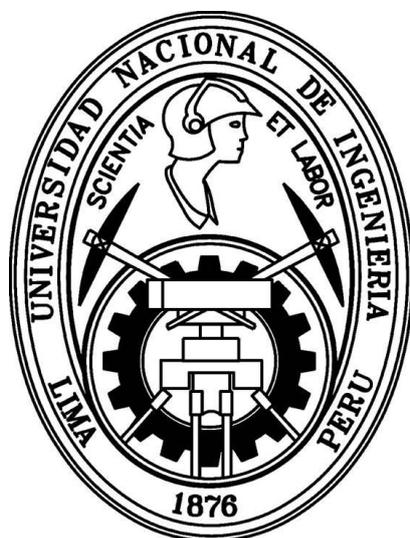


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS



TESIS

“ANÁLISIS DEL CONFORT HIGROTÉRMICO DE LA VIVIENDA AYNÍ EN
EL SOLAR DECATHLON 2015 EN CALI, COLOMBIA”

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO FÍSICO

ELABORADO POR:

DANIEL ALBERTO OCUPA FLORIÁN

ASESOR:

Dr. MANFRED HORN MUTSCHLER

LIMA – PERÚ

2021

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo es el resultado de una dedicación continua y la colaboración de muchas personas que me han apoyado y guiado, gracias a las cuales he podido crecer y llevar a buen término esta tesis. Con mucho afecto quiero agradecer:

A mi familia, en especial a mis padres, por su apoyo y comprensión continua.

A mi asesor, el Dr. Manfred Horn, por su orientación en el desarrollo del presente trabajo y su constante enseñanza.

A mis maestros, y en especial a la Dra. Mónica Gómez, por su empuje y motivación para culminar la tesis.

A mis compañeras y compañeros del proyecto Ayni, gracias a quienes se pudo llevar a cabo el trabajo de diseñar y construir la vivienda Ayni en Lima y en Colombia.

A la organización del Solar Decathlon Latin America 2015, por habernos permitido participar en la competencia y brindarnos información utilizada en la presente tesis.

Y finalmente, a los asesores del proyecto Ayni, en especial al Arq. Luis Delgado Galimberti.

RESUMEN

El presente trabajo muestra los resultados de confort higrotérmico obtenidos en la vivienda Ayni, prototipo diseñado y construido por la Universidad Nacional de Ingeniería para la competencia internacional Solar Decathlon 2015, durante la semana de pruebas y calificación en la ciudad de Cali en el mes de diciembre del 2015.

El diseño de la vivienda Ayni fue un trabajo multidisciplinar que involucró a alumnos y egresados de la Universidad Nacional de Ingeniería provenientes de diferentes especialidades de la universidad: Arquitectura, Ingeniería Civil, Ingeniería Física, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Sanitaria, Ingeniería Económica, entre otros.

En esta presente tesis se analiza las diferentes técnicas y estrategias bioclimáticas utilizadas en el diseño de la vivienda Ayni. Luego se analiza mediante software (*EnergyPlus*, *Ecotect*) el desempeño higrotérmico de la vivienda en un rango anual y específico para la semana de competencia. Finalmente se compara con las mediciones obtenidas por la organización de la competencia con los datos predichos. El análisis y discusión de estos resultados nos muestran el alcance de éxito del diseño de la vivienda Ayni.

ABSTRACT

This work shows the results concerning the hygrothermal comfort obtained in the Ayni house (Ayni means in Quechua: reciprocity, mutual aid), a prototype designed and built by the National University of Engineering for the international competition "Solar Decathlon 2015", organized with a week of tests and qualification in the city of Cali in December of 2015.

The design of the Ayni house was a multidisciplinary work that had involved students and graduates from different specialties of the university: Architecture, Civil Engineering, Physical Engineering, Electrical Engineering, Sanitary Engineering, Economic Engineering, among others.

The different bioclimatic techniques and strategies applied in the design of the Ayni house are analyzed. The hygrothermal performance of the house had been simulated with EnergyPlus and Ecotect software for an annual period as well as the time of the competition week. Finally, the measurements obtained by the competition organization are compared with the predicted data. The analysis and discussion of these results shows us the degree of success of the design of the Ayni house.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO.....	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	III
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	XI
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Hipótesis.....	2
1.4 Antecedentes.....	2
2 CONCEPTOS BÁSICOS DE EDIFICACIONES BIOCLIMÁTICAS.....	4
2.1 Principios energéticos de edificaciones.....	4
2.1.1 Hábitat bioclimático.....	4
2.1.2 Eficiencia energética en edificaciones.....	5
2.1.3 Propiedades termo-físicas de materiales constructivos.....	5
2.1.4 Transferencia de calor.....	6
2.1.5 Balance térmico en edificaciones.....	10
2.2 Confort térmico.....	13
2.3 Clima.....	14
2.3.1 Elementos y factores climáticos.....	14
2.3.2 Clasificaciones climáticas.....	16
2.4 Metodologías de análisis bioclimático.....	22
2.4.1 Gráfico de confort de Givoni.....	22
2.4.2 Tablas de Mahoney.....	24
2.5 Climatización natural.....	24
2.5.1 Criterios de diseño bioclimático.....	24
2.5.2 Sistemas especiales de acondicionamiento ambiental pasivo.....	26
2.6 Programas de simulación.....	29
2.6.1 EnergyPlus.....	29
2.6.2 Ecotect.....	34
2.6.3 Biosol.....	36
3 SOLAR DECATHLON.....	38
3.1 Solar Decathlon Latin America & The Caribbean Cali 2015.....	41
3.2 Clima de la ciudad de Cali.....	45
4 VIVIENDA AYNI.....	50

4.1 Metodología de diseño.....	54
4.2 Análisis bioclimático para la ciudad de Cali.....	54
4.2.1 Gráfico de confort de Givoni para Cali.....	54
4.2.2 Tablas de Mahoney para Cali.....	55
4.3 Recomendaciones generales de diseño para climas cálidos.....	60
4.3.1 Recomendaciones de diseño en base al análisis bioclimático.....	61
4.4 Técnicas bioclimáticas implementadas.....	62
4.4.1 Envolvente.....	62
4.4.2 Aberturas.....	62
4.4.3 Estrategias pasivas de enfriamiento.....	63
4.4.4 Estrategias pasivas de calentamiento.....	64
4.5 Cálculo de transmitancia térmica de la envolvente.....	64
4.5.1 Piso.....	65
4.5.2 Techo.....	66
4.5.3 Muros.....	67
4.6 Simulaciones sobre el diseño final.....	69
4.6.1 Análisis térmico.....	69
4.6.2 Análisis de humedad.....	71
4.6.3 Análisis de protección solar.....	73
4.6.4 Análisis de ventilación natural.....	74
5 VIVIENDA AYNÍ EN CALI.....	75
5.1 Construcción de la vivienda en la Villa Solar.....	75
5.2 Mediciones de la vivienda en la Villa Solar.....	80
5.2.1 Temperatura.....	80
5.2.2 Humedad.....	81
5.3 Comparativa entre datos simulados y medidos.....	82
5.3.1 Temperatura.....	82
5.3.2 Humedad.....	82
6 CONCLUSIONES.....	83
7 RECOMENDACIONES.....	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
ANEXOS.....	88
ANEXO 1. Propiedades termo físicas de materiales construcción.....	88
ANEXO 2. Tablas de Mahoney.....	93
ANEXO 3. Recomendaciones de diseño bioclimático del Ministerio de vivienda del Perú.....	99
ANEXO 4. Recomendaciones de diseño arquitectónico para el Perú, Arquitecto Wieser.....	111
ANEXO 5. Calificación de competencias del SDLAC 2015.....	114
ANEXO 6. Pruebas de confort térmico y de humedad en el SDLAC 2015.....	115
ANEXO 7. Certificados y reconocimientos al Proyecto Ayni.....	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Influencias sobre el microclima de un edificio.....	4
Figura 2. Esquema de las estrategias y tecnologías de eficiencia energética en el diseño de edificios de bajo consumo energético (Rodríguez-Ubinas, Rodríguez, et al., 2014).....	5
Figura 3. Conducción estacionaria unidimensional a través de un material (Conley, Cruickshank y Baldwin, 2018).....	6
Figura 4. Conducción estacionaria unidimensional a través de materiales con diferentes conductividades térmicas (Conley, Cruickshank y Baldwin, 2018).....	7
Figura 5. Conducción bidimensional a través de materiales con diferentes conductividades térmicas (Conley, Cruickshank y Baldwin, 2018).....	8
Figura 6. Circuito de resistencias equivalente para transferencia de calor por conducción y convección (Conley, Cruickshank y Baldwin, 2018).....	9
Figura 7. Circuito de resistencias equivalente para la envolvente de una edificación incluyendo los tres tipos de transferencia de calor (Conley, Cruickshank y Baldwin, 2018).....	10
Figura 8. Flujos de calor en una edificación.....	11
Figura 9. Mapa mundial de clasificación climática Köppen-Geiger (Peel, Finlayson y McMahon, 2007)....	18
Figura 10. Mapa climático Köppen-Geiger para Sudamérica (Peel, Finlayson y McMahon, 2007).....	19
Figura 11. Mapa climático del Perú (SENAMHI, 2020).....	21
Figura 12. Gráfico de confort de Givoni (Givoni, 1992).....	23
Figura 13. Sistemas de protección frente a la radiación. Umbráculo (a) y Protectores de piel del edificio (b) (Serra y Coch, 1995).....	29
Figura 14. Entorno alfanumérico del programa <i>EnergyPlus</i>	30
Figura 15. Entorno gráfico de programa <i>SketchUp + Euclid</i>	30
Figura 16. Vivienda real y su representación arquitectónica en una vista de planta.....	31
Figura 17. Modelo gráfico de una vivienda en el entorno gráfico <i>SketchUp</i>	32
Figura 18. Entorno alfanumérico de <i>EnergyPlus</i> para introducir variables de localización latitud, longitud y altitud.....	32
Figura 19. Entorno alfanumérico de <i>EnergyPlus</i> para introducir propiedades de materiales.....	33
Figura 20. Entorno alfanumérico de <i>EnergyPlus</i> para ingreso de construcciones.....	33
Figura 21. Entorno gráfico de <i>SketchUp</i> para asignación de construcciones.....	34
Figura 22. Entorno gráfico del programa <i>Ecotect</i>	35
Figura 23. Análisis de la trayectoria solar sobre un modelo de vivienda en <i>Ecotect</i>	35
Figura 24. Movimiento de aire dentro de una vivienda usando <i>Ecotect</i>	35
Figura 25. Primera hoja de cálculo de Biosol donde se introducen los datos de ubicación y clima del lugar de estudio.....	36
Figura 26. Esquemas de identificación de ángulos y medidas espaciales para aleros y parasoles usados en Biosol. Imágenes obtenidas del programa Biosol.....	36
Figura 27. Tercera hoja de cálculo del programa Biosol para introducir las medidas de las ventanas y el ángulo óptimo de protección y obtener el tamaño del alero.....	37
Figura 28. Competiciones Solar Decathlon en el mundo (Solar Decathlon, 2020).....	38

Figura 29. Vivienda Canopea en el (Solar Decathlon Europe, 2012).....	39
Figura 30. Vivienda Patio 2.0 (Solar Decathlon Europe, 2012).....	39
Figura 31. Vivienda Rhome for Density (Solar Decathlon Europe, 2014).....	39
Figura 32. Villa Solar en Madrid (Solar Decathlon Europe, 2012).....	40
Figura 33. Villa Solar en Washington, D.C. (Solar Decathlon, 2020).....	40
Figura 34. Etapas de la competencia del Solar Decathlon Latin America & Caribbean 2015. Gráfico proporcionado por la organización del evento.....	41
Figura 35. Esquema de la Villa Solar para el Solar Decathlon Latin America & Caribbean 2015. (SDLAC 2015).....	44
Figura 36. Clasificación climática de Koppen: Categoría Aw: Sabana Tropical (Peel, Finlayson y McMahon, 2007).....	45
Figura 37. Temperaturas exteriores promedios mensuales para Cali a lo largo de un año. Temperatura media (Tm), Temperatura máxima media (Tmaxm), Temperatura mínima media (Tminm), Temperatura máxima (Tmax), Temperatura mínima (Tmin). (SDLAC 2015).....	46
Figura 38. Humedad relativa exterior promedio mensual para Cali a lo largo de un año. Humedad relativa media (HRm), Humedad relativa máxima media (HRmaxm), Humedad relativa mínima media (HRminm). (SDLAC 2015).....	46
Figura 39. Precipitación acumulada mensual para Cali a lo largo de un año. (SDLAC 2015).....	47
Figura 40. Radiación solar diaria promedio mensual para Cali a lo largo de un año. (SDLAC 2015).....	47
Figura 41. Vientos predominantes en Cali. Frecuencia anual. (SDLAC 2015).....	47
Figura 42. Dirección de vientos para la ciudad de Cali (Alcaldía de Cali, 1999).....	48
Figura 43. Mapa de radiación solar global para Colombia, promedio anual (UPME y IDEAM, 2005).....	49
Figura 44. Diseño de la vivienda Ayni. Gráfica elaborada por el equipo Ayni.....	51
Figura 45. Plano de la vivienda Ayni. Gráfica elaborada por el equipo Ayni.....	51
Figura 46. Construcción de la vivienda Ayni en el campus de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2015.....	52
Figura 47. Vista área de la vivienda Ayni construida en el campus de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2015.....	53
Figura 48. Gráfico de confort de Givoni para la ciudad de Cali.....	54
Figura 49. Estrategias de diseño recomendadas para climas cálidos para mejorar la ventilación natural (Tantasavasdi, Srebric y Chen, 2001).....	60
Figura 50. Protección solar de la envolvente.....	62
Figura 51. Esquema de la ventilación natural cruzada al interior de la vivienda.....	63
Figura 52. Fachada ventilada en paredes de la envolvente.....	63
Figura 53. Estrategias pasivas de calentamiento nocturno, vista de corte.....	64
Figura 54. Estrategias de calentamiento nocturno, vista de planta.....	64
Figura 55. Tipos de piso instalado en la vivienda Ayni. Izquierda: área de piso laminado. Derecha: área de piso cerámico.....	65
Figura 56. Izquierda: Ubicación del techo de los ambientes de sala y dormitorio. Derecha: Ubicación del techo del eje de servicios.....	66

Figura 57. Tipos de muro de la vivienda Ayni. Izquierda: muro 1. Derecha: muro 2.....	67
Figura 58. Tipos de muro de la vivienda Ayni. Izquierda: muro 3. Derecha: muro 4.....	67
Figura 59. Esquema del diseño final de la vivienda Ayni en el programa SकेctUp.....	69
Figura 60. Cuadro de temperaturas anuales exterior e interior (simuladas en <i>EnergyPlus</i>). Temperatura exterior: media (Tem), máxima media (Tema), mínima media (Temi). Temperaturas interiores simuladas: media (Tim), máxima media (Tima), mínima media (Timi).....	70
Figura 61. Cuadro de temperaturas exterior e interior (simuladas en <i>EnergyPlus</i>) para un día típico de diciembre en Cali. Temperatura exterior medida (Ter) y temperatura interior simuladas (Tis).....	71
Figura 62. Cuadro valores de humedad relativa exterior e interior (simulación en <i>EnergyPlus</i>) para un periodo anual. Humedad relativa exterior: media (HRem), máxima media (HRema), mínima media (HRemi). Humedad relativa interior simulada: media (HRim), máxima media (HRima), mínima media (HRimi).....	72
Figura 63. Cuadro de humedades relativas exterior e interior (simulación en <i>EnergyPlus</i>) para un día típico de diciembre. Humedad relativa exterior simulada (HRer) y humedad relativa interior simulada (HRis).....	72
Figura 64. Esquemas de protección solar de aleros y parasoles sobre la trayectoria solar obtenidos en el programa Biosol. Izquierda: muro NNE. Derecha: muro NNO.....	73
Figura 65. Esquemas de protección solar de aleros y parasoles sobre la trayectoria solar obtenidos en el programa Biosol. Izquierda: muro SEE. Derecha: muro SSE.....	73
Figura 66. Diseño de alero plegable como protección de ventanas, realizado por el equipo Ayni.....	74
Figura 67. Simulación de la ventilación natural de la vivienda Ayni con <i>Ecotect</i>	74
Figura 68. Ruta terrestre de Lima a Cali que recorrieron los camiones transportando la vivienda Ayni. Gráfico realizado por el equipo Ayni.....	75
Figura 69. Vista área de la Villa Solar en la Universidad del Valle de Cali (2015) con la ubicación del área de construcción de la vivienda Ayni.....	76
Figura 70. Vista aérea de la zona de construcción de la vivienda Ayni en la Villa Solar, Cali, 2015.....	77
Figura 71. Construcción de la vivienda Ayni en la Villa Solar, Cali, 2015.....	78
Figura 72. Vivienda Ayni terminada en la Villa Solar, Cali, 2015.....	79
Figura 73. Cuadro de temperaturas medidas por la organización del Solar Decathlon dentro y fuera de la vivienda Ayni del 09 al 15 de diciembre del 2015. Temperatura exterior (Te) y temperatura interior (Ti)...	80
Figura 74. Cuadro de humedades relativas medidas por la organización del Solar Decathlon dentro y fuera de la vivienda Ayni del 09 al 15 de diciembre del 2015. Humedad relativa exterior (HRe) y humedad relativa interior (HRi).....	81
Figura 75. Mapa climático del Perú (Rayter, 2008). Cuadro elaborado por (Romero Verástergui, 2016)..	100
Figura 76. Mapa de clasificación climática del Perú para diseño arquitectónico (Wieser Rey, 2011).....	112
Figura 77. Función de puntaje para la prueba de Temperatura.....	115
Figura 78. Función de puntaje para la prueba de Humedad.....	116
Figura 79. Certificado de participación en el Solar Decathlon Latin América & Caribbean Cali 2015.....	117
Figura 80. Mención Honrosa al Proyecto Ayni en la categoría Innovación en Ingeniería en el Premio Graña y Montero 2016.....	117
Figura 81. Mención Honrosa al Proyecto Ayni en la XVII Bienal Nacional de Arquitectura del Perú, Categoría Investigación, 2016.....	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Elementos y factores del clima (McGuffie y Henderson-Sellers, 2005).....	14
Tabla 2. Características del suelo (McGuffie y Henderson-Sellers, 2005).....	16
Tabla 3. Descripción y criterios de la clasificación Köppen (Peel, Finlayson y McMahon, 2007).....	17
Tabla 4. Descripción de los símbolos y criterios de la clasificación climática de SENAMHI, 2020.....	20
Tabla 5. Criterios de diseño en relación con la ubicación y corrección del entorno (Serra y Coch, 1995)....	24
Tabla 6. Criterios de diseño en relación con la forma del edificio (Serra y Coch, 1995).....	25
Tabla 7. Criterios de diseño en relación con la piel del edificio (Serra y Coch, 1995).....	25
Tabla 8. Criterios de diseño en relación al interior del edificio (Serra y Coch, 1995).....	25
Tabla 9. Sistemas captadores de radiación solar (Serra y Coch, 1995).....	26
Tabla 10. Rangos típicos de ventilación por al tipo de ambiente (Szokolay, 2008).....	27
Tabla 11. Rangos mínimos y recomendados de renovación de aire en función del número de ocupantes por área (Szokolay, 2008).....	27
Tabla 12. Sistemas de ventilación natural (Serra y Coch, 1995).....	28
Tabla 13. Equipos y universidades que participaron el SDLAC 2015.....	43
Tabla 14. Data climática de la ciudad de Cali. (SDLAC 2015).....	46
Tabla 15. Asesores del proyecto Ayni.....	50
Tabla 16. Tabla de Mahoney 1 primera parte para la ciudad de Cali.....	55
Tabla 17. Tabla de Mahoney 1 segunda parte para la ciudad de Cali.....	55
Tabla 18. Tabla de Mahoney 2 primera parte para la ciudad de Cali.....	56
Tabla 19. Tabla de Mahoney 2 segunda parte para la ciudad de Cali.....	57
Tabla 20. Tabla de Mahoney 3 y 4 modificadas primera parte, para la ciudad de Cali.....	58
Tabla 21. Tabla de Mahoney 3 y 4 modificadas segunda parte, para ciudad de Cali.....	59
Tabla 22. Cálculo de la transmitancia térmica del piso.....	65
Tabla 23. Cálculo de la transmitancia térmica para el techo.....	66
Tabla 24. Cálculo de la transmitancia térmica de los muros.....	68
Tabla 25. Parámetros usados en las simulaciones en <i>EnergyPlus</i>	69
Tabla 26. Valores promedio anuales de temperatura.....	70
Tabla 27. Resumen de valores obtenidos.....	71
Tabla 28. Medidas recomendadas de aleros y parasoles obtenidas con Biosol.....	73
Tabla 29. Temperaturas promedio medidas dentro y fuera de la vivienda Ayni.....	81
Tabla 30. Cantidad de horas que la temperatura interior de la vivienda Ayni se encuentra dentro de la zona de confort térmico designada por la competencia.....	81
Tabla 31. Cantidad de horas dentro de la zona de confort de humedad en el interior de la vivienda Ayni....	82
Tabla 32. Comparación de diferencias de temperaturas exterior e interior esperadas (simulación) y obtenidas (medición en Cali).....	82
Tabla 33. Comparación de diferencias de humedades relativas exterior e interior esperadas (simulación) y obtenidas (medición en Cali).....	83
Tabla 34. Lista de características higrotérmicas de materiales de construcción (MINVIV, 2014).....	88
Tabla 35. Tabla de Mahoney 1, primera parte (Evans, 2001).....	93

Tabla 36. Tabla de Mahoney 1, segunda parte (Evans, 2001).....	94
Tabla 37. Tabla de Mahoney 2, primera parte (Evans, 2001).....	95
Tabla 38. Tabla de Mahoney 2, segunda parte (Evans, 2001).....	96
Tabla 39. Tabla de Mahoney 3 y 4 modificadas, primera parte (Pawar, Mukherjee y Shankar, 2015).....	97
Tabla 40. Tabla de Mahoney 3 y 4 modificadas, segunda parte (Pawar, Mukherjee y Shankar, 2015).....	98
Tabla 41. Valores máximos de transmitancia térmica de la envolvente de una vivienda según zona bioclimática (MINVIV, 2014).....	99
Tabla 42. Características climáticas de las zonas bioclimáticas del Perú (Rayter, 2008).	101
Tabla 43. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 1 (Rayter, 2008).....	102
Tabla 44. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 2 (Rayter, 2008).....	103
Tabla 45. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 3 (Rayter, 2008).....	104
Tabla 46. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 4 (Rayter, 2008).....	105
Tabla 47. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 5 (Rayter, 2008).....	106
Tabla 48. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 6 (Rayter, 2008).....	107
Tabla 49. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 7 (Rayter, 2008).....	108
Tabla 50. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 8 (Rayter, 2008).....	109
Tabla 51. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 9 (Rayter, 2008).....	110
Tabla 52. Clasificación climática del Perú para criterios de diseño arquitectónico (Wieser Rey, 2011).....	111
Tabla 53. Estrategias pasivas de climatización de acuerdo a la zona climática (Wieser Rey, 2011).....	113
Tabla 54. Distribución de puntos en las 10 competencias (SDLAC, 2015).....	114

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

A	: Área (m^2)
α	: Absortividad
ACH	: Cambios de aire por hora (Air Change per Hour)
Aw	: Clima tropical de sabana según clasificación climática Köppen
B	: Bienestar, comfortable
C	: Calor
c	: Calor específico ($J/kg \cdot ^\circ C$)
CER	: Centro de Energías Renovables
c_{eva}	: Calor latente de evaporación del agua (2400 kJ/kg)
ΔT	: Diferencia de temperatura ($^\circ C$)
Δx	: Espesor de un material
Δx_i	: Espesor de un material i
e	: Tasa de evaporación (kg/h)
ϵ	: Emisividad
E-O	: Este-Oeste
F	: Frío
G	: Radiación solar incidente (W/m^2)
GIZ	: Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional
h	: Coeficiente convectivo ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
HR	: Humedad Relativa
HRe	: Humedad Relativa exterior medida
HRi	: Humedad Relativa interior medida
HRm	: Humedad relativa exterior media mensual
HRmaxm	: Humedad relativa exterior máxima media mensual
HRminm	: Humedad relativa exterior mínima media mensual
HRem	: Humedad relativa exterior media mensual simulada
HRema	: Humedad relativa exterior máxima media mensual simulada
HRemi	: Humedad relativa exterior mínima media mensual simulada
HRmin	: Humedad relativa interior media mensual simulada
HRima	: Humedad relativa interior máxima media mensual simulada
HRimi	: Humedad relativa interior mínima media mensual simulada
HRex	: Humedad relativa exterior horaria simulada
HRis	: Humedad relativa interior horaria simulada
H1, H2, H3, A1, A2, A3	: Indicadores de la Tabla 2 de Mahoney
k	: Conductividad térmica ($W/m \cdot ^\circ C$)
LEED	: Certificación internacional de sostenibilidad en edificaciones (Leadership in Energy & Environmental Design)
OSB	: Tablero conglomerado de viruta de madera
PUCP	: Pontificia Universidad Católica del Perú
q, Q	: Cantidad o flujo de calor (J)

Q_s	: Ganancia de calor proveniente de sol
Q_i	: Ganancias internas por actividad humana o por artefactos
Q_c	: Ganancias o pérdidas por conducción
Q_v	: Ganancias o pérdidas por ventilación
Q_e	: Pérdidas por evaporación
Q_m	: Ganancias o pérdidas por sistemas mecánicos
R	: Resistencia térmica ($m \cdot ^\circ C/W$)
ρ	: Densidad (kg/m^3)
R_{rad}	: Resistencia térmica radiativa
R_{ef}	: Resistencia térmica efectiva
R_i	: Resistencia térmica de un material i
R_c	: Resistencia superficial convectiva
R_{se}	: Resistencia superficial exterior ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
R_{si}	: Resistencia superficial interior ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
s	: Constante de Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$)
SD	: Solar Decathlon
SDLAC	: Solar Decathlon Latin America & The Caribbean
T	: Temperatura ($^\circ C$)
T.B.S.	: Temperatura de bulbo seco
T.B.H.	: Temperatura de bulbo húmedo
T.E.	: Temperatura efectiva
TMA	: Temperatura media anual
T_e	: Temperatura exterior medida
T_i	: Temperatura interior medida
T_{er}	: Temperatura exterior horaria simulada
T_{is}	: Temperatura interior horaria simuladas
T_{em}	: Temperatura exterior media mensual simulada
T_{ema}	: Temperatura exterior máxima media mensual simulada
T_{emi}	: Temperatura exterior mínima media mensual simulada
T_{im}	: Temperatura interiores media mensual simuladas
T_{ima}	: Temperatura interiores máxima media mensual simulada
T_{imi}	: Temperatura interiores mínima media mensual simulada
T_m	: Temperatura exterior media mensual
T_{maxm}	: Temperatura exterior máxima media mensual
T_{minm}	: Temperatura exterior mínima media mensual
T_{max}	: Temperatura exterior máxima mensual
T_{min}	: Temperatura exterior mínima mensual
T_s	: Temperatura superficial de un material
T_∞	: Temperatura del fluido o entorno
T_{alr}	: Temperatura de los alrededores
T_{min}	: Temperatura mínima
T_{max}	: Temperatura máxima

T_{ea}	: Temperatura exterior promedio
T_{ed-i}	: Temperatura diaria exterior promedio i días antes
U	: Transmitancia térmica ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
u	: Constante ($0,335 W/m^3 \cdot ^\circ C$)
UNI	: Universidad Nacional de Ingeniería
V	: Volumen (m^3)

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe una tendencia nacional en el desarrollo de proyectos de viviendas urbanas y rurales sostenibles, con enfoque en el confort térmico y la arquitectura bioclimática. A su vez, el estado peruano ha ido creando normativas que regulen e incentiven la eficiencia energética en edificaciones, como son la Norma EM110 de Confort térmico y lumínico (Ministerio de Vivienda de Perú [MINVIV], 2014), y el Código Técnico de Construcción Sostenible. Ambas aún de carácter no obligatorio. Sin embargo, incentivos como el Bono Verde de Construcción Sostenible, han hecho que cada vez más proyectos nacionales y privados adopten estas normas. En el sector privado existen certificaciones como LEED y Edge, para distintos tipos de edificaciones sostenibles.

En cuanto a investigación, el estado ha venido desarrollando diversos trabajos en conjunto con la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), a través del Centro de Energías Renovables (CER-UNI); con la PUCP, con instituciones como CARE-Perú, GIZ, entre otros. Estos trabajos han estado orientados sobre todo al estudio de las técnicas bioclimáticas adecuadas para las zonas alto andinas.

En la arquitectura, uno de los aspectos principales a considerar en el diseño, es el clima donde se construirá la edificación, y, por tanto, las técnicas que aprovechen estas condiciones para lograr el bienestar interior para los habitantes. La eficiencia energética en edificaciones comienza con el diseño mismo de este. Una edificación diseñada adecuadamente tomando en consideración el clima será una edificación más eficiente energéticamente que una que no lo considera.

Incrementar la eficiencia energética de edificaciones, es un paso esencial considerando el cambio climático y calentamiento global, que se estima incrementará la temperatura global promedio 2 °C para el año 2100 (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2019).

Es así que la Universidad Nacional de Ingeniería, viene impulsando proyectos de este tipo, con financiamiento propio o externo. Uno de estos proyectos fue el diseño y construcción de la una vivienda sostenible de clima tropical (vivienda Ayni) para la competencia internacional Solar Decathlon, que se realizó por primera vez en Latinoamérica, en la ciudad de Cali.

Esta tesis se encarga de estudiar las técnicas bioclimáticas empleadas en el diseño de la vivienda Ayni y analizar el comportamiento higrotérmico de la vivienda construida.

1.1 Planteamiento del problema

Algunas preguntas que se plantearon al inicio de la investigación de este tema son:

- ¿Qué técnicas bioclimáticas pasivas son aplicables en viviendas de zonas climáticas cálidas?
- ¿Qué tanta diferencia de temperatura se puede lograr entre el interior y el exterior de una vivienda en una zona climática cálida?
- ¿Es suficiente el uso de técnicas pasivas? ¿Se requiere el uso de técnicas activas?
- ¿Cuáles son los lugares replicables en el Perú?

Entonces, el problema identificado es el siguiente:

Las implementaciones de técnicas bioclimáticas en el diseño de una vivienda en una zona climática cálida inciden beneficiosamente en las condiciones de confort de esta, según la bibliografía analizada, pero no se precisa cuantitativamente este beneficio. Las simulaciones realizadas al diseño de la vivienda y las posteriores mediciones determinan la proporción del beneficio, esto es, el grado de confort que se alcanza.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento térmico y de humedad de la vivienda Ayni durante la competencia Solar Decathlon en la ciudad de Cali, Colombia.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudiar el clima y estrategias bioclimáticas recomendadas para una zona climática cálida como Cali.
- Calcular los valores de transmitancia de la envolvente de la vivienda Ayni.
- Comparar el comportamiento higrotérmico de la vivienda Ayni con las simulaciones previas de diseño.

1.3 Hipótesis

Las técnicas bioclimáticas pasivas aplicadas en el diseño y construcción de la vivienda Ayni incrementan el número de horas dentro del grado de confort higrotérmico en el interior de la vivienda.

1.4 Antecedentes

A continuación, se listan investigaciones en confort térmico y arquitectura bioclimática desarrolladas en Perú:

- “Evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda alto andina para lograr el confort térmico con energía solar” (Molina Fuertes, 2017). Tesis de maestría del año 2017 que realiza un estudio sobre un módulo de vivienda experimental en la región Ayacucho, a más de 3600 m s. n. m. En este estudio se demuestra que los programas de simulación predicen acertadamente el comportamiento térmico de módulos de vivienda.
- “Aprovechamiento de los vientos en la propuesta arquitectónica hotel resort cuatro estrellas Punta Balcones Negritos – Talara” (Távora Juárez y Simón Rodríguez, 2018). Tesis de grado del año 2018 que analiza los vientos locales para que el diseño arquitectónico permita aprovecharlos en la ventilación natural requerida y así satisfacer las necesidades de renovaciones de aire y confort de los usuarios de la edificación.
- “Diseño, construcción y evaluación térmica de un módulo de vivienda rural en la localidad de Vilcallamas Arriba, distrito de Pisacoma, provincia de Chucuito, región uno” (Saavedra Salazar, 2014). Tesis de grado del año 2014 donde se realiza un análisis completo de una vivienda rural a más de 4500 m s. n. m., desde la concepción del diseño aplicando técnicas bioclimáticas apropiadas hasta su posterior evaluación durante su ocupación.
- “Evaluación bioclimática de una vivienda rural alto andina de la comunidad de San Francisco de Raymina de Ayacucho” (Molina Castillo, 2016). Tesis de maestría del año 2016.
- “Evaluación experimental de cambios constructivos para lograr confort térmico en una vivienda alto-andina del Perú” (Huaylla Roque, 2009). Tesis de grado del año 2010 que comprueba que con el uso de técnicas constructivas adecuadas se logra incrementar la temperatura interior en viviendas rurales alto-andinas ubicadas a 3700 m s. n. m.
- “Aplicación de sistemas bioclimáticos pasivos en base a las necesidades de confort termo-lumínico del paciente en habitaciones de hospitalización y área de terapias en el diseño de un hospital oncológico,

Pucallpa, 2018” (Portilla Colina, 2019). Tesis de grado del año 2019 que analiza el confort y la arquitectura bioclimática en un clima cálido húmedo de la selva baja peruana y toma como eje de estudio a pacientes oncológicos.

Uno de los objetivos de la competencia Solar Decathlon es promover la investigación en energías renovables y eficiencia energética. Algunas de estas investigaciones que han servido de ejemplo y fuente bibliográfica para el desarrollo del proyecto se detallan a continuación:

- La casa “Patio 2.12” de la Universidad de Andalucía para el *Solar Decathlon Europe 2010*. En esta propuesta la estrategia energética gira en torno a dos estrategias arquitectónicas: el patio, que asemeja el estilo de vida mediterráneo, y el botijo, que rememora las vasijas españolas y se ve plasmado en una envolvente cerámica que refresca la vivienda mediante la evaporación del agua (Terrados y Moreno, 2014).
- La casa “RhOME for denCity” desarrollada en conjunto por el Politécnico de Milán, la Universidad de Roma TRE y la Universidad de Sidney para el Solar Decathlon Europe 2014. Para el diseño de este prototipo se aplicó un análisis de confort de acuerdo a la metodología europea estándar “Active House”, el cual consiste en un sistema de prorrateado de evaluación del confort interior para diferentes tipos de climas (Brambilla *et al.*, 2017).
- La vivienda “UC Davis” de la Universidad de California para el Solar Decathlon 2015. La principal estrategia en este modelo fue el uso de un sistema radiante bajo el piso para calentamiento y un sistema de enfriamiento en el techo. Este sistema usa agua caliente a través del piso para la temporada de invierno y agua fría en el techo para la temporada de verano (Alemi y Loge, 2017).
- La casa “Solar I” de la Universidad del Sureste de China para el Solar Decathlon China 2013. El equipo de este proyecto usó el programa *EnergyPlus* para evaluar mediante simulaciones el desempeño energético de la vivienda y con ello obtuvo excelentes resultados en el desempeño de sus sistemas fotovoltaicos, de agua caliente, de calentamiento y aire acondicionado (Peng *et al.*, 2015).
- La vivienda construida por la Universidad de Nevada Las Vegas para el Solar Decathlon 2013. Esta casa fue diseñada para un clima desértico haciendo énfasis en el aislamiento de la envolvente y sistemas de enfriamiento evaporativo (Shrestha y Mulepati, 2016).
- La casa construida por la Universidad Tongji de Shanghai para el Solar Decathlon China 2017. El sistema energético de esta vivienda fue diseñado y optimizado a través de una metodología basada en simulaciones usando el programa *Design Builder* (Lyu, Pan y Qu, 2017).

2 CONCEPTOS BÁSICOS DE EDIFICACIONES BIOCLIMÁTICAS

Una edificación es un espacio arquitectónico diseñado para otorgar privacidad, seguridad y protección a sus habitantes frente a las inclemencias y factores externos perjudiciales para la vida y la salud.

2.1 Principios energéticos de edificaciones

Desde el punto de vista físico, las edificaciones son sistemas térmicos complejos, son sistemas termodinámicos abiertos, siempre en constante cambio y con superficies comportándose diabáticamente, intercambiando energía con el entorno en todo momento.

El comportamiento térmico de una edificación se ve influenciado por varios factores como son el clima, el diseño de la edificación, los materiales, los usos y horarios de los usuarios, los equipos eléctricos y mecánicos, etc., que configuran un microclima al interior de los ambientes (figura 1).

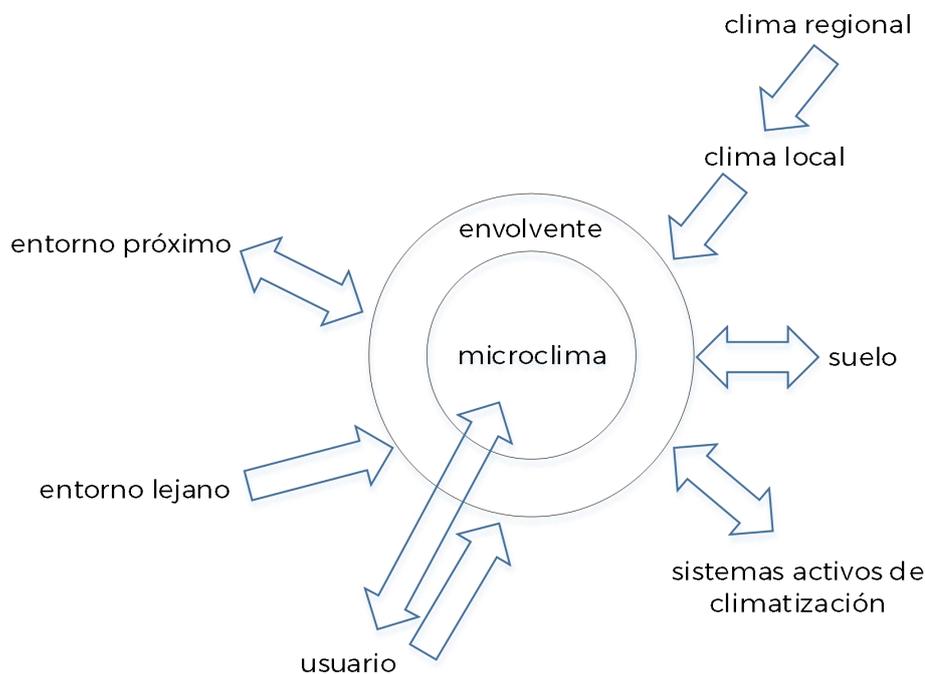


Figura 1. Influencias sobre el microclima de un edificio.

2.1.1 Hábitat bioclimático

Un hábitat bioclimático es un espacio diseñado para el desarrollo de vida en bienestar de sus habitantes. En este, además de los aspectos normalmente considerados como circulaciones, vistas, iluminación, etc., el aspecto térmico es decisivo en el diseño. Para ello se ha de tomar en cuenta: el clima, las características positivas y negativas de este; la optimización de la forma arquitectónica; la elección de materiales apropiados considerando sus propiedades físicas; el uso de sistemas bioclimáticos de calentamiento o enfriamiento (Courgey y Oliva, 2006).

El estudio de la relación entre el confort interno y el clima es esencial para asegurar una calidad de vida superior a los habitantes (Brambilla *et al.*, 2017).

2.1.2 Eficiencia energética en edificaciones

Se considera como la mejora de la eficiencia energética a cualquier acción emprendida por el fabricante o consumidor final de energía que permita reducir la energía usada sin afectar el nivel y la calidad del servicio provisto (International Energy Agency [IEA], 2020).

Las edificaciones energéticamente eficientes poseen un buen balance entre las estrategias pasivas de climatización (para reducir la demanda energética) y el uso de equipos altamente eficientes para reducir el consumo (Rodríguez-Ubinas, Rodríguez, *et al.*, 2014).

Para lograr el ahorro energético esperado, los sistemas activos y pasivos deben diseñarse conjuntamente con el edificio como un diseño integrado (Lyu, Pan y Qu, 2017).



Figura 2. Esquema de las estrategias y tecnologías de eficiencia energética en el diseño de edificios de bajo consumo energético (Rodríguez-Ubinas, Rodríguez, *et al.*, 2014).

Las estrategias pasivas de diseño contribuyen a mejorar el confort interior, disminuyendo el uso de energía en los sistemas activos, por tanto, mejorando la eficiencia energética de la edificación (Rodríguez-Ubinas, Montero, *et al.*, 2014).

2.1.3 Propiedades termo-físicas de materiales constructivos

A continuación se presenta una breve descripción de las principales propiedades físicas que debemos tener en conocimiento para caracterizar materiales constructivos (Molina Fuertes, 2017).

a. Densidad (ρ).

Cantidad de masa contenida por unidad de volumen de un determinado material. Se expresa en (kg/m^3) .

b. Calor específico (c)

Es la cantidad de calor necesaria para elevar $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ la temperatura de 1 kg de masa de un material. Su valor se expresa en $(\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C})$.

c. Conductividad térmica (k)

Es la capacidad de que tiene un material para dejar pasar calor a través de este. Su valor se mide en $(\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C})$. Lo contrario, es decir, la capacidad de no dejar pasar calor se denomina resistencia térmica (R) y su valor se mide en $(\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{W})$.

d. Inercia térmica

La inercia térmica es la resistencia de un cuerpo a cambiar de temperatura o la de intercambiar calor con otro cuerpo (Saavedra Salazar, 2014). Esta propiedad es importante cuando se busca disminuir la velocidad de flujo de calor, almacenar energía y liberar la energía cuando la temperatura del entorno sea menor que la del material (Molina Fuertes, 2017). A mayor inercia térmica de los materiales, menor es la variación de temperatura, es decir, menor amplitud térmica.

2.1.4 Transferencia de calor

Los mecanismos de transferencia de calor son tres: conducción, convección y radiación. Estos mecanismos se presentan solos o en conjunto. La conducción es el flujo de calor de un punto a otro por medio de un sólido, líquido o gas. La convección es el flujo de calor a través de un fluido (líquido o gas) que viaja más allá de la fuente de calor. La radiación es el intercambio de calor entre dos superficies por medio de ondas electromagnéticas en un medio gaseoso o en el vacío (Conley, Cruickshank y Baldwin, 2018).

a. Conducción

La conducción de calor es la transferencia de energía entre elementos colindantes debido a una diferencia de temperatura. En los sólidos se explica por la combinación de las vibraciones de las moléculas y el transporte de energía por electrones libres. En los fluidos se debe a las colisiones y difusión de las moléculas durante el movimiento aleatorio que presenta.

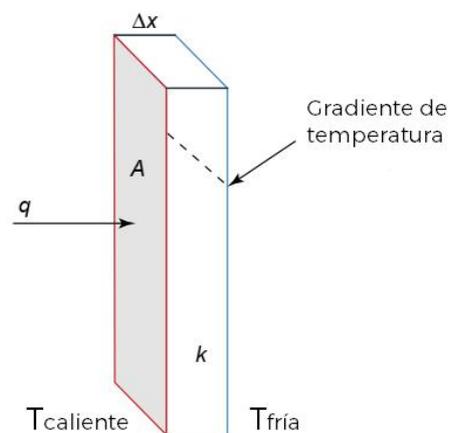


Figura 3. Conducción estacionaria unidimensional a través de un material (Conley, Cruickshank y Baldwin, 2018).

En una edificación, la conducción de calor se produce a través de los cerramientos, desde la superficie caliente interior hacia la superficie fría exterior. Esta transferencia puede darse cuando se trata de un solo material o varios materiales en contacto.

Para calcular la conducción de calor a través de un material (figura 3) además del gradiente de temperatura ΔT , debemos tener en cuenta el valor de la conductividad k del material. A menor conductividad, menor cantidad de calor se transfiere. Entonces, tenemos que esta cantidad de calor q viene dada por la ecuación 1, donde A es el área de la superficie en contacto y Δx es el espesor del material.

$$q = (k \cdot A \cdot \Delta T) / \Delta x \quad (1)$$

En sistemas reales, la conducción atraviesa más de un material con diferentes valores de conductividad térmica y espesor. Un método efectivo para el cálculo del flujo de calor en estos sistemas más complejos es calcular la resistencia térmica (R) mediante un circuito equivalente de resistencias como se muestra en la figura 4.

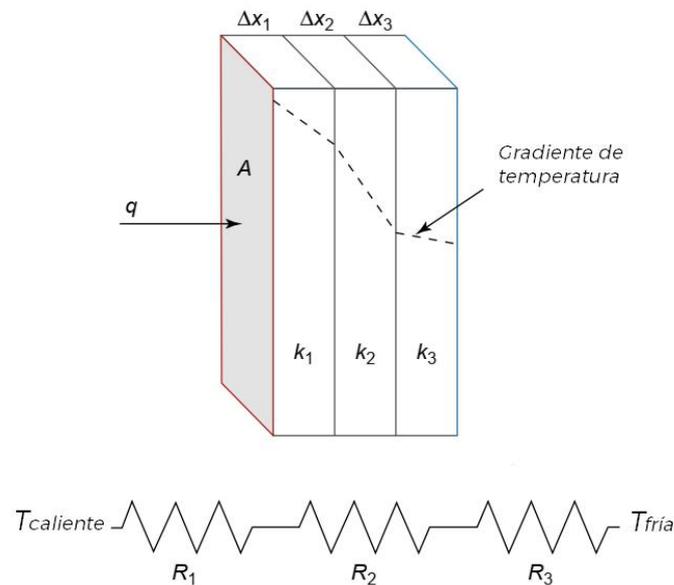


Figura 4. Conducción estacionaria unidimensional a través de materiales con diferentes conductividades térmicas (Conley, Cruickshank y Baldwin, 2018).

El circuito de resistencias usa el valor de la resistencia térmica de cada material, el cual viene siendo la inversa de la conductividad térmica por unidad de espesor. Entonces para un sistema estacionario la resistencia térmica efectiva (R_{ef}) viene dada por la ecuación 2.

$$R_{ef} = \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{\Delta x_3}{k_3} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (2)$$

Puede darse el caso que los materiales varíen en el plano perpendicular al flujo de calor (figura 5).

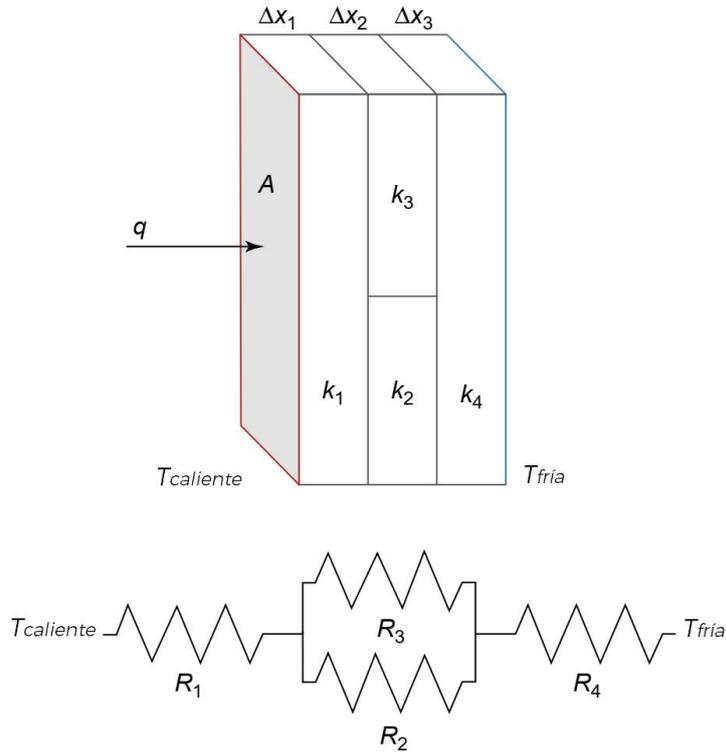


Figura 5. Conducción bidimensional a través de materiales con diferentes conductividades térmicas (Conley, Cruickshank y Baldwin, 2018).

En este caso, en el circuito equivalente, las resistencias de los materiales adyacentes están en paralelo y las otras en serie. La resistencia térmica efectiva viene dada por la ecuación (3).

$$R_{ef} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + R_4 \quad (3)$$

b. Convección

Convección es el intercambio de calor por medio del movimiento de un fluido cuando existe una diferencia de temperatura. La convección contiene un coeficiente convectivo, h , que representa la cantidad de calor intercambiado entre la superficie o fluido y el entorno y se mide en $(W/m^2 \cdot ^\circ C)$. La ecuación 4 muestra el cálculo de la transferencia de calor por convección (q), donde A es el área de la superficie en contacto, T_s es la temperatura superficial del material y T_∞ es la temperatura del fluido o entorno.

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (4)$$

Cuando la conducción y la convección están presentes, el sistema puede ser analizado como un circuito de resistencias (figura 6). Se crea un valor de resistencia superficial convectivo (R_c) tomando el inverso del coeficiente de convección.

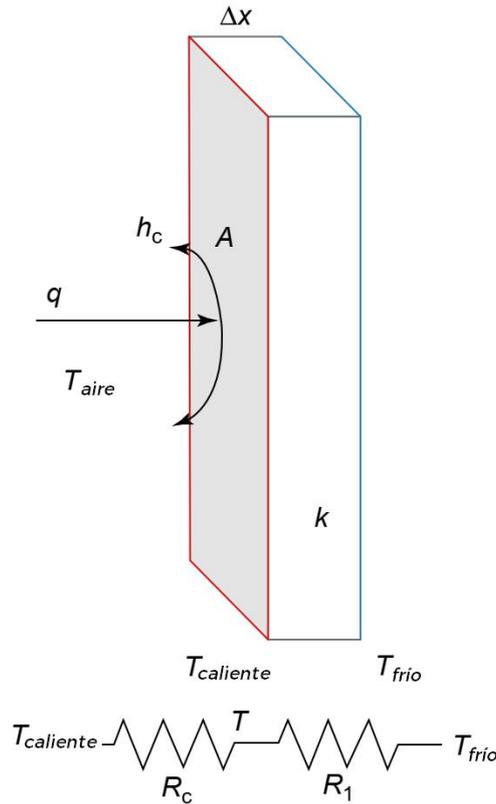


Figura 6. Circuito de resistencias equivalente para transferencia de calor por conducción y convección (Conley, Cruickshank y Baldwin, 2018).

Entonces la resistencia térmica efectiva puede ser calculada por la ecuación 5.

$$R_{ef} = R_c + R_1 \quad (5)$$

Existen dos tipos de convección: natural y forzada. La convección natural es causada por el movimiento natural del fluido debido a la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido. Esta diferencia de temperaturas provoca una diferencia de densidades y un flujo convectivo (en presencia de gravedad). La convección forzada ocurre cuando existe un flujo generado por una fuente externa, como una bomba o un ventilador, para incrementar el flujo de calor. El coeficiente de convección forzado es mayor al de convección natural.

c. Radiación

La radiación es un mecanismo de transferencia de calor mediante ondas electromagnéticas. A diferencia de la conducción y convección, la radiación no requiere un medio para su propagación (Welty, 2008).

La radiación para un material puede ser evaluada por la ecuación 6, donde A es el área superficial, T_s es la temperatura superficial del material, T_{alr} es la temperatura de los alrededores y σ es la constante de Stefan-Boltzmann y cuyo valor es $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

$$q = \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (6)$$

La envolvente de una edificación está constantemente intercambiando energía entre los ambientes interiores y el medio ambiente exterior. Para la evaluación de los tres tipos de transferencia de calor en conjunto,

como se muestra en la figura 7, tenemos un circuito de resistencias equivalente. R_1 y R_7 son las resistencias convectivas superficiales interior y exterior respectivamente. R_2 , R_3 , R_4 , R_5 y R_6 son resistencias térmicas conductivas. R_{rad} representa el intercambio de radiación entre la superficie exterior y los alrededores.

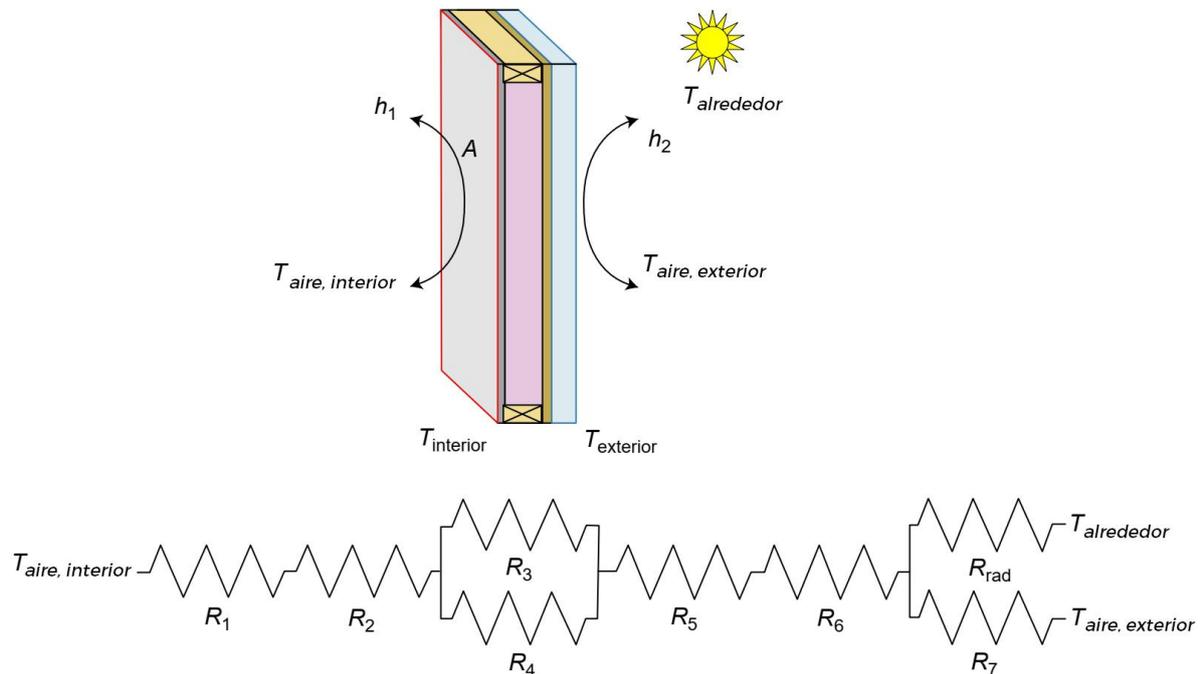


Figura 7. Circuito de resistencias equivalente para la envolvente de una edificación incluyendo los tres tipos de transferencia de calor (Conley, Cruickshank y Baldwin, 2018).

La ecuación 6 corresponde a un radiador ideal o “cuerpo negro”. El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el un cuerpo negro a la misma temperatura y viene dado por la ecuación 7.

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (7)$$

Donde ε es una propiedad radiativa superficial llamada emisividad, la cual toma valores en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$, siendo $\varepsilon = 1$ para un cuerpo negro. La radiación también incide desde los alrededores hacia una superficie. La fracción de energía absorbida por una superficie respecto a la radiación incidente sobre esta, se le denomina absorptividad (α), que va de 0 a 1. El valor de α y ε dependen de la naturaleza de la radiación (longitud de onda) y de la superficie misma. Para todo “cuerpo gris” ambos valores son iguales (Incropera y DeWitt, 1999).

2.1.5 Balance térmico en edificaciones

Es importante conocer los flujos o transferencias de energía en una edificación, ya que esto permite obtener el confort térmico. El objetivo del diseño bioclimático es lograr el control térmico natural (pasivo) sin emplear sistemas artificiales electromecánicos (activos).

Solo en condiciones extremas, es decir, cuando las posibilidades de medios arquitectónicos y/o sistemas pasivos se hayan agotado deberá utilizarse sistemas mecánicos.

Existen muchas metodologías sobre balance térmico. Todas dan la posibilidad de conocer cuanta energía gana o pierde la edificación debido a todos los elementos que la componen e influyen (radiación solar, materiales de construcción, personas, artefactos, etc.)

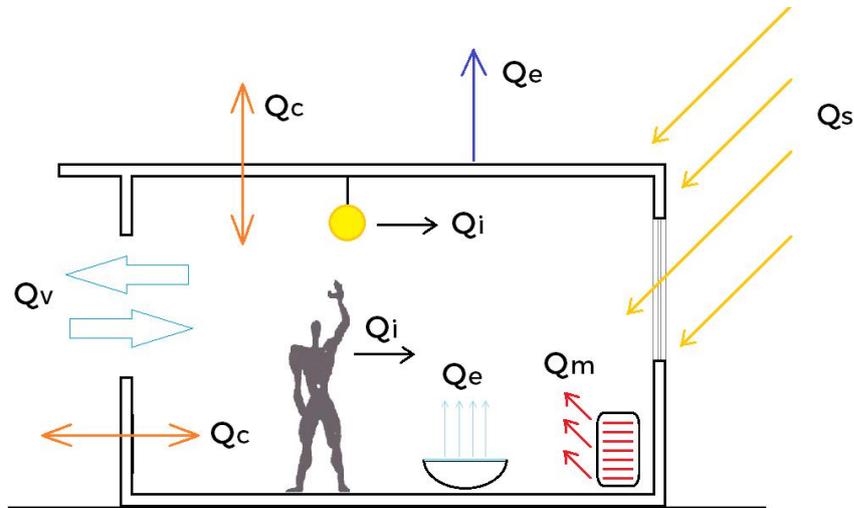


Figura 8. Flujos de calor en una edificación.

La ecuación de balance térmico viene dada por:

$$Q_s + Q_i + Q_c + Q_v + Q_e + Q_m = 0 \quad (7)$$

Donde:

Q_s = ganancia solar por la radiación

Q_i = ganancias internas por el calor humano y de los artefactos

Q_c = ganancias o pérdidas por conducción de los materiales

Q_v = ganancias o pérdidas por ventilación (ventilación e infiltración)

Q_e = pérdidas por evaporación

Q_m = ganancias o pérdidas por sistemas mecánicos

a. Ganancia solar

Es el aporte de la radiación solar sobre las superficies externas de la edificación o habitación de estudio.

$$Q_s = \sum G \times A \times \alpha \times U \times R_{se} \quad (8)$$

Donde:

G = Radiación solar incidente según orientación de la superficie (W/m^2)

A = Área superficial exterior (m^2)

α = Absortividad

U = Transmitancia térmica ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

R_{se} = Resistencia superficial exterior ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)

b. Ganancias internas

Las ganancias internas representan a las fuentes de calor (Watt) al interior del edificio e incluyen:

- Calor generado por personas
- Calor generado por equipos
- Calor generado por iluminación

c. Ganancias o pérdidas por conducción

En un clima frío se perderá calor desde el interior hacia el exterior del edificio a través de su envolvente. En un clima cálido ganará calor desde el exterior hacia el interior.

$$Q_c = \sum (U \times A) \times \Delta U \quad (9)$$

Donde:

U = Transmitancia térmica del elemento (techo, muro, piso) ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A = Superficie del elemento (m^2)

ΔT = Diferencia entre temperatura exterior e interior ($^\circ C$)

d. Ganancias o pérdidas por ventilación

Las pérdidas y ganancias por ventilación ocurren cuando el aire exterior ingresa y circula a través del edificio, lo cual implica también que el aire interior sea expulsado hacia afuera.

La ventilación puede ser intencional, a través de ventanas y puertas, o involuntaria, infiltración a través de los componentes constructivos (huecos, grietas, etc.).

Cuando la temperatura del aire exterior es mayor que del aire interior se tienen ganancias, usualmente en climas cálidos. Cuando la temperatura del aire exterior es más baja que el interior, se tienen pérdidas.

$$Q_v = V \times ACH \times \Delta T \times u \quad (10)$$

Donde:

V = Volumen de la habitación (m^3)

ACH = Cambios de aire por hora

ΔT = Diferencia entre temperatura exterior e interior ($^\circ C$)

$u = 0,335 W/m^3 \cdot ^\circ C$ (constante)

e. Ganancias o pérdidas por sistemas mecánicos

El flujo de calor debido a los sistemas mecánicos de climatización está sujeto al criterio del diseñador y puede controlarse deliberadamente. Debido a ello, generalmente se considera como una variable que puede ajustarse de acuerdo al balance de los demás factores.

Si la suma de los cinco primeros valores de la ecuación 8 es diferente de cero se debería incluir Q_m para que el resultado final sea cero. Debe utilizarse cuando se desea niveles de confort precisos que no pueden llegar mediante la arquitectura (por ejemplo, debido a temperaturas exteriores demasiado bajas o demasiado altas) o cuando se desea ambientes especiales donde la temperatura controlada sea una obligación. Entonces, se ha de impulsar calor o frío adicional proveniente de sistemas electromecánicos de calefacción o refrigeración.

f. Pérdidas por evaporación

El resultado siempre es negativo. El calor latente de evaporación del agua es 2400 kJ/kg, o sea, se absorben 2400 kJ al evaporarse 1kg de agua a 20°C.

$$Q_e = e \times c_{eva} \quad (11)$$

Donde:

e = tasa de evaporación (kg/h)

c_{eva} = calor latente de evaporación del agua = 2400 kJ/kg = 666,6 W.h/kg

2.2 Confort térmico

El objetivo principal de la disciplina del acondicionamiento térmico es crear espacios que ofrezcan condiciones de bienestar térmico. El estudio del confort térmico pretende analizar las respuestas del ser humano con respecto a las condiciones termo-físicas del ambiente (Rivero, 2010).

A continuación, se presentan algunas definiciones de confort térmico:

1. Según la *American Society of Heating and Air Conditioning Engineers* (2009) el confort “es la condición de la mente que expresa la satisfacción con el entorno térmico”, definición que recoge la norma ISO 7730.
2. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) el confort “es un estado de bienestar físico, mental y social”.
3. El confort o el disconfort, por ser una sensación propia del inconsciente, podemos no reconocerla, a menos que alguna circunstancia nos obligue a fijarnos en esa sensación de bienestar o de incomodidad. (Serra y Coch, 1995)

En el campo de investigación y de las normativas referidas a confort térmico se presentan dos modelos: el “estático” y el “adaptativo”, con diferentes bases metodológicas, enfoques y prescripciones sobre cómo debería ser manejado el clima interior de un edificio.

El modelo estático considera al usuario como un receptor pasivo de estímulos físico-térmicos. Estos estímulos, se supone, son exclusivamente originados por la termodinámica y los intercambios de energía en la superficie del cuerpo, y que el mantenimiento de la temperatura interna constante del cuerpo necesita algunas respuestas fisiológicas. Este sistema está basado en el balance térmico, según el cual:

- Los parámetros de confort son decididos por el diseñador: temperatura del aire, temperatura radiante, humedad relativa del aire, velocidad de viento.
- Los factores de confort dependen del usuario. El tipo de vestimenta es un factor sociocultural. La tasa de metabolismos vendría a ser un factor fisiológico.
- El equilibrio térmico es la condición básica (pero no suficiente) para el confort térmico.

El modelo adaptativo considera la física y la fisiología interactuando con la percepción térmica. Estos factores pueden incluir aspectos demográficos, el contexto y las preferencias y expectativas de los ocupantes, factores no considerados en el modelo estático.

El término “adaptación” se refiere a los mecanismos de adaptación fisiológica, de conducta y psicológicos que sufren los ocupantes del edificio con el fin de mejorar y ajustar las condiciones ambientales interiores.

2.3 Clima

El clima es la suma de todas las estadísticas (promedio y de variabilidad relevante) que describen la atmósfera y el océano determinadas durante un intervalo de tiempo (estaciones, décadas o más tiempo) calculado para todo el mundo o para una zona o región seleccionada (Bates *et al.*, 2008).

2.3.1 Elementos y factores climáticos

El clima es el conjunto de elementos y factores meteorológicos que caracterizan el estado de la atmósfera y océano. Los principales son mencionados en la tabla 1.

Tabla 1. Elementos y factores del clima (McGuffie y Henderson-Sellers, 2005).

Elementos	Termodinámicos	<ul style="list-style-type: none">- Temperatura- Presión- Velocidad y dirección de viento
	Acuosos	<ul style="list-style-type: none">- Humedad- Precipitación- Nubosidad
Factores	Cósmicos	<ul style="list-style-type: none">- Forma de la tierra- Movimiento terrestre- Radiación solar
	Geográficos	<ul style="list-style-type: none">- Altitud- Longitud- Latitud- Naturaleza del suelo- Continentalidad- Orografía- Temperatura superficial del mar

a. Temperatura atmosférica

Grado de calor específico del aire en un lugar y momento determinado. Se mide en grados centígrados (°C) o grados Fahrenheit (°F). Para su medición suele usarse un termómetro colocado en una caseta meteorológica. Para el estudio del clima en un tiempo acotado se necesita conocer: temperatura promedio, máxima y mínima.

La amplitud térmica está dentro de las variables necesarias para el análisis climático, esto es, definición del rango de confort, elección de estrategias bioclimáticas, y para el análisis comparativo del desempeño térmico calculado y simulado de edificaciones (Evans, 2001).

La amplitud térmica depende en gran medida de la masa térmica, por tanto, a mayor masa térmica menor amplitud térmica (González García, 2010).

b. Presión atmosférica

Se refiere al peso del aire sobre la superficie de la tierra. Se mide en milibares (mb), pascales (Pa), milímetros de mercurio (mmHg), atmósferas (atm) o bares (bar). La presión del aire varía de acuerdo a la altitud sobre el nivel del mar del lugar de estudio.

c. Viento

Es el movimiento horizontal de las masas de aire, producido como consecuencia de la diferencia de presiones. Sus unidades suelen ser metro por segundo (m/s) o kilómetros por hora (km/h). Para el estudio del clima se necesita conocer la orientación del viento, la velocidad del viento y la frecuencia de este.

d. Humedad relativa del aire

Es la relación entre cantidad de vapor de agua contenida en un metro cúbico el aire a una temperatura y presión determinada y la cantidad de vapor que tendría si estuviera saturado en las mismas condiciones, por tanto, se mide en porcentaje (%). Para su medición se utiliza un psicómetro o higrómetro. Para el estudio del clima se necesita conocer: humedad relativa promedio, máxima y mínima.

e. Precipitación

Referida a la caída de agua en forma de lluvia, granizo o nieve. Se mide con un pluviómetro en milímetros (mm) por metro cuadrado, Para el estudio presente basta con cuantificar las precipitaciones mensuales.

f. Nubosidad

Es la presencia de nubes en la atmósfera, por tanto, afectando la radiación solar incidente en la superficie terrestre. Puede determinarse por observación o imágenes satelitales.

g. Radiación solar

Es la energía proveniente del sol y que llega hasta la ubicación de la tierra. Cuando atraviesa la atmósfera parte de ella se desvía antes de llegar a la superficie. Por tanto, tenemos radiación solar directa, difusa, albedo y total. Para el estudio del clima necesitamos conocer la intensidad de la radiación horaria por metro cuadrado (W/m^2) y la energía total diaria por metro cuadrado (kWh/m^2 al día).

h. Latitud

Es la ubicación de un punto de la tierra respecto al Ecuador. Mientras más cerca al Ecuador, los rayos solares caen más perpendiculares.

i. Longitud

Es la ubicación de un punto en la tierra con respecto al meridiano de Greenwich. Está relacionado a la hora real del lugar.

j. Altitud

Es la ubicación de un lugar con respecto al nivel del mar. Este valor está relacionado inversamente proporcional a la presión del aire y a la temperatura.

k. Naturaleza del suelo

La composición, color y estructura de la superficie del suelo influye en el comportamiento térmico de este. Se puede encontrar dos grupos diferenciados de superficies: inorgánicas y orgánicas, como se detalla en la tabla 2.

Tabla 2. Características del suelo (McGuffie y Henderson-Sellers, 2005).

Superficies inorgánicas	Superficies orgánicas
Calentamiento y enfriamiento intenso.	Variaciones de temperatura estables.
Baja absorción del agua de lluvia.	Alta absorción del agua de lluvia y acumulación en acuíferos subterráneos.
La constitución del suelo cambiará producto de las escorrentías.	Evita la erosión del suelo.
El color oscuro de muchas de estas superficies (asfalto) contribuyen al aumento de la temperatura.	La absorción de calor estará en función a sus condiciones externas (sombra, sol, agua).
Reflexión de los rayos solares a otras superficies.	Mejor absorción de los rayos solares.

1. Continentalidad

Se refiere a la distribución de las masas continentales y masas de agua. Los lugares localizados cerca a grandes masas de agua (mares, océanos, lagos) suelen tener temperaturas más estables debido a la inercia térmica del agua.

2.3.2 Clasificaciones climáticas

Las clasificaciones climáticas permiten ayudar a identificar grandes áreas con similitudes en valores y rangos de temperatura, humedad, precipitaciones, etc. Existen diferentes clasificaciones de acuerdo a los elementos y factores que se toman en consideración, el peso relativo que se establece y la metodología empleada para la recolección de datos y análisis de la información.

Se necesita data climática de 30 años para promediar y establecer clasificaciones relevantes (Bates *et al.*, 2008).

En este estudio nos interesan dos clasificaciones: la clasificación climática mundial Köppen y la clasificación climática peruana del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

a. Köppen

Esta clasificación climática mundial fue establecida por Wladimir Köppen en 1918 y ha venido siendo actualizada constantemente y manteniéndose como la clasificación más usada mundialmente en enseñanza, investigación y desarrollo (Peel, Finlayson y McMahon, 2007).

Esta clasificación se basa en las temperaturas y precipitaciones medias, y en la vegetación presente en las regiones. Emplea un código de letras consecutivas que representan: en primer orden, una de las cinco zonas climáticas definidas, en segundo orden, el régimen de precipitaciones, en tercer lugar, el régimen de temperaturas y, por último, alguna característica especial del clima

Las cinco zonas climáticas definidas por Köppen son:

- Zona A: clima tropical.
- Zona B: clima seco o árido.
- Zona C: clima templado.
- Zona D: clima frío o de nieve.
- Zona E: clima polar o de hielo.

La descripción detallada de la clasificación climática de Köppen y los criterios que se toman en cuenta se presentan en la tabla 3. En la figura 9 se muestra el mapa climático mundial Köppen-Geiger y en la figura 10 el correspondiente mapa para Sudamérica.

Tabla 3. Descripción y criterios de la clasificación Köppen (Peel, Finlayson y McMahon, 2007).

1°	2°	3°	Descripción	Criterio
A			Tropical	$T_{fría} \geq 18\text{ °C}$
	f		- Selva	$P_{seco} \geq 60\text{ mm}$
	m		- Monzón	No (Af) y $P_{seco} \geq (100 - PMA/25)\text{ mm}$
	w		- Sabana	No (Af) y $P_{seco} \leq (100 - PMA/25)\text{ mm}$
B			Árido	$PMA < 10 \times P_{umbral}$
	W		- Desierto	$PMA < 5 \times P_{umbral}$
	S		- Estepa	$PMA \geq 5 \times P_{umbral}$
		h	- Caluroso	$TMA \geq 18\text{ °C}$
		k	- Frío	$TMA < 18\text{ °C}$
C			Templado	$T_{caliente} > 10\text{ °C}$ y $0\text{ °C} < T_{fría} < 18\text{ °C}$
	s		- Verano seco	$P_{vseco} < 40\text{ mm}$ y $P_{vseco} < P_{ihúmedo}/3$
	w		- Invierno seco	$P_{iseco} < P_{vhúmedo}/10$
	f		- Sin temporada seca	No (Cs) o (Cw)
		a	- Verano caluroso	$T_{caliente} \geq 22\text{ °C}$
		b	- Verano cálido	No (Csa) y $T_{mes10} \geq 4$
		c	- Verano frío	No (Csa) o (Csb) y $1 \leq T_{mes10} \leq 4$
D			Frío	$T_{caliente} > 10\text{ °C}$ y $T_{fría} \leq 0\text{ °C}$
	s		- Verano seco	$P_{vseco} < 40\text{ mm}$ y $P_{vseco} < P_{ihúmedo}/3$
	w		- Invierno seco	$P_{iseco} < P_{vhúmedo}/10$
	f		- Sin temporada seca	No (Ds) o (Dw)
		a	- Verano caluroso	$T_{caliente} \geq 22\text{ °C}$
		b	- Verano cálido	No (Dsa) y $T_{mes10} \geq 4$
		c	- Verano frío	No (Dsa) o (Dsb) o (Dsd)
		d	- Invierno muy frío	No (Dsa) o (Dsb) y $T_{fría} < -38\text{ °C}$
E			Polar	$T_{caliente} < 10\text{ °C}$
	T		- Tundra	$T_{caliente} > 0\text{ °C}$
	F		- Helado	$T_{caliente} \leq 0\text{ °C}$

PMA = precipitación media anual, TMA = temperatura media anual, $T_{caliente}$ = temperatura del mes más caliente, $T_{fría}$ = temperatura del mes más frío, T_{mes10} = número de meses con temperatura mayor a 10°C, P_{seco} = precipitación del mes más seco, P_{vseco} = precipitación del mes más seco en verano, P_{iseco} = precipitación del mes más seco en invierno, $P_{vhúmedo}$ = precipitación del mes más húmedo en verano, $P_{ihúmedo}$ = precipitación del mes más húmedo en invierno, P_{umbral} = varía de acuerdo a la siguiente regla (si 70% de PMA ocurre en invierno entonces $P_{umbral} = 2 \times TMA$, si 70% de PMA ocurre en verano entonces $P_{umbral} = 2 \times TMA + 28$, de otra manera $P_{umbral} = 2 \times TMA + 14$). El verano (invierno) está definido como el más cálido (frío) de los dos periodos: de octubre a marzo y de abril a septiembre.

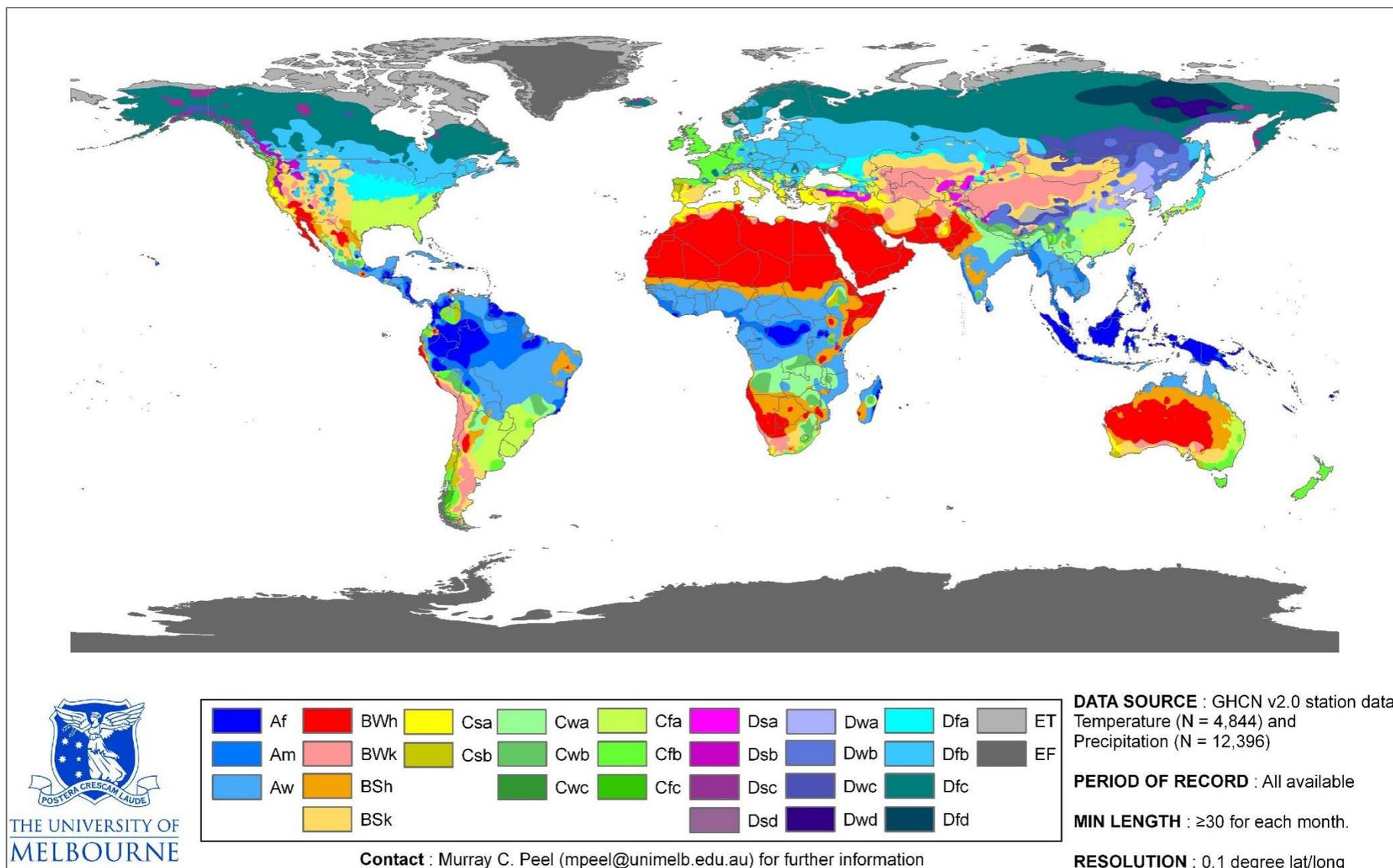


Figura 9. Mapa mundial de clasificación climática Köppen-Geiger (Peel, Finlayson y McMahon, 2007).

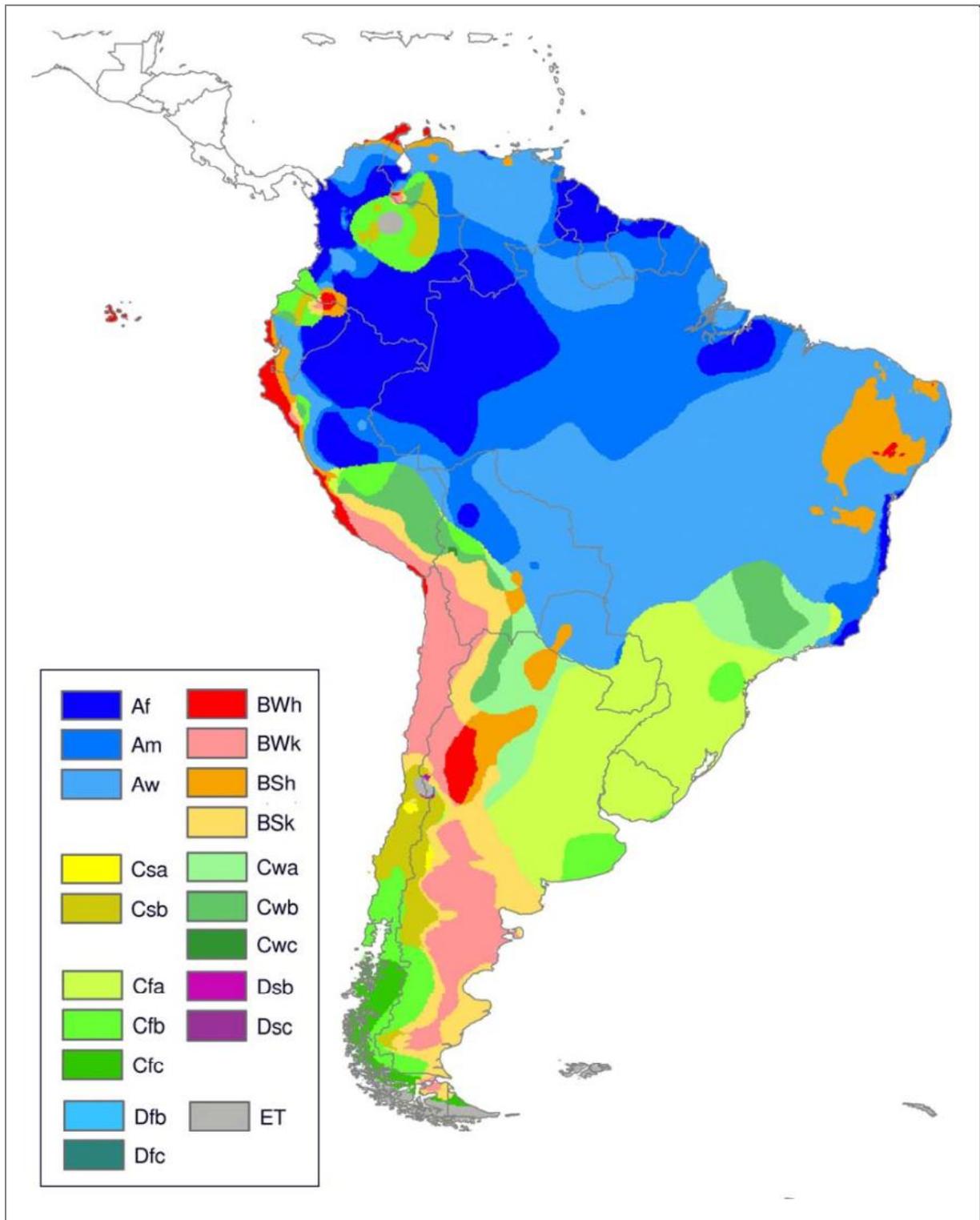


Figura 10. Mapa climático Köppen-Geiger para Sudamérica (Peel, Finlayson y McMahon, 2007).

b. SENAMHI

Clasificación elaborada por SENAMHI sustentada en información meteorológica de cerca de veinte años (1965 - 1984), con la cual se formula los "índices climáticos" y el trazado de las zonas de acuerdo a la clasificación de Werren Thornthwaite (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

[SENAMHI], 2020). En la tabla 4 se muestran los símbolos y criterios de esta clasificación climática. El mapa climático para Perú se muestra en la figura 11.

Tabla 4. Descripción de los símbolos y criterios de la clasificación climática de SENAMHI, 2020.

Precipitación efectiva		
Clima	Símbolo	Vegetación característica
Muy lluvioso	A	Selva
Lluvioso	B	Bosque
Semiseco	C	Pastizal
Semiárido	D	Estepa
Árido	E	Desierto
Distribución anual de la precipitación		
Símbolo	Significado	
(r)	Precipitación abundante en todas las estaciones	
(i)	Con invierno seco	
(p)	Con primavera seca	
(v)	Con verano seco	
(o)	Con otoño seco	
(d)	Deficiencia de precipitación en todas las estaciones	
Temperatura eficiente		
Clima	Símbolo	Zona
Cálido	A'	Tropical
Semicálido	B' ₁	Mesotermal
Templado	B' ₂	
Semifrío	B' ₃	
Frío	C'	Microtermal
Semifrígido	D'	
Frígido	E'	
Polar	F'	Hielo Perpetuo
Humedad relativa media		
Rango medio anual	Clima	Símbolo
25% a 44%	Muy seco	H ₁
45% a 64%	Seco	H ₂
65% a 84%	Húmedo	H ₃
85% a 100%	Muy húmedo	H ₄

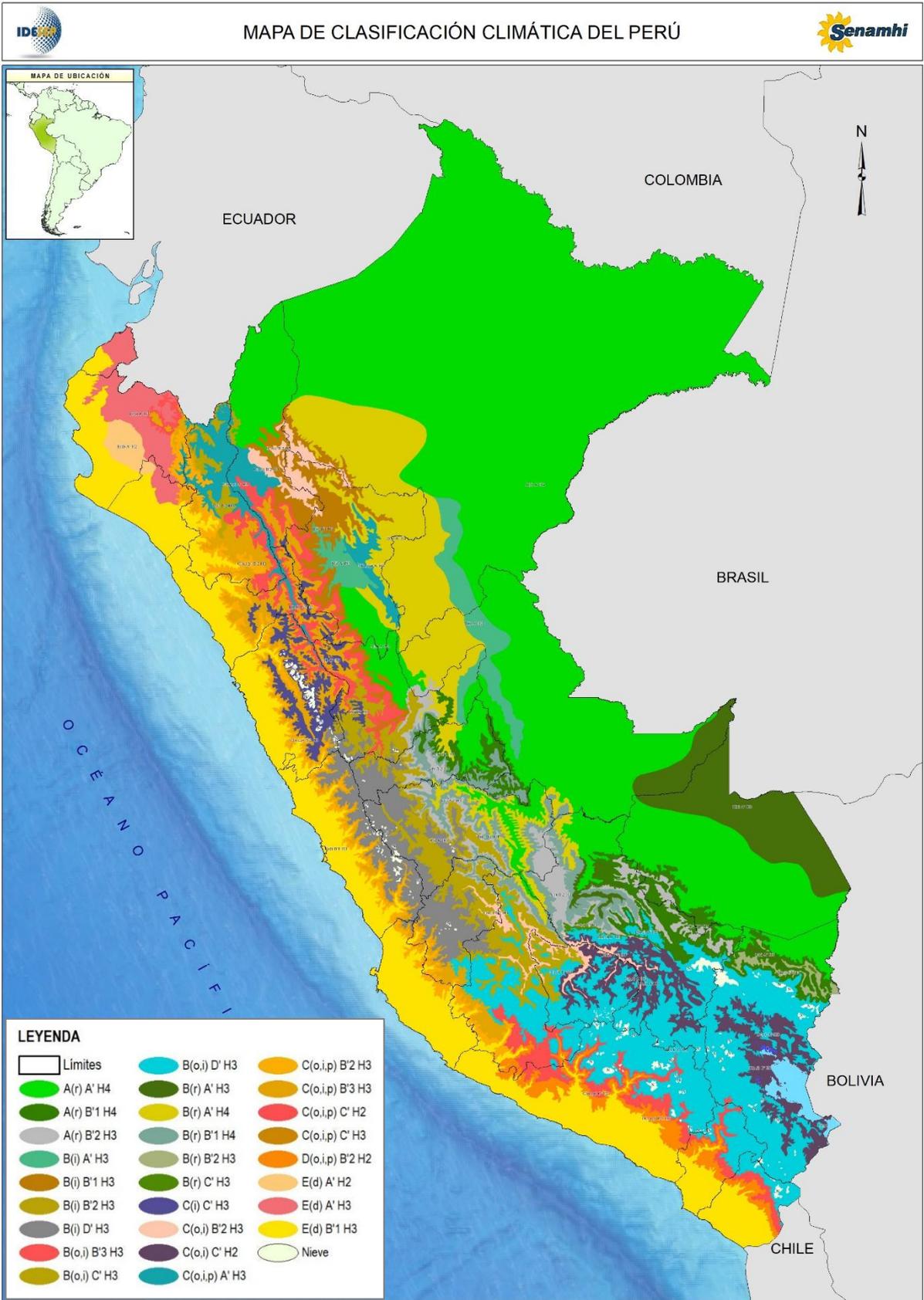


Figura 11. Mapa climático del Perú (SENAMHI, 2020).

2.4 Metodologías de análisis bioclimático

Los efectos climáticos sobre el ser humano han sido estudiados de diferentes maneras. Diversas observaciones muestran que las actividades físicas y mentales del ser humano se desarrollan óptimamente en un determinado rango de condiciones climáticas. Fuera de este rango, su eficiencia en el trabajo disminuye, mientras que el estrés y riesgos de padecer alguna enfermedad relacionada aumentan (Olgay, 1963).

En arquitectura, el ser humano es la medida central para las decisiones de diseño. Los análisis bioclimáticos, son herramientas necesarias para que, a partir de condiciones climáticas existentes, establecer estrategias y técnicas de diseño arquitectónico que permitan generar ambientes confortables, es decir, dentro de las zonas de confort definidas.

2.4.1 Gráfico de confort de Givoni

Este gráfico bioclimático de confort fue desarrollado por Baruch Givoni, un arquitecto israelí, a partir de 1969 en su libro "*Man, Climate and Architecture*" y posteriormente ampliado y mejorado por él y otros especialistas.

Esta carta fue desarrollada por Givoni para abordar problemas presentes en las cartas de Olgay asociados a diferencias significativas entre temperaturas interiores y exteriores en edificaciones con gran masa térmica en climas cálidos y áridos.

Sobre una carta psicométrica se ubica una zona de confort, basada en temperaturas interiores esperadas en edificaciones sin sistemas mecánicos de climatización y apropiadamente diseñada para la zona de construcción. Estos límites de confort se basan en investigaciones en Estados Unidos, Europa e Israel. Para otros lugares se sugiere una extensión de esta zona basada en estudios del sitio.

El gráfico de confort de Givoni sugiere límites y zonas de condiciones climáticas dentro de las cuales existen estrategias de diseño y sistemas climatización natural recomendadas para otorgar confort dentro de la edificación.

La figura 12 muestra las zonas y límites de la carta bioclimática de Givoni:

- Zona de confort. Área de bienestar y área de bienestar admisible.
- Estrategias de diseño bioclimático y sistemas pasivos. Masa térmica. Enfriamiento evaporativo. Ventilación natural permanente. Ventilación natural nocturna. Ganancias internas. Sistemas solares pasivos.
- Sistemas activos. Sistemas solares activos. Humidificación. Refrigeración convencional. Calefacción convencional

En el gráfico de confort de Givoni se ubican los promedios, máximos y mínimos mensuales de las temperaturas y humedad relativa de un año. La correspondencia de estos con las zonas marcadas nos indicará las estrategias recomendadas para lograr el confort.

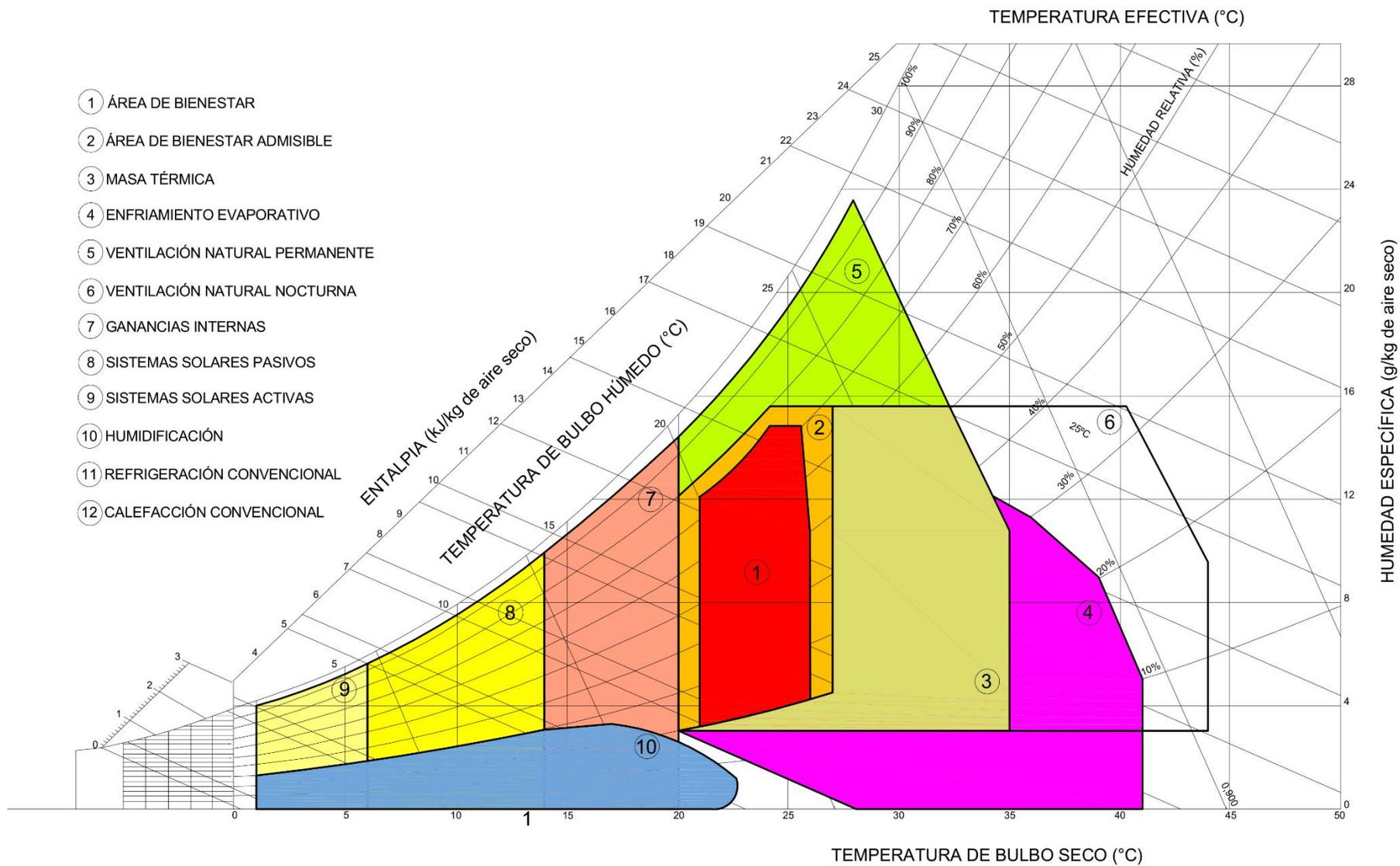


Figura 12. Gráfico de confort de Givoni (Givoni, 1992).

2.4.2 Tablas de Mahoney

Las tablas de Mahoney fueron desarrolladas en 1969 para Nigeria y publicadas por Koenigsberger, Mahoney y Evans en 1971 (Evans, 2001). Las tablas de Mahoney son usadas para el diseño bioclimático y en especial para la determinación de las zonas de confort diurno y nocturno por mes de acuerdo a la temperatura media anual y la humedad relativa promedio mensual (Daemei, Eghbali y Khotbehsara, 2019). El método de Mahoney se usa para evaluar los requerimientos del confort térmico en viviendas tradicionales y viviendas nuevas, especialmente en climas tropicales (Pawar, Mukherjee y Shankar, 2015).

El método consiste en un análisis de cuatro etapas (Evans, 2001):

- Tabla de Mahoney 1. Se registra la data climática mensual, con ciertas simplificaciones para definir sus características principales.
- Tabla de Mahoney 2. Para comparar los datos con las zonas de confort para el día y la noche. Con esta tabla se obtiene un registro mensual de condiciones cálidas, óptimas o frías, de día y de noche. Además, se muestra los indicadores que surgen del análisis de las condiciones climáticas coincidentes con confort o desconfort mensual.
- Tabla de Mahoney 3. Recomendaciones generales de diseño en base a la cantidad de meses con distintos indicadores.
- Tabla de Mahoney 4. Definición de pautas de diseño específicas en base a la cantidad de meses con distintos indicadores.

Las tablas detalladas del método Mahoney se muestran en el Anexo 2. Es necesario desarrollar modelos de confort térmico adecuados a las zonas climáticas del Perú, los actuales han sido desarrollados en países europeos, norteamericanos y africanos (Molina Castillo, 2016).

Además, en los anexos 3 y 4 se muestran recomendaciones de diseño desarrolladas para el Perú por el Ministerio de Vivienda y por el Arquitecto Wieser, respectivamente.

2.5 Climatización natural

Si se aplica criterios bioclimáticos en el diseño y sistemas pasivos de calefacción y enfriamiento, mediante el uso de programas de simulación y análisis se puede llegar a obtener resultados de eficiencia energética hasta de 49% (Coellar Heredia, 2013).

2.5.1 Criterios de diseño bioclimático

Los criterios de diseño bioclimático representan simplificaciones de algunos aspectos y propiedades aplicados en edificaciones (Montoro Cavero, 2003).

a. Ubicación y corrección del entorno

Tabla 5. Criterios de diseño en relación con la ubicación y corrección del entorno (Serra y Coch, 1995).

Altura Relativa	Respecto a las elevaciones cercanas como cerros, edificios, colinas, etc.
Pendiente	Influye en las horas de sol y dirección e intensidad del viento.
Orientación	Influye en las horas de sol y dirección e intensidad del viento.
Relación con el agua	Las grandes masas de agua regulan y estabilizan las temperaturas.
Relación con la vegetación	La vegetación provee sombra y humedad.

b. Forma del edificio

Tabla 6. Criterios de diseño en relación con la forma del edificio (Serra y Coch, 1995).

Compacidad	Relación entre la superficie envolvente y volumen del edificio. A mayor compacidad menos superficie de intercambio de calor.
Porosidad	Relación entre las zonas vacías (patios) del edificio y su volumen total. A mayor porosidad aumenta las superficies de contacto con el medio exterior.
Esbeltez	Relación de las dimensiones del edificio en función de su forma alargada en el sentido horizontal. A mayor esbeltez existe una menor superficie de contacto con el terreno y una mayor exposición al exterior.
Orientación	Orientación del eje del edificio orientando las paredes ya sea para captar mayor radiación solar o evitarla. Esto depende de la latitud, la altitud y del clima del lugar.

c. Piel del edificio

Tabla 7. Criterios de diseño en relación con la piel del edificio (Serra y Coch, 1995).

Asentamiento	Grado de contacto de las superficies exteriores del edificio con el terreno.
Adosamiento	Grado de contacto de las superficies exteriores del edificio con otros edificios colindantes.
Peso	Característica de las superficies exteriores que depende del tipo y cantidad de material utilizado en ellas.
Aislamiento	Grado de resistencia de las superficies exteriores del edificio al flujo de calor.
Perforación	Grado de permeabilidad al paso del aire de las superficies exteriores del edificio.
Transparencia	Característica que determina la mayor o menos capacidad de captación de radiación solar.
Color	El color de las superficies determina la absorción de la energía radiante. Colores claros captan menos energía que los colores oscuros.

d. Interior del edificio

Tabla 8. Criterios de diseño en relación al interior del edificio (Serra y Coch, 1995).

Geometría	Tanto el volumen, la proporción y desnivel del interior del edificio repercuten en la captación y distribución de la energía.
Compartimentación y conexión	Se refiere al modo de ordenar y relacionar los espacios interiores. El nivel de separación horizontal y verticalmente condiciona la transmisión de la energía.
Peso	A mayor peso mayor estabilidad térmica.
Textura y color	Una mayor rugosidad favorece ligeramente el intercambio de calor y los colores oscuros la absorción de la radiación.

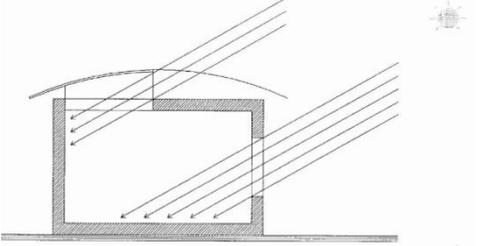
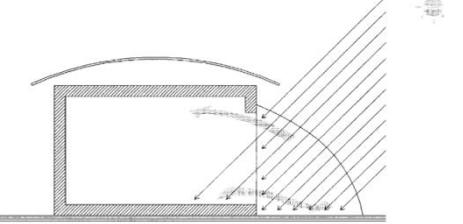
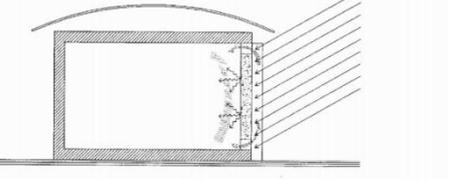
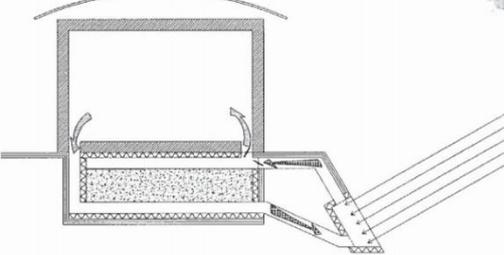
2.5.2 Sistemas especiales de acondicionamiento ambiental pasivo

En esta sección se describe los sistemas ambientales pasivos (no utilizan fuente de energía artificial) para captación y disipación de calor, ventilación natural, tratamiento de aire, protección a la radiación, según la clasificación hecha por Serra y Coch (Serra y Coch, 1995).

a. *Sistemas captadores de radiación solar*

Estos sistemas tienen la función de captar energía solar y con ella calentar el interior de la edificación. A su vez, estos sistemas pueden ser directos, semidirectos, indirectos independientes.

Tabla 9. Sistemas captadores de radiación solar (Serra y Coch, 1995).

Sistema captador	Descripción	Esquema
Directo	La energía solar penetra directamente en el ambiente interior.	
Semidirecto	Un espacio intermedio capta la energía solar y la transfiere al ambiente interior.	
Indirecto o de inercia	Un elemento acumulador capta la energía solar, la almacena y posteriormente calienta el ambiente interior.	
Independiente	La captación y acumulación de la energía solar se realiza fuera del ambiente interior.	

b. *Sistemas de ventilación*

Estos sistemas se encargan de facilitar la ventilación de los ambientes. La ventilación es necesaria y obligatoria por varias razones:

- Renovar el oxígeno.
- Remover el dióxido de carbono, vapor de agua, olores, agentes patógenos, partículas de polvo y humo, gases tóxicos, etc.
- Disipar el calor del edificio y controlar la humedad, entre otros.

La cantidad de renovaciones de aire de cada ambiente varía de acuerdo al tipo de ambiente, al número de personas, al uso que se le dé, a la actividad desarrollada, etc.

La ventilación a través de las ventanas es necesaria para renovar el aire y reducir los niveles de CO₂ y humedad del aire. La energía perdida en un ambiente es proporcional al producto del ratio de ventilación y la diferencia de temperatura (Allard *et al.*, 1992). Los parámetros de renovación de aire pueden estar dados en intercambios de aire por hora (*ACH, Air Change per Hour*), en litros por segundo (l/s), en metros cúbicos por hora (m³/h), en pies cúbicos por minuto (CFM, *Cubic Feet per Minute*).

El valor aproximado de necesidad de aire de una persona para actividad sedentaria es de 0,5 m³/h y para trabajo pesado es 5 m³/h. Rangos típicos de ventilación requeridos en algunos tipos de ambientes pueden verse en la tabla 10. El uso de sistemas pasivos de enfriamiento en combinación con la masa térmica puede ser aplicado en un edificio para incrementar los niveles de confort interior (González García, 2010).

Tabla 10. Rangos típicos de ventilación por al tipo de ambiente (Szokolay, 2008).

Ambiente	Renovación mínima (ACH)
Cocina	20
Lavandería	15
Restaurante	10 – 15
Cine, teatro	6 – 10
Baño	6
Oficina	4 – 6
Biblioteca	3 – 4
Corredor	2

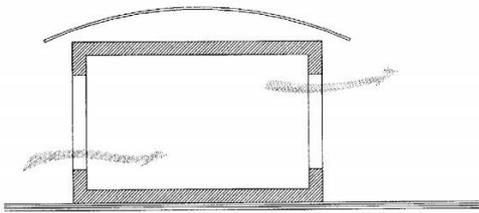
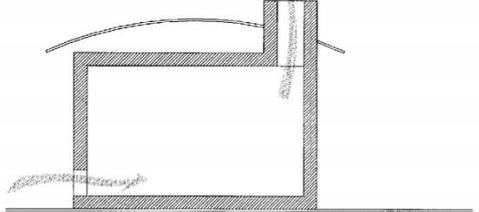
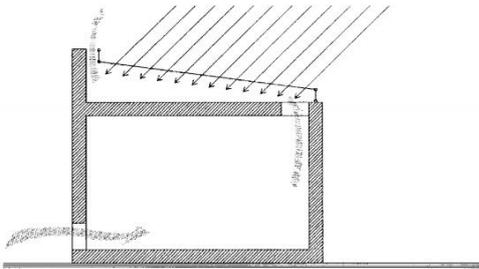
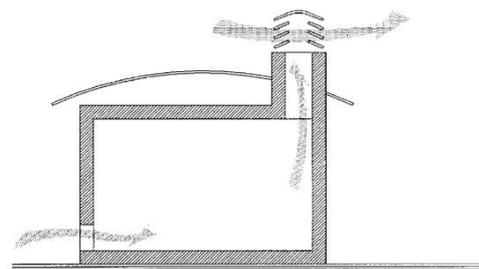
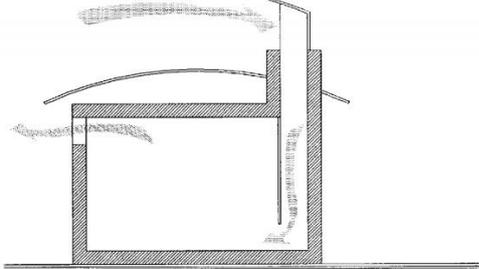
Además, solo considerando el número de personas en un ambiente, se puede tener el número de renovaciones requerido mínimo en la tabla 11.

Tabla 11. Rangos mínimos y recomendados de renovación de aire en función del número de ocupantes por área (Szokolay, 2008)

Volumen del ambiente por persona (m ³)	Renovación de aire por persona (ACH)	
	Mínima	Recomendada
3	12	17
6	7	11
9	5	8
12	4	6

Los principales sistemas de generación de movimiento de aire son: ventilación cruzada, efecto chimenea, cámara solar, aspiradores estáticos y torres de viento.

Tabla 12. Sistemas de ventilación natural (Serra y Coch, 1995)

Sistema	Descripción	Esquema
Ventilación cruzada	Consiste en facilitar el movimiento de aire entre espacios mediante aberturas colocadas en paredes opuestas.	
Efecto chimenea	Se produce al crear extracción de aire por aberturas en el techo del ambiente. Es necesario aberturas inferiores para generar flujo de aire.	
Cámara solar o chimenea solar	Con la ayuda de la radiación solar se calienta el aire de una cámara captadora cubierta de cristal. Esto genera una succión y extracción del aire. Es también necesaria una abertura inferior.	
Aspirador estático	Gracias al efecto Venturi, al paso del viento este dispositivo estático genera una depresión en el aire interior del edificio, extrayéndolo. Es necesaria la abertura inferior para el flujo.	
Torre de viento	Se introduce aire exterior al ambiente mediante una torre captadora elevada hasta una altura adecuada donde el viento es más intenso.	

c. *Sistemas de protección frente a la radiación solar*

Sistemas que protegen el interior del edificio del exceso de radiación. Esto es sobre todo valioso en climas calurosos o de veranos intensos, siendo estos sistemas mucho más importantes que el aislamiento térmico para esos casos (Serra y Coch, 1995).

Estos sistemas se pueden clasificar en dos sistemas:

- Umbráculos. Espacios sombreados por fuera de la envolvente del edificio.
- Protectores de la piel del edificio. Aleros y parasoles fijos o móviles sobre la fachada que protegen la piel y el interior del edificio de la radiación y la lluvia.

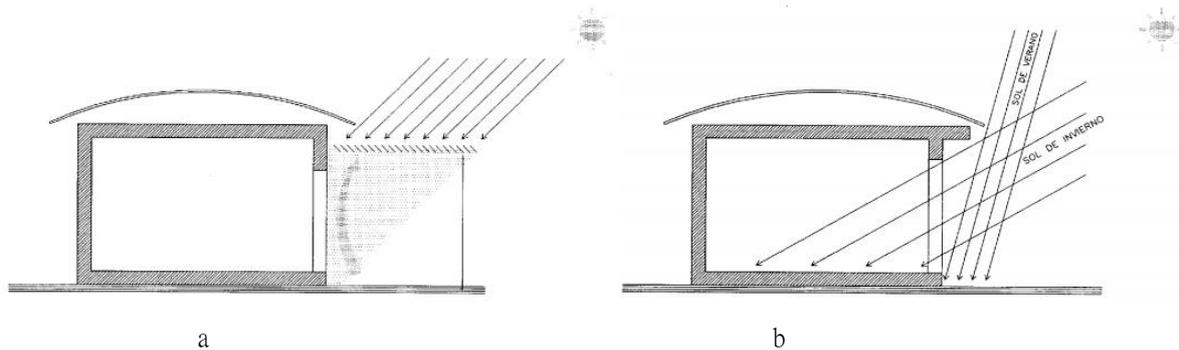


Figura 13. Sistemas de protección frente a la radiación. Umbráculo (a) y Protectores de piel del edificio (b) (Serra y Coch, 1995).

2.6 Programas de simulación

Para el presente estudio se utilizaron tres programas de cálculo y simulación. Para el cálculo predictivo de temperatura y humedad interior se usó el programa *EnergyPlus*, para el cálculo de la ventilación natural se utilizó el programa *Ecotect* y para obtener las medidas idóneas de aleros y parasoles, el programa *Biosol*.

El uso de programas de simulación de comportamiento de edificaciones permite adecuar el diseño arquitectónico a los requerimientos energéticos desde el proceso de creación, por tanto, son herramientas decisivas en la mejora de la eficiencia energética y desempeño térmico de viviendas (Gaspari *et al.*, 2017).

2.6.1 *EnergyPlus*

EnergyPlus es un programa desarrollado por el Departamento de Energía de Los Estados Unidos como una poderosa herramienta de análisis en la búsqueda de lograr la eficiencia energética en las edificaciones.

EnergyPlus es un programa completo de simulación de energía de edificios que se usa para modelar tanto el consumo de energía (para calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación y cargas de enchufe y de proceso) como el uso de agua en los edificios (EnergyPlus, 2020).

EnergyPlus fue diseñado para evaluar edificaciones térmicamente, de manera dinámica, en función de su entorno, descripción del usuario, geometría arquitectónica, materiales constructivos, usos, funciones y demás sistemas energéticos internos (Molina Fuertes, 2017).

Para nuestro estudio utilizaremos algunas de sus funciones que incluye: la solución de las condiciones de zonas térmicas, el balance térmico de ambientes, transferencia de calor, movimiento de aire entre zonas, para obtener un modelo predictivo de comportamiento térmico de una edificación, que nos servirá para validar las recomendaciones bioclimáticas propuestas en el análisis y ayudar en la toma de decisiones al ser aplicadas al diseño.

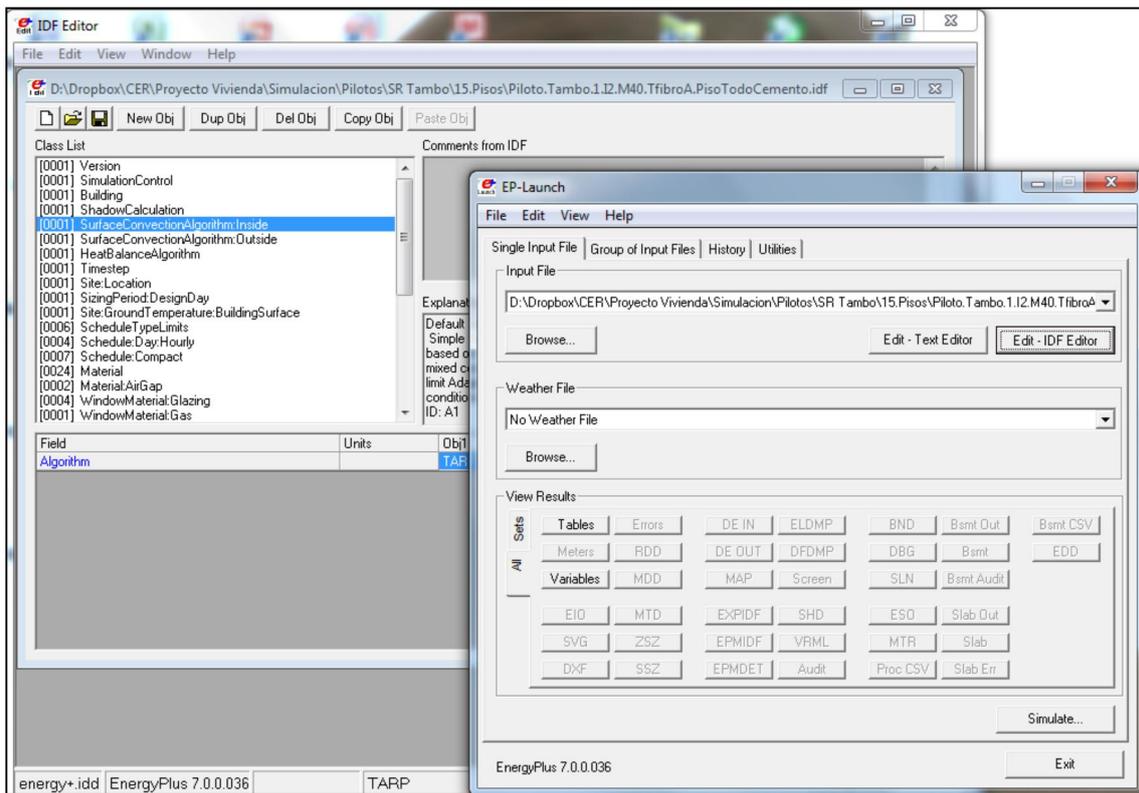


Figura 14. Entorno alfanumérico del programa *EnergyPlus*.

El entorno del programa *EnergyPlus* es enteramente alfanumérico (figura 14). Para su correcto y productivo funcionamiento, se necesitan dos programas adicionales: *SketchUp* y *Euclid* (figura 15). El primero es un software de modelado tridimensional que se utiliza tanto en arquitectura como en ingenierías para diseñar desde piezas mecánicas hasta grandes edificaciones, para dibujar la geometría del edificio y definir los espacios interiores, que conoceremos como zonas térmicas. Una zona térmica es aquella zona o volumen que consideraremos como uniforme en cuanto a temperatura, humedad, movimiento de aire, etc. Una zona térmica puede abarcar más de una habitación de una edificación. En pequeñas viviendas consideramos a cada habitación como una zona térmica.

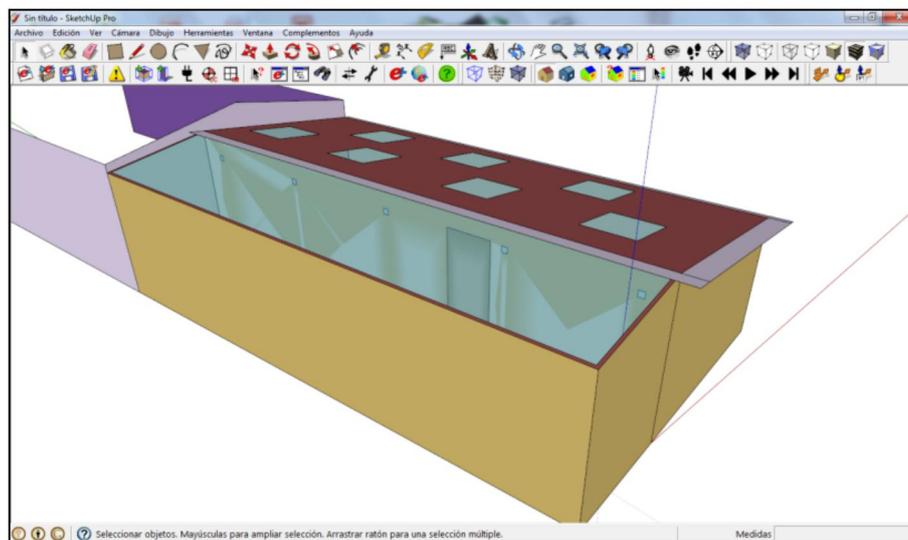


Figura 15. Entorno gráfico de programa *SketchUp + Euclid*.

El segundo programa, *Euclid*, es una extensión del programa *SketchUp* que sirve como enlace entre este y *EnergyPlus*. Otorga herramientas de dibujo especializado dentro del entorno gráfico de *SketchUp*, de asignación de materiales de construcción y creación del archivo de trabajo que pueda ser leído por el *EnergyPlus*.

Una metodología más detallada del uso de *EnergyPlus* para el balance térmico puede encontrarse en el trabajo desarrollado por Molina (Molina Fuertes, 2018)

a. Datos requeridos

Para realizar el proceso de simulación en el programa *EnergyPlus* se necesita contar con la siguiente información:

- Descripción de la vivienda:
 - o Planos arquitectónicos y estructurales.
 - o Dimensiones, propiedades térmicas y ópticas de los materiales de construcción (espesor, calor específico, conductividad térmica, densidad, etc.)
 - o Número de habitantes.
 - o Propiedades de los materiales muebles.
 - o Descripción de las fuentes internas de calor.
 - o Temperatura y humedad relativa interna de los ambientes de la vivienda.
- Descripción del lugar:
 - o Localización (latitud, longitud, altitud, zona horaria).
 - o Temperatura y humedad relativa externa.
 - o Radiación solar.
 - o Velocidad y dirección del viento.

b. Reconocimiento del modelo de vivienda

Una vivienda suele contar con varios ambientes. El primer paso del reconocimiento es identificar las zonas térmicas dentro de la vivienda. Identificamos las características de sus componentes arquitectónicos y geometría arquitectónica.

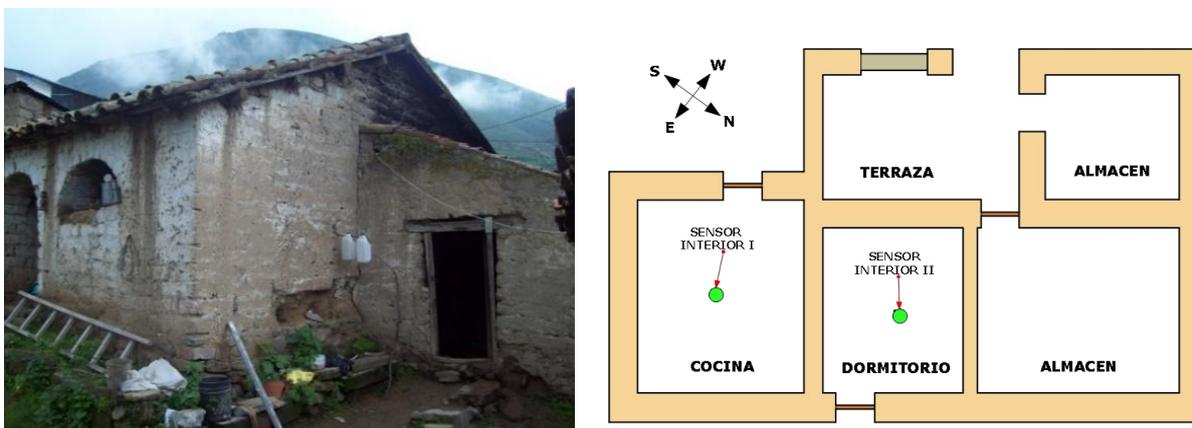


Figura 16. Vivienda real y su representación arquitectónica en una vista de planta.

c. *Gráfica del modelo de la vivienda*

Con *SketchUp* se realiza el modelo tridimensional de la vivienda por zonas térmicas (figura 17).

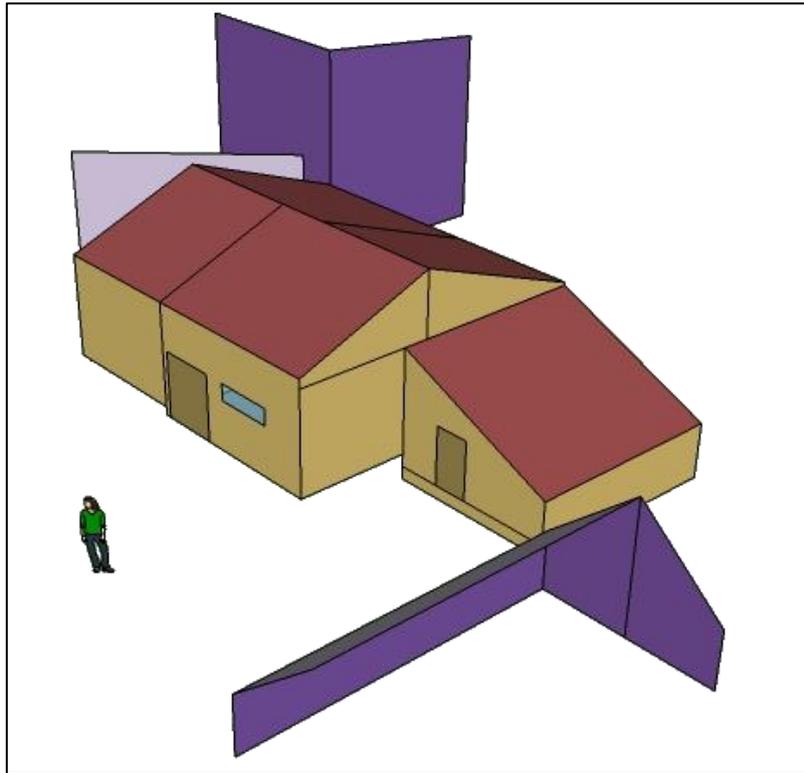


Figura 17. Modelo gráfico de una vivienda en el entorno gráfico *SketchUp*.

d. *Localización de la vivienda*

En el entorno del programa *EnergyPlus* se introducen varios datos, empezando por la localización geográfica del sitio de estudio.

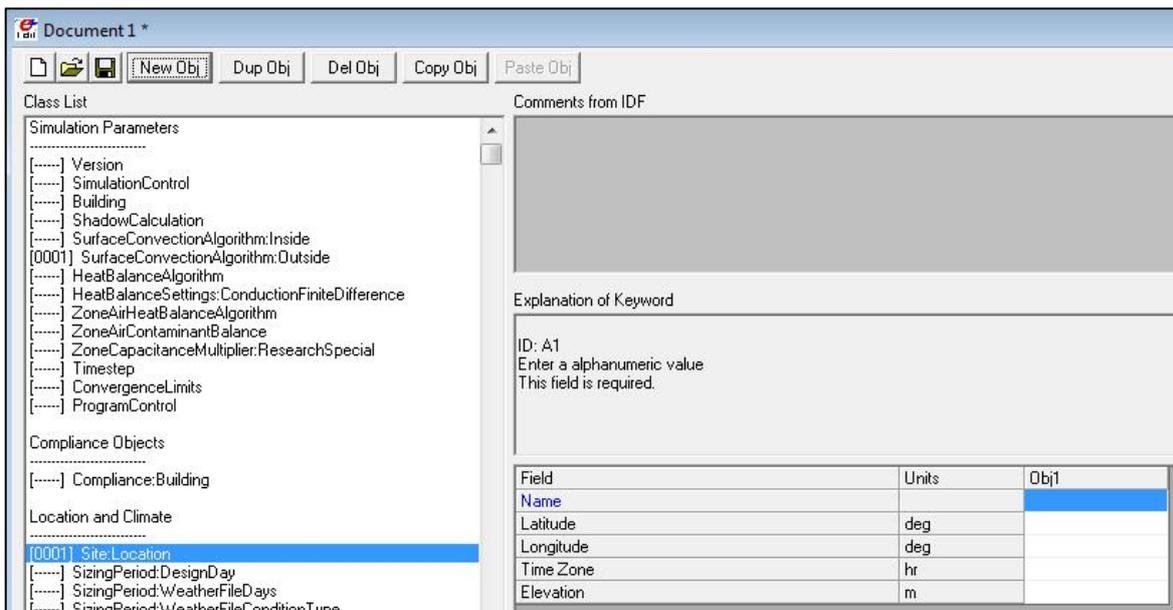


Figura 18. Entorno alfanumérico de *EnergyPlus* para introducir variables de localización latitud, longitud y altitud.

e. Definición de materiales

Para definir los materiales el programa requiere: espesor, calor específico, conductividad, densidad y propiedades ópticas para de materiales transparentes.

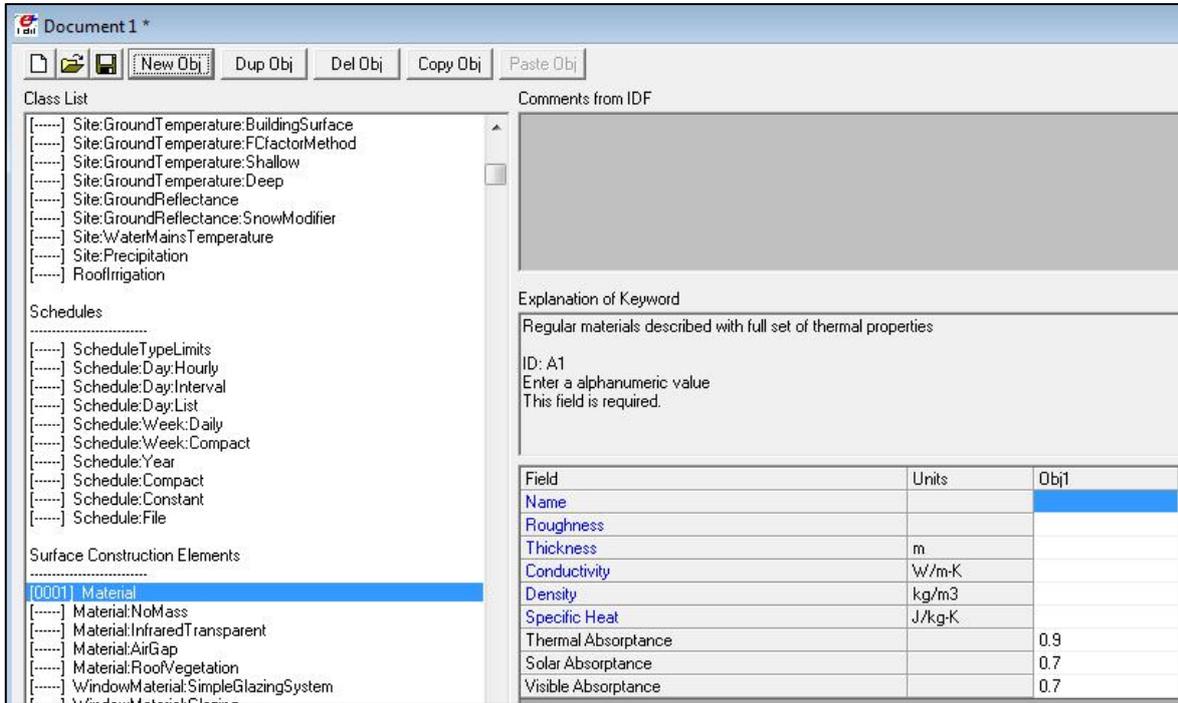


Figura 19. Entorno alfanumérico de *EnergyPlus* para introducir propiedades de materiales.

f. Elaboración de construcciones

Las construcciones son capas compuestas de varios materiales definidos previamente. Estas conforman los muros, techos, pisos y vanos. Los materiales se colocan empezando por el exterior.

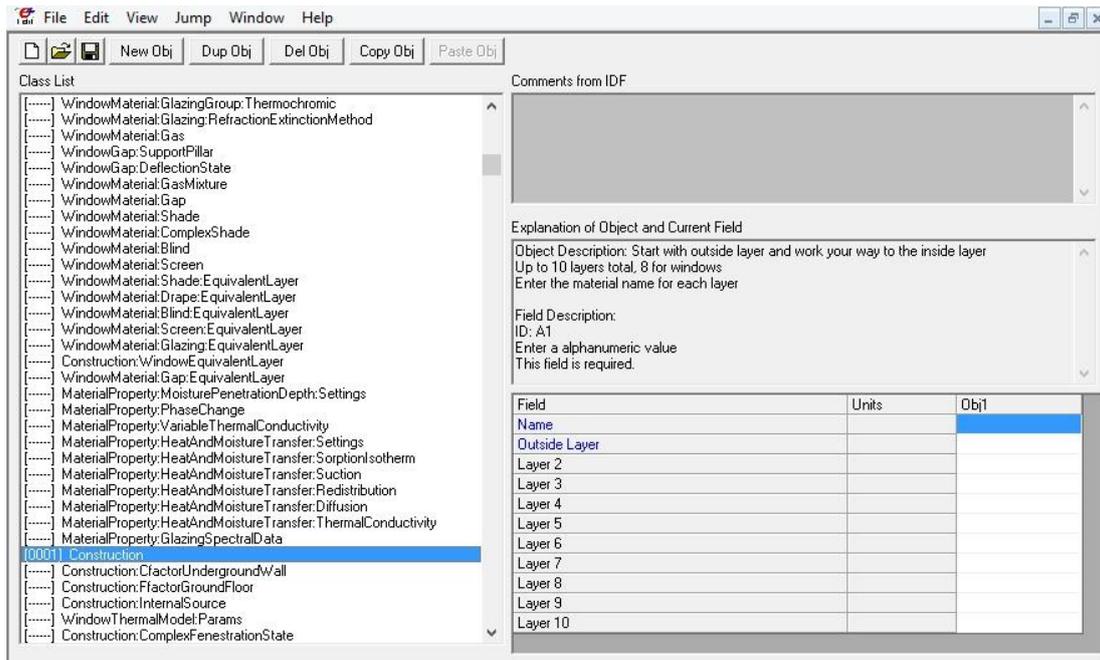


Figura 20. Entorno alfanumérico de *EnergyPlus* para ingreso de construcciones.

g. Asignación de las construcciones

Este proceso se lleva a cabo nuevamente en el entorno gráfico de *SketchUp*.

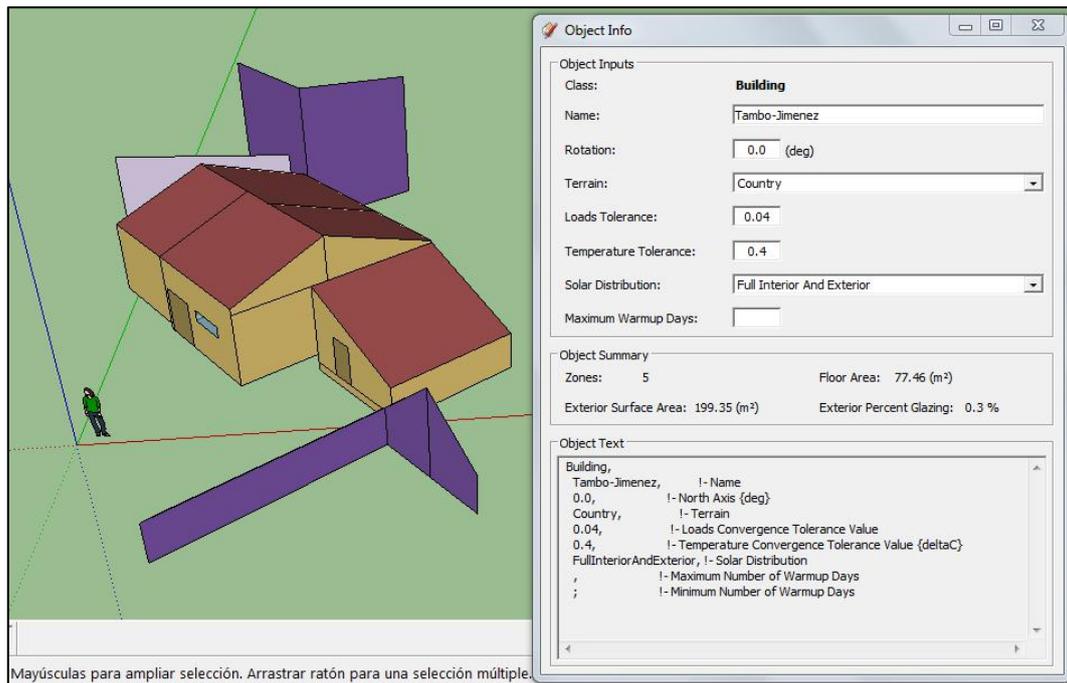


Figura 21. Entorno gráfico de *SketchUp* para asignación de construcciones.

h. Datos del clima

El programa permite realizar el ingreso de datos de clima (temperatura, humedad relativa, radiación Solar, velocidad y dirección del viento) de dos formas:

- Utilizando un archivo de clima. Datos medidos en un periodo de tiempo para un cierto intervalo de medida y obtenido generalmente de una estación meteorológica.
- Creando días de diseño. Se ingresa valores promedios medidos por hora en un periodo de tiempo.

i. Asignación de infiltraciones y 'mixing'

Las infiltraciones son los intercambios de aire de cada zona térmica con el exterior a través de ventanas, puertas, aberturas, rendijas.

El *mixing* es el intercambio de aire interior entre zona térmicas a través de los vanos que tienen en común.

j. Resultados

Los resultados de la simulación en *EnergyPlus* se obtienen de manera numérica en archivos de cálculo (Excel), lo cuales se pueden interpretar de manera gráfica.

2.6.2 Ecotect

Es un software de simulación física de edificaciones que contiene una interfaz de usuario 3D básica. Permite la importación de información geometría de otras fuentes como archivos de *AutoCAD*. Posee un sencillo manejo de datos de clima.

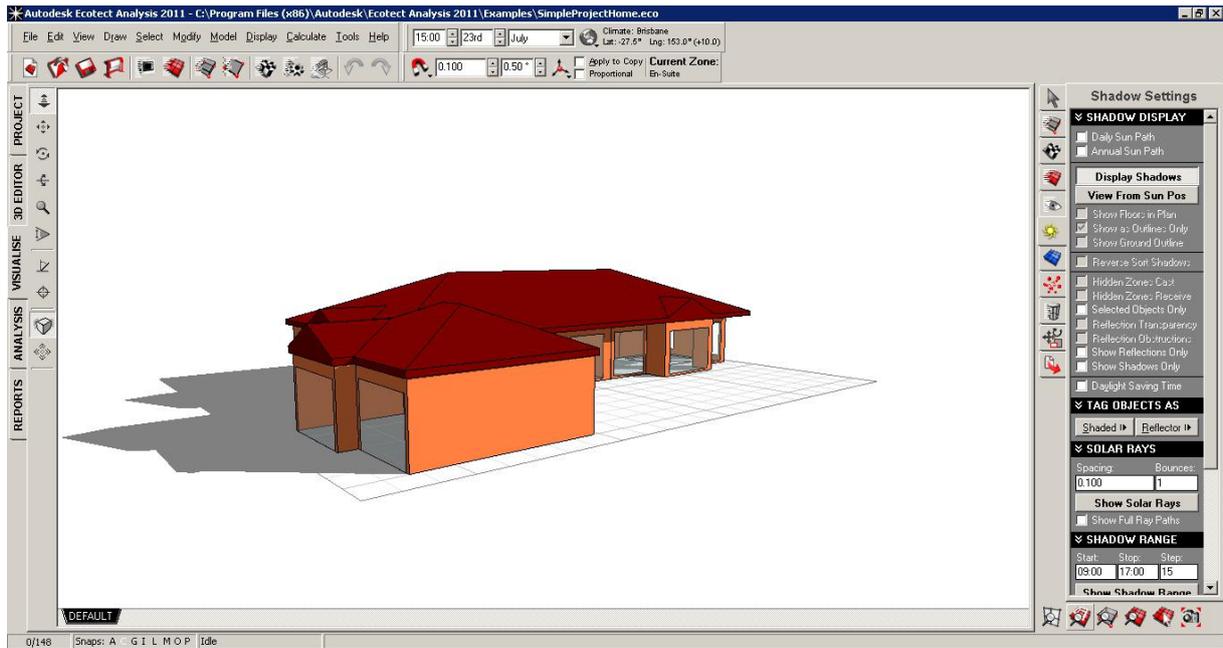


Figura 22. Entorno gráfico del programa *Ecotect*.

Algunos de los análisis y cálculos que se pueden realizar en *Ecotect* son: análisis de sombras, exposición y trayectoria solar, simulación de iluminación natural y artificial, análisis acústico, comportamiento térmico, costo e impacto ambiental, movimiento de aire, entre otros.

Los resultados obtenidos pueden ser numéricos y gráficos. En este estudio se utilizó el análisis de movimiento de aire para corroborar que el diseño arquitectónico propuesto permitía una ventilación natural adecuada.

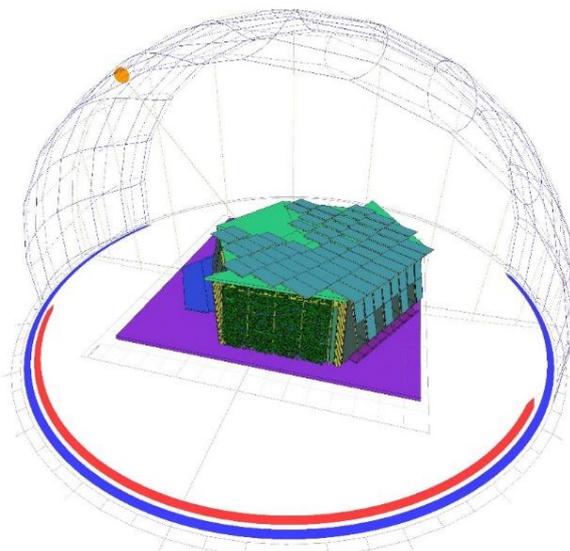


Figura 23. Análisis de la trayectoria solar sobre un modelo de vivienda en *Ecotect*.

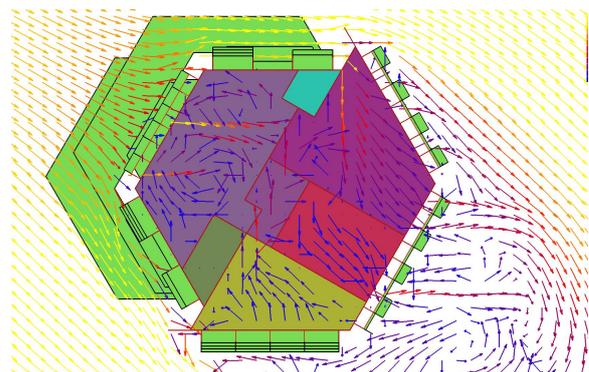


Figura 24. Movimiento de aire dentro de una vivienda usando *Ecotect*.

2.6.3 Biosol

Es una hoja de cálculo (figura 25) desarrollado por el M. I. Oscar Preciado y el Dr. David Morillón en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Este programa permite, a partir de los datos de ubicación, temperatura y humedad del lugar de estudio, estimar las horas del año que se requiere protección solar y además calcular las dimensiones de aleros y parasoles necesarios (figura 26).

DATOS DE ENTRADA												
Localidad	Cali, Colombia			Latitud (xx.xx)	3.35	Longitud (xxx.xx)	-76.55	Altitud [m]	1000			
Introduzca en las celdas en blanco los datos de entrada necesarios												
Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	díc
Temp max [°C]	29.9	29.9	30.2	29.7	29.3	29.5	30.3	30.9	30.3	29.2	28.8	29.1
Temp min [°C]	19.2	19.2	19.3	19.4	19.4	19	18.3	18.5	18.8	18.9	19	19
¿Cuenta con datos de humedades relativas medias extremas?					(si/no)	si	Introduzca valores abajo					
HR max [%]	99	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
HR min [%]	51.9	52.1	52	56.3	58.3	58.3	54.8	47.9	50.1	55	56.5	56
¿Cuenta con datos de humedades relativas medias?					(si/no)	si	Introduzca valores abajo					
HR med [%]	72.1	72.1	72.6	75.7	76.6	75.2	71.3	68	70.6	74.2	76.1	74.7
La humedad relativa horaria se estimará a partir de las medias extremas												

Figura 25. Primera hoja de cálculo de Biosol donde se introducen los datos de ubicación y clima del lugar de estudio.

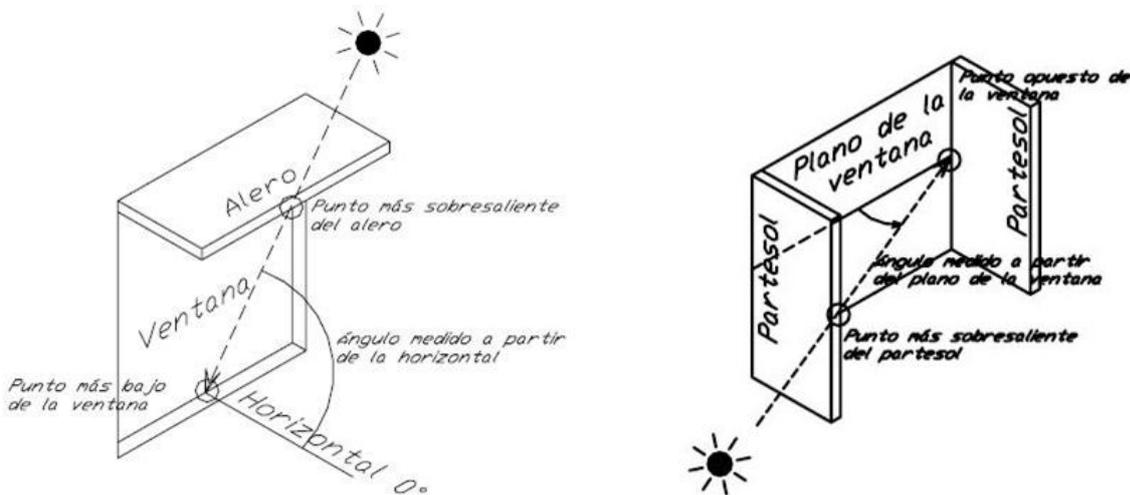
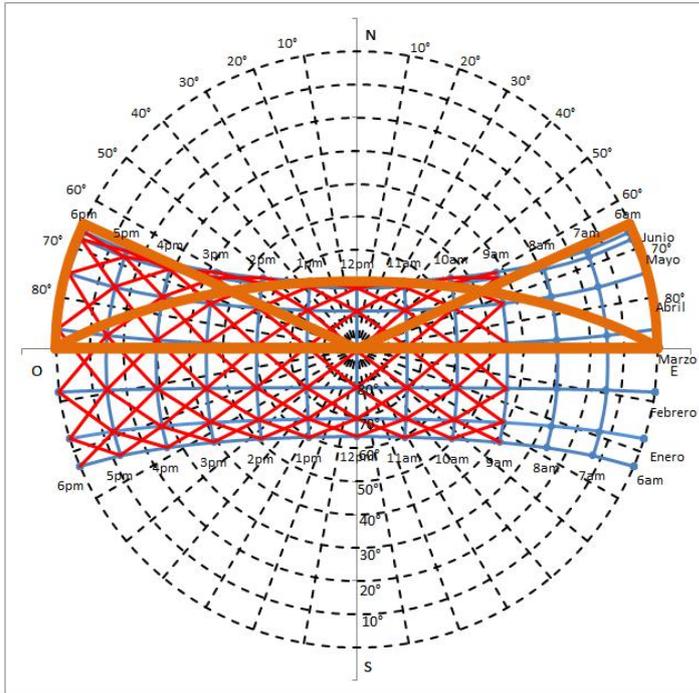


Figura 26. Esquemas de identificación de ángulos y medidas espaciales para aleros y parasoles usados en Biosol. Imágenes obtenidas del programa Biosol.

Entonces como se muestra en la figura 27, en la gráfica solar equidistante las líneas rojas en la trayectoria solar indican las horas del día a lo largo del año que se necesita protección solar. Las líneas naranjas señalan la protección brindada por el alero y por el parasol de acuerdo a los datos ingresados.

GRÁFICA SOLAR EQUIDISTANTE							
1er SEMESTRE							
Localidad	Cali, Colombia	Latitud	3.35	Longitud	-76.55	Altitud [m]	1000



Mostrar horas que deben protegerse (si/no):	si
---------------------------------------------	----

Alero (si/no):	si
----------------	----

Ángulo fachada (0 = fachada Sur; 90 = fachada Este; -90 = fachada Oeste; 180 = fachada Norte; ó grados a partir del Sur):	180
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Ángulo alero (0 a 90):	70
------------------------	----

Introduzca la altura de la ventana [m]:	1
-----------------------------------------	---

Tamaño del alero [m]:	0.364
-----------------------	-------

Partesol (si/no):	si
-------------------	----

Ángulo fachada (0 = fachada Sur; 90 = fachada Este; -90 = fachada Oeste; 180 = fachada Norte; ó grados a partir del Sur):	180
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Ángulo partesol (0 a 90):	25
---------------------------	----

Introduzca el ancho de la ventana [m]:	1.45
----------------------------------------	------

Tamaño del partesol [m]:	0.676
--------------------------	-------

Figura 27. Tercera hoja de cálculo del programa Biosol para introducir las medidas de las ventanas y el ángulo óptimo de protección y obtener el tamaño del alero.

3 SOLAR DECATHLON

El *Solar Decathlon* es una competencia universitaria creada y avalada por el Departamento de Energía de Estados Unidos para incentivar el desarrollo sostenible, el uso eficiente de la energía, la implementación de energías renovables, entre otras cosas, en el sector de la construcción, a nivel académico y empresarial (*Solar Decathlon*, 2020).

Esta competencia es organizada por una universidad sede y participan otras universidades invitadas o elegidas en concurso (alrededor de 14). Se llevó a cabo por primera vez el año 2002 en Estados Unidos y posteriormente se empezó a realizar bianualmente desde el año 2005 hasta la última edición celebrada el año 2017.

Inicialmente, el Solar Decathlon solo se desarrollaba en Estados Unidos, pero a raíz de la participación de universidades extranjeras en esta competencia, esta es llevada a diferentes continentes. La primera versión fuera de Estados Unidos es *el Solar Decathlon Europe* realizada en España (2012). Luego vendrían las versiones *Solar Decathlon China* (2013), *Solar Decathlon Latin America and Caribbean* (SDLAC) realizada en Colombia (2015), *Solar Decathlon Middle East* realizada en Dubai (2018) y finalmente la versión *Solar Decathlon Africa* que está planeada para realizarse en Marruecos a finales del año 2019 (figura 28).

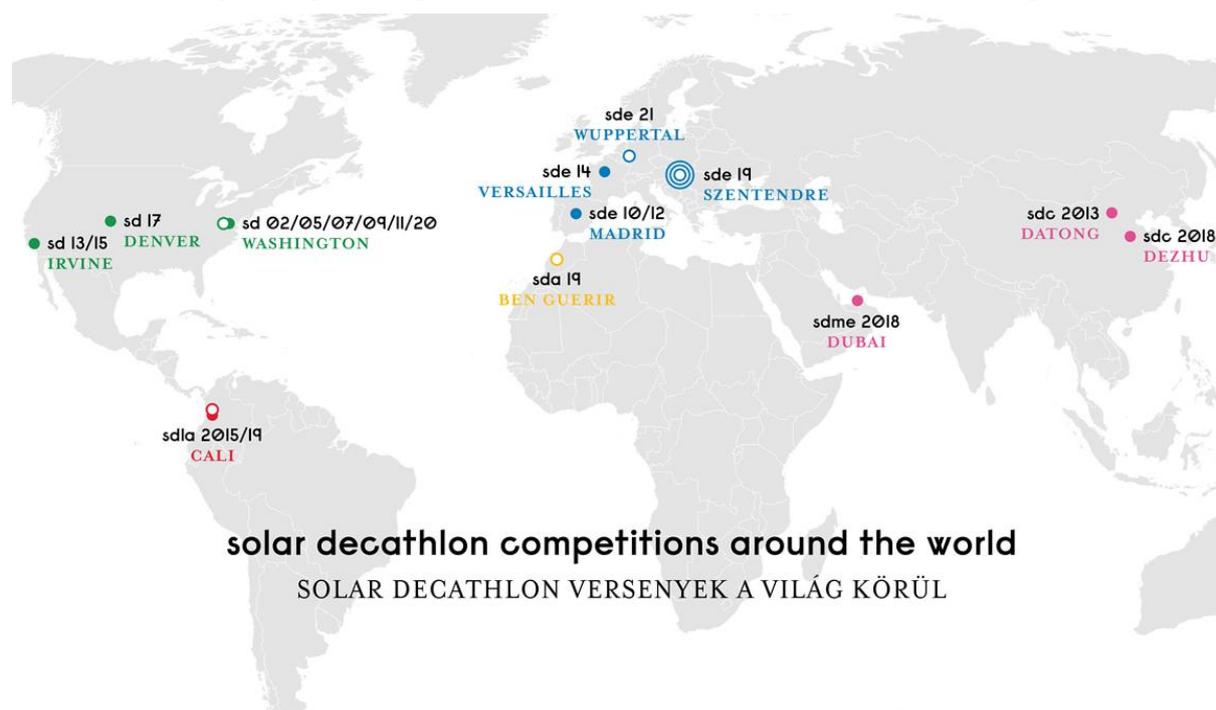


Figura 28. Competiciones Solar Decathlon en el mundo (Solar Decathlon, 2020).

La realización de las *Solar Decathlon* como competencias educativas han demostrado ser exitosas de acuerdo al desempeño y realización profesional y técnico de los estudiantes involucrados, logrando que su conocimiento se incremente en áreas relacionadas a aspectos técnicos y multidisciplinarios (Navarro *et al.*, 2014).

La competencia comprende el diseño y construcción de una vivienda sostenible y eficiente durante el tiempo de desarrollo, alrededor de un año. El equipo que desarrolla el proyecto comprende estudiantes y egresados recientes de la universidad a la cual representan. Además, cuentan con profesores asesores y un representante de la universidad como responsable del proyecto ante la competencia.



Figura 29. Vivienda Canopea en el (Solar Decathlon Europe, 2012).



Figura 30. Vivienda Patio 2.0 (Solar Decathlon Europe, 2012).



Figura 31. Vivienda Rhome for Density (Solar Decathlon Europe, 2014).

La construcción final de todas las viviendas participantes se realiza en un área designada por la universidad organizadora denominada Villa Solar (figuras 32 y 33).



Figura 32. Villa Solar en Madrid (Solar Decathlon Europe, 2012).

La sede alberga por alrededor de un mes a las viviendas, durante la etapa de construcción (11 días), etapa de evaluación (10 días) y visita de público (10 días).



Figura 33. Villa Solar en Washington, D.C. (Solar Decathlon, 2020)

La vivienda objeto de este estudio participó en el SDLAC 2015, en la ciudad de Cali, Colombia.

3.1 Solar Decathlon Latin America & The Caribbean Cali 2015

Para el SDLAC 2015, donde participó la vivienda Ayni, las etapas de la competencia y el desarrollo del proyecto se esquematizan en la figura 34. El alcance de este estudio está comprendido desde la etapa 1 a la etapa 5.

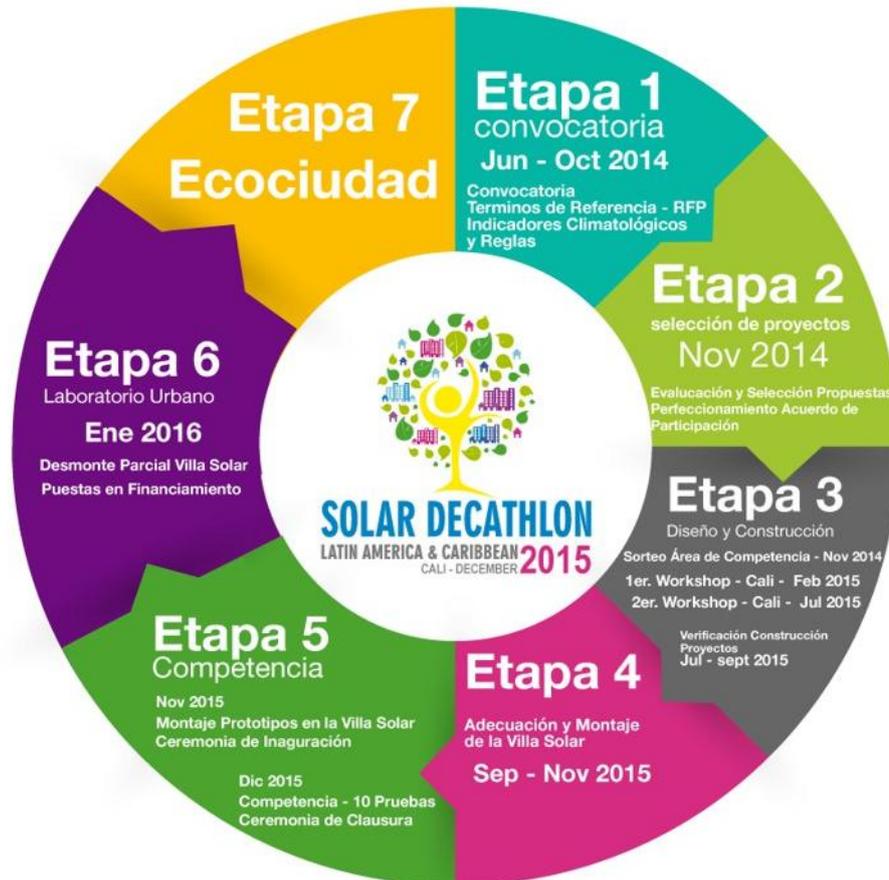


Figura 34. Etapas de la competencia del SDLAC 2015. Gráfico proporcionado por la organización del evento.

La competencia Solar Decathlon comprende 10 áreas de evaluación, mediante jurado y mediciones de campo. Para el SDLAC 2015, donde participó la vivienda Ayni, los criterios de evaluación de las áreas son:

1. **Arquitectura.** (Jurado) Se evalúa la coherencia y percepción de la propuesta, la funcionalidad y diseño espacial, el diseño lumínico, el uso apropiado de materiales y tecnologías sostenibles, así como la relevancia del proyecto.
2. **Ingeniería y construcción.** (Jurado) Se evalúa la coordinación y gestión durante el periodo de ensamblaje, el diseño estructural, el diseño constructivo, el diseño del sistema eléctrico y sanitario, el diseño del sistema solar.
3. **Eficiencia energética.** (Mediciones). Se evalúa el consumo total de energía eléctrica y la relación temporal de generación y consumo del sistema solar y eléctrico.
4. **Balance de energía eléctrica.** (Mediciones). Se evalúa el balance de energía neto final de la vivienda y la existencia de picos de consumo.
5. **Condiciones de confort.** (Mediciones). Se evalúan 4 parámetros: temperatura, humedad, iluminación natural y desempeño acústico.

El rango de temperaturas en la zona de confort para la competencia es medida de acuerdo a:

$$T_{min} = 0,255T_{ea} + 17,9 \quad (12)$$

$$T_{m\acute{a}x} = 0,255T_{ea} + 19,9 \quad (13)$$

Donde, T_{ea} es la temperatura exterior promedio, calculada como:

$$T_{ea} = \frac{(T_{ed-1}+0,8.T_{ed-2}+0,6.T_{ed-3}+0,5.T_{ed-4}+0,4.T_{ed-5}+0,3.T_{ed-6}+0,2T_{ed-7})}{3,8} \quad (14)$$

Donde, T_{ed-i} es la temperatura diaria exterior promedio i días antes.

El rango de humedad de la zona de confort para la competencia es todo valor inferior a 60% de humedad relativa.

6. **Funcionamiento de la casa.** (Pruebas y Mediciones). Se evalúa el funcionamiento de los equipos eléctricos y sanitarios de la vivienda: refrigeradora, nevera, lavadora, secadora, microondas, licuadora, cocina, televisor, y demás aparatos eléctricos. Además, el consumo de agua y disponibilidad de agua caliente.
7. **Comunicación, marketing y conciencia social.** (Jurado). Se evalúa la claridad del mensaje, la presencia efectividad en las estrategias de comunicación, la eficiencia en los recursos usados y el público alcanzado, la creatividad al desarrollar la identidad visual y el material de comunicación generado.
8. **Diseño urbano y factibilidad.** (Jurado). Se evalúa el master plan diseñado para la vivienda, la viabilidad y factibilidad de la vivienda en el mercado y el costo del prototipo de vivienda.
9. **Innovación.** (Jurado). Se evalúa la innovación en arquitectura, ingeniería, construcción, eficiencia, diseño urbano y en la factibilidad.
10. **Sostenibilidad.** (Jurado). Se evalúa la sostenibilidad en arquitectura, ingeniería, construcción, eficiencia, diseño urbano y en la factibilidad.

A diferencia de las otras competencias internacionales de *Solar Decathlon*, esta versión latinoamericana hace énfasis en dos aspectos transversales: a vivienda social y la relevancia regional. La primera se refiere a que el precio final de la vivienda debe estar acorde al mercado y pueda ser adquirido eventualmente. El segundo aspecto hace referencia a que debe ser diseñada para la región, tomando en cuenta aspectos socioculturales de esta región del mundo.

Las pruebas, mediciones y calificaciones son realizadas durante la semana de competencia. Los datos obtenidos para la prueba de confort, temperatura y humedad, se usaron para el análisis del comportamiento de la vivienda Ayni.

En esta competencia participaron 15 equipos conformados por 20 universidades de 9 países. Los equipos participantes están listados en la tabla 13.

Tabla 13. Equipos y universidades que participaron el *SDLAC* 2015.

	EQUIPO / CASA	UNIVERSIDAD	PAÍS
1	MIHOUSE	Universidad San Buenaventura Universidad Autónoma de Occidente	Colombia Colombia
2	Itesm Queretaro / Kuxtal	Tecnológico de Monterrey, Campus Querétaro	México
3	PEI	Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá	Colombia
4	AYNI	Universidad Nacional de Ingeniería	Perú
5	Calicivita / Alero	Pontificia Universidad de Javeriana de Cali Universidad ICESI	Colombia Colombia
6	HABITEC	Hochschule Ostwestfale - Lippe Universidad La Salle	Alemania Colombia
7	Panamass / SMART	Universidad Tecnológica de Panamá Western New England University	Panamá EEUU
8	Heliomet / SOL_ID	London Metropolitan University	Inglaterra
9	Vrissa	Sena Valle del Cauca	Colombia
10	Unal Colombia / Unsolar	Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín	Colombia
11	Aura / His Cali	Universidad de Sevilla Universidad Santiago de Cali	España Colombia
12	Upb Medellín / Yarumo	Universidad Pontificia Bolivariana	Colombia
13	La Casa Uruguay	Universidad ORT de Uruguay	Uruguay
14	VLLE	Universidad del Valle (organizador)	Colombia
15	+Huerto +Casa	Universidad de Los Andes	Colombia



Figura 35. Esquema de la Villa Solar para el SDLAC 2015.

3.2 Clima de la ciudad de Cali

El clima de la región de Cali es Tropical de Sabana, categoría Aw en la clasificación climática de Köppen. Las precipitaciones anuales promedio del área metropolitana de Cali es 1000mm. La temperatura promedio anual es 24,2°C, con un mínimo promedio de 19,0°C y un máximo promedio de 29,8°C. La temperatura mínima absoluta llega a 11,5°C y la máxima absoluta a 36,4°C. La temporada seca va desde diciembre a febrero y de junio a septiembre. La temporada lluviosa va de marzo a mayo y de octubre a noviembre.

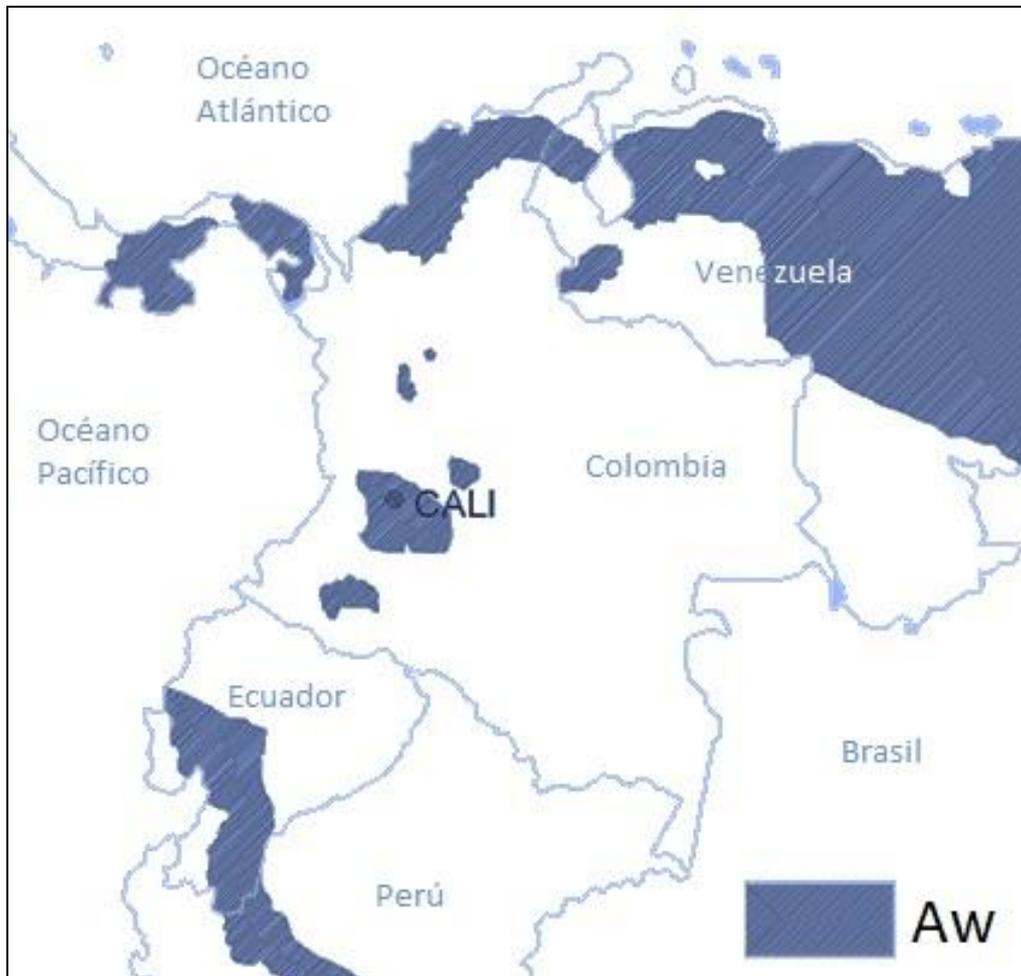


Figura 36. Clasificación climática de Köppen: Categoría Aw: Sabana Tropical (Peel, Finlayson y McMahon, 2007).

La información climática de la ciudad de Cali fue proporcionada por la organización del Solar Decathlon. Corresponde a valores de temperatura, humedad relativa, horas de sol, radiación solar, energía solar y precipitaciones obtenidas de una estación meteorológica ubicada en dentro de la Universidad del Valle.

Las temperaturas en Cali son muy constantes a lo largo de todos los meses del año. La temperatura promedio anual es 24,2 °C. La temperatura máxima promedio anual es 29,8 °C y la mínima promedio es 19,0 °C. La amplitud térmica promedio anual es 10,8°C. Las temperaturas máximas pueden llegar hasta 36,4°C y descender hasta 11,5°C. La humedad relativa promedio anual es 73,3 %. La máxima promedio anual es 100 % y la mínima promedio anual es 54,1 %.

Tabla 14. Data climática de la ciudad de Cali. (SDLAC 2015)

Parámetro		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura (°C)	Máxima absoluta	35,6	35,2	36,4	35,2	35,2	36,2	35,6	35,6	35,8	34,4	33,0	35,2
	Media máxima	29,9	29,9	30,2	29,7	29,3	29,5	30,3	30,9	30,3	29,2	28,8	29,1
	Media	24,3	24,4	24,5	24,2	24,0	24,2	24,5	24,9	24,4	23,9	23,6	23,9
	Media mínima	19,2	19,2	19,3	19,4	19,4	19,0	18,3	18,5	18,8	18,9	19,0	19,0
	Mínima absoluta	13,4	15,0	13,8	13,4	15,0	14,5	11,5	12,6	13,8	14,3	14,0	12,0
Humedad relativa (%)	Media máxima	99	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Media	72,1	72,1	72,6	75,7	76,6	75,2	71,3	68,0	70,6	74,2	76,1	74,7
	Media mínima	51,9	52,1	52,0	56,3	58,3	58,3	54,8	47,9	50,1	55,0	56,5	56,0
Horas de sol (h)	Mensual	169	148	157	136	135	151	183	179	155	139	135	150
	Diaria	5,5	5,3	5,1	4,5	4,4	5,0	5,9	5,8	5,2	4,5	4,5	4,9
Radiación Solar (W/m ²)	Máxima	880	957	935	954	880	852	860	954	974	961	920	883
	Media	282	290	247	257	219	262	306	329	290	300	255	255
Energía Solar (kWh/m ²)	Media diaria	4,6	4,7	4,8	4,5	4,5	4,6	4,9	5,0	4,8	4,6	4,4	4,4
Precipitación (mm)	Media mensual	98,4	112,7	146,3	219,6	177,8	81,7	75,4	63,3	75,6	157,1	238,6	150,6

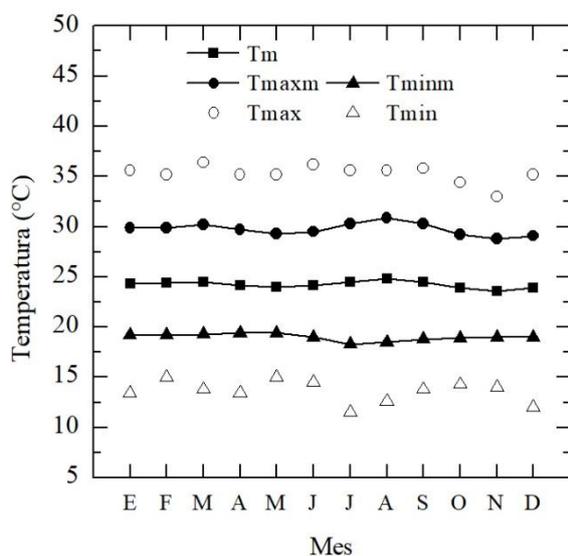


Figura 37. Temperaturas exteriores promedios mensuales para Cali a lo largo de un año. Temperatura media (Tm), Temperatura máxima media (Tmaxm), Temperatura mínima media (Tminm), Temperatura máxima (Tmax), Temperatura mínima (Tmin). (SDLAC 2015)

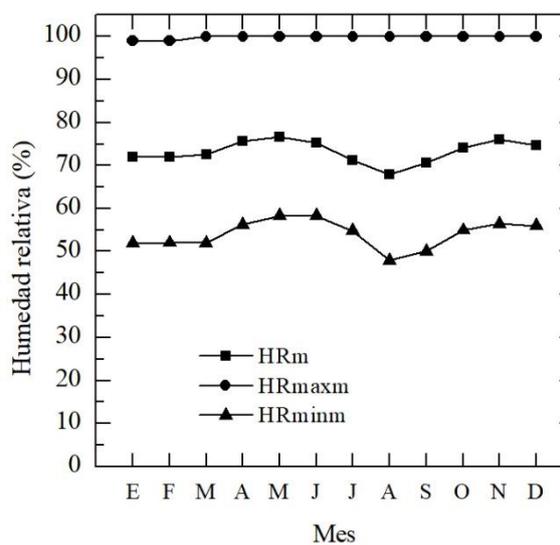


Figura 38. Humedad relativa exterior promedio mensual para Cali a lo largo de un año. Humedad relativa media (HRm), Humedad relativa máxima media (HRmaxm), Humedad relativa mínima media (HRminm). (SDLAC 2015)

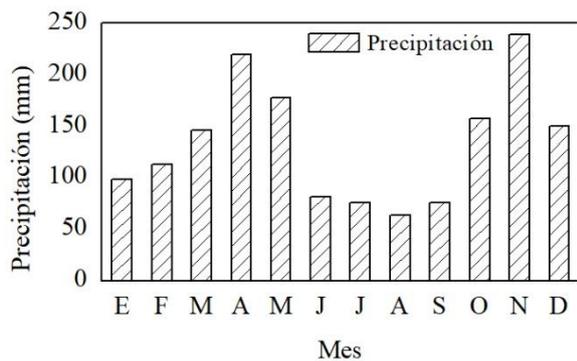


Figura 39. Precipitación acumulada mensual para Cali a lo largo de un año. (SDLAC 2015)

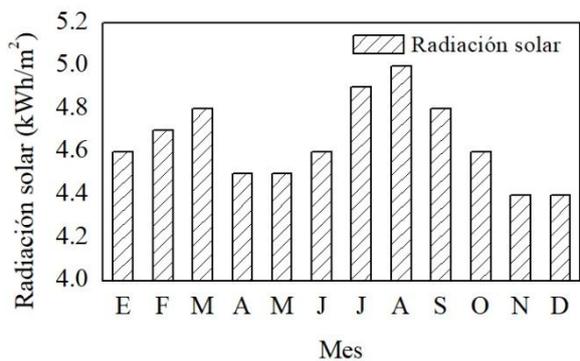


Figura 40. Radiación solar diaria promedio mensual para Cali a lo largo de un año. (SDLAC 2015)

En Cali llueve regularmente a lo largo de todo el año. Se distinguen dos épocas más lluviosas, de marzo a mayo y de octubre a diciembre. En un año, Cali recibe 1600mm de lluvia. La radiación solar diaria promedio es 4,65 kWh/m². Para el mes de diciembre baja ligeramente a 4,4 kWh/m². De la figura 43 podemos ver que los valores dados por el Atlas Solar de Colombia coinciden con los valores brindados por la organización.

Cali está localizada en el valle de Cauca, entre dos cadenas montañosas, oriental y central. Los vientos principales sobre la ciudad provienen del oeste y del noroeste desde las cuencas de los ríos que descienden de las montañas occidentales. Estos vientos refrescan la ciudad y renuevan el aire, enfriándolo ligeramente (figura 42).

La información de velocidad y dirección de viento de la ciudad de Cali (figura 41) fue obtenida de la estación meteorológica ubicada en la Universidad del Valle, en cuyo campus se ubicó la Villa Solar, sede de la competencia *Solar Decathlon*.

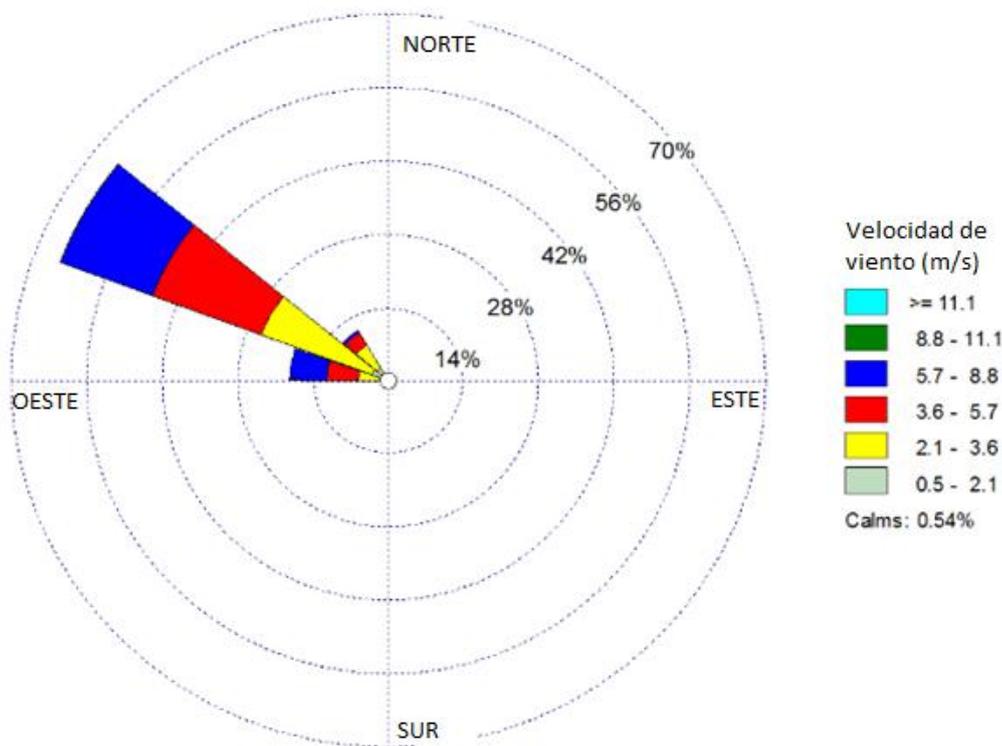


Figura 41. Vientos predominantes en Cali. Frecuencia anual. (SDLAC 2015)

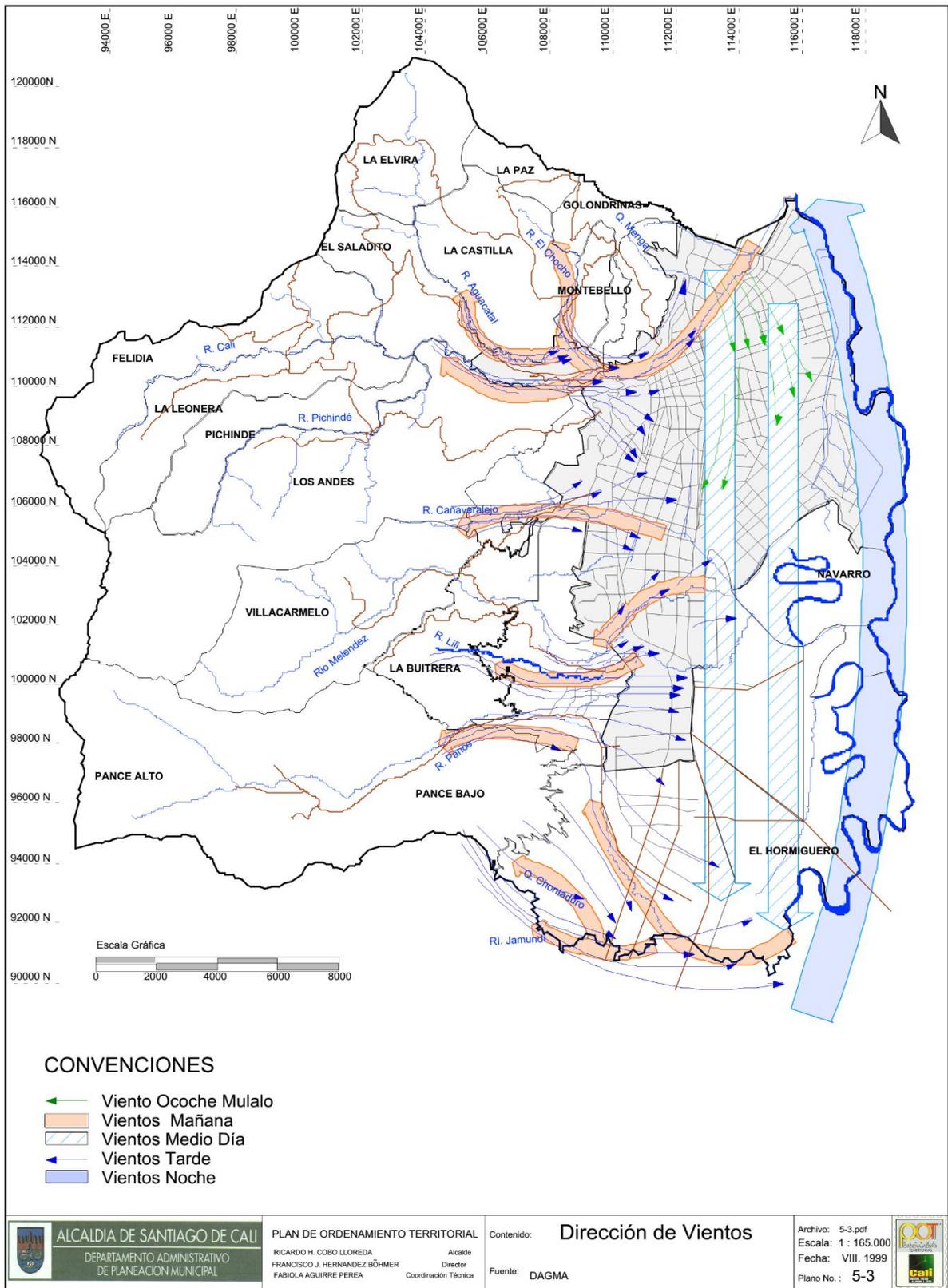


Figura 42. Dirección de vientos para la ciudad de Cali (Alcaldía de Cali, 1999).

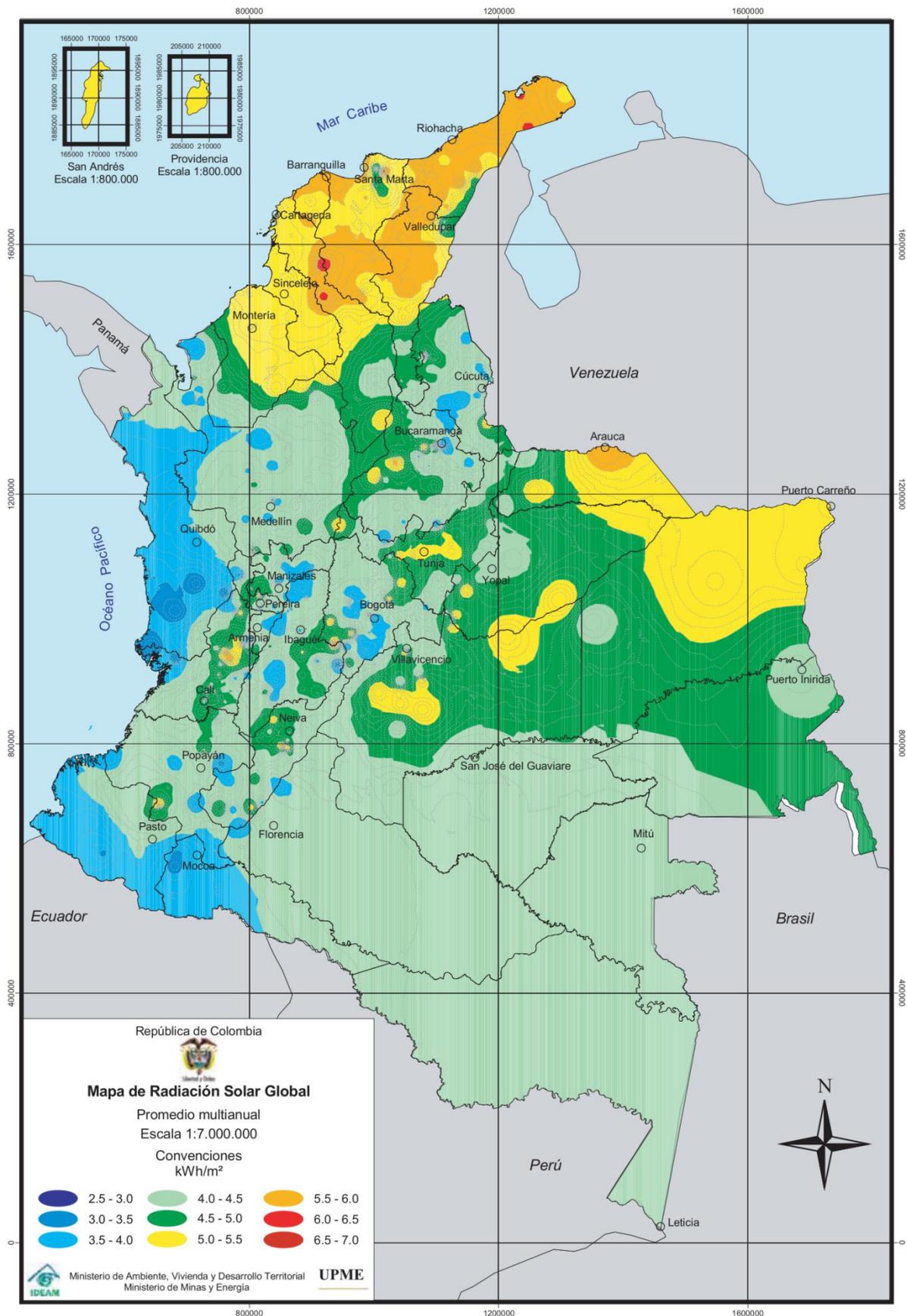


Figura 43. Mapa de radiación solar global para Colombia, promedio anual (UPME y IDEAM, 2005).

4 VIVIENDA AYNI

La vivienda Ayni fue diseñada por el equipo Ayni, conformado por estudiantes y egresados de la Universidad Nacional de Ingeniería, para participar en la competencia SDLAC 2015. Esta vivienda fue construida en la ciudad de Lima, en el campus de la universidad entre los meses de junio y noviembre del año 2014. Una vez terminada fue desarmada y enviada a la ciudad de Cali, donde fue nuevamente ensamblada por los mismos miembros del equipo durante una semana. Una vez terminada la vivienda, fue sometida a pruebas con equipos, calificación del jurado y visita del público.

El equipo Ayni estuvo conformado en total por 54 miembros que participaron en diferentes etapas del proyecto a lo largo del año de duración. Todos ellos procedentes de 08 facultades de la Universidad Nacional de Ingeniería, y 4 miembros procedentes de otras universidades.

El equipo de asesores del equipo estuvo conformado por profesores y egresados de la Universidad Nacional de Ingeniería, con amplia experiencia y trayectoria profesional y académica.

Tabla 15. Asesores del proyecto Ayni.

Nombre	Apellido	Especialidad	Área
Luis	Delgado	Arquitecto	Gestión
Luis	Takahashi	Arquitecto	Construcción en madera
José Carlos	Cano	Arquitecto	Diseño en madera
Manuel	Villena	Arquitecto	Diseño en madera
Manfred	Horn	Físico	Energías renovables
Rafael	Espinoza	Ing. Mecánico	Energías renovables
José	Meza Cuadra	Ing. Civil	Mercado de la construcción
Walter	Melendez	Ing. Civil	Gestión de la Construcción
Gustavo	Prince	Ing. Civil	Gestión de la Construcción

La investigación realizada corresponde a las tareas de quien escribe esta tesis durante el proyecto Ayni para el diseño de la vivienda Ayni. Esta investigación es analítica, computacional y experimental. Comprende cuatro fases: análisis, diseño, construcción y evaluación in situ.

Dentro del proyecto Ayni la labor encargada de quien sustenta esta tesis corresponde a las siguientes tareas, previas a la construcción:

- Análisis bioclimático de la ciudad de Cali. Como resultado se brinda recomendaciones generales de diseño para el equipo de arquitectura, con las cuales pueden iniciar el diseño arquitectónico de la vivienda y la propuesta urbana.
- Análisis en cada etapa de diseño. Se realizó simulaciones y cálculos físicos, tomando como parámetros referentes la temperatura, humedad, conductividad térmica, iluminación natural y desempeño acústico, para ayudar al equipo de arquitectura en la elección del camino a seguir durante el diseño.
- Análisis final. Finalmente se analizó mediante cálculos matemáticos y simulaciones el diseño final para intentar predecir el comportamiento térmico de la vivienda durante la competencia en Cali. Se utilizó el software de simulación *EnergyPlus* y *Ecotect*.

Durante la construcción y puesta en calificación de la vivienda las labores correspondieron:

- Supervisión de la instalación correcta de materiales esenciales para el desempeño térmico de la vivienda.
- Supervisión de la instalación de sensores de temperatura, humedad, iluminación natural y acústicos dentro de la vivienda.
- Registro de actividades durante y dentro de la vivienda que pudieran alterar las mediciones y el comportamiento predicho mediante la simulación.

Las tareas posteriores a la competencia corresponden a:

- Recolección de información medida por los sensores y estación meteorológica.
- Análisis de la información recolectada y comparación con los datos predichos.
- Validación del modelo de simulación correspondiente a la vivienda Ayni para el clima de Cali.
- Informe de las conclusiones alcanzadas en este proyecto experimental.



Figura 44. Diseño de la vivienda Ayni. Gráfica elaborada por el equipo Ayni.

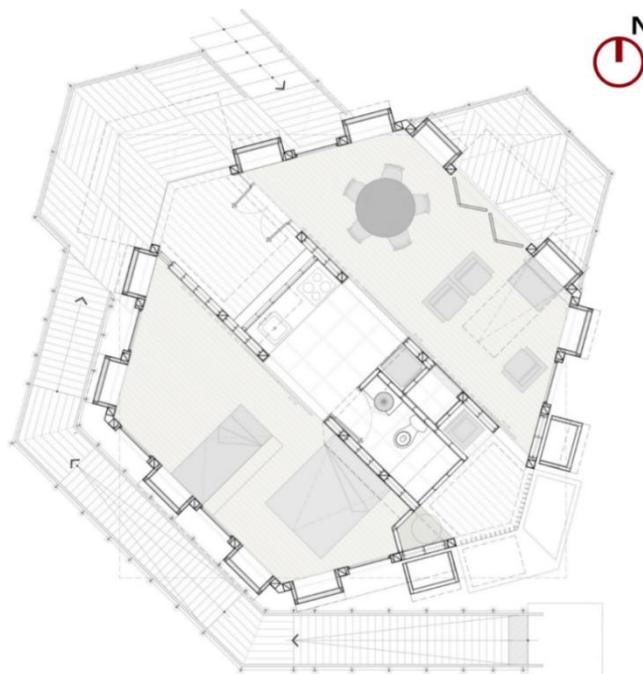


Figura 45. Plano de la vivienda Ayni. Gráfica elaborada por el equipo Ayni.



Figura 46. Construcción de la vivienda Ayni en el campus de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2015.



Figura 47. Vista área de la vivienda Ayni construida en el campus de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2015.

4.1 Metodología de diseño

El trabajo de diseño de la vivienda Ayni fue un trabajo multidisciplinario. El factor clave fue la integración de todas las especialidades desde la concepción del diseño.

Para el presente estudio se muestra la metodología en torno al diseño bioclimático. Este inicia con el análisis bioclimático de la ciudad de Cali, otorgando recomendaciones generales de diseño. Estas son tomadas por los arquitectos y otras especialidades para dar forma a la vivienda.

Luego, se estudian las técnicas bioclimáticas empleadas en el diseño de la vivienda Ayni, sus características y valores físicos de los materiales utilizados. Se realizan simulaciones que predigan el comportamiento de la vivienda anualmente y durante el mes de competencia para el lugar de ubicación propuesto.

Para el análisis higrotérmico se utilizó el software de *EnergyPlus*, junto a los programas de apoyo *SketchUp* y *OpenStudio* según la metodología de simulación y modelamiento dinámico (Molina, 2018) y modificada para este caso. En el análisis lumínico se utilizó el programa *Dialux*. Con el programa *Ecotect* se realizó el análisis de penetración solar y junto al subprograma *WinAir* el análisis de la ventilación natural.

Finalmente se analiza la vivienda construida. Las mediciones realizadas por la competencia para la evaluación del confort, se utilizan para analizar el grado de bienestar logrado.

4.2 Análisis bioclimático para la ciudad de Cali

Se analiza las condiciones del lugar para poder brindar recomendaciones generales de diseño al equipo de Arquitectura, quienes diseñarán la vivienda Ayni. Para este análisis se usó la data climática de Cali brindada por la competencia. Esta información es llevada al gráfico de Givoni y a las tablas de Mahoney.

4.2.1 Gráfico de confort de Givoni para Cali

Usando el gráfico psicrométrico de confort de Givoni obtenemos dos estrategias necesarias para mejorar el clima dentro de la vivienda: ventilación natural permanente y uso de los efectos de la masa térmica (inercia térmica), para refrescar la vivienda durante el día y mantener una temperatura constante durante la noche.

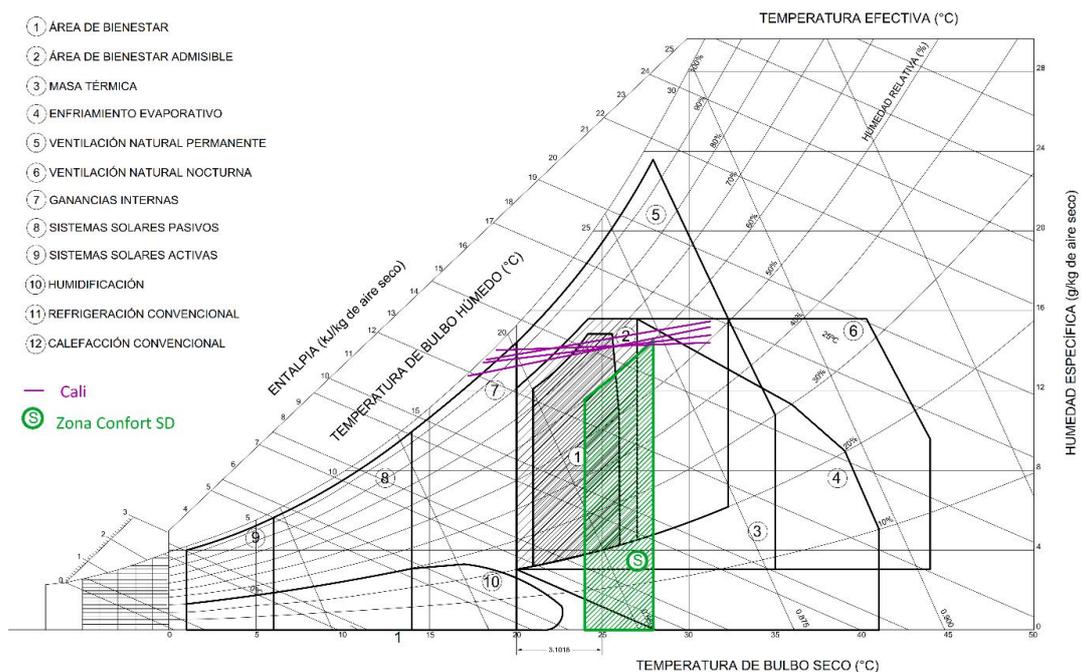


Figura 48. Gráfico de confort de Givoni para la ciudad de Cali.

4.2.2 Tablas de Mahoney para Cali

Con la información climática de la ciudad de Cali se completa las tablas de Mahoney (tablas 16 a 19) para obtener las recomendaciones finales dadas en las tablas 20 y 21.

Tabla 16. Tabla de Mahoney 1 primera parte para la ciudad de Cali.

Información del lugar												
Ubicación	Cali, Valle del Cauca, Colombia											
Longitud	76,55° O											
Latitud	03,35° N											
Altitud	1000 m.s.n.m.											
Temperatura del aire (°C)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Máx. media mensual	29,9	29,9	30,2	29,7	29,3	29,5	30,3	30,9	30,3	29,2	28,8	29,1
Mínima media mensual	19,2	19,2	19,3	19,4	19,4	19,0	18,3	18,5	18,8	18,9	19,0	19,0
Diferencia media mensual	10,7	10,7	10,9	10,3	9,9	10,5	12,0	12,4	11,5	10,3	9,8	10,1
Valores anuales (°C)												
Temperatura máxima media anual	30,9											
Temperatura mínima media anual	18,3											
Temperatura media anual (TMA)	24,6											
Diferencia máxima anual (DMA)	12,4											

Tabla 17. Tabla de Mahoney 1 segunda parte para la ciudad de Cali.

Humedad Relativa (%)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Máx. media mensual	99	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Mínima media mensual	51,9	52,1	52,0	56,3	58,3	58,3	54,8	47,9	50,1	55,0	56,5	56,0
Valor medio mensual	72,1	72,1	72,6	75,7	76,6	75,2	71,3	68,0	70,6	74,2	76,1	74,7
Grupo de Humedad	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4
Grupo de Humedad												
Grupo 1	Si la HR media está por debajo del 30%											
Grupo 2	Si la HR media está entre 30-50%											
Grupo 3	Si la HR media está entre 50-70%											
Grupo 4	Si la HR media está encima de 70%											

Lluvia													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
Precipitación (mm)	98,4	112,7	146,3	219,6	177,8	81,7	75,4	63,3	75,6	157,1	238,6	150,6	
Total (mm)	1597,1												
Viento													
Dirección de viento	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
Viento dominante	NOO	NOO	NOO	NOO	NOO	NOO	NOO	NOO	NOO	NOO	NOO	NOO	
Viento secundario	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	

Tabla 18. Tabla de Mahoney 2 primera parte para la ciudad de Cali.

Límites de confort													
TMA		Mayor de 20°C			15°C – 20°C				Menor de 15°C				
		Día	Noche		Día	Noche		Día	Noche		Día	Noche	
Grupo de humedad	1	26 – 34	17 – 25		23 – 32	14 – 23		21 – 30	12 – 21				
	2	25 – 31	17 – 24		22 – 30	14 – 22		20 – 27	12 – 20				
	3	23 – 29	17 – 23		21 – 28	14 – 21		19 – 26	12 – 19				
	4	22 - 27	17 - 21		20 – 25	14 – 20		18 – 24	12 – 18				
Diagnóstico													
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Máx. media mensual		29,9	29,9	30,2	29,7	29,3	29,5	30,3	30,9	30,3	29,2	28,8	29,1
Confort diurno superior		27	27	27	27	27	27	27	29	27	27	27	27
Confort diurno inferior		22	22	22	22	22	22	22	23	22	22	22	22
Mín. media mensual		19,2	19,2	19,3	19,4	19,4	19,0	18,3	18,5	18,8	18,9	19,0	19,0
Confort nocturno sup.		21	21	21	21	21	21	21	23	21	21	21	21
Confort nocturno inf.		17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Sensación térmica diurna		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Sensación térmica nocturna		B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B

Tabla 19. Tabla de Mahoney 2 segunda parte para la ciudad de Cali.

Condiciones de aplicabilidad														
Significado	Indicador	Estrés térmico		Agua de lluvia	Grupo de humedad	Diferencia media anual								
		Diurno	Nocturno											
Movimiento de aire necesario	H1	C			4									
		C			2, 3	< 10°C								
Movimiento de aire deseable	H2	O			4									
Resguardo de lluvia necesario	H3			> 200mm										
Inercia térmica necesaria	A1				1, 2, 3	> 10°C								
Dormitorios exteriores deseables	A2		C		1, 2									
		C	O		1, 2	> 10°C								
Protección contra el frío	A3	F												
Indicadores														
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Húmedo	H1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	11
	H2	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	11
	H3	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11
Seco	A1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	A2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 20. Tabla de Mahoney 3 y 4 modificadas primera parte, para la ciudad de Cali.

Indicadores totales de la Tabla de Mahoney 2						Recomendaciones de estrategias de diseño		
H1	H2	H3	A1	A2	A3	N°	Descripción	
11	11	11	1	0	0			
Distribución								
			0 – 10			X	1	Orientación norte-sur (eje longitudinal este-oeste)
			11, 12		5 – 12			
			11, 12		0 – 4		2	Organización compacta con patios
Espacios entre edificaciones								
11, 12						X	3	Espacios abiertos para penetración de brisas
2 – 10							4	Como 3 , pero con protección contra viento caliente y frío
0, 1							5	Distribución compacta del edificio
Movimiento de Aire								
3 – 12						X	6	Habitaciones en una sola fila, provisión permanente de aire
1, 2			0 – 5					
1, 2			6 – 12				7	Habitación doble, provisión temporal del movimiento de aire
0	2 – 12							
0	0, 1						8	No se necesita movimiento de aire
Tamaño de las aberturas								
			0, 1		0	X	9	Aberturas grandes, 40-80% del área de muro
			0, 1		1 – 12		10	Aberturas medianas, 25-40%
			2 – 5					
			11, 12		4 – 12		11	Aberturas compuestas, 20-35%
			6 – 10				12	Aberturas pequeñas, 15-25%
			11, 12		0, 3		13	Aberturas muy pequeñas, 10-20%

Tabla 21. Tabla de Mahoney 3 y 4 modificadas segunda parte, para ciudad de Cali.

Indicadores totales de la Tabla de Mahoney 2						Recomendaciones de Estrategias constructivas		
H1	H2	H3	A1	A2	A3	N°	Descripción	
11	11	11	1	0	0			
Posición de las aberturas								
3 – 12						X	14	Aberturas en paredes norte y sur, a la altura del cuerpo y a barlovento
1 – 2			0 – 5					
1 – 2			6 – 12				15	Como 14, y también con aberturas en muros interiores
0	2 – 12							
Protección de aberturas								
		0, 1			3 – 12		16	No se necesita protección especial
					0 – 2	X	17	Evitar soleamiento directo
		2 – 12			0 – 2	X	18	Protección de la lluvia y del soleamiento directo
		2 – 12				X	19	Protección de la lluvia
Muros y pisos								
			0 – 2			X	20	Muros ligeros, alta transmisión térmica
			3 – 12				21	Muros internos y externos pesados, baja transmisión térmica
Techo								
10 – 12			0 – 2			X	22	Techo ligero, superficie reflectiva, cámara de aire
10 – 12			3 – 12				23	Techo ligero, bien aislado
0 – 9			0 – 5					
0 – 9			6 – 12				24	Techo pesado, baja transmisión térmica
Dormir al aire libre								
				0		X	25	No se necesita espacio para dormir al aire libre
				1 – 12			26	Espacio para dormir al aire libre
Protección contra la lluvia								
		2 – 12				X	27	Protección contra lluvias fuertes
		0 – 1					28	No se necesita protección de lluvias fuertes

4.3 Recomendaciones generales de diseño para climas cálidos

En líneas generales existen dos directrices: primera acción, evitar la ganancia térmica; segunda acción: disminuir la amplitud térmica (inercia, envolvente, materiales efusivos).

En climas cálidos se recomienda usar la metodología de confort adaptativa para establecer los rangos de confort (Rodríguez-Ubinas, Rodríguez, *et al.*, 2014).

El uso de ventilación natural durante la noche reduce significativamente el consumo energético del aire acondicionado, especialmente durante el verano y en lugares con climas cálidos (Peng *et al.*, 2015).

Con el uso de la ventilación natural se puede obtener ambientes con temperaturas interior confortables en climas tropicales como Bangkok durante el 20% del año (invierno) (Tantasavasdi, Srebric y Chen, 2001).

Para ambientes cálidos, algunas recomendaciones generales son:

- Disminuir si es posible la ocupación.
- Control solar de las aperturas
- Control de la permeabilidad solar de las paredes opacas.
- Bajo aislamiento del edificio.

Aumentar la ventilación, sobre todo cuando la temperatura externa sea menor a la interna, es decir, ventilación nocturna.

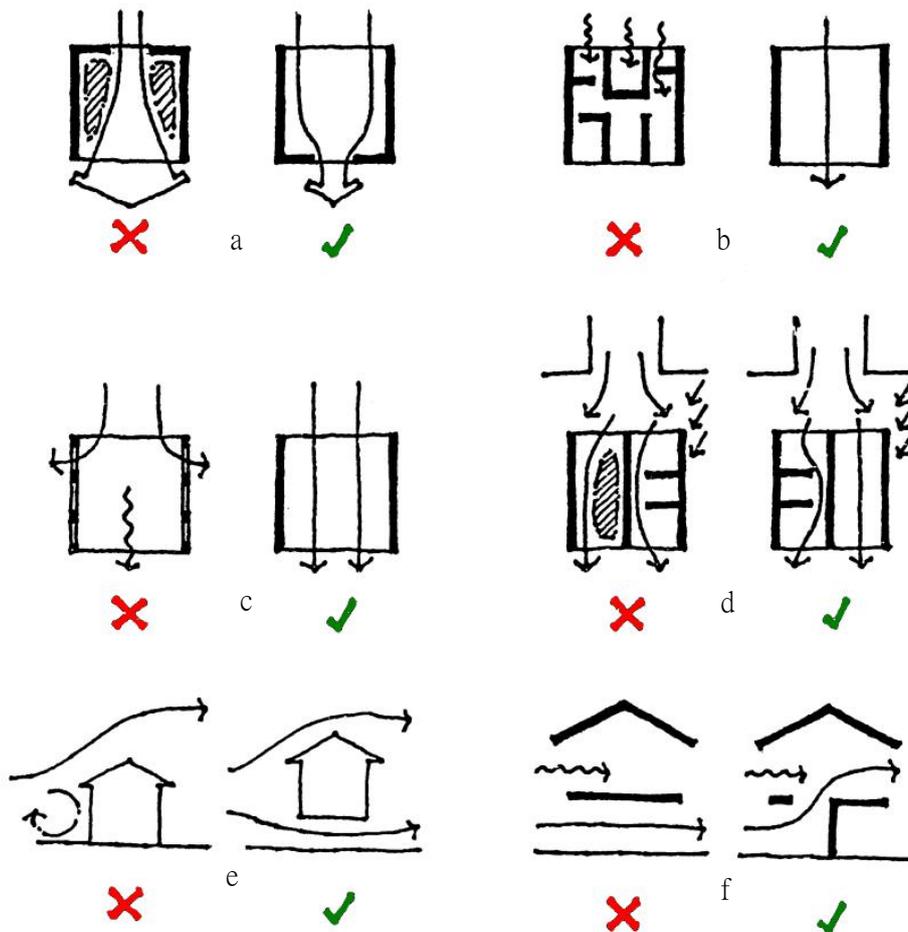


Figura 49. Estrategias de diseño recomendadas para climas cálidos para mejorar la ventilación natural (Tantasavasdi, Srebric y Chen, 2001).

A continuación, se detallarán algunas de las estrategias de diseño recomendadas para climas cálidos para mejorar la ventilación natural (Tantasavasdi, Srebric y Chen, 2001):

- Es preferible tener una apertura de entrada mayor que la salida (figura 49 a).
- Una planta abierta permite mayor velocidad de viento en el interior (figura 49 b).
- Las aperturas deben ser colocadas en la dirección deseada del flujo de aire, cerrando aquellas que corten prematuramente este flujo (figura 49 c).
- Se debe considerar las diferentes direcciones de los vientos que llegan a la vivienda para que al ingresar a la vivienda no creen con sombra de viento (figura 49 d).
- El piso elevado deja circular el aire por debajo de la vivienda, mejorando su enfriamiento (figura 49 e).

Se puede incluir escotillas en el piso para aprovechar la elevación del piso y dejar que el aire que pasa debajo de este ingrese a la vivienda (figura 49 f).

4.3.1 Recomendaciones de diseño en base al análisis bioclimático

Siguiendo los resultados obtenidos de Givoni y Mahoney se propone las siguientes recomendaciones generales de diseño como estrategias principales:

- Ventilación natural. Se necesitan espacios abiertos adelante y atrás de la vivienda, así como vanos grandes a la altura del cuerpo, orientados en la dirección predominante del viento (noroeste) y en la contraria (sureste) para favorecer una ventilación cruzada permanente.
- Protección solar. Uso de aleros y parasoles en ventanas para evitar el ingreso de luz solar directa a la vivienda y protegerlos de las lluvias.
- Envolvente ligera, de baja masa térmica, con superficies claras y reflectivas. Utilización de cámara de aire o aislamiento en el techo.
- Masa térmica y ganancias internas. Ligera masa térmica y ganancias internas propias de los aparatos eléctricos y habitantes para mantener un equilibrio energético durante la noche.

Además, evaluando las características climáticas de la ciudad de Cali se puede proponer otros criterios de diseño basados en la bibliografía y experiencias previas:

- Elección de un terreno llano o en pendiente.
- Presencia de vegetación para generar sombra alrededor de la vivienda.
- Elección de una compacidad media a más, para favorecer la ventilación de todos los ambientes de la vivienda.
- Esbeltez moderada a más en la vivienda.
- De ser posible patios internos con vegetación moderada a baja.
- Orientación longitudinal E-O para menor captación de la radiación solar.
- Menor asentamiento de la vivienda, de preferencia elevado, permitiendo la ventilación del piso y evitando el ingreso de humedad a la vivienda desde el suelo.
- Adosamiento intermedio a menos de la vivienda junto a otras.
- Grado de rugosidad media en las superficies exteriores,
- Desnivelación del edificio para condicionar la estratificación térmica.
- Compartimentación media del interior de la vivienda.
- Uso de colores claros en el interior de la vivienda.

4.4 Técnicas bioclimáticas implementadas

Siguiendo las recomendaciones generales obtenidas a partir del análisis bioclimático para la ciudad de Cali, se implementaron diferentes técnicas bioclimáticas (expresadas en el diseño de la vivienda Ayni). A continuación, se presenta el condensado de estas estrategias de diseño.

4.4.1 Envoltente

Aunque la recomendación bioclimática para un clima cálido es aumentar el área de la casa, se propone una disminución en el área, para disminuir el rango térmico, es decir, la disminución precipitada durante la noche. Esto es debido a que la zona de confort requerida por la competencia está en el rango de 24°C a 26°C y el rango de las temperaturas en la ciudad de Cali es de 12°C a 36°C.

Con una forma hexagonal la amplitud térmica de la vivienda disminuye respecto a una forma cuadrada con la misma área. Además, la forma favorece la ventilación e iluminación natural. Los vanos están orientados en 6 direcciones (en lugar de 4).

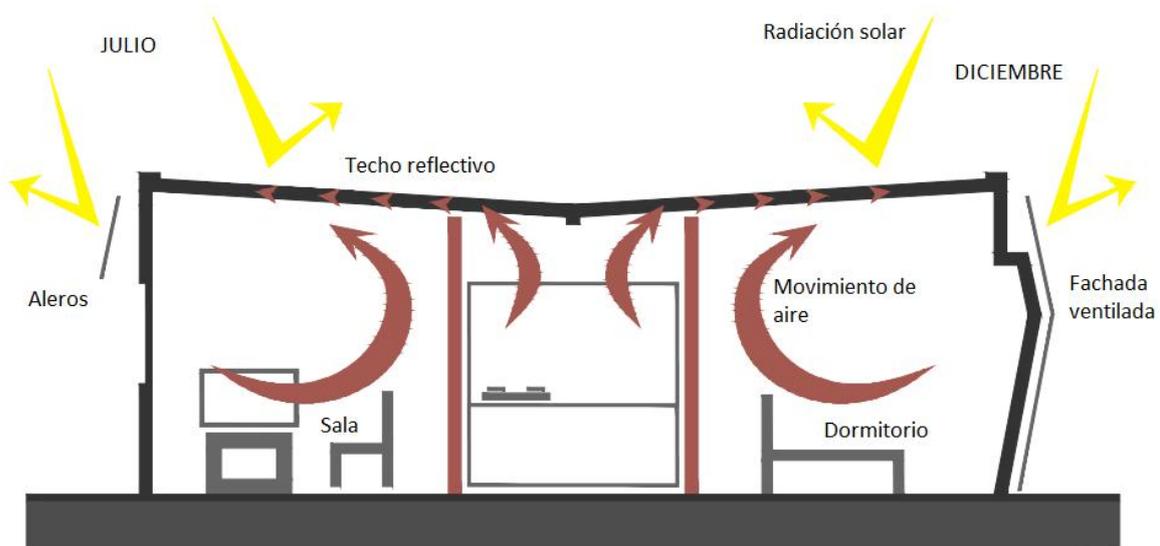


Figura 50. Protección solar de la envoltente.

Para disminuir el efecto de la radiación solar directa sobre la vivienda durante el día se utiliza paneles protectores sobre las paredes exteriores, el techo es reflectivo y aislado, los vanos están protegidos de acuerdo a la orientación de cada pared. Estas estrategias previenen a la vivienda de sobrecalentarse durante el día.

El principal material componente constructivo es la madera. Este material es ligero, no posee mucha inercia térmica. Este hecho se compensa con las planchas de fibrocemento y yeso en el interior. Además, se tiene aislante térmico en el interior de las paredes exteriores.

En el interior de la vivienda se usa colores claros que eviten la absorción de las paredes y techos y mejoren la sensación térmica.

4.4.2 Aberturas

La vivienda Ayni cuenta con un grado de perforación alrededor del 30% del área de muros. Estas tienen dos funciones principales: iluminación y ventilación. Las ventanas están colocadas hacia muchas direcciones,

aprovechando las orientaciones de las paredes. Esto ayuda a captar mayor iluminación de distintas partes del cielo evitando el ingreso directo de la radiación solar. Estratégicamente existen aberturas en direcciones opuestas en el eje noroeste-sureste para aprovechar los vientos predominantes. Estos refrescan la casa en las tardes y permiten renovar la calidad de aire.

4.4.3 Estrategias pasivas de enfriamiento

La ventilación natural es la principal estrategia de enfriamiento de la vivienda. Los vientos predominantes provienen del noroeste, es por ello que la vivienda está orientada en esta dirección.

La estrategia es promover la ventilación cruzada dentro de la vivienda. Las ventanas en la fachada que da hacia la dirección de viento y ventanas en la parte posterior permiten esta circulación de aire. Los vientos ingresan a la vivienda principalmente por el patio de entrada, que se encuentra sombreado, refrescan la cocina, las áreas sociales y se retiran por las ventanas posteriores.

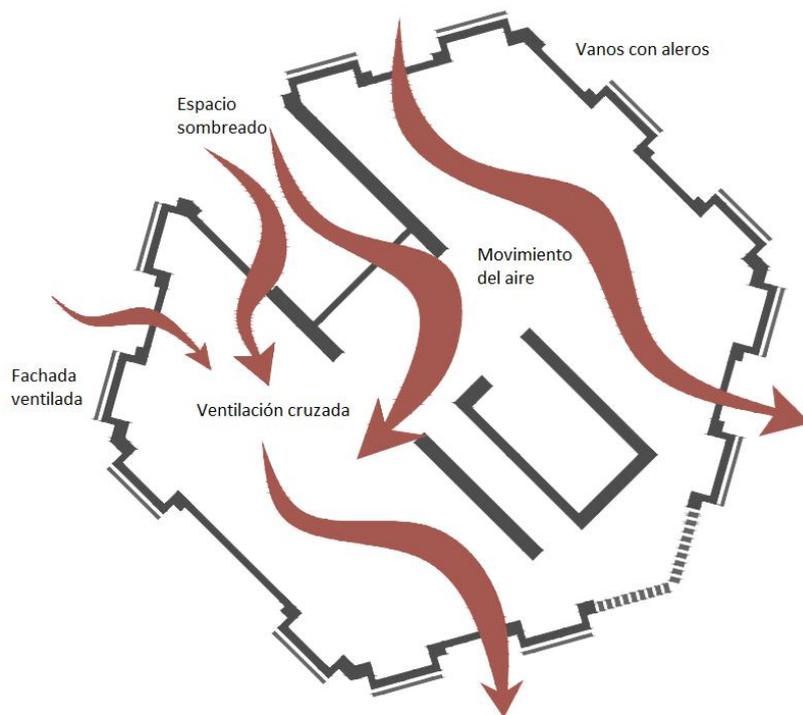


Figura 51. Esquema de la ventilación natural cruzada al interior de la vivienda.

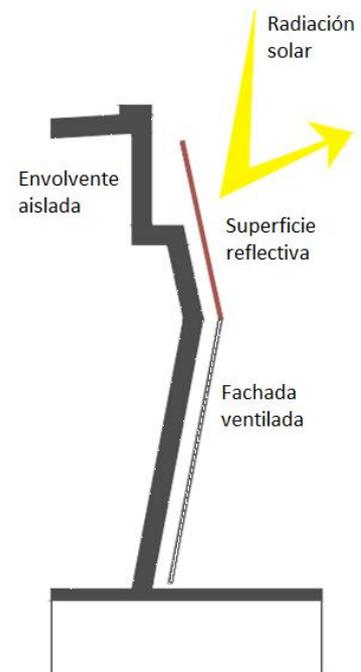


Figura 52. Fachada ventilada en paredes de la envolvente.

El techo está compuesto de tres materiales. El exterior, aluzinc, refleja la radiación incidente. El intermedio, poliuretano expandido, que aísla de las temperaturas exteriores y del calentamiento de la superficie exterior. La interior, vinilo blanco, que no se sobrecalienta en el interior.

Además, las paredes exteriores poseen una superficie exterior separada de este 10 cm, a modo de fachada ventilada, para aprovechar el calentamiento en la parte superior y generar un flujo desde el aire más frío y sombreado de abajo.

4.4.4 Estrategias pasivas de calentamiento

Las estrategias pasivas de calentamiento para la noche son dos: masa térmica y ganancias internas. El uso de la masa térmica de los materiales constructivos (madera, fibrocemento, yeso, cerámicos) para mantener la temperatura constante. Esto está concentrado en el núcleo de servicio de la vivienda. Además, se tienen ganancias internas de los aparatos eléctricos (cocina, refrigeradora) y de los ocupantes de la vivienda.

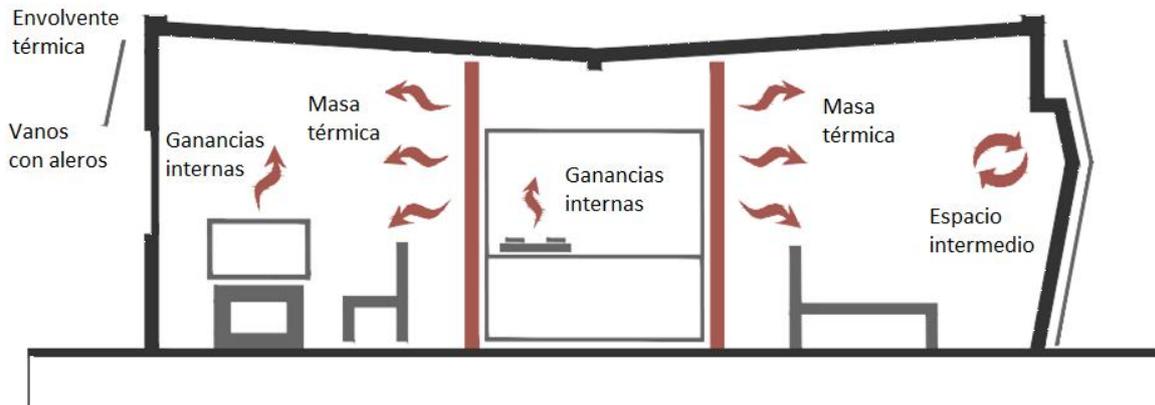


Figura 53. Estrategias pasivas de calentamiento nocturno, vista de corte.

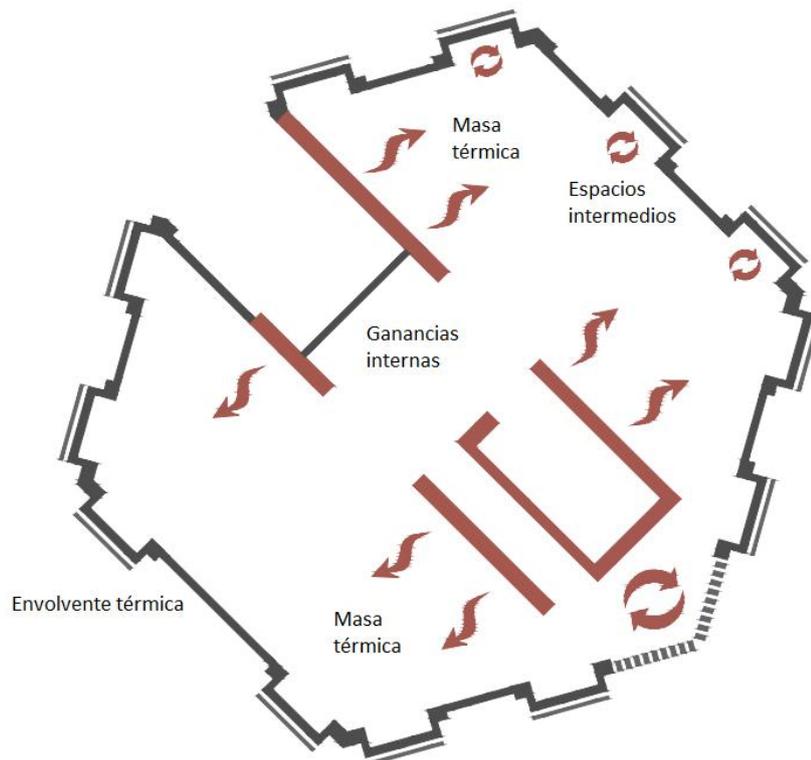


Figura 54. Estrategias de calentamiento nocturno, vista de planta.

4.5 Cálculo de transmitancia térmica de la envolvente

Los valores de resistencias térmicas de cámaras de aire se obtienen de tablas del Manual ASHRAE (2009). Los valores de conductividad y densidad de los materiales, las resistencias superficiales internas y externas son tomadas de la norma EM.110 (MINVIV, 2014)

4.5.1 Piso

Dentro de la vivienda existen dos configuraciones de pisos. Una de piso laminado presente en la sala y dormitorios. La otra de porcelanato en el eje de servicios de la vivienda (cocina, baño y cuarto eléctrico).

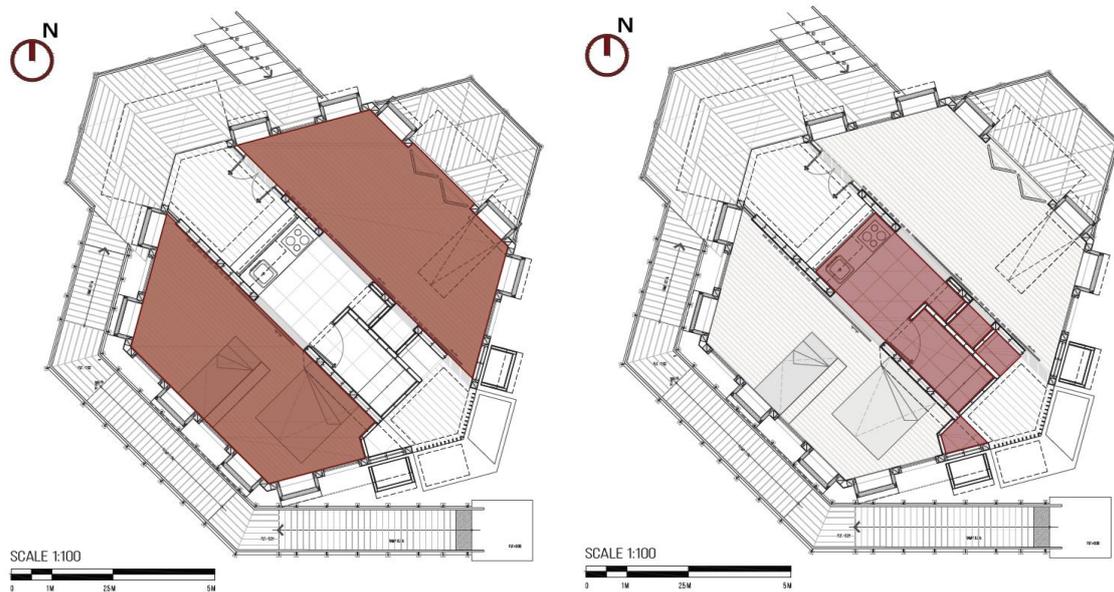


Figura 55. Tipos de piso instalado en la vivienda Ayni. Izquierda: área de piso laminado. Derecha: área de piso cerámico.

La transmitancia térmica total del piso es 2,37 W/m²K.

Tabla 22. Cálculo de la transmitancia térmica del piso.

Resistencia superficial exterior (Rse)			0,09 m ² K/W				
Resistencia superficial interior (Rsi)			0,09 m ² K/W				
Construcción / Material	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/mK)	Resistencia térmica (m ² K/W)		Transmitancia térmica (U) (W/m ² K)	Área (A) (m ²)	U x A
Piso cerámico	0,047		0,42		2,40	5,00	11,98
OSB	0,025	0,13	0,19				
Plancha fibrocemento ST	0,008	0,25	0,03				
Mortero fortificado	0,005	0,80	0,01				
Porcelanato	0,009	1,30	0,01				
Piso laminado			0,42		2,36	15,00	35,45
OSB	0,018	0,13	0,14				
Espuma nivelante	0,002	0,05	0,04				
Piso laminado	0,011	0,17	0,06				
Transmitancia térmica del piso			2,37 W/m²K				

4.5.2 Techo

La vivienda cuenta con un techo exterior de termo techo, compuesto de tres capas, siendo la más exterior el aluzinc (reflectivo), la capa intermedia poliestireno expandido (aislante) y la capa interna de vinil blanco. El núcleo de servicios cuenta además con una baldosa acústica inferior a modo de cielo raso.

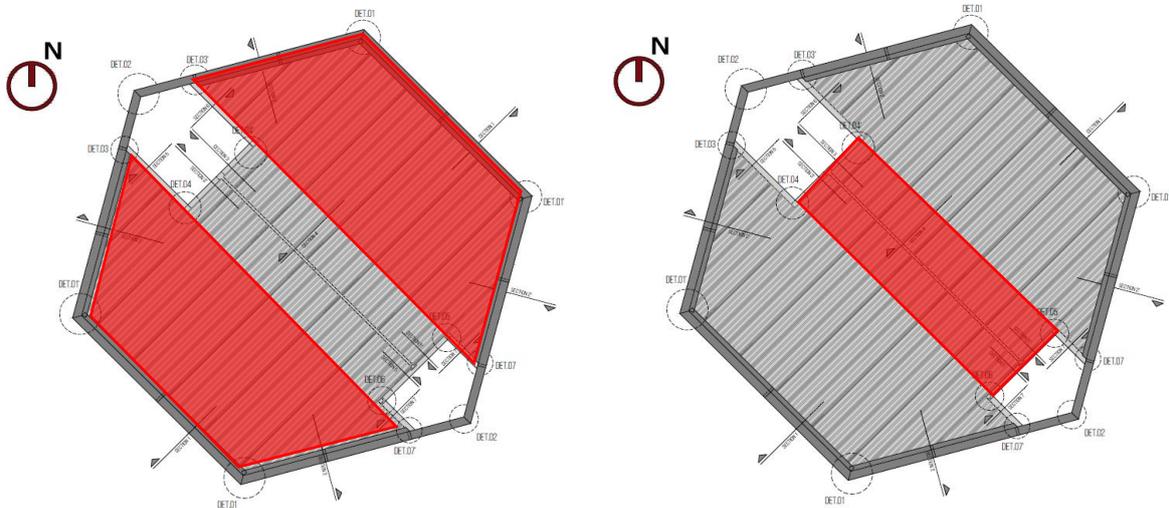


Figura 56. Izquierda: Ubicación del techo de los ambientes de sala y dormitorio. Derecha: Ubicación del techo del eje de servicios.

La transmitancia térmica para el techo es $0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tabla 23. Cálculo de la transmitancia térmica para el techo.

Resistencia superficial exterior (Rse)	0,05 $\text{m}^2\text{K/W}$
Resistencia superficial interior (Rsi)	0,17 $\text{m}^2\text{K/W}$

Construcción / Material	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/mK)	Resistencia térmica ($\text{m}^2\text{K/W}$)	Transmitancia térmica (U) ($\text{W/m}^2\text{K}$)	Área (A) (m^2)	A x S
Techo ambientes			2,81	0,36	15,00	5,35
Calaminon TAT 1060	0,075	0,03	2,59			
Techo eje de servicios			3,27	0,31	5,00	1,53
Calaminon TAT 1060	0,075	0,03	2,59			
Cámara de aire	0,010	-	0,15			
Baldosa acústica	0,019	0,06	0,32			

Transmitancia térmica del techo	0,34 $\text{W/m}^2\text{K}$
---------------------------------	-----------------------------

4.5.3 Muros

La estructura de la vivienda Ayni es de madera. El cerramiento de muros interiores y exteriores es drywall. Los muros exteriores tienen planchas de fibrocemento hacia afuera y planchas de yeso hacia adentro de la vivienda. El interior de estos muros se relleno con espuma de poliéster. Existen 04 tipos de muros en la envolvente. En dos de ellos los materiales son similares, lo que varía entre ellos es el espesor. El tercer tipo posee una protección exterior adicional. El cuarto tipo de muro tiene cerámico en el interior. El detalle de la composición se muestra en la tabla 24.

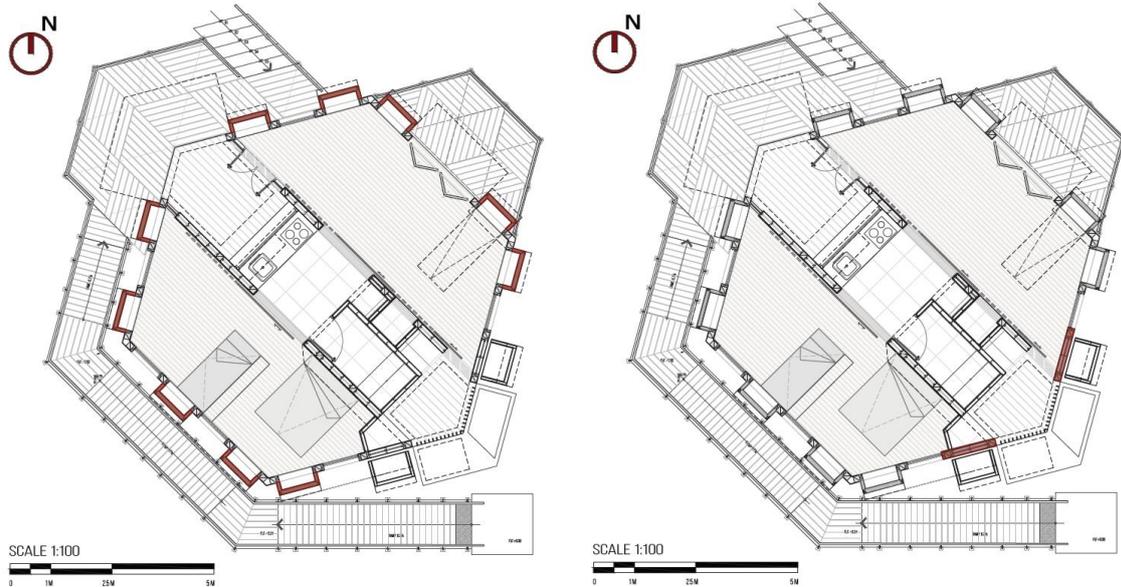


Figura 57. Tipos de muro de la vivienda Ayni. Izquierda: muro 1. Derecha: muro 2

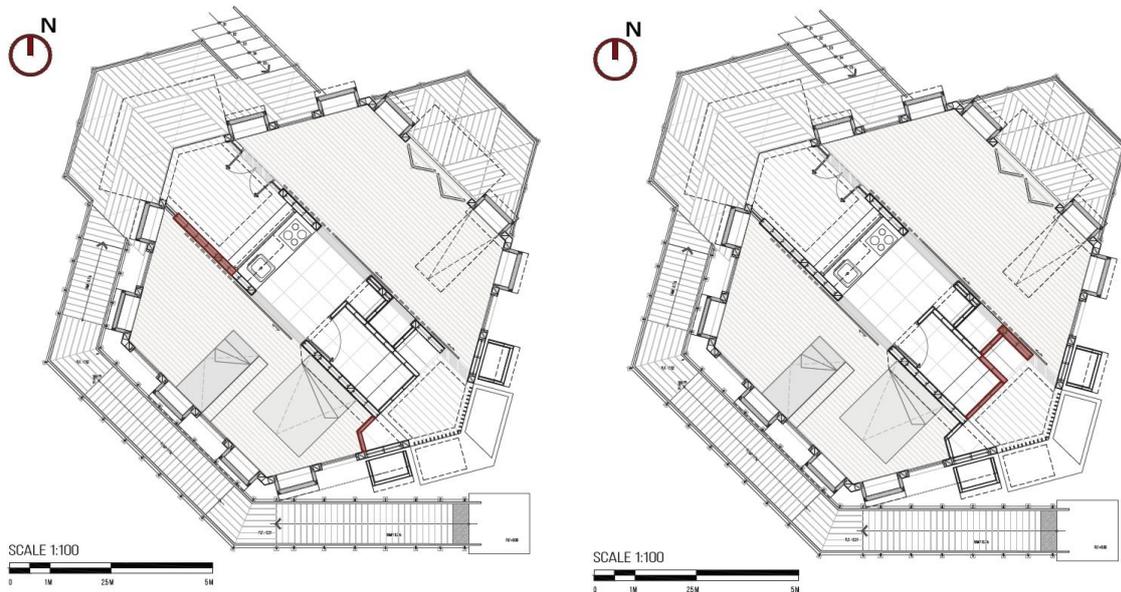


Figura 58. Tipos de muro de la vivienda Ayni. Izquierda: muro 3. Derecha: muro 4

Tabla 24. Cálculo de la transmitancia térmica de los muros

Resistencia superficial exterior (Rse)	0,11 m ² K/W
Resistencia superficial interior (Rsi)	0,06 m ² K/W

Construcción / Material	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/mK)	Resistencia térmica (m ² K/W)		Transmitancia térmica (U) (W/m ² K)	Área (A) (m ²)	U x A
Muro 1				1,46	0,68	5,00	3,42
Poli aluminio	0,008	-	-				
Espacio de aire	0,100	-	-				
Plancha fibrocemento ST	0,010	0,25	0,04				
Aislante de poliéster	0,075	0,063	1,19				
Placa de yeso ST	0,015	0,25	0,06				
Muro 2				1,46	0,68	5,00	3,42
Plancha fibrocemento ST	0,010	0,25	0,04				
Aislante de poliéster	0,075	0,063	1,19				
Placa de yeso ST	0,015	0,25	0,06				
Muro 3				1,89	0,53	1,50	0,79
Plancha fibrocemento ST	0,008	0,25	0,03				
Aislante de poliéster	0,100	0,063	1,59				
Placa de yeso RF de 15mm	0,025	0,25	0,10				
Muro 4				0,40	2,47	0,50	1,24
Porcelanato	0,009	2,30	0,00				
Mortero	0,005	0,80	0,01				
Plancha fibrocemento ST	0,008	0,25	0,03				
Cámara de aire	0,150	-	0,15				
Plancha fibrocemento ST	0,008	0,25	0,03				
Mortero	0,005	0,80	0,01				
Porcelanato	0,009	2,30	0,00				

Transmitancia térmica del piso	0,74 W/m²K
---------------------------------------	------------------------------

4.6 Simulaciones sobre el diseño final

Las simulaciones realizadas sobre la vivienda Ayni sirven para verificar el comportamiento de la vivienda bajo las estrategias bioclimáticas implementadas.

Las simulaciones fueron realizadas en diferentes etapas del diseño, para validar algunas decisiones, eligiendo la técnica que mejores resultados obtuviera.

Los parámetros con los que se trabajó fueron: la forma, la orientación, el área y ubicación de los vanos, los materiales, la actividad humana y los equipos y muebles interiores.

El análisis térmico se trabajó sobre el diseño final de la vivienda Ayni junto a los parámetros expresados en la tabla 25 para la ubicación de la ciudad de Cali.

Tabla 25. Parámetros usados en las simulaciones en *EnergyPlus*.

Parámetros	Valores
Forma	Hexagonal
Orientación	Eje NO-SE
Vanos	Orientados en el eje NO-SE 40% área de muros en el eje NO-SE Con protección solar
Actividad humana	5 personas (2 adultos, 3 niños) Actividad típica de familia unifamiliar
Equipos internos	Cocina eléctrica, refrigerador, microondas, licuadora, televisor, bluray, tableros de control
Otros	Muebles de sala, comedor y dormitorio.

4.6.1 Análisis térmico

Sobre el diseño final de la casa Ayni se utilizó la lista de materiales enumerados en la sección “4.5 Cálculo de transmitancia térmica de la envolvente” (tablas 22, 23 y 24) y la data climática mostrada en la sección “3.2 Clima de la ciudad de Cali” (tabla 14).

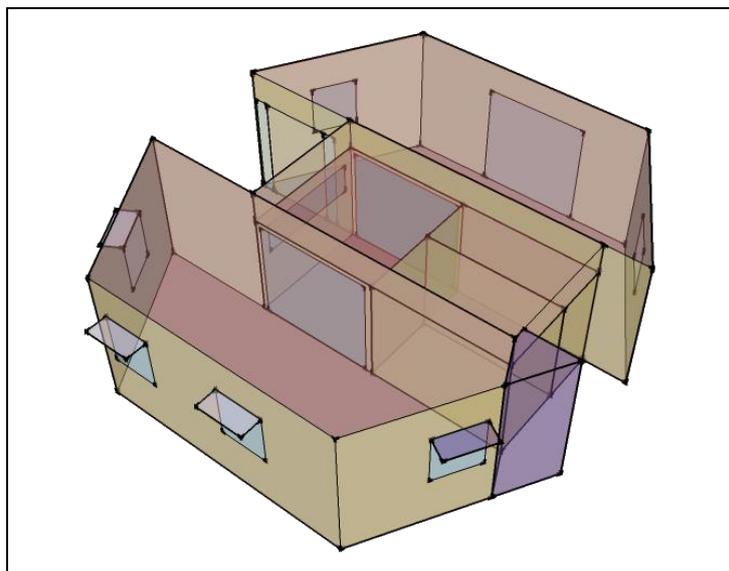


Figura 59. Esquema del diseño final de la vivienda Ayni en el programa *SketchUp*.

Entonces, lo primero que obtenemos es el comportamiento térmico de la vivienda Ayni a lo largo de un año.

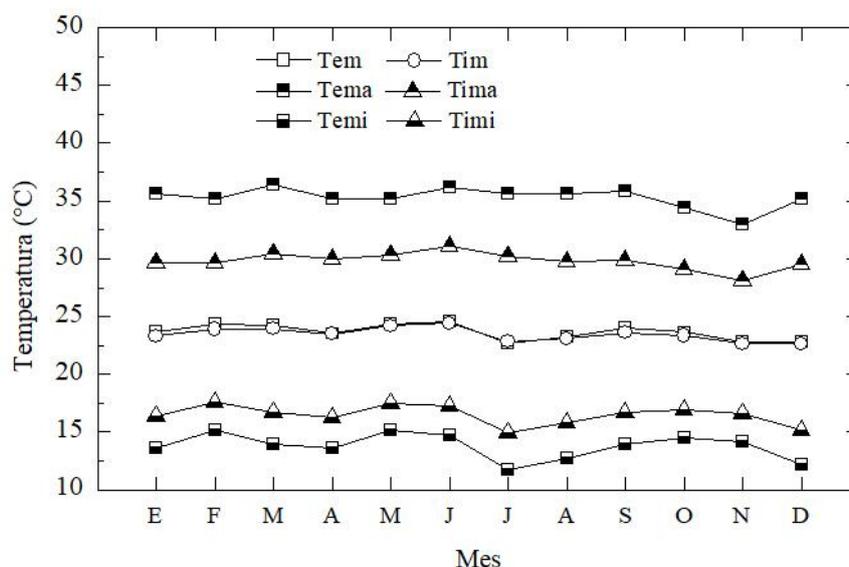


Figura 60. Cuadro de temperaturas anuales exterior e interior (simuladas en *EnergyPlus*). Temperatura exterior: media (Tem), máxima media (Tema), mínima media (Temi). Temperaturas interiores simuladas: media (Tim), máxima media (Tima), mínima media (Timi).

Los valores exteriores medidos provienen de la data climática brindada por la competencia y los valores interiores simulados provienen del cálculo realizado en el programa *EnergyPlus*. La tabla 26 resume los valores promedio anuales obtenidos en la simulación y de la data climática obtenida.

Tabla 26. Valores promedio anuales de temperatura.

Parámetro	Promedio anual (°C)
Temperatura exterior máxima medida	35,3
Temperatura exterior promedio medida	23,7
Temperatura exterior mínima medida	13,8
Amplitud térmica exterior medida	21,5
Temperatura interior máxima simulada	29,8
Temperatura interior promedio simulada	23,4
Temperatura interior mínima simulada	16,5
Amplitud térmica interior simulada	13,3

Se observa que la temperatura promedio exterior e interior se mantiene muy similar en ambos casos, 23,7°C y 23,4°C respectivamente. Es en los valores máximos y mínimos, y por tanto en la amplitud térmica, donde hay una gran variación. Hay una reducción de 5,5°C en la temperatura máxima promedio (exterior medida e interior simulada) y un aumento de 2,7°C en la temperatura mínima promedio (exterior medida e interior simulada). La amplitud térmica se reduce 8,2°C.

Se procede, además, a evaluar el comportamiento térmico de la vivienda durante el mes de competencia en la ciudad de Cali esto es, el mes de diciembre. La figura 61 muestra los valores de temperatura interior y exterior para un día típico de diciembre.

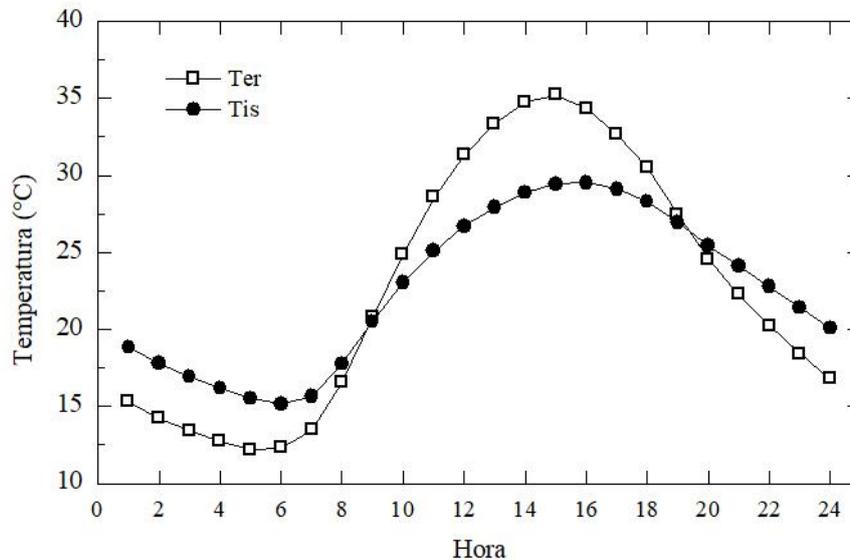


Figura 61. Cuadro de temperaturas exterior e interior (simuladas en *EnergyPlus*) para un día típico de diciembre en Cali. Temperatura exterior medida (Ter) y temperatura interior simuladas (Tis).

La tabla 27 resume los valores obtenidos de la simulación y de la data climática.

Tabla 27. Resumen de valores obtenidos.

Parámetro	Temperatura (°C)
Exterior medida máxima	35,2
Exterior medida mínima	12,2
Amplitud térmica exterior medida	23,0
Interior simulada máxima	29,5
Interior simulada mínima	15,2
Amplitud térmica interior simulada	14,4

Se observa la misma tendencia vista antes para el caso anual. Se logra reducir la amplitud térmica, de 23°C a 14,4°C (8,6°C de diferencia). El valor máximo se reduce 5,7°C y valor mínimo aumenta 3°C. Sin embargo, la zona de confort está entre los 24°C y los 26°C. El tiempo en que la temperatura se encuentra en esta zona se aumentan de una hora a dos horas, esto es, un incremento de solo 4% respecto a todo el día.

4.6.2 Análisis de humedad

Al igual que en el caso térmico, evaluamos un comportamiento anual y de un día típico de diciembre para la vivienda Ayni. Los valores exteriores provienen de la data climática y los valores interiores de la simulación realizada en *EnergyPlus*.

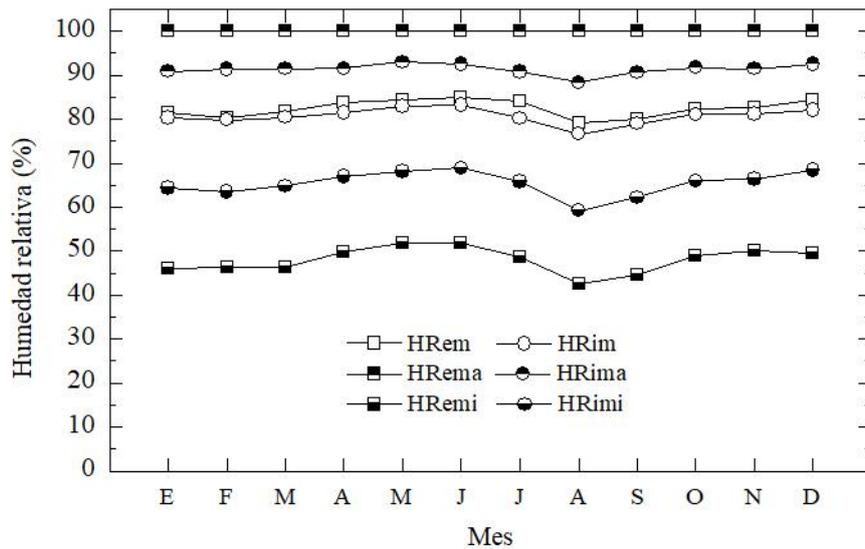


Figura 62. Cuadro valores de humedad relativa exterior e interior (simulación en *EnergyPlus*) para un periodo anual. Humedad relativa exterior: media (HRem), máxima media (HRema), mínima media (HRemi). Humedad relativa interior simulada: media (HRim), máxima media (HRima), mínima media (HRimi).

Las humedades relativas interior y exterior están muy cercanas, aunque la interior es ligeramente más baja. Es en los máximos y mínimos donde se nota la mayor diferencia. La humedad relativa máxima interior ha bajado alrededor del 10%, sin embargo, la mínima interior ha subido alrededor de 15%, ambas comparaciones respecto a la humedad exterior.

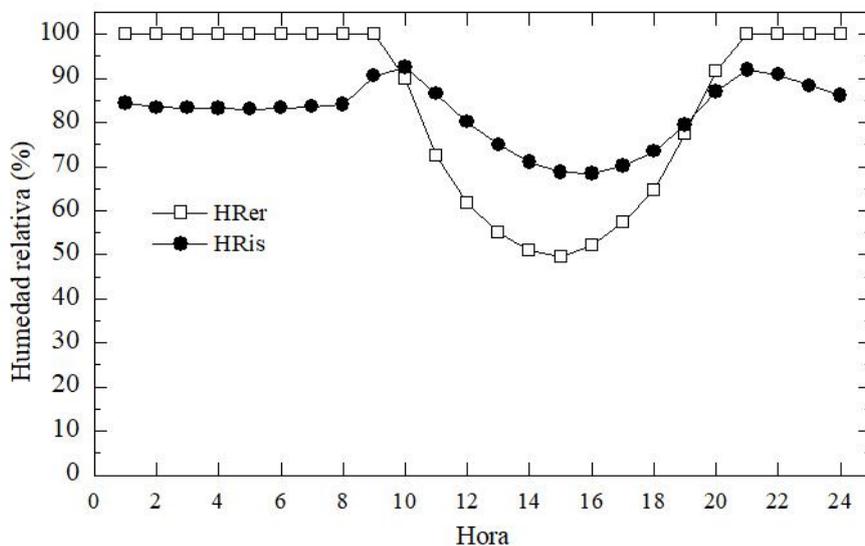


Figura 63. Cuadro de humedades relativas exterior e interior (simulación en *EnergyPlus*) para un día típico de diciembre. Humedad relativa exterior simulada (HRer) y humedad relativa interior simulada (HRis)

Para el caso del mes de competencia, sucede lo mismo que se ha descrito en el caso anual, la amplitud se ha atenuado, pasando de 50% (exterior) a 25% (interior). Sin embargo, si nos referimos a la zona de confort, hemos pasado de estar en 30% de las horas del día dentro de la zona de confort (medidas exteriores) a tener 0% de medidas simuladas dentro de la zona de confort.

4.6.3 Análisis de protección solar

Con el uso del programa Biosol, obtenemos las medidas de aleros y parasoles (tabla 28) necesarios para evitar la penetración solar directa, de acuerdo a la orientación del muro que lo contiene. Las medidas de las ventanas principales son 1,44 m x 0,88 m.

Tabla 28. Medidas recomendadas de aleros y parasoles obtenidas con Biosol.

Orientación muro	Alero	Parasol
NNE	1,0 m	No necesario
NNO	0,8 m	0,6 m
SEE	1,0 m	No necesario
SSE	0,8 m	No necesario

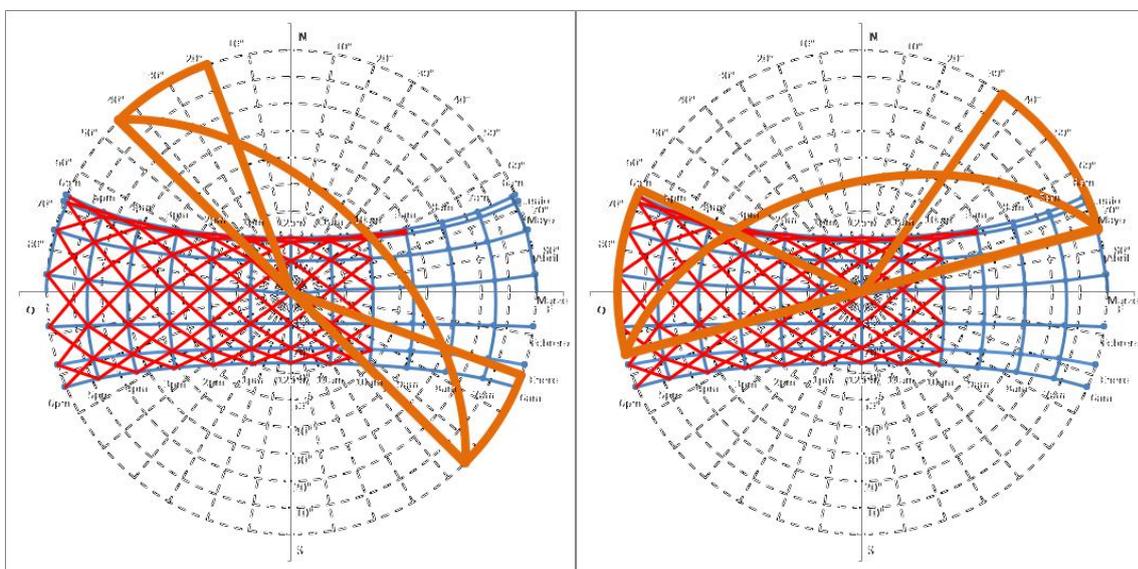


Figura 64. Esquemas de protección solar de aleros y parasoles sobre la trayectoria solar obtenidos en el programa Biosol. Izquierda: muro NNE. Derecha: muro NNO.

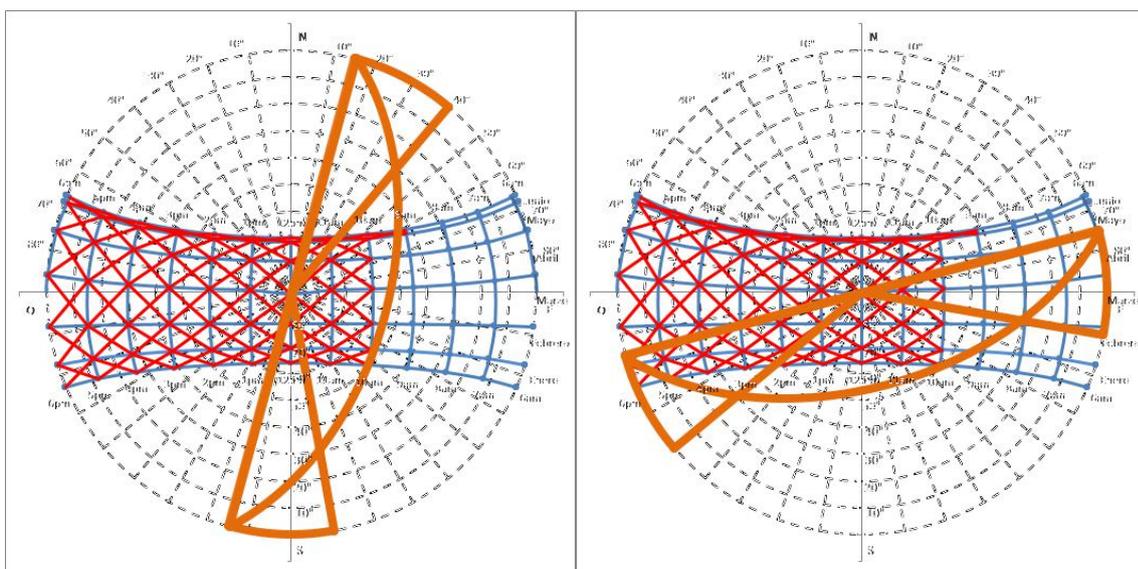


Figura 65. Esquemas de protección solar de aleros y parasoles sobre la trayectoria solar obtenidos en el programa Biosol. Izquierda: muro SEE. Derecha: muro SSE.

Las medidas obtenidas en la tabla 28 son tomadas en cuenta por los diseñadores para encontrar soluciones específicas y creativas de protección solar. Al diseñar un alero que se pliega (figura 66) se necesita solo la mitad de tamaño requerido. Se ha mostrado que los parasoles no son necesarios salvo en una dirección. Los muros sobresalientes de la envolvente de la vivienda hacen innecesario el uso de parasoles.



Figura 66. Diseño de alero plegable como protección de ventanas, realizado por el equipo Ayni.

4.6.4 Análisis de ventilación natural

La orientación de la vivienda y vanos hacia el noroeste busca aprovechar los vientos predominantes de la ciudad de Cali. La evaluación de este diseño se puede observar en la figura 67. Esta evaluación se realizó para vientos de 2m/s, provenientes desde la orientación noroeste y a una altura de 1,5m sobre el suelo.

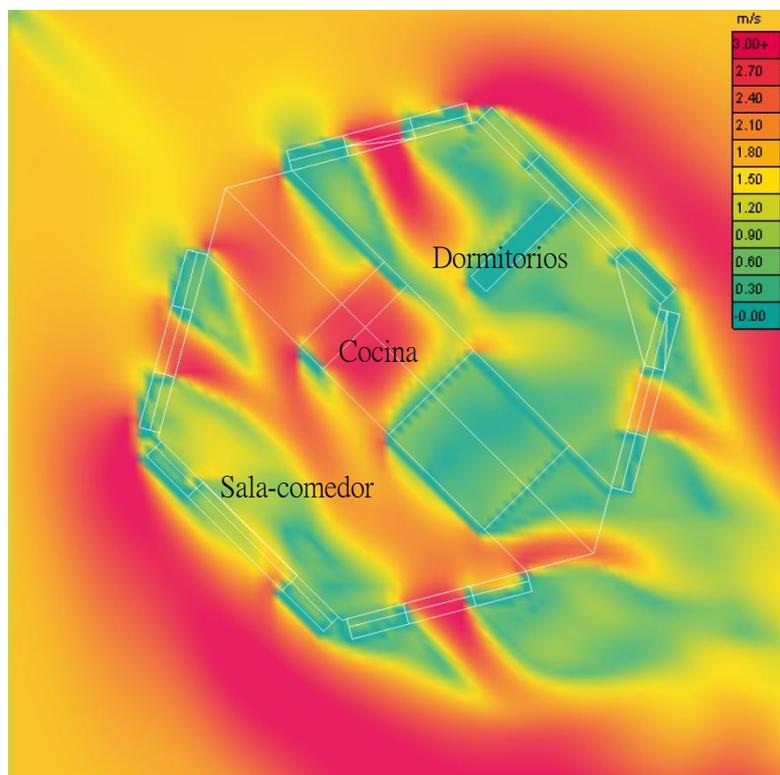


Figura 67. Simulación de la ventilación natural de la vivienda Ayni con *Ecotect*.

Se observa claramente el movimiento del aire a través de los ambientes sociales (cocina y sala-comedor). En los dormitorios este movimiento es ligeramente menor.

5 VIVIENDA AYNI EN CALI

La vivienda Ayni luego de ser construida y terminada en Lima fue desmontada y enviada a la ciudad de Cali en tres camiones para ser nuevamente construida en la Villa Solar ubicada en el campus de la Universidad del Valle de Cali.



Figura 68. Ruta terrestre de Lima a Cali que recorrieron los camiones transportando la vivienda Ayni. Gráfico realizado por el equipo Ayni.

5.1 Construcción de la vivienda en la Villa Solar

La zona designada para la construcción de la vivienda Ayni dentro de la Universidad del Valle de Cali se muestra en la figura 69. Allí se observa la Villa Solar, donde se construyeron todas las viviendas en competencia. La construcción de la vivienda Ayni en Cali tardó alrededor de 10 días, en tres horarios de trabajo. La construcción fue realizada por los miembros del equipo y con ayuda de algunos especialistas en instalaciones sanitarias, eléctricas y drywall.



Figura 69. Vista área de la Villa Solar en la Universidad del Valle de Cali (2015) con la ubicación del área de construcción de la vivienda Ayni.

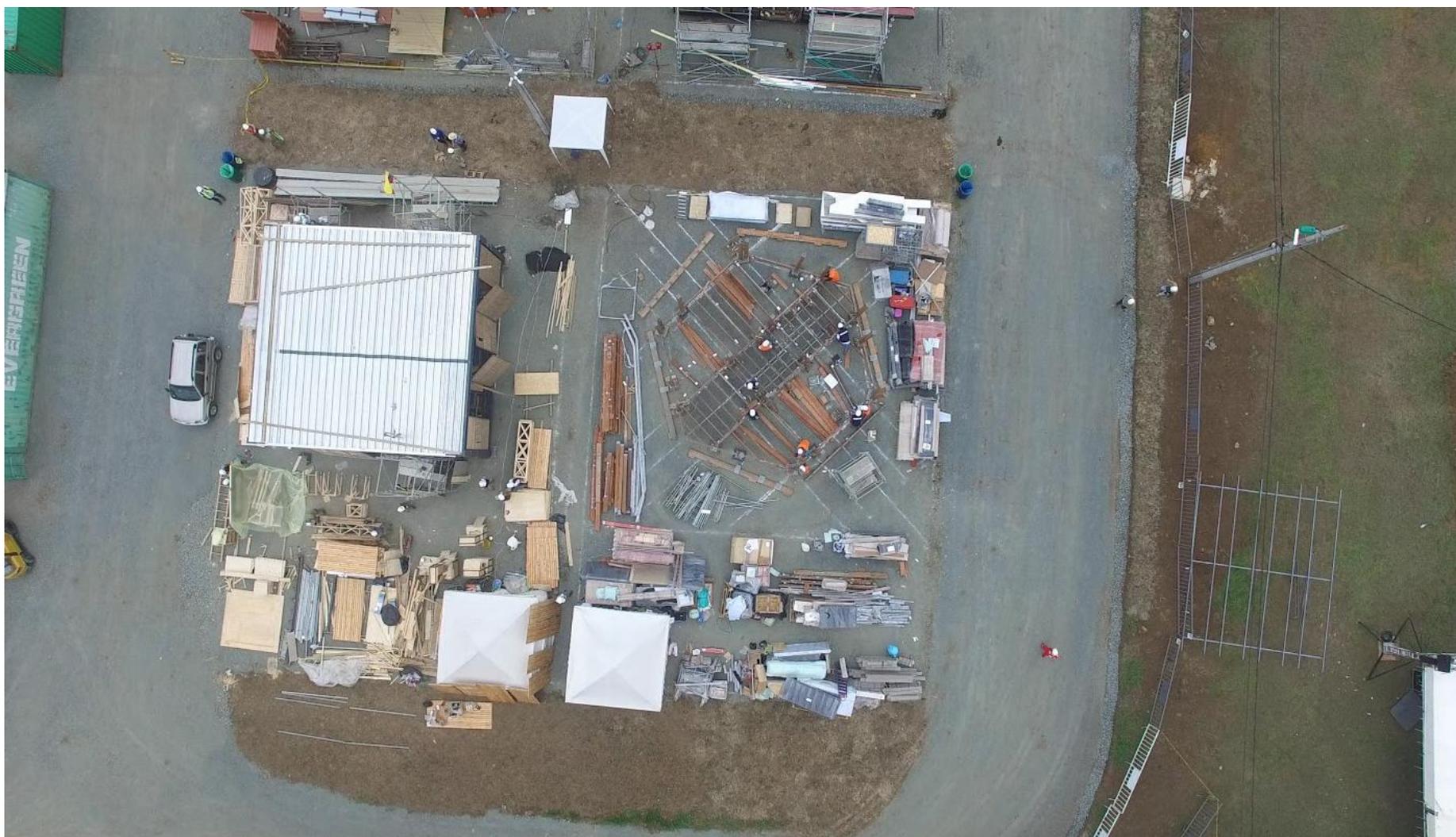


Figura 70. Vista aérea de la zona de construcción de la vivienda Ayni en la Villa Solar, Cali, 2015.



Figura 71. Construcción de la vivienda Ayni en la Villa Solar, Cali, 2015.



Figura 72. Vivienda Ayni terminada en la Villa Solar, Cali, 2015.

5.2 Mediciones de la vivienda en la Villa Solar

Una de las pruebas de la competencia son las condiciones de confort alcanzadas en la vivienda. Para ello, la organización de la competencia instaló sensores de humedad, temperatura e iluminación en tres ambientes de la casa: sala, cocina y dormitorio. Estos sensores funcionan durante los 10 días que dura la prueba. Sin embargo, la construcción de la vivienda Ayni tuvo un retraso de 5 días y solo se tienen medidas de los últimos 5 días de la competencia.

5.2.1 Temperatura

La gráfica muestra las temperaturas medidas por la organización durante la competencia. La temperatura exterior se midió en una estación meteorológica instalada en la Villa Solar. La temperatura interior mostrada corresponde a la temperatura medida en la sala de la vivienda Ayni. El rango de confort corresponde al rango calculado para esos días de competencia. La tabla 29 resume los valores promedio obtenidos.

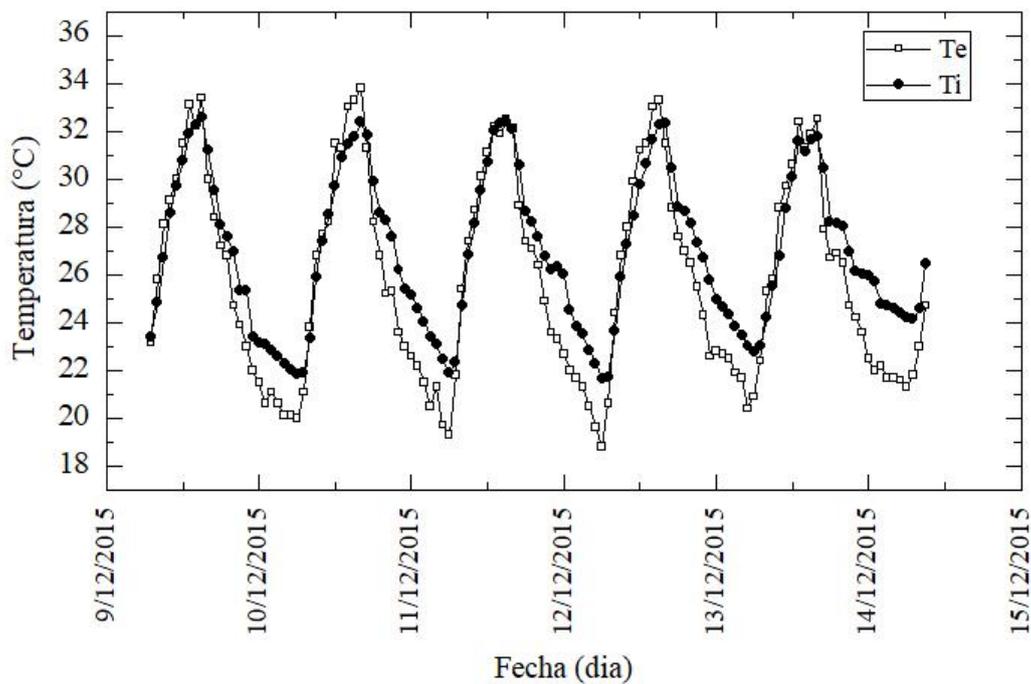


Figura 73. Cuadro de temperaturas medidas por la organización del Solar Decathlon dentro y fuera de la vivienda Ayni del 09 al 15 de diciembre del 2015. Temperatura exterior (Te) y temperatura interior (Ti).

De la gráfica 73 se puede observar que los máximos interiores son ligeramente menores a los máximos exteriores y los mínimos interiores mayores a los mínimos exteriores.

La temperatura máxima interior promedio es $0,9^{\circ}\text{C}$ menor que la temperatura máxima exterior promedio. La temperatura mínima interior promedio es $2,3^{\circ}\text{C}$ mayor que la temperatura mínima exterior promedio. La amplitud térmica interior es $3,2^{\circ}\text{C}$ menor que la exterior.

Tabla 29. Temperaturas promedio medidas dentro y fuera de la vivienda Ayni.

Descripción	Promedio
Temperatura exterior máxima medida (°C)	33,1
Temperatura exterior promedio medida (°C)	25,8
Temperatura exterior mínima medida (°C)	20,3
Amplitud térmica exterior medida (°C)	12,8
Temperatura interior máxima medida (°C)	32,2
Temperatura interior promedio medida (°C)	26,8
Temperatura interior mínima medida (°C)	22,6
Amplitud térmica interior medida (°C)	9,6

La tabla 30 muestra la cantidad de horas de confort dentro de la casa Ayni en comparación con el exterior. Se pasa de un 9,8% a un 22,0%.

Tabla 30. Cantidad de horas que la temperatura interior de la vivienda Ayni se encuentra dentro de la zona de confort térmico designada por la competencia.

Confort térmico	Exterior	Interior AYNI
Horas	12	27
Porcentaje	9,8 %	22,0 %

5.2.2 Humedad

De igual manera, se tomó mediciones de la humedad relativa dentro y fuera de la vivienda durante la semana de competencia.

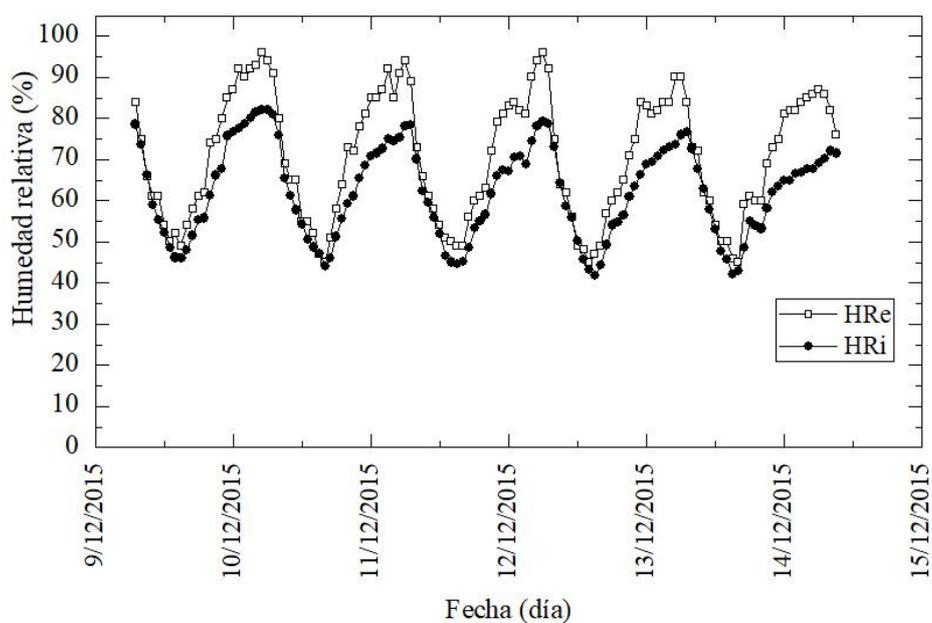


Figura 74. Cuadro de humedades relativas medidas por la organización del Solar Decathlon dentro y fuera de la vivienda Ayni del 09 al 15 de diciembre del 2015. Humedad relativa exterior (HRe) y humedad relativa interior (HRi).

La humedad relativa en el interior de la vivienda Ayni siempre está por debajo de la humedad relativa exterior. Mientras afuera de la vivienda los máximos llegan a 95%, en el interior la humedad relativa máxima solo llega a 82%. La humedad relativa promedio baja de 70,6% en el exterior a 62,3% en el interior de la vivienda.

La tabla 31 muestra la cantidad de horas de confort dentro de la casa Ayni en comparación con el exterior. Se pasa de un 30,9% en el exterior a un 43,1% en el interior. La cantidad de horas en confort ha aumentado un 39%.

Tabla 31. Cantidad de horas dentro de la zona de confort de humedad en el interior de la vivienda Ayni.

Confort humedad	Exterior	Interior AYNI
Horas	38	53
Porcentaje	30,9 %	43,1 %

5.3 Comparativa entre datos simulados y medidos

5.3.1 Temperatura

La tabla 32 resume los valores de temperatura esperados por la simulación para el mes de diciembre y los valores obtenidos medidos en los días de competencia.

Tabla 32. Comparación de diferencias de temperaturas exterior e interior esperadas (simulación) y obtenidas (medición en Cali).

	Simulación	Medición
Diferencia de temperaturas máxima exterior e interior (promedio)	- 5,7 °C	- 0,9 °C
Diferencia de temperaturas mínimas exterior e interior (promedio)	+ 3,0 °C	+ 2,3 °C
Diferencia de amplitudes térmicas exterior e interior (promedio)	- 8,7 °C	- 3,2 °C

Se observa que la vivienda se ha comportado en el sentido de la simulación, pero no en los valores esperados, estos han sido menores.

5.3.2 Humedad

La tabla 33 resume los valores de humedad relativa esperados por la simulación para el mes de diciembre y los valores obtenidos medidos en los días de competencia.

Se observa que la vivienda se ha comportado en el sentido de la simulación, salvo en un caso, en la humedad mínima. Se esperaba que aumentara, pero ha disminuido ligeramente. En los valores máximos y mínimos se ha obtenido mejores resultados que los esperados.

Tabla 33. Comparación de diferencias de humedades relativas exterior e interior esperadas (simulación) y obtenidas (medición en Cali).

	Simulación	Medición
Diferencia de humedad relativa máxima exterior e interior (promedio)	-7,4 %	-14,9 %
Diferencia de humedad relativa mínima exterior e interior (promedio)	+ 18,8 %	-2,9 %
Diferencia de humedad relativa promedio exterior e interior (promedio)	-2,3 %	-8,3 %
Diferencia de amplitudes de humedad exterior e interior (promedio)	-26,2 %	-12,0 %

6 CONCLUSIONES

Las estrategias bioclimáticas pasivas incrementan el número de horas dentro de la zona de confort dentro de la vivienda Ayni en comparación con el exterior, subiendo de 9,8 % a 22,0 % cuando se considera temperatura y subiendo de 30,9 % a 43,1 % cuando se considera humedad relativa.

Esto claramente es insuficiente para considerar como exitoso un confort interior. Aún faltan 76,4% de horas fuera de confort. Si se desea llegar al 100% del tiempo dentro de la zona de confort definida por la competencia se requiere climatización activa.

Las mediciones de temperatura y humedad dentro de la vivienda demuestran que la simulación predice correctamente el sentido de la mejora, sin embargo, no así el valor esperado. Se esperaba que las temperaturas máximas interiores descendieran 5,7°C en promedio respecto a la exterior, pero solo han descendido 0,9°C. Esto podría explicarse por el uso que se le dio a la vivienda Ayni durante los días de medición. Se había considerado una baja ventilación en las horas de máxima temperatura para la simulación, sin embargo, en los días de competencia se prefirió ventilar los ambientes para evitar la subida de humedad relativa esperada (18,8%) y por tanto el bochorno en el interior. El descenso en la humedad relativa mínima medida (-2,9 %) comprueba este hecho.

La diferencia entre los valores medidos y simulados de temperatura y humedad demuestran que la estrategia de ventilación diurna adoptada en campo aumentó la temperatura interior, sacrificando puntos en el área de temperatura, pero mejorando el comportamiento de la humedad interior, ganando puntos adicionales en el área de humedad.

Al ser pocos días de monitoreo de las condiciones interiores de la vivienda, aún no se puede obtener un entendimiento fidedigno del desempeño de los sistemas pasivos implementados (Rodríguez-Ubinas, Montero, *et al.*, 2014).

7 RECOMENDACIONES

Las recomendaciones de diseño y estrategias bioclimáticas dadas se basan en tres puntos: un estudio general para climas cálidos, un estudio especial para la ciudad de Cali y cálculos y simulaciones computacionales. Todos ellos tomaron como condicionantes mejorar el confort interior, disminuyendo los valores máximos de temperatura y humedad, y disminuyendo la amplitud térmica y de humedad. Sin embargo, esto fue insuficiente para el rango de confort exigido por la competencia. Si se desea llegar a cumplir estas condicionantes se hace necesario la instalación de un sistema de aire acondicionado.

No se aplicó la estrategia de baja ventilación diurna. Por ello, es recomendable estudiar más estrategias que tomen en cuenta otros factores humanos como la sensación de bochorno, cambios en la operación y uso de la casa, cantidad de personas presentes en el interior, etc., que permitan una predicción más fidedigna del comportamiento real de la vivienda durante la competencia.

De haber seguido la estrategia de baja ventilación diurna probablemente los valores de temperatura y humedad hubieran sido más cercanos a los simulados. Sin embargo, esto permitió ganar puntos adicionales en las mediciones de humedad. Se debería prorratear estos valores para obtener el máximo de puntos deseados en la competencia.

De las 14 viviendas en competencia, solo 3 implementaron sistemas de aire acondicionado. Y fueron estas las que consiguieron todos los puntos en la competencia de confort. Sin embargo, esto les sacrificó puntos en sostenibilidad, eficiencia e innovación. Esto se debe tomar en cuenta durante la concepción y desarrollo de un proyecto de este tipo.

No se realizaron mediciones de temperatura, humedad e iluminación del interior de la vivienda Ayni durante su construcción en Lima y previo a su desensamblaje y posterior envío a Cali. De haber realizado algunas mediciones previas se podrían haber replanteado algunas estrategias de uso, ventilación, iluminación, con tiempo suficiente para estudiar y corregir errores.

No se obtuvieron datos técnicos de los equipos usados en las mediciones. Es recomendable tener equipos propios para realizar mediciones más prolongadas sin el límite de tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alemi, P. y Loge, F. (2017). Energy efficiency measures in affordable zero net energy housing: A case study of the UC Davis 2015 Solar Decathlon home. *Renewable Energy*, 101, 1242–1255.
- Allard, F., Bienfait, D., Haghighat, F., Liébecq, G., Van der Maas, K., Pelletret, R., Vandaele, L. y Walker, R. (1992). Air Flow Through Large Openings in Buildings. En J. Van der Maas (Ed.), *Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme*. Lausana: LESO-PB, EPFL.
- American Society of Heating, Refrigerations and Air-Conditioning Engineers. (2009). *2009 ASHRAE Handbook: Fundamentals (SI)*. Atlanta, GA: ASHRAE.
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikofates (Eds.). (2008). *Climate change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ginebra: IPCC.
- Brambilla, A., Salvalai, G., Tonelli, C. e Imperadori, M. (2017). Comfort analysis applied to the international standard “Active House”: The case of RhOME, the winning prototype of Solar Decathlon 2014. *Journal of Building Engineering*, 12, 210–218.
- Coellar Heredia, F. (2013). *Diseño Arquitectónico Sostenible y Evaluación Energética de la Edificación* (Tesis profesional de Arquitectura). Universidad de Cuenca.
- Conley, B., Cruickshank, C. A. y Baldwin, C. (2018). Insulation Materials. En I. Dincer (Ed.), *Comprehensive Energy Systems* (pp. 760–795). Oshawa: Elsevier.
- Courgey, S. y Oliva, J. P. (2006). *La conception bioclimatique, des maisons confortables et économes*. Mens: Terre vivante.
- Daemei, A. B., Eghbali, S. R. y Khotbehsara, E. M. (2019). Bioclimatic design strategies: A guideline to enhance human thermal comfort in Cfa climate zones. *Journal of Building Engineering*, 25, 1-17.
- EnergyPlus. (17 de enero de 2020). <https://energyplus.net>
- Evans, J. M. (2001). Técnicas bioclimáticas de diseño: Las “Tablas de Mahoney” y los “Triángulos de Confort”. *Energy and Buildings*, 35, 26–33.
- Gaspari, J., Fabbri, K., Cancellari, T., Corazzi, G. y Vodola, V. (2017). The use of building performance simulation to support architectural design: A case study. *Energy Procedia*, 122, 205–210.
- Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18, 11–23.
- González García, S. I. (2010). *Estudio experimental del comportamiento térmico de sistemas pasivos de enfriamiento en clima cálido-húmedo*. (Tesis de maestría en Energías Renovables). Universidad Internacional de Andalucía.
- Huaylla Roque, F. A. (2009). *Evaluación experimental de cambios constructivos para lograr confort térmico en una vivienda altoandina del Perú*. (Tesis profesional de Ingeniería Física). Universidad Nacional de Ingeniería.
- International Energy Agency. (17 de enero de 2020). <https://www.iea.org/>
- Incropera, F. y DeWitt, D. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México: Prentice Hall.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (15 de noviembre de 2019). *Climate Change Synthesis Report (2014)*. <http://www.ipcc.ch>
- Lyu, Y., Pan, Y. y Qu, C. (2017). Energy System Design and Optimization of a Solar Decathlon House.

- Procedia Engineering*, 205, 1019–1026.
- McGuffie, K. y Henderson-Sellers, A. (2005). *A Climate Modelling Primer*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Ministerio de Vivienda de Perú. (2014). *Norma EM.110: Confort térmico y lumínico con eficiencia energética*. <https://www.gob.pe/vivienda>
- Molina Castillo, J. R. (2016). *Evaluación Bioclimática De Una Vivienda Rural Alto Andina De La Comunidad De San Francisco De Raymina De Ayacucho*. (Tesis de maestría en Energías Renovables). Universidad Nacional de Ingeniería.
- Molina Fuertes, J. O. (2017). *Evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda alto andina para lograr el confort térmico con energía solar*. (Tesis de maestría en Energías Renovables). Universidad Nacional de Ingeniería.
- Molina Fuertes, J. O. (2018). *Uso del programa EnergyPlus para la simulación del consumo energético de un módulo bioclimático ubicado en Imata, Arequipa, a 4519 m.s.n.m.* (Tesis profesional de Ingeniería Física). Universidad Nacional de Ingeniería.
- Montoro Cavero, G. E. (2003). *Criterios de diseño bioclimático en el Perú*. (Informe de suficiencia profesional de Arquitectura). Universidad Nacional de Ingeniería.
- Navarro, I., Gutiérrez, A., Montero, C., Rodríguez-Ubiñas, E., Matallanas, E., Castillo-Cagigal, M., Porteros, M., Solórzano, J., Caamaño-Martín, E., Páez, J. M. y Vega, S. (2014). Experiences and methodology in a multidisciplinary energy and architecture competition: Solar Decathlon Europe 2012. *Energy and Buildings*, 83, 3–9.
- Olgay, V. (1963). *Design with Climate. Bioclimatic approach to Architectural Regionalism*. New Jersey: Princeton University Press.
- Pawar, A. S., Mukherjee, M. y Shankar, R. (2015). Thermal comfort design zone delineation for India using GIS. *Building and Environment*, 87, 193–206.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L. y McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644.
- Peng, C., Huang, L., Liu, J. y Huang, Y. (2015). Energy performance evaluation of a marketable net-zero-energy house: Solar I at Solar Decathlon China 2013. *Renewable Energy*, 81, 136–149.
- Portilla Colina, M. G. (2019). *Aplicación de sistemas bioclimáticos pasivos en base a las necesidades de confort termo-lumínico del paciente en habitaciones de hospitalización y área de terapias en el diseño de un hospital oncológico, Pucallpa, 2018*. (Tesis profesional de Arquitectura). Universidad Privada del Norte.
- Rayter, D. (2008). *Guía de aplicación de arquitectura bioclimática en locales educativos*. Lima: MINEDU - OINFE.
- Rivero, R. (2010). Confort térmico. En *Acondicionamiento térmico*. Montevideo: Facultad de Arquitectura, UR.
- Rodríguez-Ubinas, E., Rodríguez, S., Voss, K. y Todorovic, M. S. (2014). Energy efficiency evaluation of zero energy houses. *Energy and Buildings*, 83, 23–35.
- Rodríguez-Ubinas, E., Montero, C., Porteros, C., Vega, S., Navarro, I., Castillo-Cagigal, M., Matallanas, E. y Gutiérrez, A. (2014). Passive design strategies and performance of Net Energy Plus Houses. *Energy*

- and Buildings*, 83, 10–22.
- Romero Verástergui, B. D. (2016). *Propuesta metodológica para evaluar la eficiencia energética de edificaciones. Estudio caso: Laboratorio de microbiología y biotecnología - UNALM*. (Tesis profesional de Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Saavedra Salazar, G. G. (2014). *Diseño, construcción y evaluación térmica de un módulo de vivienda rural en la localidad de Vilcallamas Arriba, distrito de Pisacoma, provincia Chucuito, región Puno*. (Tesis profesional de Ingeniería Física). Universidad Nacional de Ingeniería.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (1 de enero de 2020). *Mapa climático del Perú*. <http://idesep.senamhi.gob.pe/geovisoridesep/>
- Serra, R. y Coch, H. (1995). *Arquitectura y energía natural*. Barcelona: Edicions UPC.
- Shrestha, P. P. y Mulepati, S. (2016). Energy Performance of a Solar Home Constructed for the Solar Decathlon Competition 2013. *Procedia Engineering*, 145, 1298–1305.
- Solar Decathlon. (2020). Recuperado el 17 de enero de 2020 de <https://www.solardecathlon.gov>
- Solar Decathlon Europe. (2012). Recuperado el 17 de enero de 2020 de <http://www.sdeurope.org>
- Solar Decathlon Europe. (2014). Recuperado el 17 de enero de 2020 de <http://www.solardecathlon2014.fr>
- Solar Decathlon Latin America & Caribbean (2015). *Rules Final Version*. Recuperado el 1 de enero de 2016 de <http://www.solardecathlon2015.com.co>
- Szokolay, S. V. (2008). *Introduction to architectural science: the basis of sustainable design*. Oxford: Architectural Press.
- Tantasavasdi, C., Srebric, J. y Chen, Q. (2001). Natural ventilation design for houses in Thailand. *Energy and Buildings*, 33(8), 815–824.
- Távora Juárez, L. M. y Simón Rodríguez, C. S. (2018). *Aprovechamiento de los vientos en la propuesta arquitectónica hotel resort cuatro estrellas Punta Balcones Negritos – Talara*. (Tesis Profesional de Arquitectura). Universidad San Pedro.
- Terrados, F. J. y Moreno, D. (2014). "Patio" and "Botijo": Energetic strategies' architectural integration in "Patio 2.12" prototype. *Energy and Buildings*, 83, 70–88.
- UPME y IDEAM (2005). *Atlas de radiación solar de Colombia*. Recuperado el 1 de enero de 2020 de <http://www.ideam.gov.co>
- Welty, J. R. (2008). *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*. Danver, MA: Wiley.
- Wieser Rey, M. (2011). *Consideraciones bioclimáticas en el diseño arquitectónico. El caso peruano*. Lima: PUCP.

ANEXOS

ANEXO 1. Propiedades termo físicas de materiales construcción

Tabla 34. Lista de características higrotérmicas de materiales de construcción (MINVIV, 2014).

N°	Material	Densidad ρ (kg / m ³)	Conductividad térmica k (W / m K)	Calor Específico c (J / kg °C)
	ROCAS Y SUELOS			
	Rocas o suelos sedimentarios			
1	Gravas y arenas (arena fina, arena gruesa, etc.)	1700 - 2200	2.00	910 - 1180
2	Arcilla o limo	1200 - 1800	1.50	1670 - 2500
3	Arcilla refractaria	2000	0.46	879
4	Caliza muy dura	2200 - 2590	2.30	1000
5	Caliza media dura	1800 - 1990	1.40	1000
6	Caliza muy blanda	≤ 1590	0.85	1000
7	Piedra canto rodado de 10 cm	---	3.50	---
	Rocas ígneas			
8	Basalto	2700 - 3000	3.50	1000
9	Granito	2500 - 2700	2.80	1000
10	Piedra pómez	≤ 400	0.12	1000
11	Roca natural porosa (por ej. lava)	≤ 1600	0.55	1000
	Rocas metamórficas			
12	Pizarra	2000 - 2800	2.20	1000
13	Mármol	2600 - 2800	3.50	1000
	Tierra			
14	Tierra	≤ 2050	0.52	1840
15	Yeso	600 - 900	0.30	1000
16	Barro con paja de 2 cm.	---	0.09	---
	CONCRETO			
17	Concreto armado	2400	1.63	1000
18	Concreto simple	2300	1.51	1000
19	Cemento pulido (pisos de 5 cm de espesor)	---	0.53	---
	MAMPOSTERIA			
20	Bloque de arcilla - Ladrillo corriente	1700	0.84	800
21	Bloque de arcilla - Ladrillo tipo King Kong	1000	0.47	930
22	Bloque de arcilla - Ladrillo pandereta	900	0.44	---
23	Bloque de arcilla - Ladrillo hueco de techo	600	0.35	---
24	Bloque de arcilla - Ladrillo pastelero	1450	0.71	---
25	Bloque de concreto - Unidad hueca	1200	0.50	1000
26	Adobe	1100 - 1800	0.90	---

N°	Material	Densidad ρ (kg / m ³)	Conductividad térmica k (W / m K)	Calor Específico c (J / kg °C)
	MORTEROS Y ENLUCIDOS			
27	Mortero cemento-arena	2000	1.40	1000
28	Mortero cemento y cal o yeso	1850	0.87	1000
29	Enlucido de yeso	≤ 1000	0.40	1000
	METALES			
30	Acero	7800	50.00	450
31	Acero inoxidable	7913	15.60	456
32	Aluminio	2700	230.00	880
33	Bronce	8700	65.00	380
34	Cobre	8900	380.00	380
35	Estaño	7310	66.60	227
36	Latón	8400	120.00	380
37	Plomo	11300	35.00	130
38	Zinc	7200	110.00	380
39	Calamina metálica de 2 mm.	---	237.00	---
	MADERAS			
40	Maderas livianas: Álamo, Avellano, Aliso, Zapote, Bolaina blanca, Tornillo, Casho Moena, Diablo Fuerte, Huimba, Maquisapa Ñagcha, Marupa, Panguana, Ucsaquiuro Blanco	200 - 565	0.130 - 0.150	1600
41	Maderas de densidad media: Abedul, Canelo, Castaño, Laurel, Roble, Olmo, Caoba, Lagarto, Copaiba, Chemicua, Huayruro, Manchinga, Fresno, Nogal, Cerezo, Palosangre Amarillo, Palosangre Negro, Pumaquiuro	565 - 750	0.180	1600
42	Maderas densas: Capirona, Estoraque	750 - 870	0.230	1600
43	Maderas muy densas: Algarrobo, Eucalipto, Shihuahuaco	≥ 870	0.290	1600
44	Coníferas livianas: Cedro	≤ 435	0.130	1600
45	Coníferas de densidad media: Pino insigne	435 - 520	0.150	1600
46	Coníferas densas: Pino Oregón, Ciprés, Alerce	520 - 610	0.180	1600
47	Coníferas muy densas	≥ 610	0.230	1600
48	Balsa	≤ 200	0.057	1600
49	Tablero de fibras, incluyendo MDF (alta densidad)	750 - 1000	0.200	1700
50	Tablero de fibras, incluyendo MDF y MDP (media densidad)	550 - 750	0.180	1700
51	Tablero de fibras, incluyendo MDF y Trupan (baja densidad)	350 - 550	0.140	1700
52	Tablero de partículas: Melamina	640 - 820	0.180	1700
53	Tablero de partículas	450 - 640	0.150	1700
54	Tablero de partículas	270 - 450	0.130	1700
55	Tablero de virutas, tipo OSB	≤ 650	0.130	1700
56	Triplay	560	0.140	1400
57	Puerta de madera		0.120	
58	Madera machihembrada (Tornillo)		0.120	

N°	Material	Densidad ρ (kg / m ³)	Conductividad térmica k (W / m K)	Calor Específico c (J / kg °C)
	MADERAS PERUANAS			
59	Cachimbo	664	0.180	---
60	Ishpingo	625	0.148	---
61	Catahua amarilla	365	0.087	1464
62	Quinilla colorada	990	0.188	1548
	PANELES COMUNES			
63	Panel fibrocemento	920 - 1135	0.220 - 0.230	1512
64	Panel de yeso	750 - 900	0.250	1000
65	Panel de fibra de vidrio	25	0.035	1000
66	Panel de corcho	120	0.039	1800
67	Panel de lana mineral ⁽¹⁾	80 - 120	0.036	---
68	Panel metálico aislante 50 mm (muros) ⁽¹⁾	181	0.400	---
69	Panel metálico aislante 60 mm (muros)	158	0.330	---
70	Panel metálico aislante 80 mm (muros)	128	0.250	---
71	Panel metálico aislante 100 mm (muros)	111	0.200	---
72	Panel metálico aislante 120 mm (muros)	99	0.170	---
73	Panel metálico aislante 150 mm (muros)	87	0.130	---
74	Panel metálico aislante 20 mm (techos autoportantes)	265	1.000	---
75	Panel metálico aislante 25 mm (techos autoportantes)	330	0.800	---
76	Panel metálico aislante 35 mm (techos autoportantes)	247	0.570	---
77	Panel metálico aislante 45 mm (techos autoportantes)	200	0.440	---
	REVESTIMIENTOS HOMOGENEOS			
78	Alfombra de materiales sintéticos	160	0.060	2500
79	Baldosa cerámica	2000	1.000	800
80	Teja de arcilla	2000	1.000	800
81	Teja cerámica-porcelana	2300	1.300	840
	MATERIALES VARIOS			
82	Agua	1000	0.580	4186
83	Hielo	922	2.030	1945
84	Nieve	150 - 500	0.120 - 0.470	---
85	Papel	930	0.180	1340
86	Acrílico	1050	0.200	1500
87	Asfalto	2100	0.700	1000
88	Caucho natural	910	0.130	1100
89	Linóleo	1200	0.170	1400
90	Membrana asfáltica	1127	0.170	---
91	Neopreno	1240	0.230	2140
92	Polycarbonato (PC)	1200	0.200	1200
93	Polipropileno (PP)	910	0.220	1800

N°	Material	Densidad ρ (kg / m ³)	Conductividad térmica k (W / m K)	Calor Específico C_p (J / kg °C)
94	Cloruro de polivinilo (PVC)	1390	0.170	900
95	Polietileno de alta densidad (HDPE)	980	0.500	1800
96	Polietileno de alta densidad (LDPE)	920	0.330	2200
97	Resina epóxica	1200	0.200	1400
98	Silicona	1200	0.350	1000
99	Techo verde (14 cm espesor)	---	0.174	---
100	Paja (cama de 2 cm.)	---	0.090	---
101	Tela yute	1500	0.060	---
	MATERIALES AISLANTES			
102	Aire	1.2	0.026	1000
103	Corcho	100 - 150	0.049	1560
104	Fibra de vidrio	200	0.040	670
105	Fieltro	120	0.050	1300
106	Lana de vidrio (baja densidad)	11 - 14	0.043	---
107	Lana de vidrio (media densidad)	19 - 30	0.037	---
108	Lana de vidrio (alta densidad)	46 - 100	0.033	---
109	Lana de vidrio con foil ⁽¹⁾	---	0.035	---
110	Lana mineral (baja densidad)	30 - 50	0.042	---
111	Lana mineral (media densidad)	51 - 70	0.040	---
112	Lana mineral (alta densidad)	71 - 150	0.038	---
113	Lana mineral ⁽¹⁾	---	0.037	---
114	Poliestireno expandido (EPS)	30	0.033	1700
115	Poliestireno extruido (XPS)	55 - 60	0.035	---
116	Espuma elastomérica flexible	60 - 80	0.050	1500
117	Espuma de polietileno con aluminio 5 mm	---	0.045	---
118	Espuma de polietileno con aluminio 10mm	---	0.035	---
	VIDRIOS			
	Vidrio crudo			
119	Incoloro de 6 mm	---	5.700	---
120	Incoloro de 8 mm	---	5.600	---
121	Incoloro de 10 mm	---	5.600	---
	Vidrio Laminado			
122	Incoloros (1) 4 + 4	---	5.600	---
123	Incoloros 6 + 6	---	5.400	---
124	Incoloros 8 + 8	---	5.300	---
	Vidrio Insulado			
125	Incoloros (4) 4-6-(4.....10)	---	3.300	---
126	Incoloros (4) 4-9-(4.....10)	---	3.000	---
127	Incoloros (4) 4-12-(4.....10)	---	2.800	---

N°	Material	Densidad ρ (kg / m ³)	Transmitancia térmica U (W/m ² K)	Calor Específico c (J / kg °C)
	Otros tipos de vidrio			
128	Cuarzo	2200	1.400	750
129	Vidrio prensado	2000	1.200	750
130	Venta de vidrio doble incoloro de 3mm.	---	3.759	---
	POLICARBONATOS (1)			
131	Alveolar Estándar de 4 mm	---	3.900	---
132	Alveolar Estándar de 6 mm	---	3.600	---
133	Alveolar Estándar de 8 mm	---	3.300	---
134	Alveolar Estándar de 10 mm	---	3.000	---
135	Alveolar Estándar de 16 mm	---	2.300	---
136	Control Térmico, tipo Polygal Polyshade de 6 mm	---	3.600	---
137	Control Térmico, tipo Polygal Polyshade de 8 mm	---	3.300	---
138	Control Térmico, tipo Polygal Polyshade de 10 mm	---	3.000	---
139	Control Térmico, tipo Polygal Thermogal de 25 mm	---	1.700	---
140	Control Térmico, tipo Polygal Thermogal de 32 mm	---	1.400	---
141	Control Térmico, tipo Polygal Thermogal de 40 mm	---	1.100	---
142	Control Térmico - Lumínico, tipo Polygal Selectogal de 10 mm	---	2.500	---
143	Control Térmico - Lumínico, tipo Polygal Selectogal de 16 mm	---	2.200	---
144	Decorativos, tipo Polygal Rainbow de 8 mm	---	3.300	---

ANEXO 2. Tablas de Mahoney

Las Tablas de Mahoney permiten evaluar y, por tanto, recomendar de acuerdo a las condiciones cambiantes mensuales del clima de zona de estudio. Para efectos prácticos, las tablas de Mahoney 3 y 4 han sido sintetizadas en una sola tabla de estrategias constructivas (Pawar, Mukherjee y Shankar, 2015).

En la tabla de Mahoney 1, primera parte, se registra la data climática mensual de temperatura.

Tabla 35. Tabla de Mahoney 1, primera parte (Evans, 2001).

Información del lugar												
Ubicación												
Longitud												
Latitud												
Altitud												
Temperatura del aire (°C)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Máx. media mensual												
Mínima media mensual												
Diferencia media mensual												
Valores anuales (°C)												
Temperatura máxima media anual												
Temperatura mínima media anual												
Temperatura media anual (TMA)												
Diferencia máxima anual (DMA)												

En la tabla de Mahoney 1, segunda parte, se registra la data climática mensual de humedad relativa, lluvia y viento.

Tabla 36. Tabla de Mahoney 1, segunda parte (Evans, 2001).

Humedad Relativa (%)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Máx. media mensual												
Mínima media mensual												
Valor medio mensual												
Grupo de Humedad												
Grupo de Humedad												
Grupo 1	Si la HR media está por debajo del 30%											
Grupo 2	Si la HR media está entre 30-50%											
Grupo 3	Si la HR media está entre 50-70%											
Grupo 4	Si la HR media está encima de 70%											
Lluvia												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Precipitación (mm)												
Total												
Viento												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Viento dominante												
Viento secundario												

La tabla de Mahoney 2 se divide en dos partes: la primera parte trata del diagnóstico adaptativo de los límites de confort de acuerdo a la temperatura y humedad. En las filas de sensación térmica diurna y nocturna se completa con el valor F para frío, B para confortable y C para calor, de acuerdo a la comparación del valor medio mínimo y máximo mensual para la noche y para el día respectivamente.

Tabla 37. Tabla de Mahoney 2, primera parte (Evans, 2001).

Límites de confort													
TMA		Mayor de 20°C		15°C – 20°C				Menor de 15°C					
		Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche						
Grupo de humedad	1	26 – 34	17 – 25	23 – 32	14 – 23	21 – 30	12 – 21						
	2	25 – 31	17 – 24	22 – 30	14 – 22	20 – 27	12 – 20						
	3	23 – 29	17 – 23	21 – 28	14 – 21	19 – 26	12 – 19						
	4	22 - 27	17 - 21	20 – 25	14 – 20	18 – 24	12 – 18						
Diagnóstico													
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Máx. media mensual													
Confort diurno superior													
Confort diurno inferior													
Mín. media mensual													
Confort nocturno sup.													
Confort nocturno inf.													
Sensación térmica diurna													
Sensación térmica nocturna													

En la tabla de Mahoney 2, segunda parte, se identifica los indicadores de estrategias de diseño, para climas húmedos y áridos, mes a mes.

Tabla 38. Tabla de Mahoney 2, segunda parte (Evans, 2001).

Condiciones de aplicabilidad																
Significado	Indicador	Estrés térmico		Agua de lluvia	Grupo de humedad	Diferencia media anual										
		Diurno	Nocturno				Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct
Movimiento de aire necesario	H1	C			4											
		C			2, 3											< 10°C
Movimiento de aire deseable	H2	O			4											
Resguardo de lluvia necesario	H3								> 200mm							
Inercia térmica necesaria	A1										1, 2, 3					> 10°C
Dormitorios exteriores deseables	A2		C								1, 2					
		C	O								1, 2					> 10°C
Protección contra el frío	A3	F														
Indicadores																
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total		
Húmedo	H1															
	H2															
	H3															
Seco	A1															
	A2															
	A3															

Finalmente, en la tabla de Mahoney 3 y 4 se comparan la cantidad de veces que se repiten estos indicadores mes a mes con los requisitos dados para obtener las recomendaciones de diseño.

Tabla 39. Tabla de Mahoney 3 y 4 modificadas, primera parte (Pawar, Mukherjee y Shankar, 2015).

Indicadores totales de la Tabla de Mahoney 2						Recomendaciones de estrategias de diseño		
H1	H2	H3	A1	A2	A3	N°	Descripción	
Distribución								
			0 – 10			1	Orientación norte-sur (eje longitudinal este-oeste)	
			11, 12		5 – 12			
			11, 12		0 – 4	2	Organización compacta con patios	
Espacios entre edificaciones								
11, 12						3	Espacios abiertos para penetración de brisas	
2 – 10						4	Como 3, pero con protección contra viento caliente y frío	
0, 1						5	Distribución compacta del edificio	
Movimiento de Aire								
3 – 12						6	Habitaciones en una sola fila, provisión permanente de aire	
1, 2			0 – 5					
1, 2			6 – 12			7	Habitación doble, provisión temporal del movimiento de aire	
0	2 – 12							
0	0, 1					8	No se necesita movimiento de aire	
Tamaño de las aberturas								
			0, 1		0	9	Aberturas grandes, 40-80% del área de muro	
			0, 1		1 – 12	10	Aberturas medianas, 25-40%	
			2 – 5					
			11, 12		4 – 12	11	Aberturas compuestas, 20-35%	
			6 – 10			12	Aberturas pequeñas, 15-25%	
			11, 12		0, 3	13	Aberturas muy pequeñas, 10-20%	

Tabla 40. Tabla de Mahoney 3 y 4 modificadas, segunda parte (Pawar, Mukherjee y Shankar, 2015).

Indicadores totales de la Tabla de Mahoney 2						Recomendaciones de Estrategias constructivas		
H1	H2	H3	A1	A2	A3		N°	Descripción
Posición de las aberturas								
3 – 12							14	Aberturas en paredes norte y sur, a la altura del cuerpo y a barlovento
1 – 2			0 – 5					
1 – 2			6 – 12				15	Como 14, y también con aberturas en muros interiores
0	2 – 12							
Protección de aberturas								
		0, 1			3 – 12		16	No se necesita protección especial
					0 – 2		17	Evitar soleamiento directo
		2 – 12			0 – 2		18	Protección de la lluvia y del soleamiento directo
		2 – 12					19	Protección de la lluvia
Muros y pisos								
			0 – 2				20	Muros ligeros, alta transmisión térmica
			3 – 12				21	Muros internos y externos pesados, baja transmisión térmica
Techo								
10 – 12			0 – 2				22	Techo ligero, superficie reflectiva, cámara de aire
10 – 12			3 – 12				23	Techo ligero, bien aislado
0 – 9			0 – 5					
0 – 9			6 – 12				24	Techo pesado, baja transmisión térmica
Dormir al aire libre								
				0			25	No se necesita espacio para dormir al aire libre
				1 – 12			26	Espacio para dormir al aire libre
Protección contra la lluvia								
		2 – 12					27	Protección contra lluvias fuertes
		0 – 1					28	No necesita protección de lluvias fuertes

ANEXO 3. Recomendaciones de diseño bioclimático del Ministerio de vivienda del Perú

La norma técnica EM.110 de Confort térmico y lumínico con eficiencia energética (MINVIV, 2014) establece zonas del territorio peruano de acuerdo a criterios bioclimáticos (figura 75 y tabla 42) para la construcción, indicando las características de cada zona y estableciendo parámetros de diseño para lograr el confort térmico y lumínico en cada zona definida.

La norma EM.110 (MINVIV, 2014) establece para cada zona bioclimática valores máximos de transmitancia térmica (tabla 41).

Esta clasificación y recomendaciones están basadas en el trabajo “Guía de Aplicación de Arquitectura Bioclimática en locales Educativos” (Rayter, 2008) del Ministerio de Educación del Perú.

Tabla 41. Valores máximos de transmitancia térmica de la envolvente de una vivienda según zona bioclimática (MINVIV, 2014).

Zona bioclimática	Transmitancia térmica máxima del muro (U_{muro})	Transmitancia térmica máxima del techo (U_{techo})	Transmitancia térmica máxima del piso (U_{piso})
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. Meso andino	2,36	2,21	2,63
5. Alto andino	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

Las recomendaciones generales de diseño y construcción propuestas por el Ministerio de vivienda del Perú para las nueve zonas bioclimáticas definidas se encuentran desde la tabla 43 hasta la tabla 51.

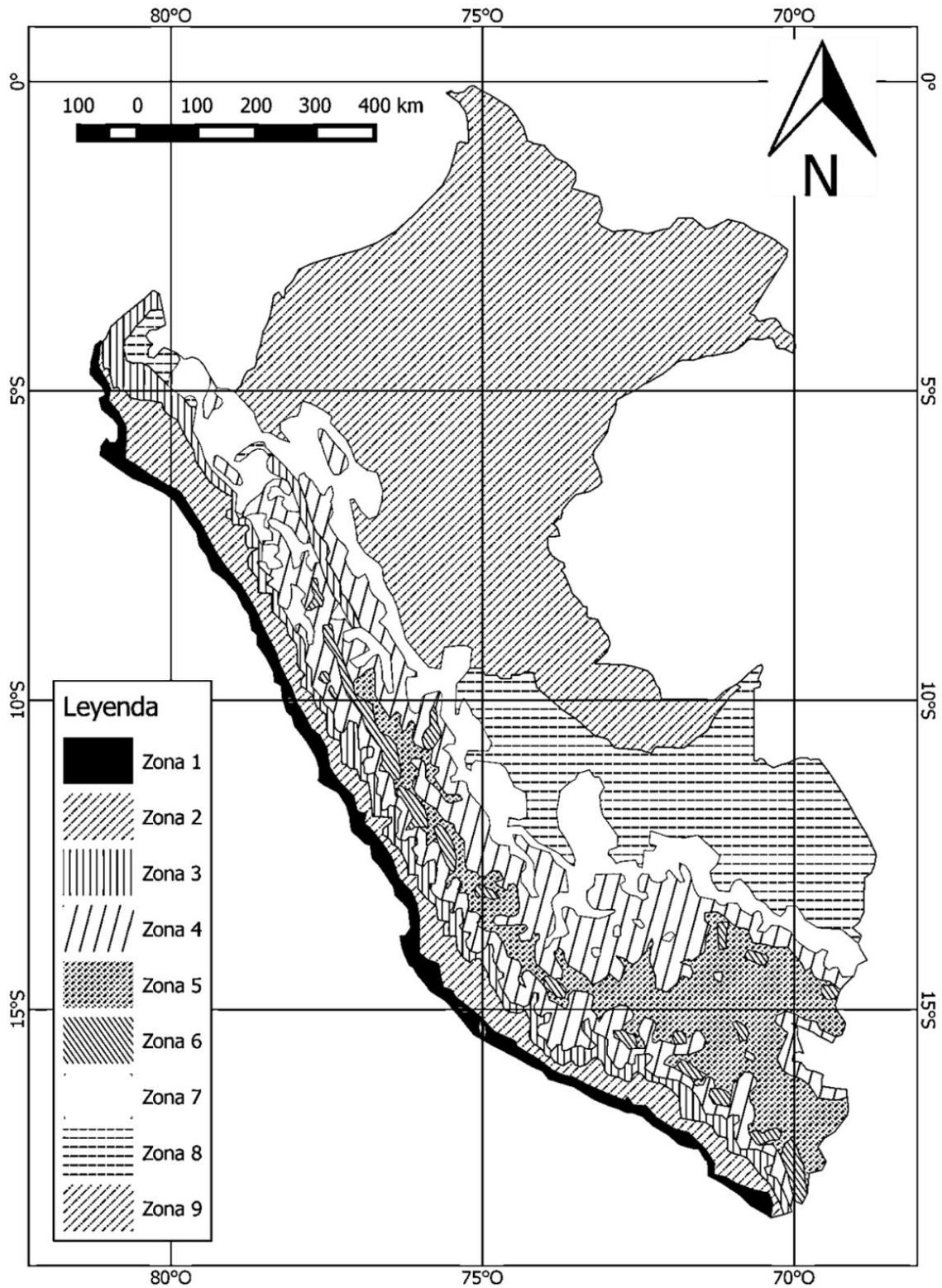


Figura 75. Mapa climático del Perú (Rayter, 2008). Cuadro elaborado por (Romero Verástergui, 2016).

Tabla 42. Características climáticas de las zonas bioclimáticas del Perú (Rayter, 2008).

Características climáticas		ZONAS BIOCLIMATICAS DEL PERU								
		1 Desértico Marino	2 Desértico	3 Interandino Bajo	4 Mesoandino	5 Alto Andino	6 Nevado	7 Ceja de Montaña	8 Subtropical Húmedo	9 Tropical Húmedo
1	Temperatura media anual	18 a 19°C	24°C	20°C	12°C	6°C	< 0°C	25 a 28°C	22°C	22 a 30°C
2	Humedad relativa media	> 70%	50 a 70%	30 a 50%	30 a 50%	30 a 50%	70 a 100%	70 a 100%	70 a 100%	70 a 100%
3	Velocidad de viento	Norte: 5-11 m/s Centro: 4-5 m/s Sur: 6-7 m/s	Norte: 5-11 m/s Centro: 4-5 m/s Sur: 6-7 m/s	Norte: 4 m/s Centro: 6 m/s Sur: 5-7 m/s	Norte: 10 m/s Centro: 7,5 m/s Sur: 4 m/s Sureste : 7 m/s	Centro: 6 m/s Sur: 7 m/s Sur Este: 9 m/s	Centro: 7 m/s Sur: 7 m/s	Norte: 4-6 m/s Centro: 4-5 m/s Sur: 6-7 m/s	Norte: 5-7 m/s Este: 5-7 m/s Centro: 5 m/s	Este: 5-6 m/s Centro: 5 m/s
4	Dirección predominante del viento	S - SO - SE	S - SO - SE	S	S - SO - SE	S - SO	S - SO	S - SO - SE	S - SO - SE	S - SO
5	Radiación solar	5 a 5,5 kWh/m ²	5 a 7 kWh/m ²	2 a 7,5 kWh/m ²	2 a 7,5 kWh/m ²	5 kWh/m ²	5 kWh/m ²	3 a 5 kWh/m ²	3 a 5 kWh/m ²	3 a 5 kWh/m ²
6	Horas de sol	Norte: 5 horas Centro: 4,5 horas Sur: 6 horas	Norte: 6 horas Centro: 5 horas Sur: 7 horas	Norte: 5-6 horas Centro: 7-8 horas Sur: 6 horas	Norte: 6 horas Centro: 8-10 horas Sur: 7-8 horas	Centro: 8 a 10 horas Sur: 8 a 10 horas	Centro: 8 a 10 horas Sur: 8 a 11 horas	Norte: 6-7 horas Centro: 8-11 horas Sur: 6 horas	Norte: 4-5 horas Sur-Este: 4-5 horas	Norte: 4-5 horas Este: 4-5 horas
7	Precipitación anual	< 150 mm	< 150 a 500 mm	< 150 a 1,500 mm	150 a 2,500 mm	< 150 a 2,500 mm	250 a 750 mm	150 a 6000 mm	150 a 3000 mm	150 a 4000 mm
8	Altitud	0 a 2000 m s.n.m.	400 a 2000 m s.n.m.	2000 a 3000 m s.n.m.	3000 a 4000 m s.n.m.	4000 a 4800 m s.n.m.	> 4800 m s.n.m.	1000 a 3000 m s.n.m.	400 a 2000 m s.n.m.	80 a 1000 m s.n.m.
Equivalente en la clasificación Köppen		BSs-BW, BW	Bw	BSw	Dwb	ETH	EFH	Cw	Aw	Af

Tabla 43. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 1 (Rayter, 2008).

Zona bioclimática 1: Desértico marino		
1	Partido arquitectónico	Planta lineal y abierta. Evitar sistemas captadores de calor. Altura mínima del ambiente: 2,40 m.
2	Orientación	Orientación del eje del edificio preferentemente este-oeste. Espacios abiertos orientados preferentemente al norte o sur. Ventanas orientadas preferentemente al norte o sur.
3	Material de construcción	Masa térmica media y alta. Resistente a la salinidad. Con aislamiento térmico para el techo o cobertura.
4	Techos	Pendiente según material a utilizar. Sistema de control del drenaje del agua proveniente de las precipitaciones (por ejemplo, canaletas).
5	Pisos y muros	Considerar pisos antideslizantes para exteriores en caso de precipitaciones. Evitar calentamiento de paredes y losas circundantes por efecto de la radiación solar directa.
6	Vanos	Área de vanos / Área de piso: mayor a 25 % (iluminación). Área de aberturas / Área de piso: 7 – 10 % (ventilación).
7	Iluminación y parasoles	Uso de parasoles horizontales en vanos. Protecciones solares en patios.
8	Ventilación	Considerar dirección de vientos locales predominantes para su aprovechamiento.
9	Vegetación	Uso de vegetación para sombreados (pérgolas, ramadas, etc.). Áreas verdes para reducir absorción de energía calórica.

Tabla 44. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 2 (Rayter, 2008).

Zona bioclimática 2: Desértico		
1	Partido arquitectónico	Planta lineal y abierta. Altura mínima del ambiente: 2,40 m.
2	Orientación	Orientación del eje del edificio preferentemente este-oeste. Espacios abiertos orientados preferentemente al norte o sur, protegidos del sol. Ventanas orientadas preferentemente al norte y sur.
3	Material de construcción	Masa térmica media a alta. Con aislamiento térmico para el techo o cobertura.
4	Techos	Pendiente según material a utilizar. Sistema de control del drenaje del agua proveniente de las precipitaciones (por ejemplo, canaletas).
5	Pisos y muros	Considerar pisos antideslizantes para exteriores en caso de precipitaciones. Evitar calentamiento de paredes y pisos exteriores por efecto de la radiación solar directa. Crear zonas sombreadas.
6	Vanos	Área de vanos / Área de piso: mayor a 23 % (iluminación). Área de aberturas / Área de piso: 7 – 10 % (ventilación).
7	Iluminación y parasoles	Uso de parasoles horizontales en vanos.
8	Ventilación	Aprovechamiento del viento del valle. Ventilación cruzada. Considerar dirección de vientos locales predominantes para su aprovechamiento.
9	Vegetación	Uso para sombreados (pérgolas, ramadas, etc.). Uso para reducción de absorción de energía calórica.

Tabla 45. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 3 (Rayter, 2008).

Zona bioclimática 3: Interandino bajo		
1	Partido arquitectónico	Planta cerrada preferentemente con patio. Altura mínima del ambiente: 2,30 m.
2	Orientación	Orientación del eje del edificio preferentemente este-oeste. Vanos orientados preferentemente hacia el norte.
3	Material de construcción	Masa térmica media a alta.
4	Techos	Pendiente algo pronunciada según material a utilizar. Sistema de control del drenaje del agua proveniente de las precipitaciones (por ejemplo, canaletas). Aleros para protección de muros, zócalos y elementos exteriores frente a la humedad. Aprovechamiento de la radiación solar.
5	Pisos y muros	Considerar pisos antideslizantes para exteriores en caso de precipitaciones. Zócalo de protección de sobre cimientos ante humedad. Aprovechamiento de radiación solar en muros.
6	Vanos	Área de vanos / Área de piso: mayor a 18 % (iluminación). Área de aberturas / Área de piso: 7 – 10 % (ventilación).
7	Iluminación y parasoles	Uso de parasoles en vanos.
8	Ventilación	Protección frente al viento.
9	Vegetación	Áreas verdes para reducción de absorción de energía calórica.

Tabla 46. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 4 (Rayter, 2008).

Zona bioclimática 4: Mesoandino		
1	Partido arquitectónico	Planta cerrada preferentemente con patio. Altura mínima del ambiente: 2,30 m. Edificación compacta para aprovechamiento de radiación.
2	Orientación	Orientación del eje del edificio preferentemente norte-sur. Ventanas orientadas preferentemente al este y oeste.
3	Material de construcción	Masa térmica alta.
4	Techos	Pendiente pronunciada según material a utilizar. Sistema de control del drenaje del agua proveniente de las precipitaciones (por ejemplo, canaletas). Aprovechamiento de la radiación solar. Aleros para protección de muros, zócalos y elementos exteriores frente a la humedad.
5	Pisos y muros	Considerar pisos antideslizantes para exteriores en caso de precipitaciones. Zócalo de protección de sobre cimientos ante humedad. Aprovechamiento de radiación solar en muros.
6	Vanos	Área de vanos / Área de piso: mayor a 16 % (iluminación). Área de aberturas / Área de piso: 5 – 7 % (ventilación). Aislamiento de los vanos para evitar infiltración y fugas.
7	Iluminación y parasoles	Uso de parasoles verticales.
8	Ventilación	Protección frente al viento.
9	Vegetación	Con árboles de hoja caduca ingresa radiación en invierno. Árboles de hoja frondosa protegen del viento.

Tabla 47. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 5 (Rayter, 2008).

Zona bioclimática 5: Alto andino		
1	Partido arquitectónico	Planta cerrada. Altura mínima del ambiente: 2,30 m. Edificación compacta.
2	Orientación	Orientación del eje del edificio preferentemente norte-sur. Ventanas orientadas preferentemente al este y oeste. Sistemas de captación solar (invernaderos, etc.) orientados al norte u oeste.
3	Material de construcción	Masa térmica alta.
4	Techos	Pendiente pronunciada según material a utilizar. Sistema de control del drenaje del agua proveniente de las precipitaciones (por ejemplo, canaletas). Aprovechamiento de la radiación solar. Aleros para protección de muros, zócalos y elementos exteriores frente a la humedad.
5	Pisos y muros	Considerar pisos antideslizantes para exteriores en caso de precipitaciones. Zócalo de protección de sobre cimientos ante humedad. Aprovechamiento de radiación solar en muros.
6	Vanos	Área de vanos / Área de piso: 15 % (iluminación). Área de aberturas / Área de piso: 5 – 7 % (ventilación). Aislamiento de los vanos para evitar infiltración y fugas.
7	Iluminación y parasoles	Uso de parasoles verticales.
8	Ventilación	Protección frente al viento.
9	Vegetación	Árboles de hoja caduca permite ingreso de radiación en invierno. Árboles de hoja frondosa para protección frente a vientos.

Tabla 48. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 6 (Rayter, 2008).

Zona bioclimática 6: Nevado		
1	Partido arquitectónico	Planta cerrada. Altura mínima del ambiente: 2,30 m. Edificación compacta.
2	Orientación	Orientación del eje del edificio preferentemente norte-sur. Ventanas orientadas preferentemente al este y oeste. Sistemas de captación solar (invernaderos, etc.) orientados al norte u oeste.
3	Material de construcción	Masa térmica alta.
4	Techos	Pendiente pronunciada según material a utilizar. Sistema de control del drenaje del agua proveniente de las precipitaciones (por ejemplo, canaletas). Aleros para protección de muros, zócalos y elementos exteriores frente a la humedad. Aprovechamiento de la radiación solar.
5	Pisos y muros	Considerar pisos antideslizantes para exteriores en caso de precipitaciones. Zócalo de protección de sobre cimientos ante humedad. Aprovechamiento de radiación solar en muros.
6	Vanos	Área de vanos / Área de piso: 15 % (iluminación). Área de aberturas / Área de piso: 5 % (ventilación).
7	Iluminación y parasoles	Uso de parasoles verticales.
8	Ventilación	Protección frente al viento.

Tabla 49. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 7 (Rayter, 2008).

Zona bioclimática 7: Ceja de montaña		
1	Partido arquitectónico	Planta abierta con patio. Altura mínima del ambiente: 2,40 m.
2	Orientación	Orientación este-oeste del eje del edificio. Ventanas orientadas preferentemente al norte o sur. Espacios orientados al norte y protegidos del sol.
3	Material de construcción	Masa térmica media. Aislamiento térmico en cobertura.
4	Techos	Pendiente pronunciada según material a utilizar. Sistema de control del drenaje del agua proveniente de las precipitaciones (por ejemplo, canaletas). Aleros para protección de muros, zócalos y elementos exteriores frente a la humedad y radiación solar.
5	Pisos y muros	Pisos antideslizantes exteriores por las precipitaciones. Zócalo de protección de sobre cimientos ante humedad. Evitar calentamiento de paredes y losas circundantes por efecto de la radiación solar directa.
6	Vanos	Área de vanos / Área de piso: 25 % (iluminación). Área de aberturas / Área de piso: 10 - 15 % (ventilación).
7	Iluminación y parasoles	Uso de parasoles horizontales en vanos.
8	Ventilación	Considerar dirección de vientos locales para su máximo aprovechamiento. Orientación que permita la ventilación cruzada. Tratar de generar el efecto Venturi.
9	Vegetación	Crear sombras y espacios verdes para impedir la radiación indirecta.

Tabla 50. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 8 (Rayter, 2008).

Zona bioclimática 8: Subtropical húmedo		
1	Partido arquitectónico	Planta lineal y abierta. Altura mínima del ambiente: 2,50 m. Planta elevada del suelo.
2	Orientación	Orientación este-oeste del eje del edificio. Ventanas orientadas preferentemente al norte y sur. Espacios orientados al norte y protegidos del sol.
3	Material de construcción	Masa térmica baja para muros. Aislamiento térmico en cobertura.
4	Techos	Pendiente pronunciada según material a utilizar. Sistema de control del drenaje del agua proveniente de las precipitaciones (por ejemplo, canaletas). Aleros para protección de muros, zócalos y elementos exteriores frente a la humedad y radiación solar.
5	Pisos y muros	Pisos antideslizantes exteriores en caso de precipitaciones. Zócalo de protección de sobre cimientos ante humedad. Evitar calentamiento de paredes y losas circundantes por efecto de la radiación solar directa.
6	Vanos	Área de vanos / Área de piso: mayor a 30 % (iluminación). Área de aberturas / Área de piso: mayor a 15 % (ventilación).
7	Iluminación y parasoles	Uso de parasoles en vanos.
8	Ventilación	Considerar dirección de vientos locales para su máximo aprovechamiento. Orientación que permita la ventilación cruzada. Generar el efecto Venturi.
9	Vegetación	Crear sombras y espacios verdes para impedir la radiación indirecta.

Tabla 51. Recomendaciones de diseño arquitectónico para edificaciones ubicadas en la zona bioclimática 9 (Rayter, 2008).

Zona bioclimática 9: Tropical húmedo		
1	Partido arquitectónico	Planta lineal y abierta. Altura mínima del ambiente: 2,50 m. Planta elevada del suelo.
2	Orientación	Orientación preferentemente este-oeste del eje del edificio. Ventanas orientadas preferentemente al norte y sur. Espacios orientados al norte y protegidos del sol.
3	Material de construcción	Masa térmica baja para muros. Aislamiento térmico en cobertura.
4	Techos	Pendiente pronunciada según material a utilizar. Sistema de control del drenaje del agua proveniente de las precipitaciones (por ejemplo, canaletas). Aleros para protección de muros, zócalos y elementos exteriores frente a la humedad y radiación solar.
5	Pisos y muros	Pisos exteriores antideslizantes. Zócalo de protección de sobre cimientos ante humedad. Evitar calentamiento de paredes y losas circundantes por efecto de la radiación solar directa.
6	Vanos	Área de vanos / Área de piso: mayor a 30 % (iluminación). Área de aberturas / Área de piso: mayor a 15 % (ventilación).
7	Iluminación y parasoles	Uso de parasoles en vanos.
8	Ventilación	Considerar dirección de vientos locales para su máximo aprovechamiento. Orientación que permita la ventilación cruzada. Generar el efecto Venturi.
9	Vegetación	Crear sombras y espacios verdes para impedir la radiación indirecta.

ANEXO 4. Recomendaciones de diseño arquitectónico para el Perú, Arquitecto Wieser

El arquitecto Martin Wieser hace un análisis climático de las principales ciudades del país, y tomando como referencia los métodos de Olgyay y Mahoney, propone una zonificación climática para el Perú solo para efectos de categorizar las recomendaciones generales de diseño (Wieser Rey, 2011).

Un estudio de este tipo es muy importante debido a que, como menciona Wieser, los métodos anteriormente descritos están hechos para otras realidades y climas. Es por tanto necesario más estudios locales y regionales de confort y análisis bioclimático.

La zonificación propuesta por Wieser esta descrita en la tabla 52 y en el gráfico 76.

Tabla 52. Clasificación climática del Perú para criterios de diseño arquitectónico (Wieser Rey, 2011).

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. o 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 seco todo el año, 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 Quechua.
6	Continental muy frío	Muy frío y seco todo el año. Amplitud térmica media y alta.	Serranía alta arriba de 3500 m.s.n.m. coincide con las regiones naturales 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 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.

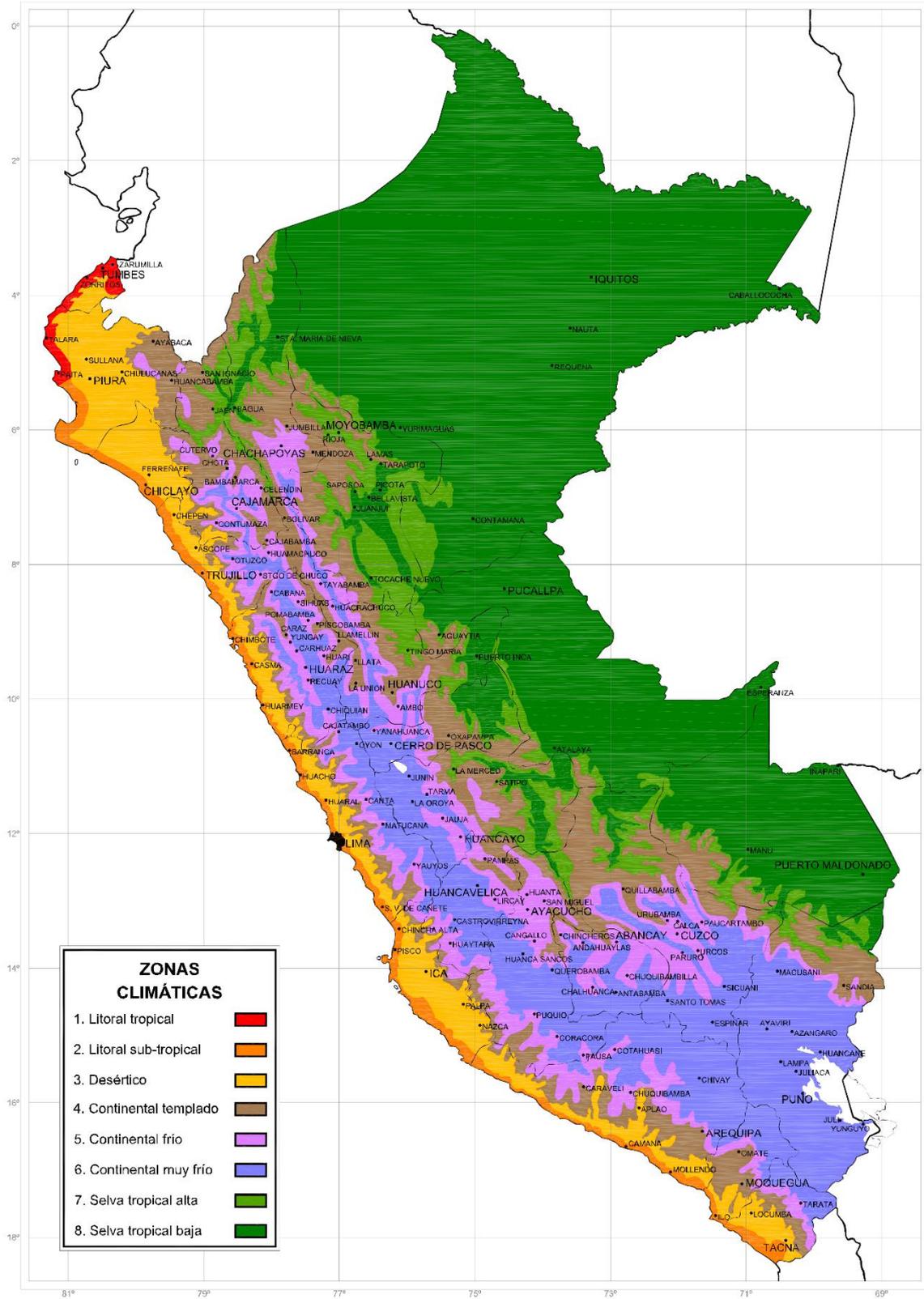


Figura 76. Mapa de clasificación climático del Perú para diseño arquitectónico (Wieser Rey, 2011).

Tabla 53. Estrategias pasivas de climatización de acuerdo a la zona climática (Wieser Rey, 2011).

		ZONAS CLIMÁTICAS							
ESTRATEGIAS		1	2	3	4	5	6	7	8
		Litoral Tropical	Litoral Subtropical	Desértico	Continental Templado	Continental Frío	Continental muy Frío	Selva Tropical Alta	Selva Tropical Baja
1	Captación Solar	-2	-2 / 1	-2	-1 / 1	1	2	-2	-2
2	Ganancias Internas	-1	-1 / 1	-1	1	2	2	-1	-2
3	Protección de vientos	-1	-1 / 1	1	1	2	2	-1	-2
4	Inercia térmica	-1	1	2	2	2	2	1	-2
5	Ventilación diurna	2	1 / -1	-1	-1	-1	-2	1	2
6	Ventilación nocturna	1	1 / -1	2	1	-1	-2	1	1
7	Refrigeración evaporativa	1	1 / 0	2	1	0	0	-1	-1
8	Control de radiación	2	2 / 1	2	1	1	1	2	2

Imprescindible	2
Recomendable	1
Indistinto	0
No recomendable	-1
Peligroso	-2

Nota:
En los casilleros que existan dos valores (x/y), las recomendaciones se dividen según la estación (verano/invierno).

ANEXO 5. Calificación de competencias del SDLAC 2015

Tabla 54. Distribución de puntos en las 10 competencias (SDLAC, 2015)

N°	Competencia	Puntos disponibles	N°	Sub competencia	Puntos disponibles	Tipo de calificación
1	Arquitectura	100	-	-	-	Jurado
2	Ingeniería y construcción	100	-	-	-	Jurado
3	Eficiencia energética	100	3.1	Correlación de generación y consumo	50	Monitoreo
			3.2	Límite del consumo de energía	50	Monitoreo
4	Balance energético eléctrico	100	4.1	Balance neto de energía cero	60	Medición + monitoreo
			4.2	Picos de consumo	40	Medición + monitoreo
5	Condiciones de confort	100	5.1	Temperatura	50	Medición + monitoreo
			5.2	Humedad relativa	20	Medición + monitoreo
			5.3	Iluminación natural	20	Monitoreo + tarea
			5.4	Entorno sonoro y rendimiento acústico	10	Monitoreo + tarea
6	Funcionamiento de la casa	100	6.1	Refrigeración	8	Medición + monitoreo
			6.2	Congelamiento	8	Medición + monitoreo
			6.3	Lavado y secado de ropa	12	Monitoreo + prueba
			6.4	Horno microondas	5	Tarea
			6.5	Licuadaora	5	Tarea
			6.6	Cocina	10	Tarea
			6.7	Equipos eléctricos domésticos	7	Tarea
			6.8	Actividad social	15	Evaluación de invitados
			6.9	Consumo de agua	2	Tarea
			6.10	Menor consumo de agua	10	Medición + monitoreo
			6.11	Agua caliente	18	Monitoreo + tarea
7	Comunicación, marketing y conciencia social	100	-	-	-	Jurado
8	Diseño urbano y asequibilidad	100	-	-	-	Jurado
9	Innovación	100	-	-	-	Jurado
10	Sostenibilidad	100	-	-	-	Jurado
TOTAL		1000	600 puntos obtenidos de jurado y 400 puntos de mediciones			

ANEXO 6. Pruebas de confort térmico y de humedad en el SDLAC 2015

A. Temperatura

El rango de temperaturas en la zona de confort para la competencia es medida de acuerdo a las ecuaciones 17, 18 y 19:

$$T_{min} = 0,255T_{ea} + 17,9 \quad (17)$$

$$T_{máx} = 0,255T_{ea} + 19,9 \quad (18)$$

Donde, T_{ea} es la temperatura exterior promedio, calculada como:

$$T_{ea} = \frac{(T_{ed-1} + 0,8T_{ed-2} + 0,6T_{ed-3} + 0,5T_{ed-4} + 0,4T_{ed-5} + 0,3T_{ed-6} + 0,2T_{ed-7})}{3,8} \quad (19)$$

Donde, T_{ed-i} es la temperatura diaria exterior promedio i días antes.

Los puntos se obtienen como se indica en la figura 77.

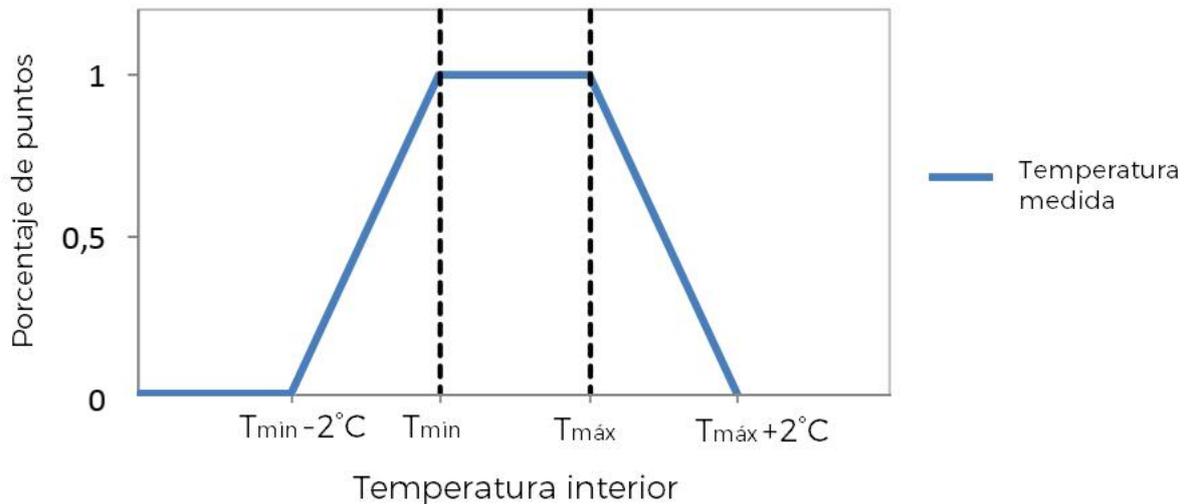


Figura 77. Función de puntaje para la prueba de Temperatura.

La cantidad de puntos totales de esta prueba es de 50. Esta cantidad se divide entre el número total de horas de medición de la prueba y se obtiene el valor de puntos disponible para cada hora. Usando la función de la figura 70 se obtiene los puntos ganados cada hora. Al finalizar el periodo de mediciones se suman todos los puntos obtenidos.

B. Humedad

Los puntos se obtienen de acuerdo a la figura 78.

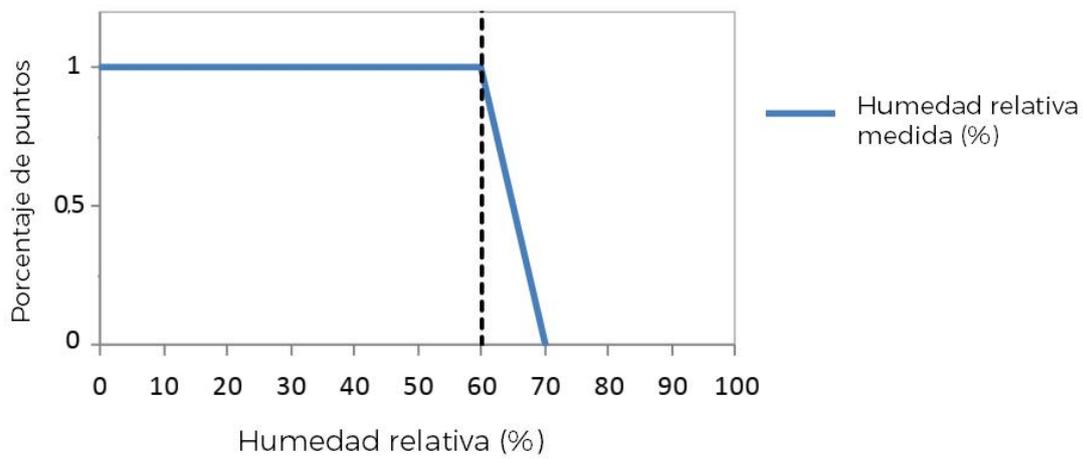


Figura 78. Función de puntaje para la prueba de Humedad.

La cantidad de puntos totales de esta prueba es de 20. Esta cantidad se divide entre el número total de horas de medición de la prueba y se obtiene el valor de puntos disponible para cada hora. Usando la función de la figura 78 se obtiene los puntos ganados cada hora. Al finalizar el periodo de mediciones se suman todos los puntos obtenidos.

ANEXO 7. Certificados y reconocimientos al Proyecto Ayni



Figura 79. Certificado de participación en el SDLAC Cali 2015.



Figura 80. Mención Honrosa al Proyecto Ayni en la categoría Innovación en Ingeniería en el Premio Graña y Montero 2016.



Figura 81. Mención Honrosa al Proyecto Ayni en la XVII Bienal Nacional de Arquitectura del Perú, Categoría Investigación, 2016