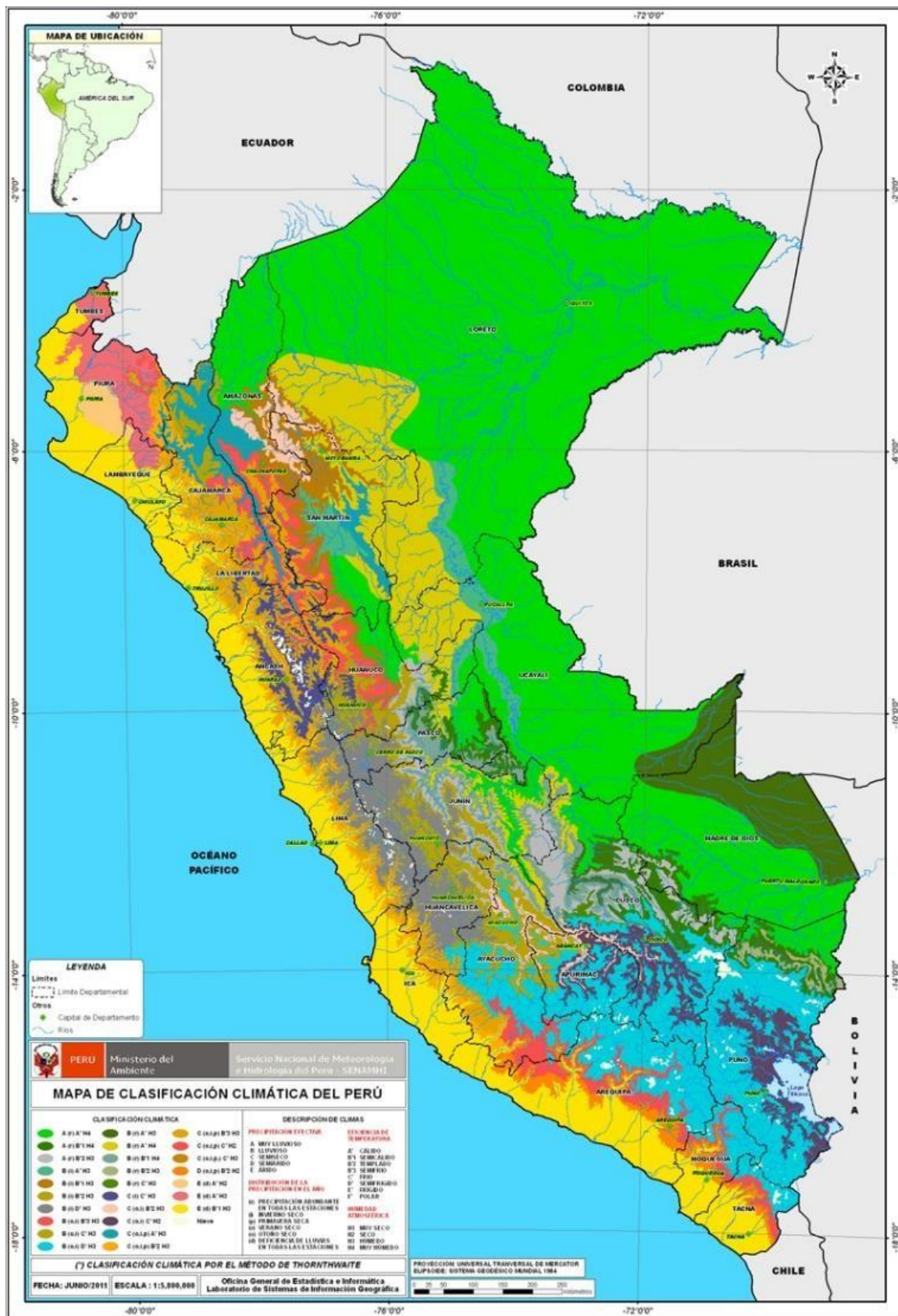
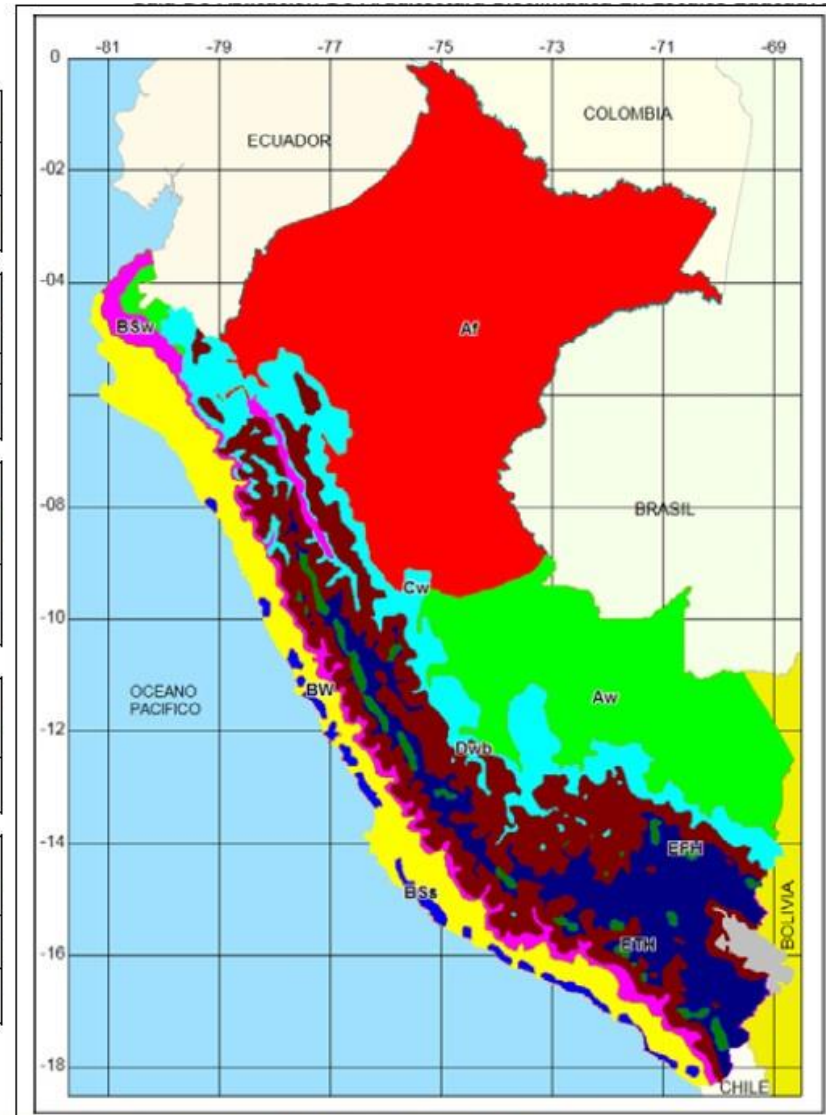


Figura 7.4: Mapa de clasificación climática (Versión Thornthwaite)  
Fuente: SENAMHI

### Climas en el Perú según Köppen

A	Climas lluviosos tropicales	El mes más frío tiene una temperatura superior a los 18 °C
Af	Clima de selva tropical lluviosa	El mes más seco caen más de 60 milímetros. de lluvia
Aw	Clima de sabana tropical	Por lo menos hay un mes en el que caen menos de 60 milímetros. de lluvia
B	Climas de terreno seco (sin precipitaciones)	La evaporación excede las precipitaciones. Siempre hay déficit hídrico
BS	Clima de estepa	Clima árido continental
BW	Clima desértico	Clima árido con precipitaciones anuales inferiores a 400 milímetros. (*)
C	Climas templados y húmedos	Temperatura media del mes más frío es menor de 18 °C y superior a -3 °C y al menos un mes la temperatura media es superior a 10 °C.
Cw	Clima templado húmedo con estación invernal seca	El mes más húmedo del verano es diez veces superior al mes más seco del invierno
D	Climas boreales o de nieve y bosque	La temperatura media del mes más frío es inferior a -3 °C y la del mes más cálido superior a 10 °C
Dw	Climas boreales o de nieve y bosque con inviernos secos	Con una estación seca en invierno
E	Climas polares o de nieve	La temperatura media del mes más cálido es inferior a 10 °C y superior a 0 °C
ET	Clima de tundra	Temperatura media del mes más cálido es inferior a 10 °C y superior a 0 °C
EF	Clima de los hielos polares	La temperatura media del mes más cálido es inferior a 0 °C

### MAPA DE CLASIFICACION CLIMATICA



(\*) Las precipitaciones se miden según el espesor de la lámina de agua que se forma en una superficie plana. Medida en milímetros (mm).

Figura 7.5: Mapa de clasificación climática (Versión Köppen) Fuente: SENAMI

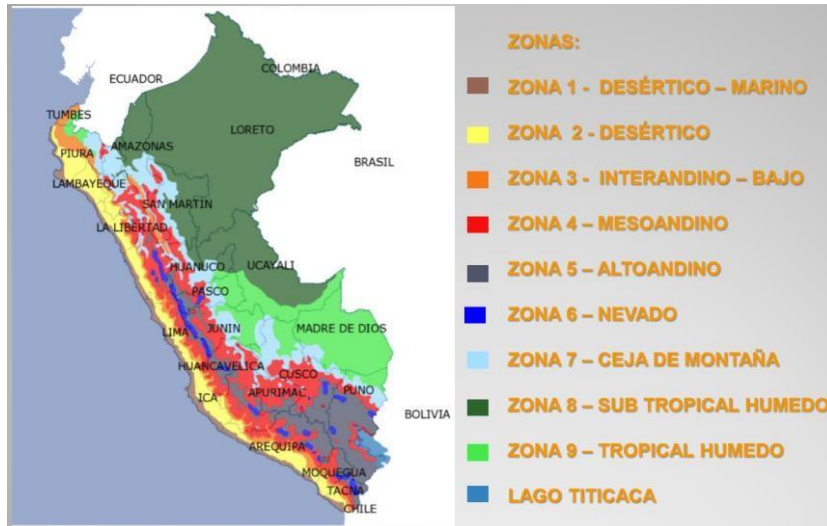


Figura 7.6: Zonas de diseño bioclimático. Fuente: Oficina de infraestructura educativa (2008). *Guía de aplicación de arquitectura bioclimática en locales educativos.*, Ministerio de Educación, Lima, Perú.





## 7.3 Apéndice C : Resultados Design Builder

### 7.3.1. Resultados de caso práctico

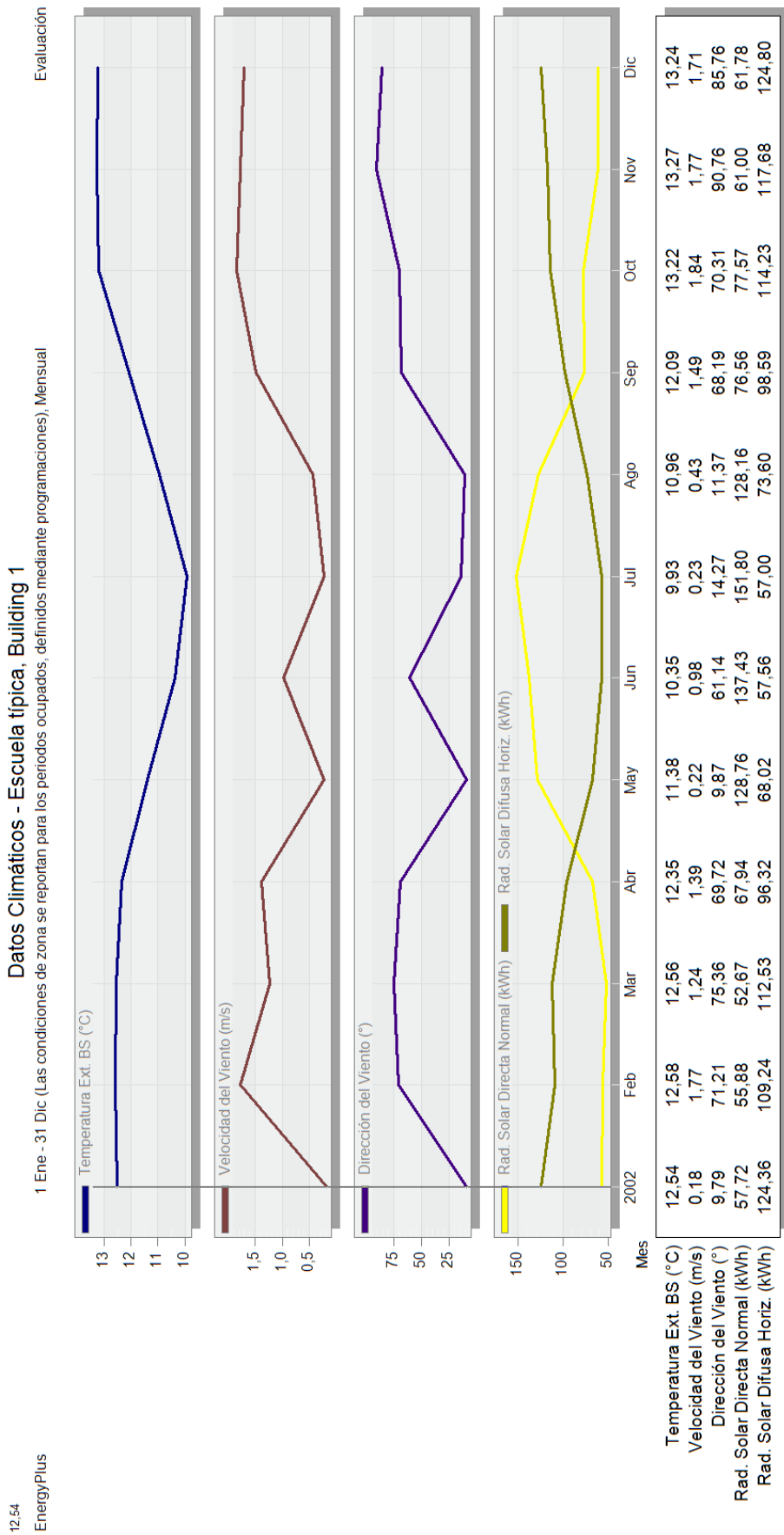


Figura 7.7: Datos del emplazamiento

**Result - 1er piso, Aula 1**

17 May - 23 May (Las condiciones de zona se reportan para los periodos ocupados, definidos mediante programaciones), Diario

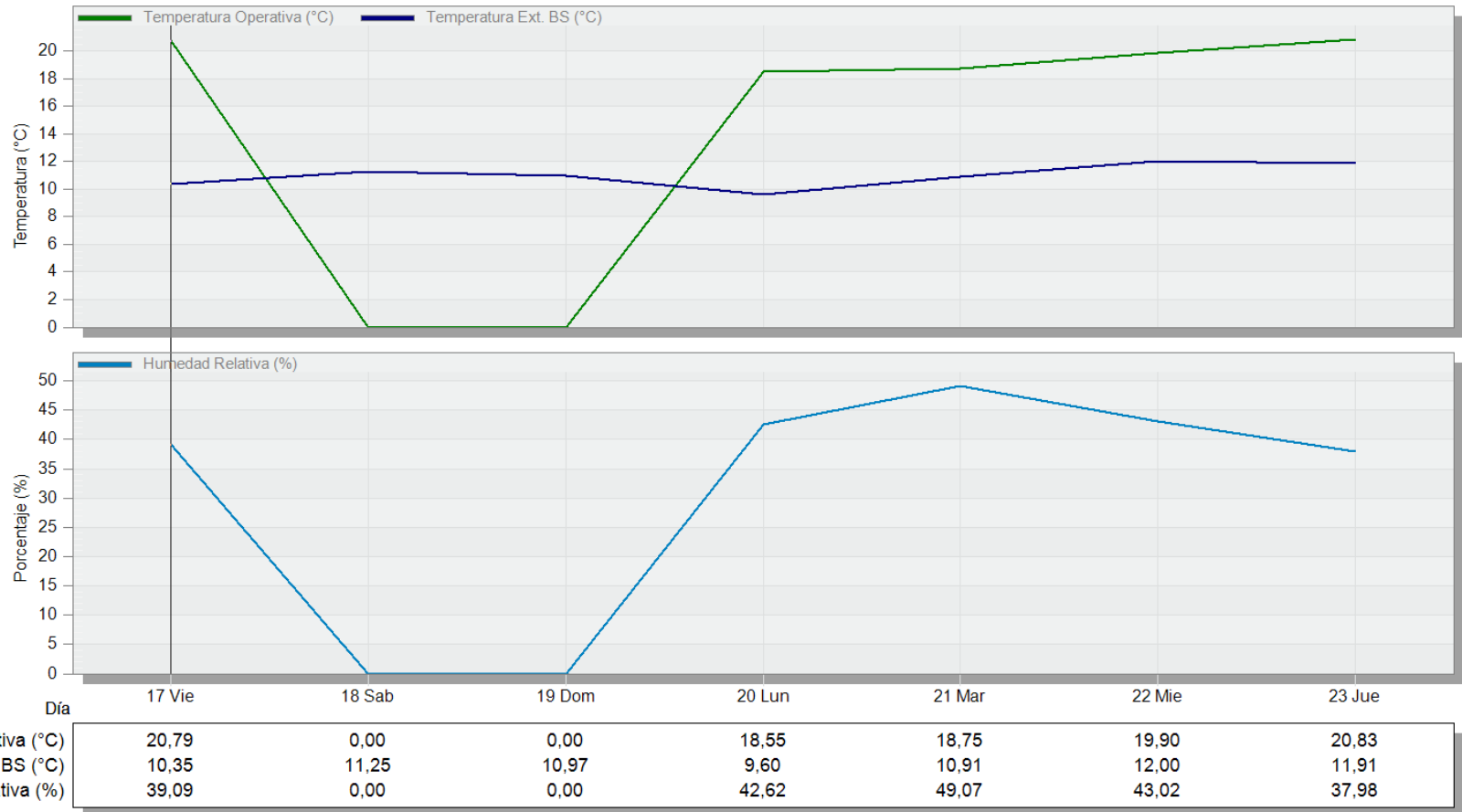


Figura 7.8: Resultados de semana de diseño en invierno-  
1er piso- Aula 1

**Result - 1er piso, Aula 2**

17 May - 23 May (Las condiciones de zona se reportan para los periodos ocupados, definidos mediante programaciones), Diario

Evaluación

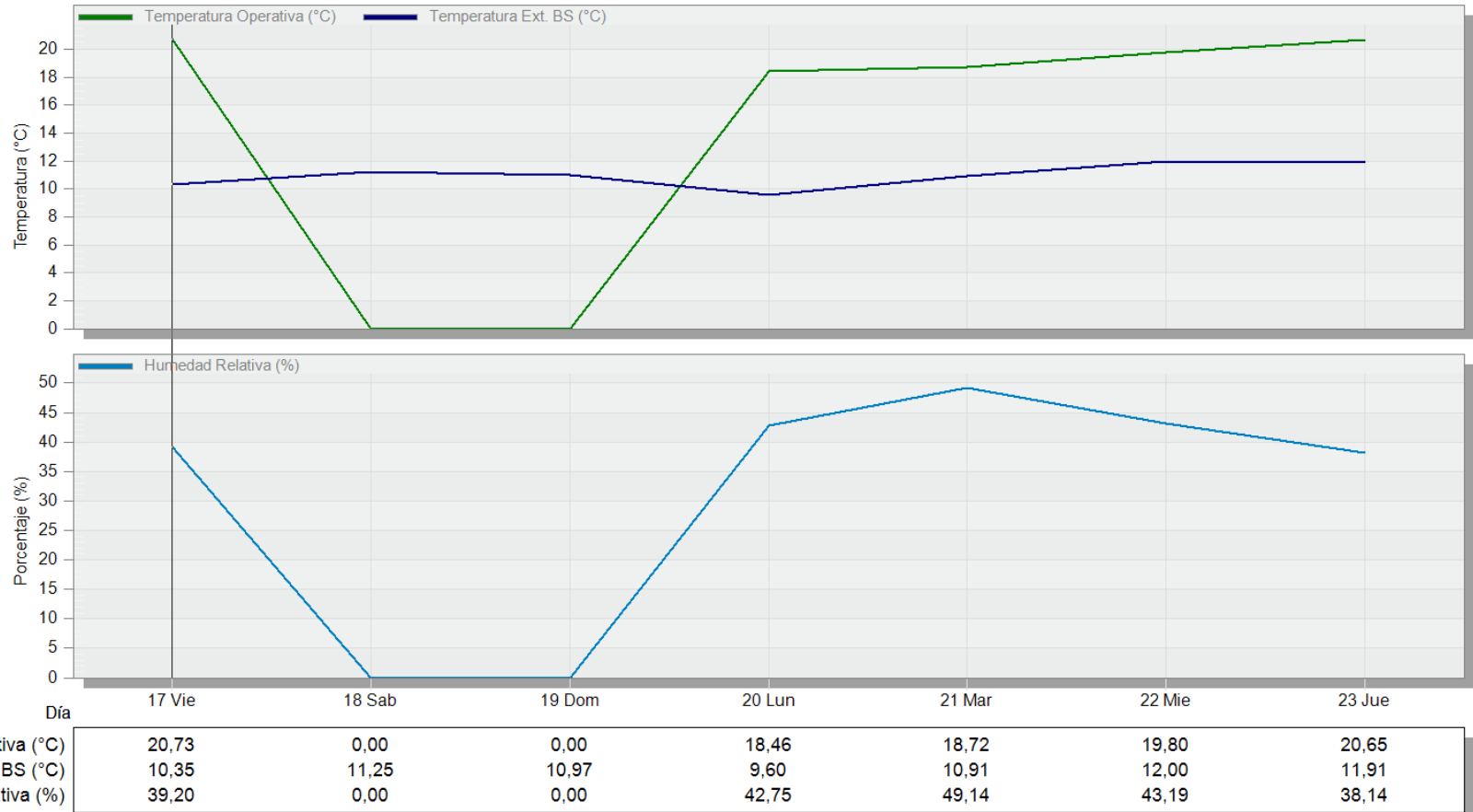
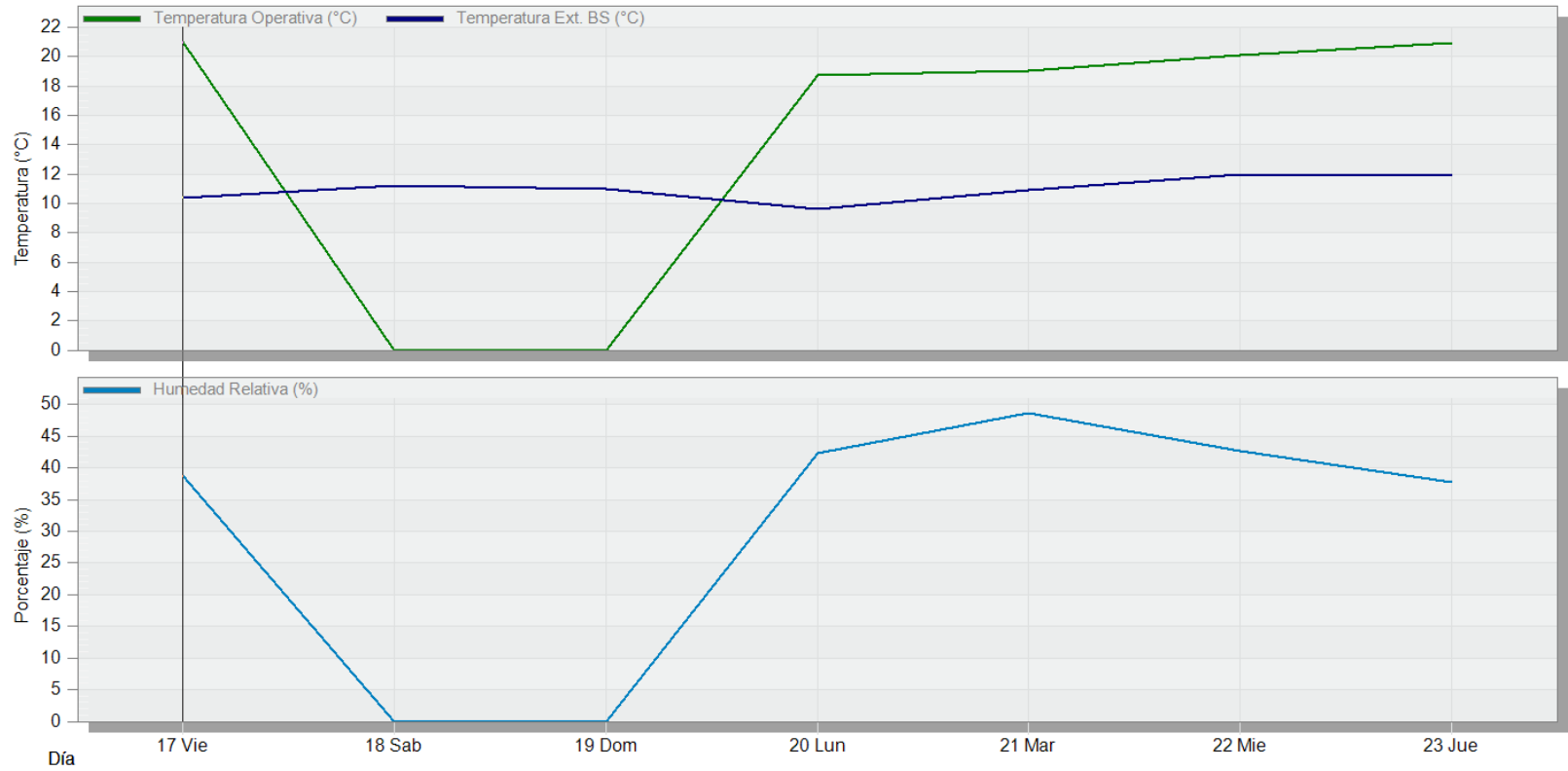


Figura 7.9: Resultados de semana de diseño en invierno  
1er piso- Aula 2

**Result - 1er piso, Aula 3**

17 May - 23 May (Las condiciones de zona se reportan para los periodos ocupados, definidos mediante programaciones), Diario

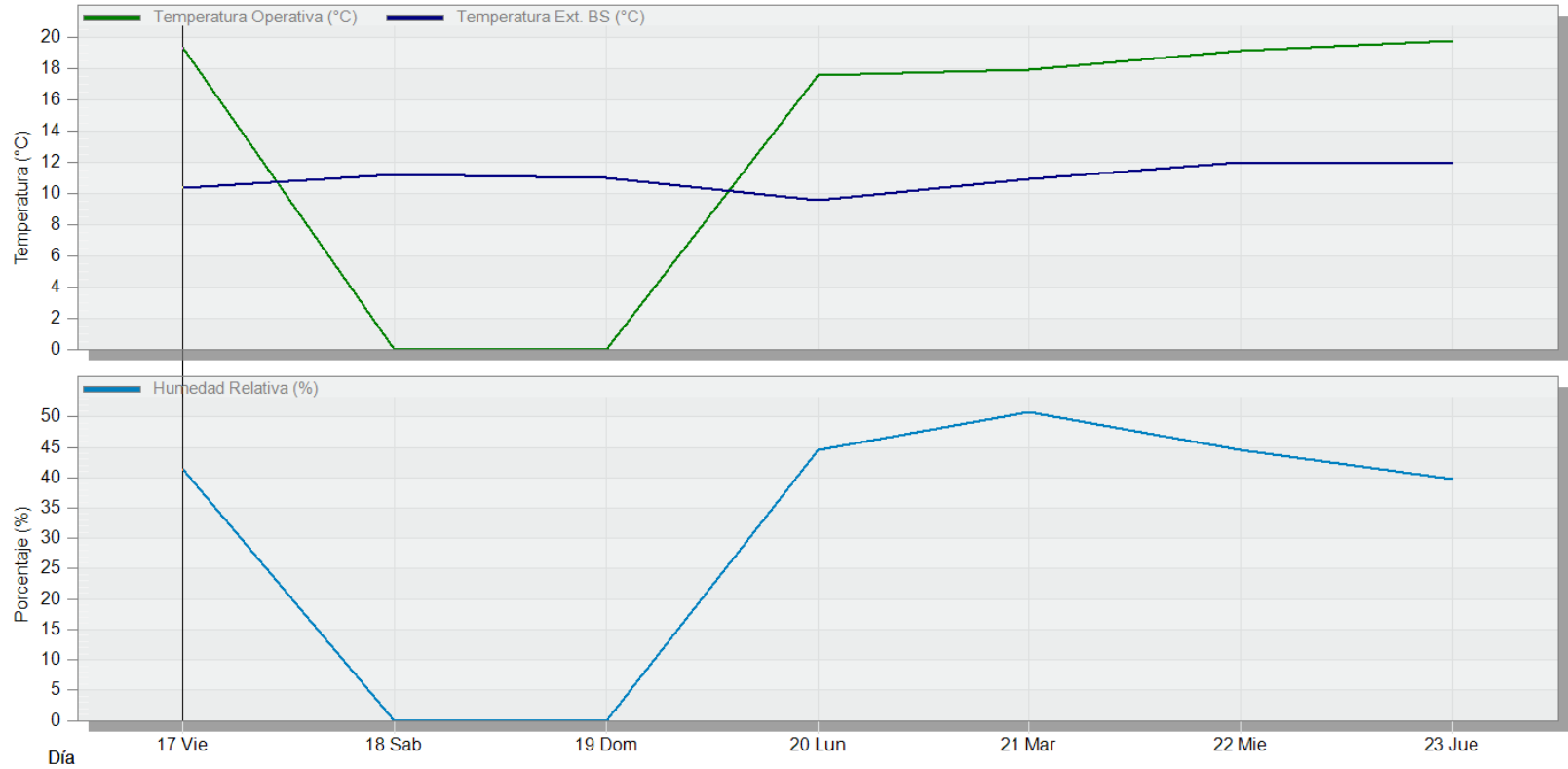


Día	17 Vie	18 Sab	19 Dom	20 Lun	21 Mar	22 Mie	23 Jun
Temperatura Operativa (°C)	20,99	0,00	0,00	18,71	19,01	20,08	20,96
Temperatura Ext. BS (°C)	10,35	11,25	10,97	9,60	10,91	12,00	11,91
Humedad Relativa (%)	38,84	0,00	0,00	42,38	48,61	42,70	37,68

Figura 7.10: Resultados de semana de diseño en invierno  
1er piso- Aula 3

**Result - 2do piso, Aula 1**

17 May - 23 May (Las condiciones de zona se reportan para los periodos ocupados, definidos mediante programaciones), Diario



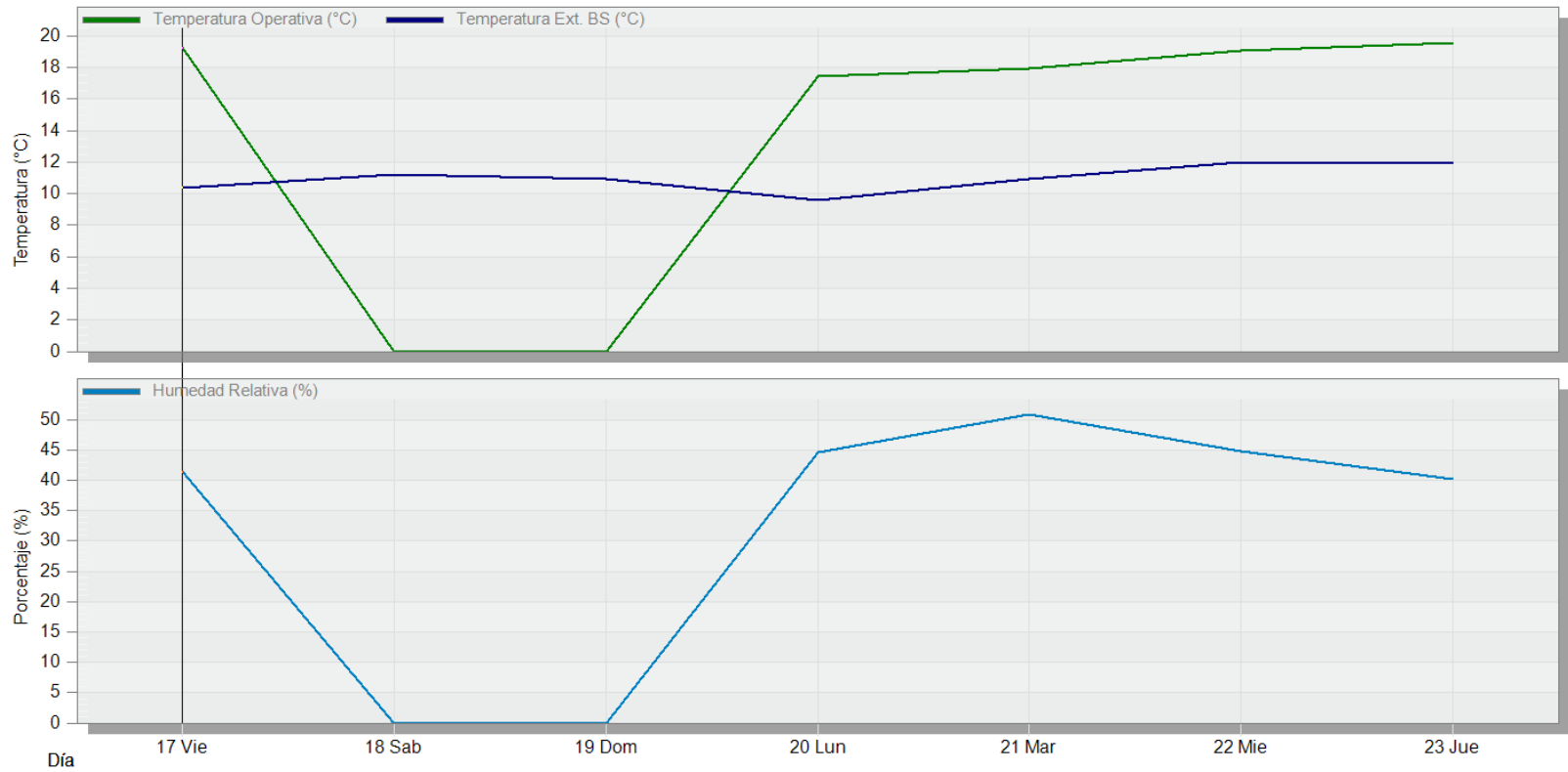
Día	17 Vie	18 Sab	19 Dom	20 Lun	21 Mar	22 Mie	23 Jun
Temperatura Operativa (°C)	19,38	0,00	0,00	17,56	17,96	19,19	19,79
Temperatura Ext. BS (°C)	10,35	11,25	10,97	9,60	10,91	12,00	11,91
Humedad Relativa (%)	41,37	0,00	0,00	44,48	50,75	44,61	39,83

Figura 7.11: Resultados de semana de diseño en invierno  
2do piso- Aula 1

### Result - 2do piso, Aula 2

17 May - 23 May (Las condiciones de zona se reportan para los periodos ocupados, definidos mediante programaciones), Diario

Evaluación

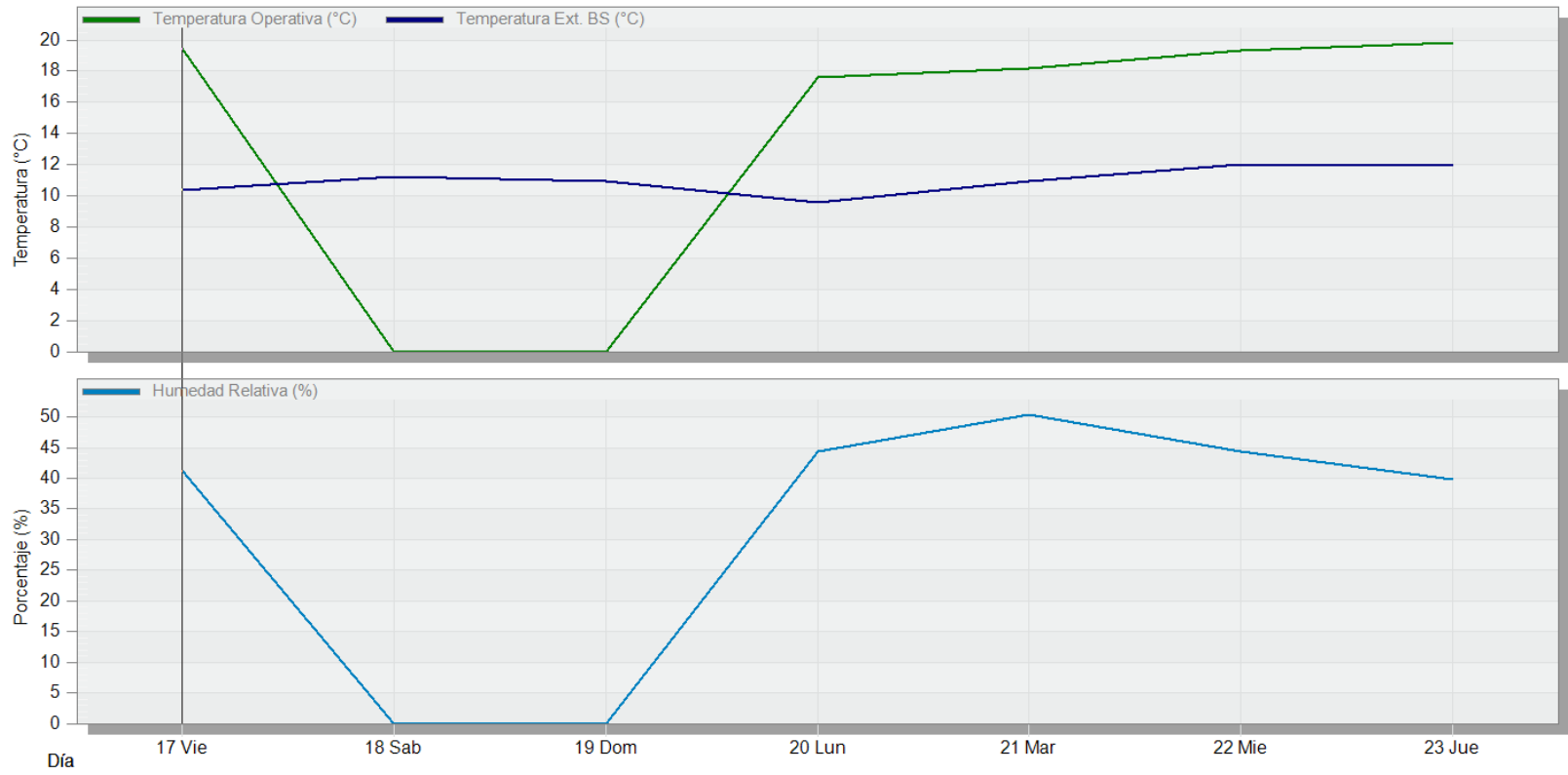


Día	17 Vie	18 Sab	19 Dom	20 Lun	21 Mar	22 Mie	23 Jun
Temperatura Operativa (°C)	19,28	0,00	0,00	17,44	17,92	19,05	19,55
Temperatura Ext. BS (°C)	10,35	11,25	10,97	9,60	10,91	12,00	11,91
Humedad Relativa (%)	41,50	0,00	0,00	44,66	50,83	44,82	40,22

Figura 7.12: Resultados de semana de diseño en invierno  
2do piso- Aula 2

Result - 2do piso, Aula 3

17 May - 23 May (Las condiciones de zona se reportan para los periodos ocupados, definidos mediante programaciones), Diario



Día	17 Vie	18 Sab	19 Dom	20 Lun	21 Mar	22 Mie	23 Jue
Temperatura Operativa (°C)	19,47	0,00	0,00	17,64	18,18	19,30	19,80
Temperatura Ext. BS (°C)	10,35	11,25	10,97	9,60	10,91	12,00	11,91
Humedad Relativa (%)	41,21	0,00	0,00	44,35	50,33	44,40	39,78

Figura 7.13: Resultados de semana de diseño en invierno  
2do piso- Aula 3

## 7.2.2 Resultados de caso bioclimático

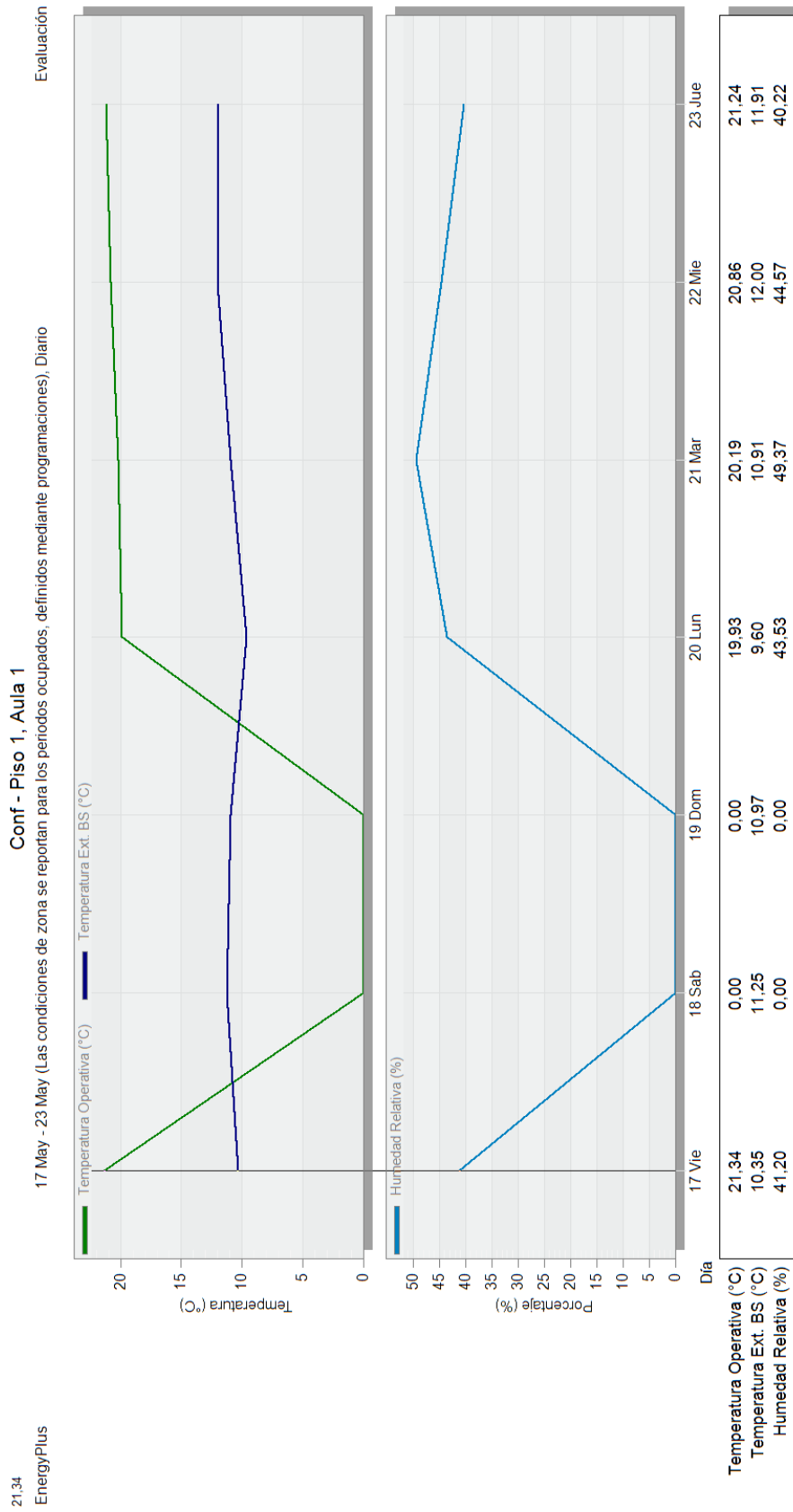


Figura 7.14: Resultados de semana de diseño en invierno  
1er piso – Aula 1



Conf - Piso 1, Aula 2

17 May - 23 May (Las condiciones de zona se reportan para los periodos ocupados, definidos mediante programaciones), Diario

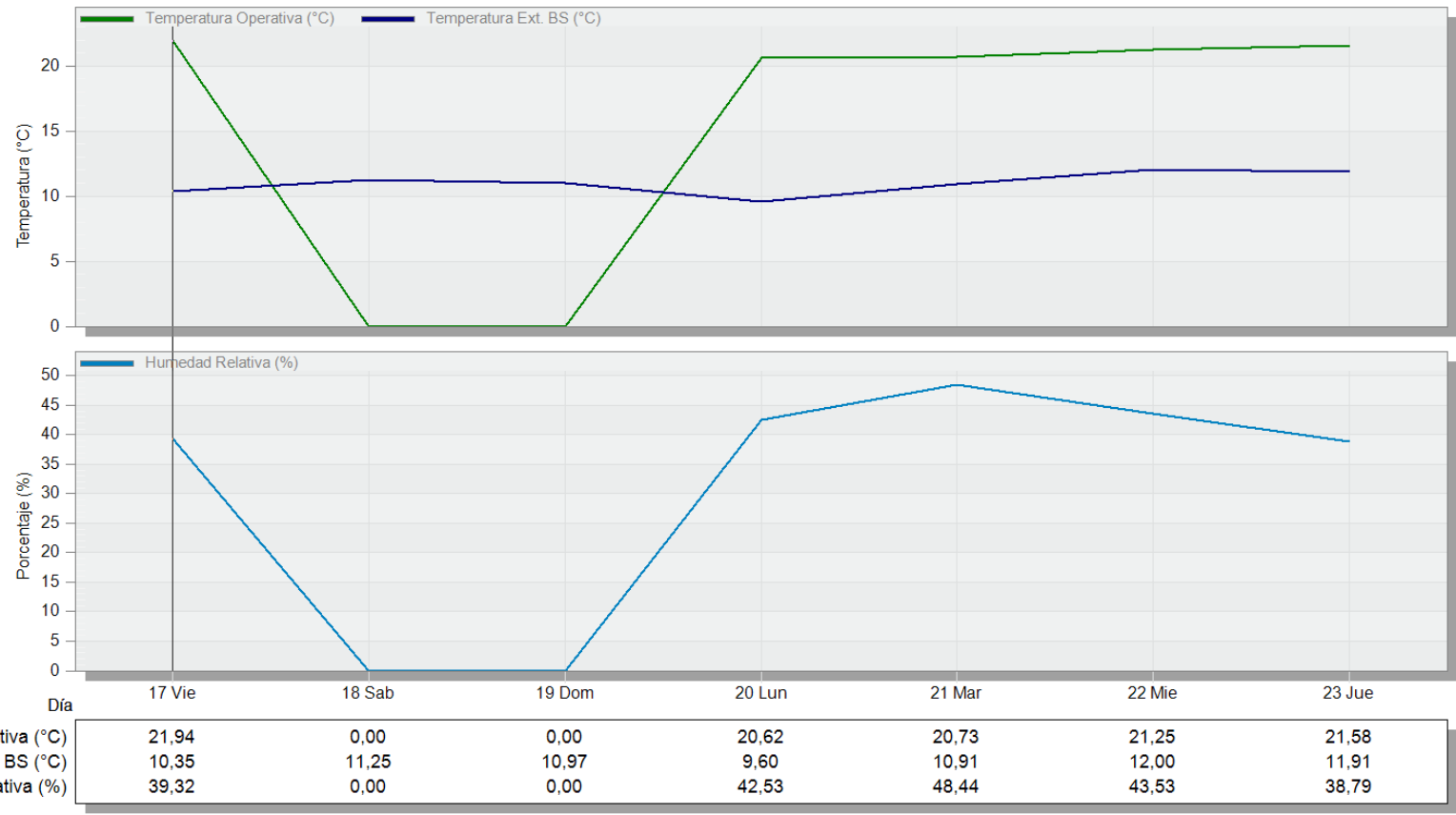


Figura 7.15: Resultados de semana de diseño en invierno  
1er piso – Aula 2

Conf - Piso 1, Aula 3

17 May - 23 May (Las condiciones de zona se reportan para los periodos ocupados, definidos mediante programaciones), Diario

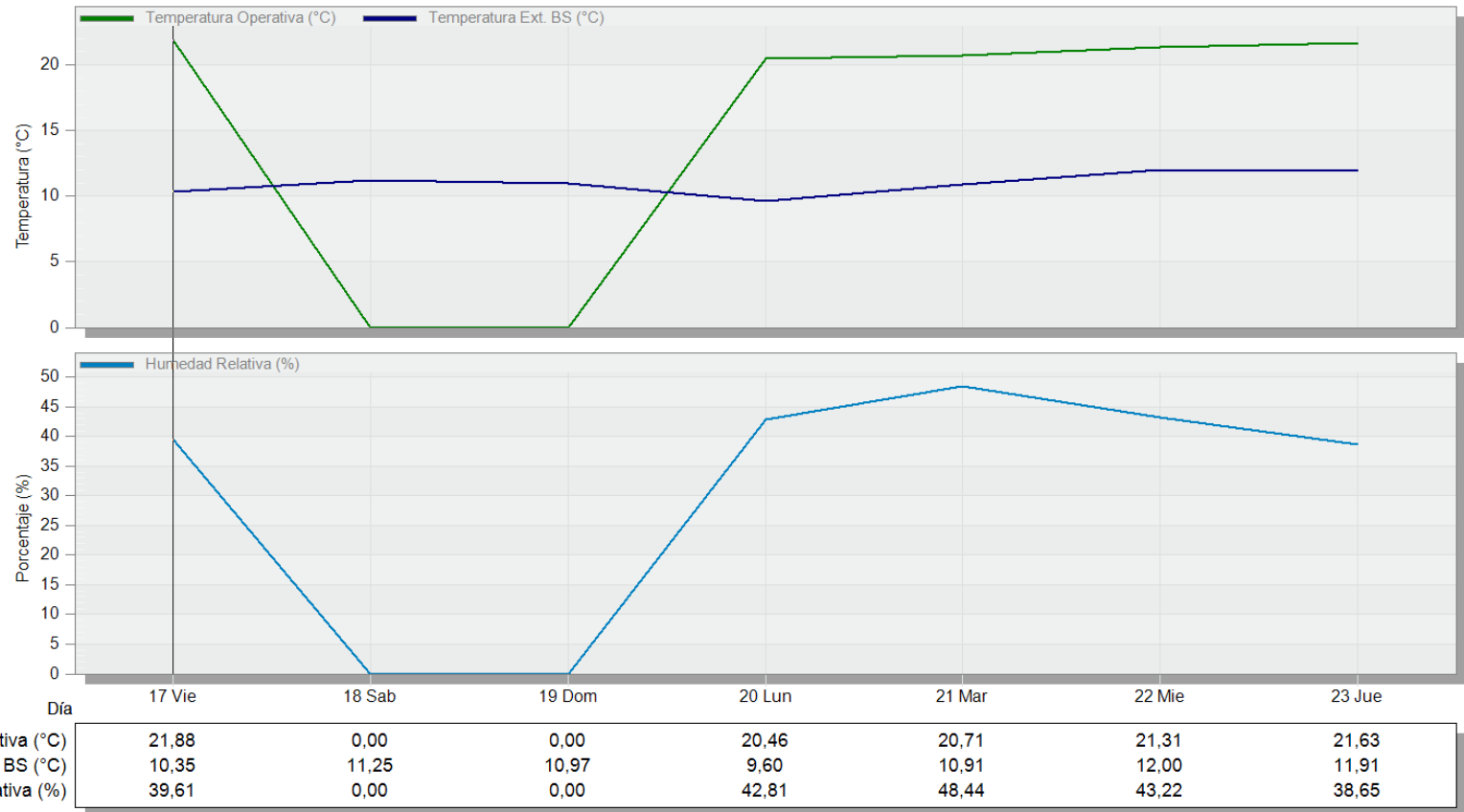


Figura 7.16: Resultados de semana de diseño en invierno  
1er piso – Aula 3

Conf - Piso 2, Aula 1

17 May - 23 May (Las condiciones de zona se reportan para los periodos ocupados, definidos mediante programaciones), Diario

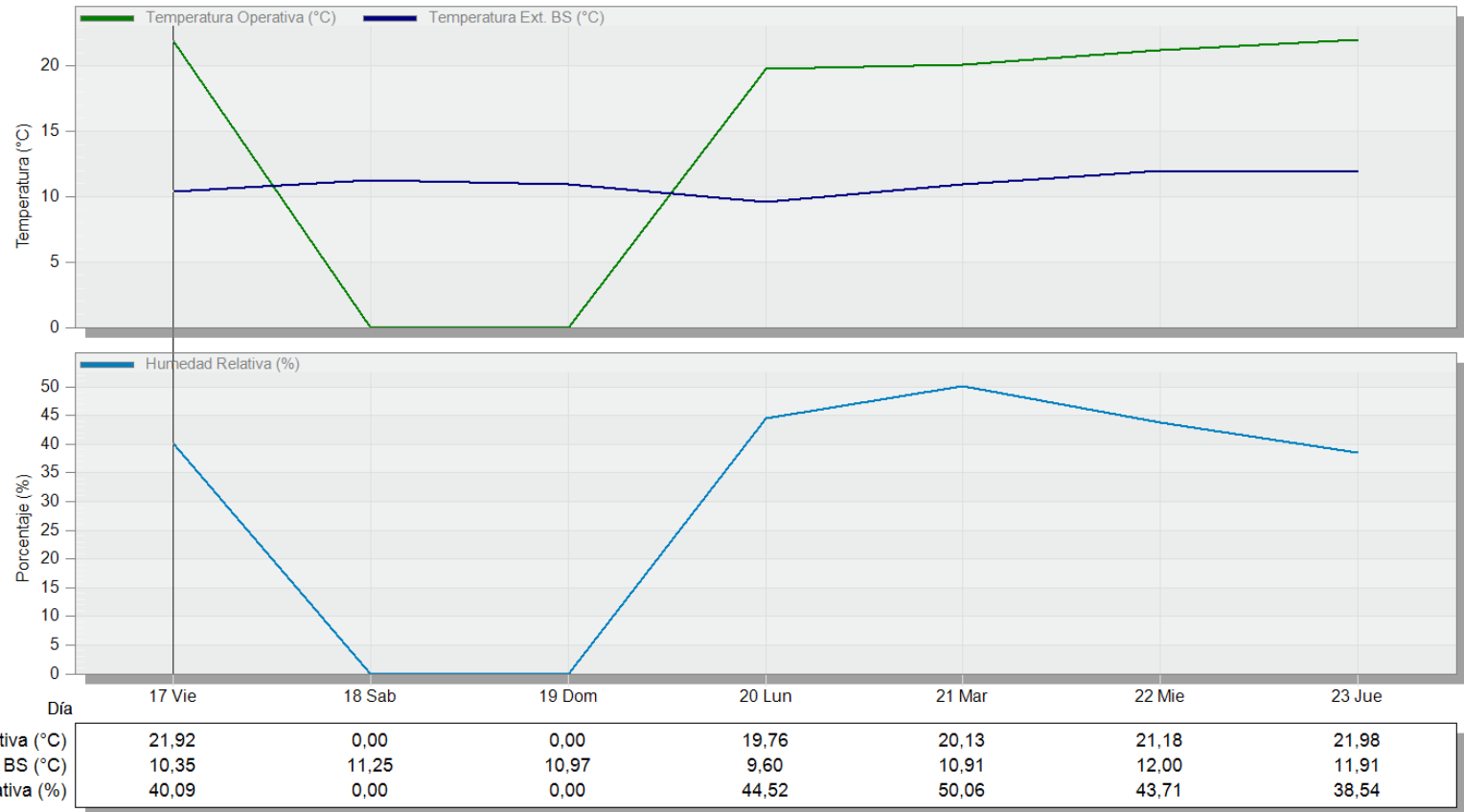


Figura 7.17: Resultados de semana de diseño en invierno  
2do piso – Aula 1

Conf - Piso 2, Aula 2

17 May - 23 May (Las condiciones de zona se reportan para los periodos ocupados, definidos mediante programaciones), Diario

Evaluación

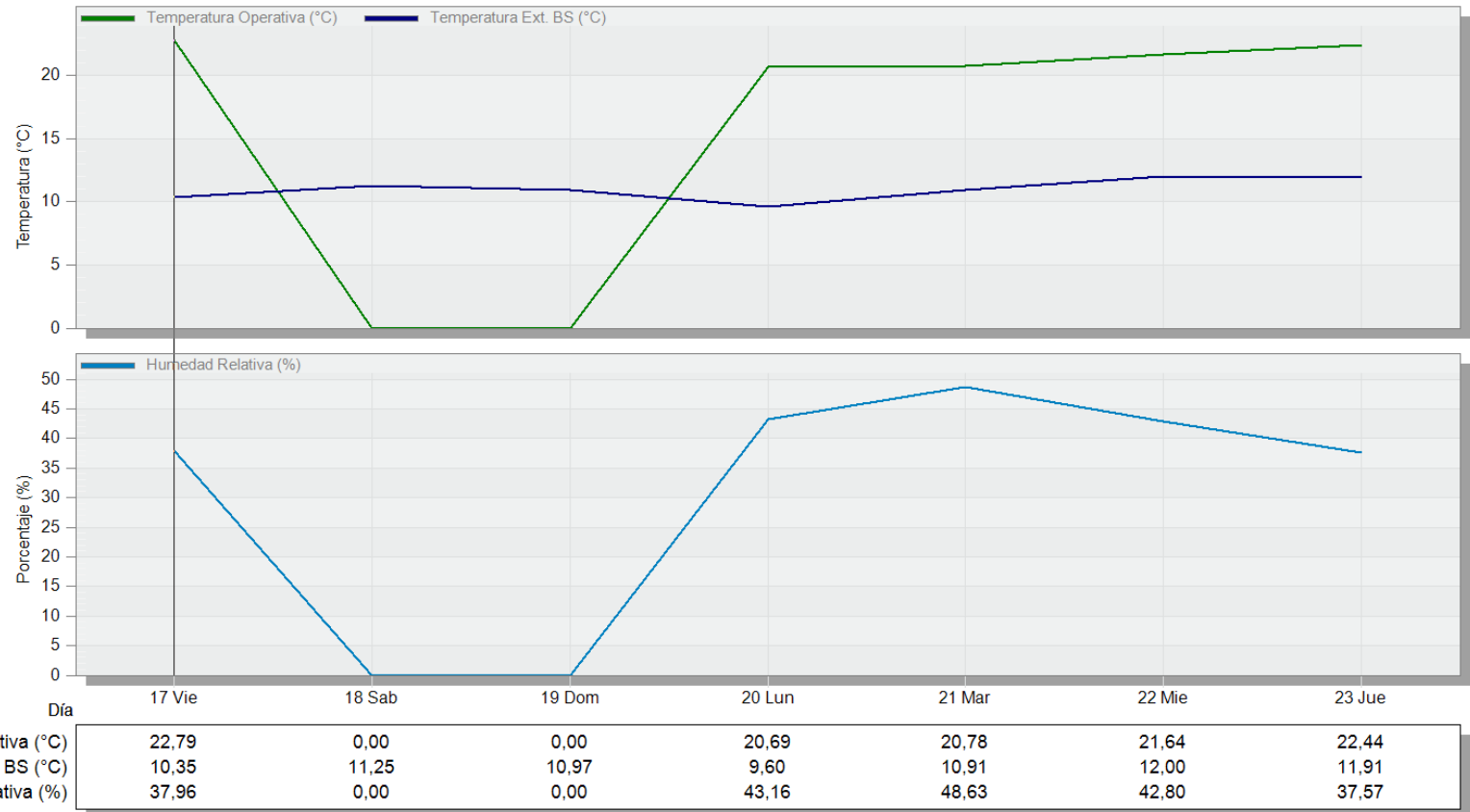


Figura 8.18: Resultados de semana de diseño en invierno  
2do piso – Aula 2

Conf - Piso 2, Aula 3

17 May - 23 May (Las condiciones de zona se reportan para los periodos ocupados, definidos mediante programaciones), Diario

Evaluación

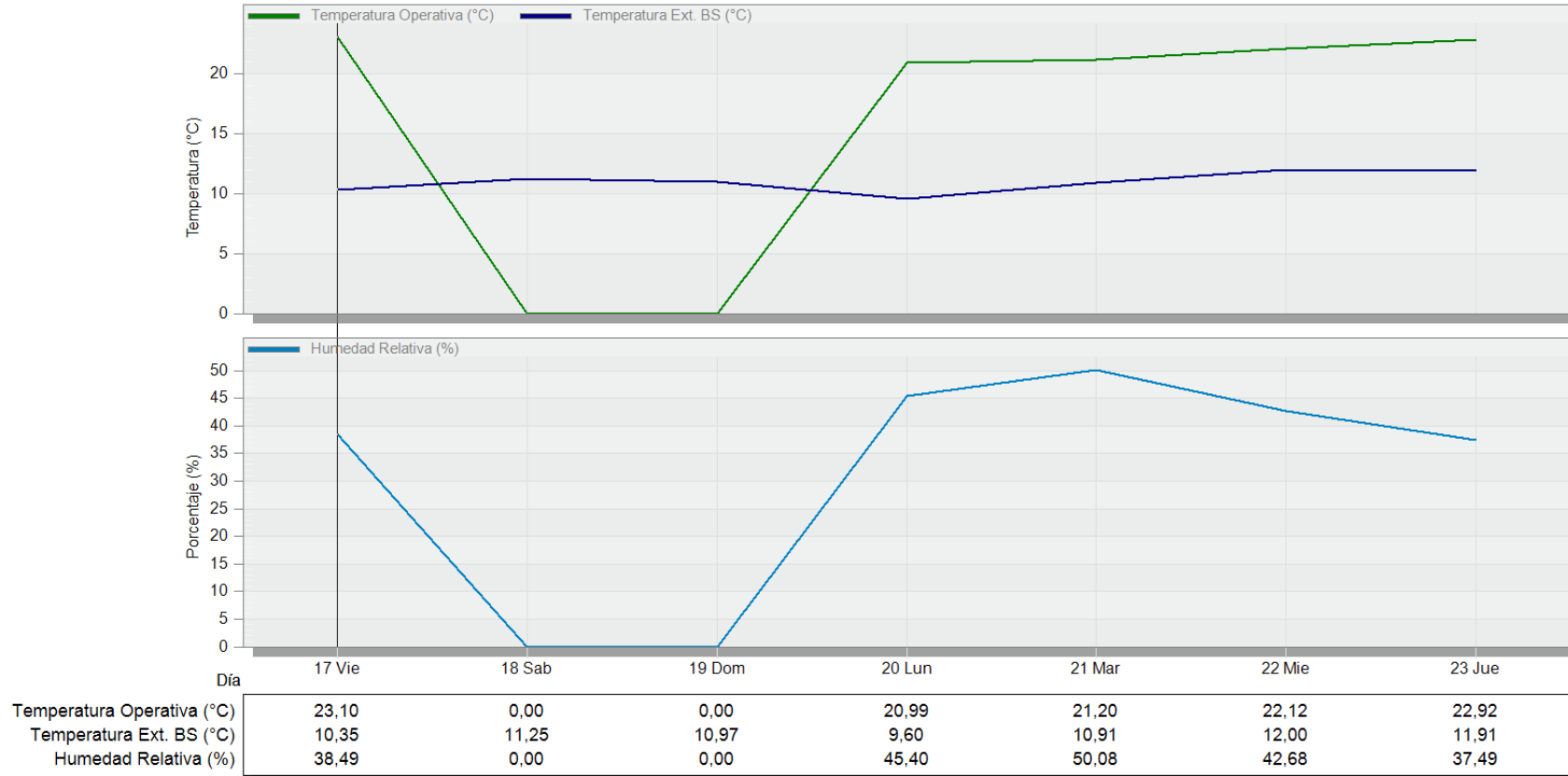


Figura 7.19: Resultados de semana de diseño en invierno  
2do piso – Aula 3