

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



TESIS

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL BIENESTAR TÉRMICO EN EL
ENTORNO DE UN POBLADO ALTOANDINO**

PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS CON
MENCIÓN EN ENERGÉTICA

ELABORADO POR:

JESSICA ROXANA MOLINA CASTILLO

ASESOR:

Dr. GILLES LEFEBVRE

CO-ASESORA:

Dra. MÓNICA GÓMEZ

LIMA-PERÚ

2022

En memoria de mis padres, Martha y Antonio, que siempre iluminan mi camino.

A mis hermanos Mary, Marino, Caro, Edy, Dely, Rubén, Pily y sobrina Lisset por el constante apoyo durante toda mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Gilles Lefebvre, quién con sus conocimientos y su experiencia fue mi guía para el desarrollo de la presente tesis. Permitiendo que mis conocimientos en la temática del bienestar térmico y transferencia de calor en viviendas se fortalezcan.

A la Dra. Mónica Gómez por su apoyo constante, sus comentarios constructivos y sus sugerencias que me permitieron tener una visión más clara de la tesis.

A Víctor, por el soporte y apoyo durante estos años, siempre estuvo a mí lado con su comprensión y buen humor. Gracias por todas esas horas compartidas con conversaciones tratando de comprender conceptos físicos aplicados en la tesis.

Al programa de Doctorado en Ciencias con Mención en Energética financiado por el CONCYTEC PROCENCIA por medio del Convenio N° 207-2015-FONDECYT, por otorgarme una beca de estudios dentro de la cual se realizó el presente trabajo.

Al CONCYTEC a través del contrato 04-2018-FONDECYT-BM-IADT-MU por el apoyo logístico y técnico brindado para el desarrollo de la tesis.

PREFACIO

El presente trabajo pertenece a un conjunto de investigaciones del bienestar térmico para zonas altoandinas que la Universidad Nacional de Ingeniería ha desarrollado hace más de 20 años. Producto de esto, se cuenta con varias publicaciones internacionales, así como tesis sustentadas que anteceden a esta investigación. Entre las principales tesis de Titulación Profesional se pueden señalar tres tesis en la especialidad de Ingeniería Física: Huaylla F. (2010)¹, Saavedra G. (2014)² y Molina J. O. (2018)³. Así mismo, se identificaron tres tesis en la Maestría en Ciencias con Mención en Energías Renovables y Eficiencia Energética, siendo los autores: Espinoza R. (2014)⁴, Molina J.R. (2016)⁵ y Molina J. O. (2018)⁶.

Todos los trabajos, antes mencionados, abordaron la temática del bienestar térmico altoandino, utilizando índices establecidos en base a las expectativas de bienestar de personas con el estilo de vida de los países desarrollados. Por consiguiente, dichos estudios no han considerado el bienestar térmico del poblador altoandino, lo que hace que este trabajo sea el primero en estudiarlo.

Parte del desarrollo de la presente tesis ha sido previamente publicado en los siguientes artículos científicos:

Molina, J. R., Nakama, V. L., & Lefebvre, G. (2020). A low-cost measurement device for recording perceptions of thermal comfort. *Journal of Physics: Conference Series*, 1433, 012006.

Molina, J. R., Lefebvre, G., Espinoza, R., Horn, M., & Gómez, M. (2021). Bioclimatic approach for rural dwellings in the cold, high Andean region: A case study of a Peruvian house. *Energy and Buildings*, 231, 110605.

¹ Evaluación experimental de cambios constructivos para lograr confort térmico en una vivienda altoandina del Perú.

² Construcción y evaluación térmica de un módulo de vivienda rural en la localidad de Vilcallamas Arriba, distrito de Pisacoma, provincia de Chucuito, región Puno.

³ Uso del programa EnergyPlus para la simulación del consumo energético de un módulo bioclimático ubicado en Imata, Arequipa a 4519 msnm.

⁴ Evaluación experimental de la performance de dos componentes bioclimáticas de calentamiento aplicadas en un módulo de vivienda de San Francisco de Raymina - Ayacucho con el propósito de validarlas como técnicas de estrategias bioclimáticas para viviendas rurales Alto Andinas.

⁵ Desarrollo de un procedimiento de evaluación integral de una vivienda rural alto andina para su calificación como vivienda bioclimática caso de la vivienda modificada y la vivienda nueva de San Francisco de Raymina de Ayacucho.

⁶ Evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda alto andina para lograr el confort térmico con energía solar

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
RESUMEN	xv
SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES.....	xvi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Justificación.....	3
1.3. Objetivo	4
1.3.1. General	4
1.3.2. Específico.....	4
1.4. Hipótesis	5
1.5. Metodología	5
1.6. Estado del arte del bienestar térmico	6
1.6.1. Investigaciones de bienestar térmico en climas fríos	8
1.6.2. Bienestar térmico en lugares de gran altura	9
II. BIENESTAR TÉRMICO	12
2.1. Definiciones del bienestar térmico	12
2.1.1. El enfoque fisiológico.....	12
2.1.2. Enfoque psicológico	13
2.1.3. Enfoque racional	14
2.2. La sensación térmica	14
2.3. Parámetros que afectan el bienestar térmico	14
2.4. Evaluación del bienestar térmico	16
2.4.1. Índices bioclimáticos empíricos	16
2.4.2. Diagramas bioclimáticos.....	16
2.5. Bienestar térmico adaptativo	17
2.6. Estándares internacionales	19
2.7. Bienestar térmico del poblador altoandino.....	20
2.8. Adaptación del poblador altoandino.....	20
III. CENTRO POBLADO DE IMATA	23
3.1. Descripción general.....	23

3.2. El clima de Imata.....	25
3.2.1. Análisis climático	26
3.2.2. Comparación con otros climas	31
3.3. Conclusión del capítulo	33
IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL, METROLÓGICO Y ANÁLISIS DE DATOS	34
4.1. Dispositivo de registro de datos.....	34
4.1.1. Calibración de los dispositivos.....	38
4.1.2. Dispositivos entregados	39
4.2. Encuestas realizadas y proceso de evaluación	40
4.3. Análisis de datos obtenidos.....	42
4.3.1. Análisis del voto de sensación térmica VST	43
4.3.2. Análisis de la temperatura	44
4.3.3. Análisis de humedad	57
4.3.4. Análisis de actividad.....	63
4.3.5. Análisis de vestimenta.....	65
4.4. Conclusión del capítulo	69
V. PROPUESTA DE EVALUACIÓN DEL BIENESTAR TÉRMICO EN IMATA	70
5.1. Áreas propuestas de bienestar térmico	70
5.1.1. Caso 1: “datos totales”	71
5.1.2. Caso 2: “datos por tipo de actividad”	72
5.2. Comparación de las zonas propuestas con datos de temperatura y humedad	81
5.2.1. Comparación con parámetros exteriores	81
5.2.2. Comparación con parámetros interiores	84
5.3. Comparación con otras zonas de bienestar.....	89
5.4. Conclusión del capítulo	96
VI. ANÁLISIS ENERGÉTICO DE VIVIENDAS EN IMATA CON <i>m2m</i>	97
6.1. Módulos experimentales M1 y M2	97
6.2. Simulaciones térmicas iniciales	99
6.3. Simulación anual de temperatura	103
6.3.1. Temperatura interior de M1	103
6.3.2. Temperatura interior de M2	105
6.3.3. Comparación de temperaturas de M1 y M2	106
6.4. Energía requerida para lograr el bienestar térmico.....	109
6.5. Energía en las superficies de la envolvente.....	113

6.5.1. Análisis energético de M1.....	114
6.5.2. Análisis energético de M2.....	116
VII. CONCLUSIONES GENERALES.....	120
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
ANEXO I. BALANCE TÉRMICO DEL CUERPO HUMANO.....	135
ANEXO II. ÍNDICES Y DIAGRAMAS RELACIONADOS AL BIENESTAR TÉRMICO.....	142
ANEXO III. FICHAS TÉCNICAS DE SENSORES UTILIZADOS.....	148
ANEXO IV. MODELO DE ENCUESTA.....	151
ANEXO V. ANÁLISIS DE ÍNDICE PMV PARA IMATA.....	152
ANEXO VI. SIMULACIÓN TÉRMICA CON $m2m$.....	162
ANEXO VII. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA ENERGÍA EN LAS SUPERFICIES DE LA ENVOLVENTE DE M1 Y M2.....	164

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Modelos de bienestar térmico adaptativo representados para la variación de temperaturas exteriores (\bar{T}_e) entre 0 °C y 25°C.....	19
Figura 2.	(a) Fotografía de la plaza de Imata y (b) ubicación en el mapa del Perú: latitud 15,8391° S, longitud 71,0906° O y altitud 4500 msnm.....	23
Figura 3.	Principales construcciones en Imata: albergue (A), iglesia (I), I.E. de nivel inicial (J), I.E. de nivel primario y nivel secundario (E), puesto de salud (S), puesto policial (P), la municipalidad (M), canchas deportivas (D) y “Plataforma de Servicios Tambos” (T).	24
Figura 4.	Vivienda típica en Imata (a) puerta de calamina y ventanas de vidrio con marco metálico, (b) techos de calamina [109].....	25
Figura 5.	(a) Temperaturas y (b) humedades relativas mensuales: máximas, medias y mínimas de Imata para el año 2019.....	27
Figura 6.	Estación de SENAMHI [116]: Registro histórico de las temperaturas máximas y mínimas diarias en Imata, desde el año 1962 hasta el año 2019.	27
Figura 7.	Precipitación mensual en Imata durante el 2019.	28
Figura 8.	Estación de SENAMHI [116]: registro histórico de la precipitación diaria en Imata.	28
Figura 9.	Radiación solar que incide sobre el plano horizontal para Imata, año 2019.	29
Figura 10.	Gráfico solar cilíndrico para Imata, elaborado a partir del cálculo del azimut y altura solar para la latitud de 15,8391° S.	29
Figura 11.	Rosa de viento mensual para Imata, año 2019.	30
Figura 12.	Frecuencia de la velocidad del viento en Imata, año 2019. Velocidad media igual a 3,6 m/s.....	31
Figura 13.	Clasificación climática del Perú según Köppen-Geiger [117].....	32
Figura 14.	Temperaturas mensuales para (a) Imata, (b) Lima y (c) París.....	32
Figura 15.	Algoritmo de funcionamiento del dispositivo TSVR [118].....	35
Figura 16.	Diseño de las dos placas del dispositivo TSVR, realizado en KiCad.	36
Figura 17.	(a) Ilustración de la disposición de botones y sensores; y (b) fotografía del dispositivo TSVR desarrollado para la investigación.	37
Figura 18.	Fotografía de los dispositivos Delta Ohm HD 32.3 y TSVR al interior de una vivienda de Imata.....	38
Figura 19.	Curva de calibración de D1: (a) temperatura de TSVR (T_{TSVR}) y temperatura del dispositivo Delta Ohm (T_{DO}) y (b) humedad relativa de TSVR (HR_{TSVR}) y la humedad relativa del sensor de referencia Delta Ohm (HR_{DO}).....	39
Figura 20.	Entrega de dispositivos TSVR a dos usuarios.	40
Figura 21.	Instrumento Delta Ohm HD 32.3 para la medición de parámetros como la temperatura, la humedad relativa y la velocidad de viento en Imata.	41

Figura 22. Encuestas realizadas en el centro educativo de Imata: (a) aula de 3° de secundaria, (b) aula del 4° de primaria y (c) aula de 1° de secundaria.	41
Figura 23. Número de mujeres y hombres encuestados en Imata.....	42
Figura 24. Votos de sensación térmica según el ambiente evaluado.	44
Figura 25. La temperatura interior (T_i) y el VST de los encuestados en Imata. El radio de los círculos está en proporción del número de datos obtenidos para cada punto T_i y VST.	45
Figura 26. Caso 1: “datos totales”: valores medios de temperatura para cada VST (MF, F, N, C, MC) y sus relaciones lineales (líneas de colores). $T_n = 12,39$ °C; $T_{min,ZE} = 6,52$ °C; $T_{max,ZE} = 18,26$ °C; $T_{min,ZR} = 9,45$ °C y $T_{max,ZR} = 15,32$ °C para VST = N.....	46
Figura 27. Actividad pasiva: (a) VST y T_i ; (b) cálculo de $T_n = 14,52$ °C y rangos de la ZE ($T_{min,ZE} = 11,86$ °C y $T_{max,ZE} = 17,17$ °C) y la ZR ($T_{min,ZR} = 13,19$ °C y $T_{max,ZR} = 15,84$ °C) a partir de las correlaciones lineales de temperatura media T_i (•), mínimo extenso (•), mínimo (•), máximo (•) y máximo extenso (•) para VST=N.	48
Figura 28. Actividad moderada: (a) VST y T_i ; (b) cálculo de $T_n = 13,74$ °C y rangos de la ZE ($T_{min,ZE} = 10,44$ °C y $T_{max,ZE} = 17,03$ °C) y ZR ($T_{min,ZR} = 12,09$ °C y $T_{max,ZR} = 15,38$ °C) a partir de las correlaciones lineales de temperaturas medias T_i (•), mínimo extenso (•), mínimo (•), máximo (•) y máximo extenso (•) para VST=N.	49
Figura 29. Datos para la actividad elevada. VST de los pobladores y T_i	49
Figura 30. Información recopilada en Imata: (a) temperatura exterior (T_e) y VST registradas en forma simultánea; (b) temperatura exterior promedio mensual (\bar{T}_e) y VST.....	50
Figura 31. Relación entre \bar{T}_e y T_n (línea magenta) obtenida para valores de VST = N (○). Diferencia del rango de temperatura de la ZE es 10,88 °C y de la ZR es 5,44 °C estimados con $\sigma = 2,72$ °C.	51
Figura 32. Relación entre T_e y T_n (línea magenta) obtenida para valores de VST = N (○), y La amplitud de la ZE es 10,88 °C y de la ZR es 5,44 °C estimados con $\sigma = 2,72$ °C.	52
Figura 33. Datos registrados para la actividad pasiva. Correlación lineal entre: (a) \bar{T}_e y T_i ; y (b) T_e y T_i para VST = N (se considera $T_i = T_n$). El valor de σ es 1,44 °C y la diferencia entre los límites máximo y mínimo de la ZR es 2,88 °C y de la ZE es 5,76 °C.	53
Figura 34. Datos registrados para la actividad moderada. Correlación lineal entre: (a) \bar{T}_e y T_i ; y (b) T_e y T_i para VST = N (se considera $T_i = T_n$). El valor de σ es 1,84 °C y la diferencia entre los límites máximo y mínimo de la ZR es 3,68 °C y de la ZE es 7,36 °C.	54
Figura 35. Comparación entre modelos de T_n . Propuestas: (a) “datos totales”, “actividad pasiva”, “actividad moderada” y otros autores, (b) determinadas para Imata, (c) “datos totales”, “actividad moderada” y Humphreys, (d) “datos totales”, “actividad moderada” y Griffiths, (e) Auliciems, Nicol y Roaf, y ASHRAE.	56

Figura 36. Humedad relativa interior (HR_i) y VST de los pobladores de Imata. El radio de los círculos está en proporción al número de datos obtenidos para cada punto HR_i y VST.	57
Figura 37. Caso 1: “datos totales”: valores medios de HR_i para cada VST (MF, F, N, C, MC) y sus correlaciones lineales (líneas de colores). $HR_n = 46,16 \%$; $HR_{min,ZE} = 15,93 \%$; $HR_{max,ZE} = 76,39 \%$; $HR_{min,ZR} = 31,05 \%$ y $HR_{max,ZR} = 61,28 \%$ para VST = N.	58
Figura 38. Relación de mezcla interior (w_i) y el VST de los encuestados. El radio de los círculos está en proporción al número de datos obtenidos para cada punto w_i y VST.	60
Figura 39. Caso 1: “datos totales”: valores medios de w_i para cada VST (MF, F, N, C, MC) y sus correlaciones lineales (líneas de colores), se calculó $w_n = 7,07$ g/kg, la diferencia entre los límites máximo y mínimo de la ZE = $7,47$ g/kg y de la ZR = $3,73$ g/kg para VST = N.	61
Figura 40. Humedad relativa exterior (HR_e) y el VST de los encuestados. El radio de los círculos está en proporción al número de datos obtenidos para cada punto HR_e y VST.	62
Figura 41. Correlación lineal entre los valores de w_i y w_e registrados en Imata para respuestas de VST = N.	62
Figura 42. Distribución del nivel de actividad (M) de los encuestados en Imata.	64
Figura 43. Nivel de vestimenta (M) y nivel de actividad (I_{cl}) de los encuestados en Imata, según el VST.	64
Figura 44. Distribución del nivel de vestimenta (I_{cl}) de encuestados en Imata.	65
Figura 45. Nivel de vestimenta (I_{cl}) respecto a la temperatura interior (T_i) y el VST (MF, F, N, C y MC) de los encuestados en Imata.	66
Figura 46. Nivel de vestimenta (I_{cl}) respecto a la temperatura exterior (T_e) y el VST (MF, F, N, C y MC) de los encuestados en Imata.	67
Figura 47. Nivel de vestimenta (I_{cl}) respecto a la temperatura exterior diaria (T_d) y el VST (MF, F, N, C y MC) de los encuestados en Imata.	68
Figura 48. Zonas de bienestar propuestas con datos recolectados con las encuestas y los dispositivos. (a) Zona 1 (línea verde) con los límites de la ZR y (b) zona 2 (línea azul) con los límites de la ZE.	71
Figura 49. Zonas de bienestar propuestas con datos de las encuestas y los dispositivos. (a) Zona 3 (línea roja): los límites de la temperatura (ZR) la humedad relativa (ZE), y (b) zona 4 (línea morada): los límites de la temperatura (ZR) la relación de mezcla (ZE).	72
Figura 50. Caso2a: actividad pasiva. Zonas de bienestar térmico propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para Imata, acompañadas de las respuestas de VST = N.	74
Figura 51. Caso2a: actividad pasiva. Zonas de bienestar térmico propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para Imata, acompañadas de las respuestas del VST: MF (círculos rojos), F (círculos azules), N (círculos negros), C (círculos verdes) y MC (círculos magenta).	75
Figura 52. Caso 2a: actividad pasiva. Análisis de las respuestas VST = MF, obtenidas dentro de las zonas propuestas y según el valor de I_{cl}	76

Figura 53. Caso 2a: actividad pasiva. Análisis de las respuestas VST = F, N y C, obtenidas dentro de las zonas propuestas y según el valor de I_{cl}	77
Figura 54. Caso 2a: actividad pasiva. Análisis de las respuestas VST = MC, obtenidas dentro de las zonas propuestas y según el valor de I_{cl}	78
Figura 55. Zonas de bienestar térmico propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para Imata en base a encuestas, acompañadas de las respuestas de VST = N. Caso: actividad moderada.	79
Figura 56. Caso: actividad moderada. Análisis de las respuestas VST = MF, obtenidas dentro de las zonas propuestas y según el valor de I_{cl}	79
Figura 57. Caso: actividad moderada. Análisis de las respuestas VST = F, N y C, obtenidas dentro de las zonas propuestas y según el valor de I_{cl}	80
Figura 58. Caso: actividad moderada. Análisis de las respuestas VST = MC, obtenidas dentro de las zonas propuestas y según el valor de I_{cl}	80
Figura 59. Zonas de bienestar propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para el caso 2a (“la actividad pasiva”) y datos horarios de T_e y HR_e (puntos grises) en Imata, año 2019.....	82
Figura 60. Zonas de bienestar propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para el caso 2a (actividad pasiva) y datos horarios de T_e y HR_e en Imata, para julio (puntos grises) y diciembre (puntos verdes).....	83
Figura 61. Zonas de bienestar propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para el caso 2b (actividad moderada) y datos horarios de T_e y HR_e (puntos grises) en Imata, año 2019.....	84
Figura 62. Zonas de bienestar propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para el caso 2a (actividad pasiva) y datos horarios de T_i y HR_i (•) de M1, del 13 de setiembre al 31 de octubre de 2019.	85
Figura 63. Zonas de bienestar propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para el caso 2b (actividad moderada) y datos horarios de T_i y HR_i (•) de M1, del 13 de setiembre al 31 de octubre de 2019.	86
Figura 64. Zonas de bienestar propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para el caso 2a (actividad pasiva) y datos horarios de T_i y HR_i (puntos celestes) de M2, del 13 de setiembre al 31 de octubre de 2019.....	87
Figura 65. Zonas de bienestar propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para el caso 2b (actividad moderada) y datos horarios de T_i y HR_i (•) de M2, del 13 de setiembre al 31 de octubre de 2019.	87
Figura 66. Desplazamiento de la zona de bienestar propuesta Z2 (línea azul) para la actividad moderada respecto a la variación de v y datos horarios de T_i y HR_i (•) de M2, del 13 de setiembre al 31 de octubre de 2019 entre 10:00 y 17:00.....	89
Figura 67. Comparación de la zona de confort de Givoni (región naranja) y las zonas del caso 2a (“la actividad pasiva”): Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada), acompañadas de datos horarios de T_e y HR_e (•) del año 2019 en Imata.....	90

Figura 68. Comparación de la zona de confort de Givoni (región naranja) y las zonas del caso 2a (“la actividad pasiva”): Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada), acompañadas de datos horarios de T_i y HR_i (•) de M1 (•) y M2 (•), del 13 de setiembre al 31 de octubre de 2019.....	91
Figura 69. Comparación de la zona de Givoni (calculada con $T_n = 17,8+0,31 T$, región amarilla) y las zonas del caso 2a (“la actividad pasiva”): Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada), acompañadas de datos horarios de T_e y HR_e (•) del año 2019 en Imata.	91
Figura 70. Comparación de la zona de Givoni (calculada con $T_n = 17,8+0,31 T$, región amarilla) y las zonas del caso 2a (“la actividad pasiva”): Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada), acompañadas de datos horarios de T_i y HR_i de M1 (•) y M2 (•), del 13 de setiembre al 31 de octubre de 2019.....	92
Figura 71. Comparación de la zona de confort del índice PMV ($-0,5 \leq PMV \leq 0,5$, para $T_r = T$; $v = 0,1$ m/s; $M = 1,0$ met; $I_{cl} = 1,0$ clo) y las zonas del caso 2a (“la actividad pasiva”): Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada), acompañadas de datos horarios de T_e y HR_e (•) del año 2019 en Imata.....	92
Figura 72. Zonas de bienestar propuestas para el caso 2a (actividad pasiva) y zonas de confort del índice PMV ($-0,5 \leq PMV \leq 0,5$) calculadas para $T_r = T$; $v = 0,05$ m/s y valores diferentes de M y I_{cl} : (a) $M = 1,2$ met; $I_{cl} = 1,28$ clo; (b) $M = 1,2$ met; $I_{cl} = 1,0$ clo; (c) $M = 1,2$ met; $I_{cl} = 2,0$ clo; y (d) $M = 1,0$ met; $I_{cl} = 2,0$ clo.	93
Figura 73. Zonas de bienestar propuestas para el caso 2b (actividad moderada) y zonas de confort según el PMV ($-0,5 \leq PMV \leq 0,5$) calculadas para $T_r = T$; $v = 0,05$ m/s y valores diferentes de M y I_{cl} : (a) $M = 1,5$ met; $I_{cl} = 1,29$ clo; (b) $M = 1,5$ met; $I_{cl} = 1,0$ clo; (c) $M = 1,8$ met; $I_{cl} = 1,2$ clo; y (d) $M = 1,6$ met; $I_{cl} = 1,5$ clo.	94
Figura 74. Zonas de bienestar propuestas (1, 2, 3 y 4) para el caso 2a (actividad pasiva), datos horarios de T_i y HR_i de M1 (•) y M2 (•) y zona de confort para el índice PMV ($-0,5 \leq PMV \leq 0,5$) calculado para $T_r = T$; $v = 0,05$ m/s; $M = 1,2$ met; $I_{cl} = 1,28$ clo.	95
Figura 75. Módulo 1 (M1) construido en Imata: (a) fotografía y (b) plano.	98
Figura 76. Módulo 2 (M2) construido en Imata: (a) fotografía y (b) plano.	98
Figura 77. Temperatura experimental y temperatura simulada con $m2m$ de M1, periodo mayo y junio 2019.....	102
Figura 78. Temperatura experimental y temperatura simulada de M2: (a) periodo 1 setiembre 2019 y (b) periodo 2 octubre 2019.....	102
Figura 79. Temperatura interior horaria de M1 (línea roja) y temperatura exterior de Imata (línea negra), promedio durante julio del 2019.	104
Figura 80. Temperatura horaria al interior de M2 (línea roja) y del ambiente exterior en Imata (línea negra), promedio durante julio de 2019.....	106
Figura 81. Horas con y sin bienestar térmico en M1, para la actividad moderada de 6:00 a 19:00 y la actividad pasiva durante el resto de horas del día. Considerando T_b igual a: (a) $T_{min,ZE}$, (b) $T_{min,ZR}$ y (c) T_n	108

Figura 82. Horas con y sin bienestar térmico en M2, para la actividad moderada de 6:00 a 19:00 y la actividad pasiva durante el resto de horas del día. Considerando T_b igual a: (a) $T_{min,ZE}$, (b) $T_{min,ZR}$ y (c) T_n .	109
Figura 83. Energía diaria requerida para asegurar el bienestar térmico en M1: promedio anual (línea negra), máxima anual (línea azul) y mínima anual (línea roja) para diferentes valores de T_b .	111
Figura 84. Energía diaria requerida para asegurar el bienestar térmico en M2: promedio anual (línea negra), máxima anual (línea azul) y mínima anual (línea roja) para diferentes valores de T_b .	112
Figura 85. Análisis energético diario de la envolvente de M1. (a) Ganancias de energía y (b) pérdidas de energía.	114
Figura 86. Balance de ganancias-perdidas y energía neta diaria de la envolvente de M1.	115
Figura 87. Energía diaria promedio en las superficies interiores de la envolvente de M1 para el año 2019. (a) Ganancias de energía y (b) pérdidas de energía.	116
Figura 88. Análisis energético diario de la envolvente M2. (a) Ganancias de energía y (b) pérdidas de energía.	117
Figura 89. Balance ganancias-perdidas y energía neta de la envolvente de M2.	118
Figura 90. Energía diaria promedio en la envolvente de M2 para el año 2019. (a) Ganancias de energía y (b) pérdidas de energía.	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Modelos de bienestar térmico adaptativo, según diversos autores.	19
Tabla 2.	Temperaturas y humedades relativas características en Imata para el año 2019.	27
Tabla 3.	Velocidad y dirección predominante del viento durante el año 2019.	31
Tabla 4.	Temperaturas características de 3 lugares.	33
Tabla 5.	Especificación de los componentes del dispositivo TSVR.	37
Tabla 6.	Resultado de la calibración de dispositivos TSVR.	39
Tabla 7.	Escalas utilizadas para el voto de sensación térmica (VST) y la preferencia térmica en el estudio.	40
Tabla 8.	Número de personas encuestadas por ambiente.	42
Tabla 9.	Número de personas encuestadas por género y edad.	42
Tabla 10.	VST de los pobladores según el ambiente evaluado y tipo de registro de datos.	43
Tabla 11.	Preferencia térmica indicada por los encuestados en el trabajo de campo.	44
Tabla 12.	Valores de T_i [°C] para el caso 1 (“datos totales”): media (T_i), mínimo extenso ($T_i - 2\sigma$), mínimo ($T_i - \sigma$), máximo ($T_i + \sigma$) y máximo extenso ($T_i + 2\sigma$) para cada VST.	45
Tabla 13.	Límites de T_i [°C] de ZR y ZE determinados para el caso 1 (“datos totales”) y considerando el género del encuestado.	47
Tabla 14.	Límites de T_i [°C] de ZR y ZE determinados para el caso 2 (“datos por tipo de actividad”).	50
Tabla 15.	Valores de HR_i [%] para el caso 1 (“datos totales”): media HR_i , mínimo extenso ($HR_i - 2\sigma$), mínimo ($HR_i - \sigma$), máximo ($HR_i + \sigma$) y máximo extenso ($HR_i + 2\sigma$) para cada VST.	58
Tabla 16.	Límites de HR_i [%] de ZR y ZE determinados para el caso 1 (“datos totales”) y considerando el género del encuestado.	59
Tabla 17.	Límites de HR_i [%] de ZR y ZE determinados para el caso 2 (“datos por tipo de actividad”).	60
Tabla 18.	Límites de w_i [g vapor/kg aire] de ZR y ZE determinados para el caso 1 (“datos totales”) según género del encuestado y caso 2 (“datos por tipo de actividad”).	61
Tabla 19.	Valores de M para diversas actividades durante las encuestas en Imata.	63
Tabla 20.	Caso 1 (“datos totales”): límites de bienestar de la temperatura (T), la humedad relativa (HR) y la relación de mezcla (w).	72
Tabla 21.	Caso 2 (“datos por tipo de actividad”): límites de bienestar de la temperatura (T), la humedad relativa (HR) y la relación de mezcla (w).	73
Tabla 22.	Número de respuestas dentro de las zonas de bienestar propuestas en Imata y según el VST, caso2a: actividad pasiva.	74

Tabla 23.	Número de respuestas dentro de las zonas de bienestar propuestas en Imata y según el VST, caso2b: actividad moderada.	78
Tabla 24.	Porcentaje de puntos T_i y HR_i de M1 y M2, dentro de las zonas propuestas (1, 2, 3 y 4) y otras regiones de la carta psicrométrica, del 13 de setiembre al 31 de octubre.	88
Tabla 25.	Propiedades térmicas de los materiales utilizados en M1 y M2.	100
Tabla 26.	Composición de los elementos de la envolvente y espesor de los materiales en M1 y M2.	100
Tabla 27.	Superficie de los elementos que componen el módulo M1.	101
Tabla 28.	Superficie de los elementos que componen el módulo M2.	101
Tabla 29.	Temperaturas interiores (T_i , en °C) horarias y mensuales de M1. Temperaturas: máximas (rojo) y mínimas (azul).	104
Tabla 30.	Temperaturas interiores (T_i , en °C) horarias y mensuales de M2. Temperaturas: máximas (rojo) y mínimas (azul)	105
Tabla 31.	Promedios mensuales de la temperatura interior de los módulos M1 y M2 y la temperatura exterior en Imata.	107
Tabla 32.	Número de horas con necesidad de calentamiento ($T_i < T_b$) para M1 y M2 con diferentes valores de T_b	107
Tabla 33.	Energía diaria [kWh] requerida por M1 y M2 para alcanzar T_b (casos actividad pasiva y actividad moderada).	111
Tabla 34.	Energía diaria [kWh] requerida en los módulos M1 y M2, con mejoras y sin mejoras.	113

RESUMEN

Esta investigación evalúa y analiza el bienestar térmico de los pobladores de Imata, un centro poblado altoandino ubicado a 4500 msnm al sur del Perú. Además, define los rangos de bienestar térmico aceptables para los pobladores. La importancia de este estudio radica en ser la primera en realizarse en una zona altoandina, además verifica si los estudios actuales de bienestar térmico, cuyos autores afirman que pueden ser aplicados en forma universal, subestimando la capacidad adaptativa de las personas.

La recolección de datos se realiza con un dispositivo de bajo costo desarrollado para esta investigación, el cual registra información del voto de sensación térmica VST (escala con cinco estados: muy frío, frío, neutro, caliente, muy caliente) y la vestimenta de los pobladores, la temperatura, la humedad relativa del ambiente interior, la fecha y la hora, además permite recolectar información de los pobladores en ausencia de la investigadora. También se registraron datos a través de encuestas presenciales.

Los rangos de bienestar son determinados a partir de la media y la desviación estándar de cada conjunto de valores del VST para todos los datos registrados y según el nivel de actividad (pasiva o moderada). Con estos resultados, se proponen cuatro zonas de bienestar térmico las cuales son graficadas sobre la carta psicrométrica, siendo la zona 2 la que contiene mayor data experimental al poseer un rango más amplio de temperatura. Además, las zonas propuestas son contrastadas con estudios realizados por otros autores.

Asimismo, dos módulos de vivienda (M1 y M2) construidos en Imata con estrategias de calentamiento solar pasivo son analizados en base a medidas experimentales de 39 días. La simulación de ambos módulos con el software *m2m* permite determinar las temperaturas interiores del año 2019 y los horarios de bienestar dentro de los módulos. Por último, son estimadas la energía necesaria para alcanzar el bienestar térmico con la norma ISO 13790 y el aporte energético de cada elemento de la envolvente de los módulos. Incluso utilizando estrategias de calentamiento solar pasivo se requiere calor, principalmente durante periodo de la noche.

SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

A	Área de una superficie, [m ²].
a	Parámetro que depende de la constante de tiempo (τ).
a_{M1}	Parámetro que depende de la constante de tiempo del módulo M1 (τ_{M1}).
a_{M2}	Parámetro que depende de la constante de tiempo del módulo M2 (τ_{M2}).
C	Voto de sensación térmica: calor
C	Capacidad térmica útil del edificio, [W/°C].
c	Calor específico de un material, [J/(kg·°C)].
+C	Preferencia térmica: más calor.
e	Espesor del material, [m].
F	Voto de sensación térmica: frío.
+F	Preferencia térmica: más frío.
GH	Grados-horas de calefacción necesarios para alcanzar una temperatura base.
γ	Ratio entre las ganancias brutas y las pérdidas de calor en un edificio.
H_{total}	Coeficiente de pérdidas totales de energía en una vivienda (incluye la transferencia por conducción, convección e infiltración de aire), [W/°C].
$H_{total-M1}$	Coeficiente de pérdidas totales de energía del módulo M1, [W/°C].
$H_{total-M2}$	Coeficiente de pérdidas totales de energía del módulo M2, [W/°C].
HR	Humedad relativa, [%].
\overline{HR}	Humedad relativa media anual, [%].
HR_{DO}	Humedad relativa dispositivo Delta Ohm, [%].
HR_e	Humedad relativa exterior, [%].
HR_i	Humedad relativa interior, [%].
$\overline{HR}_{máx}$	Humedad relativa media máxima, [%].
$\overline{HR}_{mín}$	Humedad relativa media mínima, [%].
HR_n	Humedad relativa neutra, [%].
HR_{TSVR}	Humedad relativa del dispositivo implementado TSVR.
I_{cl}	Nivel de aislamiento de la vestimenta, (1 clo = 0,155 m ² ·°C/W), [clo].
I.E.	Institución educativa.
M	Nivel de actividad (1 met = 58,2 W/m ²), [met].
M1	Módulo de vivienda 1.
M2	Módulo de vivienda 2.
MC	Voto de sensación térmica: mucho calor
MF	Voto de sensación térmica: mucho frío.
N	Voto de sensación térmica: neutro.
η	Factor de utilización de las ganancias.
PMV	Índice del voto medio previsto, de los términos en inglés predicted mean vote.
$Q_{calefacción}$	Energía necesaria de calefacción, [kWh].
$Q_{ganancias}$	Ganancias de calor por radiación solar y ganancias internas
\dot{Q}_{inf}	Pérdida de calor por infiltraciones en una vivienda, [W/°C].
ρ	Densidad, [kg/m ³].
SC	Preferencia térmica: sin cambios.
σ	Desviación estándar de una muestra.

τ	Constante de tiempo, [h].
τ_{M1}	Constante de tiempo del M1, [h].
τ_{M2}	Constante de tiempo del M2, [h].
T	Temperatura del aire, [°C].
\bar{T}	Temperatura media anual del ambiente exterior, [°C].
T_b	Temperatura base para alcanzar el bienestar, [°C].
T_{DO}	Temperatura del sensor Delta Ohm, [°C].
T_d	Temperatura exterior promedio diario, [°C].
T_e	Temperatura del aire exterior, [°C].
T_g	Temperatura del globo, [°C].
T_i	Temperatura interior, [°C].
\bar{T}_i	Temperatura interior media, [°C].
\bar{T}_e	Temperatura exterior media, [°C].
$\bar{T}_{m\acute{a}x}$	Temperatura media máxima, [°C].
$T_{max,Z}$	Temperatura máxima de la zona, [°C].
$T_{max,ZE}$	Temperatura máxima de la zona extensa, [°C].
$T_{max,ZR}$	Temperatura máxima de la zona reducida, [°C].
$\bar{T}_{m\acute{i}n}$	Temperatura media mínima, [°C].
$T_{min,Z}$	Temperatura mínima de la zona, [°C].
$T_{min,ZE}$	Temperatura mínima de la zona extensa, [°C].
$T_{min,ZR}$	Temperatura mínima de la zona reducida, [°C].
T_n	Temperatura neutra o de neutralidad, [°C].
T_r	La temperatura radiante media, [°C].
T_{TSVR}	Temperatura del dispositivo TSVR, [°C].
U	Coficiente global de transferencia de calor de una superficie, [W/(m ² ·°C)].
VST	Voto de sensación térmica.
v_a	Velocidad del aire, [m/s].
w	Relación de mezcla, [g vapor de agua/kg aire seco].
w_i	Relación de mezcla del ambiente interior, [g vapor de agua/kg aire seco].
w_e	Relación de mezcla del ambiente exterior, [g vapor de agua/kg aire seco].
w_n	Relación de mezcla de neutra, [g vapor de agua/kg aire seco].
WBGT	El ndice de estrés térmico, del inglés wet-bulb globe temperature.
ZE	Zona extensa de bienestar térmico.
ZR	Zona Reducida de bienestar térmico.
Z1	Zona propuesta 1
Z2	Zona propuesta 2
Z3	Zona propuesta 3
Z4	Zona propuesta 4

I. INTRODUCCIÓN

Las zonas altoandinas del Perú situadas a una altitud mayor a los 3000 metros sobre el nivel del mar (msnm), cada año padecen de las heladas meteorológicas (descenso de la temperatura del aire cercana al nivel del suelo hasta alcanzar 0 °C [1]). La temperatura del aire se reduce a un valor por debajo del punto de congelación del agua provocando que el vapor de agua presente en el aire se congele y se deposite sobre el suelo en forma de hielo. Las heladas meteorológicas se presentan principalmente de mayo a setiembre (temporada de heladas), con una mayor incidencia en junio y julio. Sin embargo, algunas localidades situadas sobre los 4000 msnm pueden sufrir heladas durante todo el año [2]. Según el CENEPRED [3], alrededor de 630 267 habitantes (con una priorización de riesgo muy alto) padecen los efectos de este fenómeno, los cuales se ubican en 210 distritos del Perú en las regiones de Arequipa, Ayacucho, Tacna, Cajamarca, Ancash y Apurímac, Cusco, Huancavelica, Huánuco, Junín, La Libertad, Moquegua, Pasco y Puno.

La población altoandina padece problemas de salud debido a las heladas, esto se ve reflejado con el aumento de enfermedades respiratorias de la población, así como las pérdidas de los animales y los cultivos. Los grupos más vulnerable a las enfermedades respiratorias son los niños menores de 5 años (69 355 niños) y los ancianos mayores a 60 años (48 401 adultos mayores) [3]. Por lo que, la población de las zonas altoandinas es altamente vulnerable principalmente por su condición social, por su edad y sobre todo por su ubicación territorial que dificulta la presencia del Estado [4].

Según Huaylla [5], las problemas de salud de la población y muertes en las zonas altoandinas son causadas básicamente por: la primera, una mala alimentación (principalmente niños), los pobladores por bajos ingresos económicos y desconocimiento, usualmente consumen alimentos poco nutritivos; y la segunda, con el correr de los años las técnicas constructivas de las viviendas altoandinas han cambiado, no aíslan térmicamente sus viviendas, utilizan materiales no apropiados en los techos y las puertas.

Frente a esta situación, diversas instituciones y grupos de investigación están realizando estudios e investigaciones destinados a mejorar el ambiente interior de las viviendas de las

zonas altoandinas. Una de las principales instituciones que hace más de 20 años viene realizando estudios del bienestar térmico altoandino es el Centro de Energías Renovables y Uso Racional de la Energía de la Universidad Nacional de Ingeniería (CER - UNI) [6]. También se pueden citar otras instituciones como el Grupo de apoyo al sector rural de la Pontificia Universidad Católica del Perú (Grupo - PUCP) [7], la ONG CARE [8], la Cooperación Alemana al Desarrollo (GIZ) [9], el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS) a través de la Dirección Nacional de Construcción (DNC) con el Programa de Apoyo al Hábitat Rural (PAHR) y el Programa Nacional de Vivienda Rural (PNVR) [10], el Fondo de Cooperación para el Desarrollo Social (FONCODES) [11] a través del programa Mi Abrigo, entre otros. Claramente lo señala Espinoza [12] cuando afirma que “si bien los resultados obtenidos por estos grupos son considerados buenos su alcance es reducido y se debe fortalecer sus resultados de modo tal que puedan ser calificados y proyectados”.

A pesar de estos estudios, es evidente la escasez de información real de las condiciones climáticas con las cuales interactúan los pobladores altoandinos; esto implica información acerca de las condiciones de bienestar térmico (definida como aquella condición en la que existe satisfacción respecto del ambiente térmico [13]) asociadas al poblador andino, el cual está sujeto a condiciones del clima frío y altitud durante casi toda su vida.

Dentro de este marco, el objetivo de esta investigación es proponer las bases teóricas para determinar el bienestar térmico incluyendo la variabilidad temporal de una zona altoandina, así como el mayor número de parámetros físicos (temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, campo radiativo) y parámetros personales (nivel de actividad, tipo de vestimenta, edad, expectativas sobre el nivel de bienestar, género, entre otros).

1.1. Planteamiento del problema

El MVCS ha financiado varias investigaciones con el objetivo de mitigar los efectos que las heladas tienen sobre las temperaturas al interior de las viviendas situadas en zonas con alta vulnerabilidad, a pesar de ello, aún no se conoce si las temperaturas interiores obtenidas se encuentran dentro de la zona de bienestar térmico (*“caracterizada por un rango de temperaturas y/o humedad relativa donde las personas no siente ni frío ni calor”* [14]). Las temperaturas interiores obtenidas se comparan con modelos existentes entre los que destacan los desarrollados por Givoni [14], Humphreys [15], Brager [16], Fanger [17], entre otros; los cuales fueron desarrollados para lugares de baja altitud (menor a 1000

msnm), para climas y poblaciones diferentes a las zonas altoandinas, por lo tanto estos modelos de bienestar térmico no necesariamente son aplicables a la realidad altoandina.

En este sentido, el bienestar térmico altoandino debe estar basado no sólo en parámetros como la temperatura y humedad relativa (dejando de momento la velocidad del aire y el campo radiativo), sino también en la parte subjetiva de la apreciación del bienestar térmico por parte de los habitantes de estas zonas. La sensación de bienestar térmico no es la misma para una persona que reside en una zona altoandina y otra persona que visita la localidad y reside en Lima, por la adaptabilidad al clima y la percepción del entorno socio-económico de la zona.

Para plantear el problema, primero se hacen las siguientes interrogantes

- ¿Cómo definir el bienestar térmico altoandino?
- ¿Cuáles son las variables que influyen en el bienestar térmico altoandino?
- ¿Cómo se podría evaluar el bienestar térmico del poblador altoandino?
- ¿Cuál sería un índice pertinente de evaluación del bienestar térmico en función de las variables objetivas y de la percepción subjetiva?
- ¿Son aplicables los estándares internacionales como referencia para estudios de bienestar térmico en viviendas de las zonas altoandinas?

El problema se define de la siguiente manera: Actualmente en el Perú, se viene construyendo miles de viviendas con supuestas características bioclimáticas para hacerlas más resistentes a los efectos de las heladas, sin tener en cuenta diferentes zonas geográficas y sin conocer el rango de temperatura bienestar térmico de la población, lo que produce insatisfacciones para los habitantes de viviendas cuyos ambientes interiores no proveen bienestar térmico.

1.2. Justificación

Las evaluaciones de las mejoras térmicas de las viviendas altoandinas deben ser contrastadas con modelos experimentales donde se conozcan los rangos de bienestar térmico, puedan ser testeados de una manera más práctica y estén desarrollados para los climas locales del Perú. Si bien existen algunos modelos, su limitación es que fueron desarrollados en otros países, para personas aclimatadas a esos lugares y, a menudo, trabajando en edificios climatizados; y con expectativas de bienestar típico de las personas con el estilo de vida de los países desarrollados y a bajas altitudes [18]. Por ello, los

estándares internacionales no deben aplicarse de la misma forma para todos los lugares ya que se presentan diferentes condiciones climáticas y factores socio-culturales.

Las zonas altoandinas son un caso muy particular, respecto a los lugares donde se realizaron los estudios adaptativos de bienestar térmico, ya sea por su latitud (dentro de la zona tropical), su altitud y la radiación solar que incide sobre estas áreas, también por la vestimenta, la alimentación o la calidad de vida de las personas; estas particularidades justifican una investigación. Sin duda, este estudio permite evaluar si todas las técnicas bioclimáticas que ya se vienen aplicando en estas zonas están logrando sus objetivos o deben ser replanteados.

Por último, el presente trabajo de investigación pretende desarrollar una herramienta de medición del bienestar adaptado a la realidad altoandina del Perú, haciendo que el trabajo a realizar tenga relevancia académica; ya que no existen estudios preliminares en el Perú que establezcan un método de cálculo y elaboración de criterios con los cuales se puedan establecer índices de bienestar térmico [21-23] para el poblador altoandino.

1.3. Objetivo

1.3.1. General

Analizar y estimar los rangos de bienestar térmico adaptado a una comunidad ubicada a 4500 msnm cuya aplicación en la construcción de viviendas garantice ambientes interiores con bienestar térmico.

1.3.2. Específico

- Establecer las variables cualitativas y cuantitativas que definen e influyen en el bienestar térmico altoandino.
- Implementar un dispositivo que permita el registro de los parámetros de temperatura, humedad relativa, sensación térmica y vestimenta.
- Proponer una zona de bienestar térmico para Imata en función de las variables registradas.
- Validar las zonas propuestas de bienestar térmico en viviendas existentes en Imata.
- Aplicar las zonas de bienestar térmico desarrollado e índices de otros autores a viviendas existentes, a través de modelamiento energético con *m2m* [22] determinando periodos de cumplimiento.

- Calcular la energía necesaria de las viviendas típicas para alcanzar el bienestar térmico.

1.4. Hipótesis

La aplicación del modelo de bienestar térmico propuesto en la presente tesis, permitiría diseñar edificaciones que brinden bienestar térmico en un centro poblado altoandino ubicado a 4500 msnm.

1.5. Metodología

El desarrollo del proyecto tuvo las siguientes etapas:

Etapa 1. Búsqueda de los parámetros que intervienen en la evaluación del bienestar térmico y elaboración de encuestas para ser realizadas a pobladores para conocer sus apreciaciones térmicas.

Etapa 2. Implementación de un dispositivo de medición de los parámetros climáticos y la sensación de bienestar térmico del poblador. Se utilizaron sensores de temperatura, humedad relativa y 5 botones para elegir las sensaciones térmicas de los pobladores (muy frío, frío, neutro, caluroso, muy caluroso); implementado con un sistema de adquisición de datos el cual fue utilizado durante el trabajo de campo. Así como 9 botones para el registro de la vestimenta del poblador.

Etapa 3. Levantamiento de información inicial de las características físicas de las viviendas y de los materiales de construcción utilizados en Imata. Además, se instaló una estación meteorológica para registrar los parámetros climáticos para el año 2019.

Etapa 4. Trabajo de campo, con viajes periódicos a Imata, para la recopilación de parámetros cualitativos y cuantitativos. Conocer el voto de sensación térmica y las preferencias térmicas de los pobladores a través de encuestas, registrándose los parámetros del ambiente térmico y los datos de la población encuestada. Información recolectada: género (masculino o femenino), edad, vestimenta, alimentación y parámetros meteorológicos (temperatura interior y exterior, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar). Se enfocó en el periodo de las heladas.

Etapa 5. Procesamiento, cálculo y análisis de datos. Análisis estadístico para determinar de qué manera se relacionan los parámetros recolectados y cuáles son los factores que representan de mejor manera el bienestar térmico del poblador altoandino. Parte de esta etapa se desarrolló durante una pasantía al Centro de Estudios e Investigación en Térmica, Medio Ambiente y Sistemas (CERTES) de la Universidad Paris-Est (UPEC).

Etapa 6. Validación de los resultados obtenidos en la etapa 5 en dos construcciones altoandinas (módulos de viviendas construidos en Imata).

Etapa 7. Simulación de dos construcciones existentes con el software *m2m*. El resultado del procesamiento de los parámetros se comparó con el índice de bienestar térmico altoandino desarrollado en este trabajo y con otros índices utilizados actualmente. Obteniéndose los periodos en los cuales se cumplen todos los índices analizados al interior de las viviendas.

Etapa 8. Cálculo energético necesario para garantizar el bienestar térmico de las personas al interior de las dos construcciones existentes.

1.6. Estado del arte del bienestar térmico

El análisis del bienestar térmico ha llevado al desarrollo de varios índices o modelos [21], que son presentados en la literatura en forma de ecuaciones o diagramas, las cuales intentan establecer como influyen los diferentes parámetros del clima sobre el equilibrio térmico de las personas.

Entre los primeros estudios se puede citar al realizado por Gagge (1908 - 1993) quien en su artículo "*The linearity criterion as applied to partitioned calorimetry*" [23] publicado en los años treinta, encontró una aplicación de los principios de la termodinámica al intercambio de energía entre el cuerpo humano y su entorno a través del procesamiento de los datos experimentales. Gagge propuso un "modelo de dos nodos", el cual establece que la suma de los intercambios térmicos debidos a la actividad metabólica, la energía del cuerpo, la evaporación, la radiación y la conducción, son igual a cero.

En 1963, el arquitecto húngaro V. Olgyay (1910 - 1970) [24] presentó su trabajo, muy importante en la arquitectura y la construcción, en su libro titulado "Diseño con clima" que constituye la piedra angular de la arquitectura llamada "bioclimática".

Continuando con el trabajo de Olgyay, el arquitecto israelí B. Givoni (1920 - 2019) formuló el Índice de Estrés Térmico (ITS, de los términos en inglés *Index of Thermal Stress*) dentro de su investigación "El efecto del clima sobre el hombre: desarrollo de un nuevo índice térmico" [25] y lo incluyó en su libro "Hombre, clima y arquitectura" en 1969 [14]. El índice expresa la cantidad de calor transferido desde el cuerpo humano a través de la transpiración para mantener una condición de bienestar. Cuando el índice es alto significa que el cuerpo proporciona más energía térmica de la que normalmente se requiere (bajo estrés) para mantenerse en condiciones de bienestar.

Durante los años setenta, el fisiólogo danés Fanger (1934 - 2006), después de una serie de experimentos, publicó el libro "Confort térmico: análisis y aplicaciones en ingeniería ambiental" [17] en 1970, que define los contenidos de una nueva disciplina: el estudio de la condición de bienestar en entornos interiores. Se basó en los votos de la sensación térmica de los individuos participantes en su estudio, Fanger elaboró una ecuación que relaciona los parámetros físicos y fisiológicos del entorno con los índices de sensación térmica. Fanger propuso un índice para la evaluación de las condiciones de no comodidad (o incomodidad) para un entorno, conocido como el Voto Medio Previsto (PMV, de los términos en inglés *Predicted Mean Vote*). Fanger realizó su estudio en una cámara climática, monitoreando y registrando la temperatura del aire, la humedad, la temperatura radiante media y la velocidad del aire con un sistema de aire acondicionado. Una vez dentro de la cámara climática, los individuos permanecían sentados mientras completaban un cuestionario dando un puntaje a las condiciones ambientales: muy frío, frío, ligeramente frío, neutro, ligeramente cálido, cálido y muy caliente. Fanger realizó su estudio con 128 estudiantes daneses (64 hombres y 64 mujeres) con una edad media de 23 años, y lo replicó con 128 sujetos con una edad media de 68 años [26].

El bienestar térmico adaptativo es otro enfoque de evaluación, los estudios más relevantes fueron presentados por Humphreys en 1978 [15], Auliciems en 1981 [27], Griffiths en 1990 [28], Nicol *et al.* en 1993 [29], Brager y de Dear en 1998 [16], entre otros. Este enfoque considera las variaciones que el individuo realiza, incluso en una condición de PMV neutral, para sentirse en condiciones cómodas. Tiene en cuenta la variación de las condiciones ambientales internas y externas y del individuo [15-16, 27-29]. De acuerdo con la teoría adaptativa [27-31], el bienestar térmico no es simplemente el resultado del equilibrio térmico de un cuerpo, sino que es el resultado de un proceso continuo de adaptación que implica un acomodo fisiológico, psicológico y conductual [32]. Las

respuestas fisiológicas del cuerpo humano a los estímulos ambientales han sido ampliamente estudiadas en la literatura.

En el caso del Perú, el MVCS publicó la norma EM 110 de Confort Térmico y Lumínico con Eficiencia Energética [33] en el 2014; esta norma establece criterios que una edificación debe cumplir para ser considerada energéticamente eficiente y presenta los lineamientos técnicos de diseño para lograr el bienestar térmico y lumínico con eficiencia energética en cada una de las nueve zonas bioclimáticas que establece. Esta norma recomienda valores máximos de transmitancia térmica (coeficiente total de transferencia de calor) para muros, techos y pisos de cada zona bioclimática. Sin embargo, no hay un soporte técnico consistente porque el Perú tiene datos climáticos escasos y limitados; así mismo no se han establecido las temperaturas de bienestar para los diferentes lugares del Perú, en particular aquellas regiones situadas en las zonas altoandinas, que es de interés para el presente estudio. Además, las propiedades físicas de los materiales de construcción mencionados en esta norma no han sido verificadas experimentalmente, en particular los materiales utilizados en las zonas altoandinas como el adobe, el ichu, la paja, el tapial, entre otros.

1.6.1. Investigaciones de bienestar térmico en climas fríos

Se identificaron investigaciones realizadas en climas fríos, por ejemplo en edificios de Himachal Pradesh, India [34], se estudió las necesidades energéticas y se concluyó que al redefinir la temperatura de bienestar (de 18,3 °C a 13,5 °C) se ahorraría un 44 % de energía destinada a calefacción, lo que indicó la necesidad de adoptar un enfoque diferente para las regiones frías.

En el 2016 Luo *et al.* [35] estudiaron la adaptación térmica de las personas a largo plazo en China, en particular la adaptación fisiológica (sin considerar la influencia de género, edad y peso). Su estudio mostró que las personas que habían vivido su vida entera en climas fríos se sintieron menos incómodos a la exposición al frío respecto a los individuos que vivían en lugares con climas cálidos. Similares investigaciones sobre la adaptabilidad de las personas a climas fríos se pueden encontrar en otras publicaciones científicas desarrolladas por Lai *et al.* [36], Cao *et al.*[37], Yu *et al.*[38].

Zhang *et al.* en el 2017 [39] publicaron un estudio donde comparaban ambientes térmicos interiores de ciudades de Europa, América del Norte y Asia con latitudes similares

(entre 39° 54' a 53° 31') durante el invierno, consideraron el aislamiento de la ropa de las personas y sus sensaciones térmicas. Utilizaron datos de estudio de campo de 10 ciudades elegidas de las bases de datos ASHRAE RP-884, SCATs y de China para su estudio comparativo. Concluyeron que las temperaturas neutras de invierno de las ciudades de Europa (23,4 °C) y América del Norte (22,7 °C) tienen valores más altos respecto a las temperaturas neutras de las ciudades de China (21,7 °C).

Se pueden encontrar investigaciones similares con evaluaciones del clima interior de edificios, hospitales, oficinas [40, 42], viviendas [43, 44], colegios [45], universidades [46-47] y del clima exterior [48-50], para realizar evaluaciones del bienestar térmico y luego proponer soluciones óptimas, sobre todo en países europeos donde el ahorro energético y la eficiencia energética forman parte de sus políticas de estado. En estas investigaciones, se desarrollaron mediciones *in situ* de los parámetros cuantitativos y cualitativos que afectan el bienestar térmico, así como la percepción de bienestar reportados por las personas que habitan estos espacios. Los datos cuantitativos (temperatura del aire, humedad relativa) fueron registrados en diversos intervalos (diario o mensual). El enfoque metodológico más popular presupone la recopilación de datos cualitativos y cuantitativos, lo que hace posible la identificación de las características personales y ambientales [41].

Según Antoniadou *et. al* [41], la mayoría de los enfoques metodológicos aplicados en la evaluación del bienestar se centran en el cuerpo humano, las condiciones del entorno interior o la combinación de ambos parámetros. Sin embargo, las características individuales y socioeconómicas de los ocupantes aún no forman parte de un modelo de bienestar establecido, por lo que un análisis más detallado de este aspecto puede ser apropiado. Además, la recolección de datos es principalmente el resultado de la implementación de encuestas y mediciones de parámetros físicos o una combinación de ambos.

1.6.2. Bienestar térmico en lugares de gran altura

Los principales estudios del bienestar térmico [14-17, 24] fueron desarrollados para altitudes inferiores a los 3000 msnm. Muy pocos trabajos se han realizado en regiones de gran altitud donde la presión atmosférica tiende a ser más baja [51], respecto al nivel del mar. Sin embargo, se pueden encontrar estudios denominados a “gran altura” para lugares situados a más de 1000 msnm [35, 51-57].

Generalmente, las regiones cercanas a la línea ecuatorial son consideradas regiones con clima cálido y húmedo [58], esto es particularmente cierto para lugares de baja altitud (menores a 1000 msnm). Sin embargo, a medida que aumenta la altitud, aumenta la variabilidad climática. La temperatura del aire disminuye con la elevación, denominada gradiente térmica ambiental (*the environmental lapse rate*). Esto es común en ciertas regiones de África, Asia del Sur y América del Sur, caracterizadas por una alta radiación solar, alta oscilación térmica diurna y baja oscilación térmica anual. Debido a esta variabilidad climática, es fácil predecir que las edificaciones en estas regiones tendrán un comportamiento térmico diferente según su altitud [55].

Los estudios para condiciones de presión baja [59] (lugares situados en altura) son desarrollados para aclarar los efectos sobre el bienestar térmico de las personas y los resultados mostraron que algunas características fisiológicas varían cuando acrecienta la altitud, con lo cual los sujetos encuentran difícil expresar su estado térmico. Algunos de estos estudios fueron realizados en cámaras para simular condiciones hipobáricas [60-61], como resultado se determinó que las personas se vuelven más sensibles al frío y a las corrientes de aire.

En la región del Himalaya en Nepal, Fuller *et al.* [62] estudiaron los beneficios de mejorar las condiciones de bienestar aumentando el aislamiento del techo y reduciendo los intercambios de aire entre el ambiente interior y el ambiente exterior. Su estudio determinó que las condiciones de temperatura al interior de las viviendas estaban muy por debajo de lo internacionalmente aceptado como cómodo.

Cena *et al.* [63] realizaron una encuesta de bienestar térmico a excursionistas en la cordillera del Himalaya y Karakoram. Encontraron una relación inversa entre la temperatura media del aire y el aislamiento medio de la ropa durante la noche. Indicaron que los sujetos ajustaban el aislamiento de su ropa para mantener una sensación térmica neutra. Por otro lado, Yao *et al.* [64] propusieron un modelo teórico adaptativo de bienestar térmico (aPMV), más adelante fue considerado como el modelo de bienestar adaptativo chino para edificios con ventilación natural. Asimismo, Rijal *et al.* [54] indicaron que los pobladores de Nepal tomaban bebidas calientes y quemaban leña en invierno para alcanzar el bienestar térmico. Además, las personas tenían la libertad de modificar su ropa en casa sin limitaciones. Ya que, cambiar el aislamiento de la ropa es la adaptación más inmediata para el ajuste de

bienestar térmico. En particular, las personas usan ropa muy aislada (1,2 a 2,7 clo⁷) en invierno para la adaptación térmica [65].

Según la teoría adaptativa, la temperatura a la que se somete una persona determina la condición de bienestar de la persona [66]. Tapha [56] y Tapha *et al.* [57] en Himalaya Darjeeling estudiaron los factores que afectan el bienestar de los residentes como el aislamiento de la ropa y el efecto de la diferencia en la altitud. Enfatizaron que los recientes estudios de campo sugieren que el modelo de PMV subestima o sobreestima la sensación térmica debido a la no inclusión de las oportunidades de adaptación que un sujeto puede tener para mantener una condición de bienestar.

Por último, en su estudio del bienestar térmico y la percepción térmica de los ocupantes en lugares a gran altura son Natarajan *et al.* [51], concluyeron que los rangos de bienestar térmico para este tipo de edificios tienden a ser más amplios y que los edificios tienen una mayor variabilidad en su temperatura interior.

⁷ clo: unidad de medida empleada para el aislamiento térmico de la vestimenta. 1 clo = 0,155 m² K/W

II. BIENESTAR TÉRMICO

En este capítulo se presentan las definiciones del bienestar térmico y los enfoques existentes (fisiológico, psicológico y racional). Se definen la sensación térmica que fue consultada a los pobladores de Imata durante el trabajo de campo. Luego, se analizan los parámetros que afectan el bienestar térmico y se presentan los modelos o índices para evaluar el bienestar térmico que son utilizados ampliamente en la literatura, así como los principales estudios del bienestar térmico adaptativo y los estándares internacionales que existen actualmente para la evaluación del bienestar térmico. Finalmente, se estudian el bienestar térmico del poblador altoandino y la adaptación del poblador altoandino.

2.1. Definiciones del bienestar térmico

Desde el punto de vista práctico, se describe mediante tres enfoques principales: fisiológicos, psicológicos y racionales (también llamado balance de calor) [67-68].

2.1.1. El enfoque fisiológico

Este enfoque representa la percepción térmica de una persona debido a los sensores nerviosos desde los receptores térmicos dentro de la piel hasta el hipotálamo. El cuerpo humano, considerado como un sistema termodinámico, produce trabajo mecánico y calor a bajas temperaturas, utilizando como combustible la comida y el oxígeno. Este sistema requiere, en condiciones saludables, mantener una temperatura interior constante alrededor de $37 \pm 0,5$ °C, de otra manera la funcionalidad de los órganos del cuerpo humano puede ser dañada con severidad [19, 21, 69]. Una temperatura interna menor a 28 °C puede provocar arritmia cardíaca grave y la muerte, mientras que una temperatura mayor a 43 °C puede causar daño cerebral irreversible. Por lo tanto, una regulación de la temperatura corporal es importante para el bienestar [70].

La razón de generación de calor del cuerpo debería ser igual a la razón de calor perdido. En el caso de la temperatura de la piel, no es constante y varía de acuerdo a la parte del cuerpo, la temperatura del aire y la vestimenta. Las temperaturas de la piel asociadas con

el bienestar con actividades sedentarias están en el rango de 33 °C y 34 °C, se reducen con el aumento de la actividad [71].

La persona se siente térmicamente neutra cuando las señales transmitidas por los sensores de frío y calor tienen la misma magnitud, de lo contrario, la persona siente calor o frío. Los sensores de frío se encuentran sobre la piel, cuando la temperatura corporal disminuye por debajo de 34 °C envían las señales apropiadas para mantener el equilibrio, el proceso de calentamiento se da tiritando para aumentar la actividad muscular y reduciendo el flujo sanguíneo sobre la piel. Los sensores de calor se encuentran en el hipotálamo; cuando la temperatura corporal supera los 37 °C envían las señales apropiadas para mantener el equilibrio; el proceso de enfriamiento incluye sudoración (que conduce a la evaporación) y aumenta el flujo sanguíneo sobre la piel [72].

El bienestar térmico se logra cuando el calor generado por el metabolismo (conjunto de reacciones químicas que tienen lugar en las células del cuerpo para convertir los alimentos que ingerimos en energía) es igual al calor perdido por el cuerpo. Los factores fisiológicos que influyen en el equilibrio térmico son la temperatura de la piel y la tasa de sudoración para un metabolismo dado [73]. El enfoque fisiológico se ocupa de la aclimatación, es decir, la respuesta a la exposición continua a una o más entradas del entorno térmico, que modifica la configuración del sistema de termorregulación fisiológica en una escala de días o semanas. Las versiones a largo plazo del enfoque fisiológico abordan la adaptación genética que ocurre en escalas de tiempo más largas que la vida de un individuo [16].

2.1.2. Enfoque psicológico

Según este enfoque, el bienestar térmico es "la condición mental que expresa satisfacción con el entorno térmico". Esta definición general está dada en dos documentos utilizados para la evaluación del entorno térmico interior: la norma ISO 7730-2005 [13] y el ASHRAE 55-2017 [74]. Sin embargo, estos estándares son considerados inadecuados por no tener en cuenta el nivel de bienestar en situaciones reales [75-77]. La definición del bienestar térmico dada en el ASHRAE 55-2017 es la siguiente "la condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico y se evalúa mediante evaluación subjetiva".

El bienestar térmico se evalúa evidenciando si los ocupantes están satisfechos o no con su entorno térmico. Se considera una insatisfacción local cuando el cuerpo está demasiado caliente o frío, o cuando cierta parte del cuerpo está demasiado fría o caliente [78]. La

adaptación psicológica depende de las experiencias y hábitos de los individuos, así como de sus expectativas sobre lo que puede ofrecer el ambiente interior [79-80].

2.1.3. Enfoque racional

En el enfoque racional, la sensación térmica depende del equilibrio térmico del cuerpo humano. Para obtener bienestar térmico, el balance de calor que fluye desde y hacia el cuerpo humano y la producción metabólica por consumo de alimentos tiene que ser equilibrado, y la temperatura de la piel, así como la tasa de sudoración, debe estar dentro de rangos específicos dependiendo de la actividad metabólica [81-82]. Según Liu y *et al.* [83], el enfoque fisiológico no es el principal factor necesario para lograr un ambiente térmico aceptable; consideran que los otros dos enfoques tienen pesos similares.

2.2. La sensación térmica

La sensación térmica se entiende como una experiencia sensorial: una respuesta psicológica al estado de los termorreceptores del cuerpo humano; Parsons [84] lo analiza en detalle. La sensación térmica describe cómo la persona se siente térmicamente, por ejemplo "ligeramente cálido". Por lo tanto, dicha evaluación debe estar libre de cualquier información afectiva, porque la información necesaria es "cómo se siente" (por ejemplo, "ligeramente cálido") y no "cómo se encuentra" (por ejemplo, "cómodo"). La escala de sensación térmica es comúnmente una escala categórica, donde los sujetos solo pueden elegir los marcadores verbales entre "frío" y "caliente", pero nada entre ellos [72].

Hensen [78] explica la diferencia entre bienestar térmico y sensación térmica. El bienestar térmico se considera una experiencia emocional descrita en términos de "agradable" y "desagradable", mientras que la sensación térmica se considera una experiencia racional descrita en términos de "frío" y "caliente". Tanto el bienestar térmico como la sensación térmica dependen de los parámetros ambientales y personales.

2.3. Parámetros que afectan el bienestar térmico

El equilibrio térmico del cuerpo se ve afectado por dos grupos principales de factores: personales y ambientales.

Los parámetros personales representan las características de los ocupantes, y estos son principalmente [70]:

- Nivel de aislamiento de la ropa (I_{cl}), es la cantidad de aislamiento térmico que lleva la persona, en unidades clo ($1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$).
- Nivel de actividad (M), es la producción neta de calor del cuerpo humano en un período de tiempo determinado, o la tasa de transformación de la energía química en calor y trabajo mecánico por parte de la actividad, cuya unidad de medida es el met ($1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$). El met se expresa como una potencia de producción de energía por unidad de superficie corporal.

Los parámetros que pueden afectar el bienestar térmico y la disipación de calor del cuerpo son el tipo de alimentación y las bebidas que se ingieren, la aclimatación, la forma del cuerpo, la grasa subcutánea, la edad y el género, y el estado de salud [19].

Respecto a los principales parámetros ambientales son la temperatura del aire (T), la velocidad del aire (v_a), la humedad relativa (HR) y la temperatura radiante media (T_r). Se utilizan estos parámetros debido a que el sistema termorregulador humano es adecuado para crear un equilibrio térmico dentro de los factores ambientales.

La HR se define como la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en el aire y la cantidad máxima que el aire sería capaz de contener (en la fase vapor) a esa temperatura. La HR tiene un valor bajo cuando la temperatura es alta y la evaporación del agua es rápida. La humedad del aire también afecta la velocidad de evaporación [19].

La T_r es "la temperatura uniforme de un recinto imaginario en el que la transferencia de calor radiante del cuerpo humano es igual a la transferencia de calor radiante en el recinto real no uniforme" [74]. La expresión de T_r de Fanger [85] considera la radiación térmica emitida por las paredes. La T_r no puede ser medida directamente, pero puede ser deducida de la temperatura de un globo negro (T_g). El termómetro de globo es una esfera de cobre negro mate, generalmente de 150 mm de diámetro, con un termómetro ubicado en su centro. Posicionado en una habitación, después de alcanzar el equilibrio, el globo responderá a la radiación neta hacia o desde las superficies circundantes y a los intercambios convectivos con el aire. Si se recibe radiación, entonces T_g es mayor a T_{aire} , para el caso de T_g es menor que T_{aire} indica que las superficies circundantes emiten radiación ya que están más frías que el aire [19].

2.4. Evaluación del bienestar térmico

Los estándares internacionales como la norma ISO 7730–2005 [13] y el estándar ASHRAE 55 [74] sugieren que el bienestar térmico se puede expresar en términos del índice PMV y del índice del porcentaje de personas insatisfechas (PPD de los términos en inglés *Percent of Dissatisfied People*). El PMV predice el voto medio de un grupo de personas que señalan sobre qué tan cómodos se sienten en un entorno y el PPD está en función del PMV. Más información del índice PMV se presenta en el ANEXO I.

Para determinar el bienestar térmico de las personas existen básicamente dos metodologías disponibles:

- Estudios en cámaras climáticas donde se determina el bienestar térmico en estado estacionario, se puede variar los parámetros climáticos. Las variables personales (aislamiento de la ropa y tasa metabólica) son fijas [86].
- Estudios de campo, realizados a medida que las personas ejecutan su trabajo normal. No se controla el entorno y las personas pueden modificarlo para sentirse cómodos. En este caso interviene el aspecto conductual de los encuestados [86]. Además, estos estudios son influenciados por otros factores indirectos como la cultura y factores psicológicos. El objetivo es descubrir qué combinación de variables medioambientales describe mejor las respuestas subjetivas de los sujetos [87].

2.4.1. Índices bioclimáticos empíricos

Algunos índices que de alguna manera estiman el bienestar térmico son la temperatura efectiva [88], la temperatura operativa [89], el índice WBGT [90], el índice de enfriamiento por efecto del viento WCT (del inglés *Wind Chill Temperature* [91], considera el poder de enfriamiento del viento y sus impactos en el bienestar térmico de un ambiente frío [89]), el índice de calor (del inglés *Heat Index*, considera el impacto de la temperatura del aire y la humedad relativa [92]) y el índice PMV desarrollado por Fanger considerado como un estándar internacional desde 1980 [93]. En el ANEXO II se detalla estos índices para un mejor entendimiento.

2.4.2. Diagramas bioclimáticos

Los diagramas bioclimáticos facilitan el análisis de las características climáticas de una ubicación dada desde el punto de vista del bienestar humano, ya que presentan la combinación concurrente de temperatura y humedad para un momento en particular.

Asimismo, estos especifican pautas para diseñar edificaciones con óptimas condiciones de bienestar. Los diagramas están organizados en torno a la zona de bienestar térmico definida como el rango de condiciones climáticas dentro del cual la mayoría de las personas no sienten molestias térmicas, ni de calor ni de frío [94].

Entre los principales diagramas están el diagrama bioclimático de Olgay [24], donde se integran dos variables primordiales para el bienestar, HR (en el eje de la abscisa) y T (en el eje de la ordenada). Otro diagrama es de Givoni [95], se grafica sobre la carta psicrométrica y es acompañada con diferentes líneas que delimitan una serie de regiones las cuales indican estrategias a seguir para alcanzar el bienestar térmico al interior de una edificación. En el ANEXO II se puede encontrar una explicación de ambos diagramas.

2.5. Bienestar térmico adaptativo

Según Auliciems y Szokolay [19], Fanger indica que el índice PMV, desarrollado a partir de estudios en cámaras controladas, es válido para todas las personas y que las preferencias térmicas son las mismas independientemente de la ubicación geográfica o del clima. Sin embargo, las investigaciones de campo, con personas reales dedicadas a tareas reales en entornos construidos reales, en lugar de experimentos de laboratorio, han producido observaciones aparentemente anómalas que sugieren que la preferencia térmica de las personas también tiene un componente geográfico.

La teoría del bienestar térmico adaptativo fue introducida por primera vez por Nicol y Humphreys en la década de 1970 [29, 31, 96]. En el año 2004, se incorporó un modelo adaptativo en el ASHRAE Standard 55 gracias a la investigación de Brager y de Dear [16, 30], quienes desarrollaron una base de datos ASHRAE RP-884 con más de 21000 mediciones de bienestar térmico a partir de encuestas en 160 edificios con condiciones climáticas variadas y en cuatro continentes, principalmente en edificios con oficinas en Tailandia, Indonesia, Singapur, Pakistán, Grecia, Reino Unido, Estados Unidos, Canadá y Australia [32]. Brager y de Dear dieron un amplio límite de bienestar de 21,5 °C a 30,5 °C para los sujetos en diferentes condiciones [75].

El modelo adaptativo presentado en el ANSI/ASHRAE Standard 55 [74] y su par europeo (EN 15251) [97] se basan en la idea de que en los espacios libres existe una extensa gama de temperaturas dentro de las cuales un ocupante puede encontrar su propia sensación óptima dada suficientes oportunidades de adaptación [68].

De acuerdo con la teoría adaptativa [30-33, 76, 96, 98], el bienestar térmico no es simplemente el resultado del equilibrio térmico de un cuerpo, sino que es el resultado de un proceso continuo de adaptación que implica una adaptación fisiológica (aclimatación, vestimenta, ingesta alimenticia), psicológica (expectativa y habituación de bienestar en relación clima interior y exterior) y conductual (estrategias de restitución de la situación de bienestar como ponerse o quitarse la ropa, abrir cerrar ventanas y puertas). Las respuestas fisiológicas del cuerpo humano a los estímulos ambientales han sido ampliamente estudiadas en la literatura [68].

A diferencia de los estudios en cámaras climáticas, que no proporcionan a las personas una experiencia de realismo [16], el enfoque adaptativo se realiza en estudios de campo, donde los parámetros del clima no son controlables. Los modelos adaptativos incluyen en cierta manera las variaciones en el clima exterior para establecer las preferencias térmicas en el interior. Son también conocidos como de neutralidad térmica y se basan en estudios de campo realizados bajo una amplia gama de condiciones climáticas [19].

Se sabe que los ambientes térmicos interiores y el bienestar térmico de las personas difieren de lugar a lugar [99] debido a las diferencias culturales, climáticas y sociales; así como a las experiencias y las preferencias personales [51, 100]. Los estudios de campo son fundamentales para evaluar los estándares de bienestar existentes en otras regiones del mundo y para desarrollar nuevos algoritmos que definan las condiciones de bienestar en diferentes climas y culturas [51].

Se han desarrollado modelos que determinan la temperatura neutra o de neutralidad (T_n) en función de la temperatura media exterior (\bar{T}_e) de cada lugar. Aunque en algunos casos se han desarrollado modelos de regresión exponencial como el de Nicol y Roaf (1996) [101], por lo regular T_n se obtiene a partir de procesos de regresión lineal, por lo que suelen tener la forma de una ecuación lineal, como se muestra en la tabla 1, donde \bar{T}_e es la temperatura exterior promedio mensual o anual. El modelo de la ASHRAE fue establecido en base a la investigación realizada por Brager y de Dear [16]. En la figura 1, se presentan los modelos presentados en la tabla 1, con temperaturas exteriores de 0 °C a 30°C. Estos modelos en su mayoría fueron determinados para valores de T_n alrededor de 17 °C y 30 °C [19].

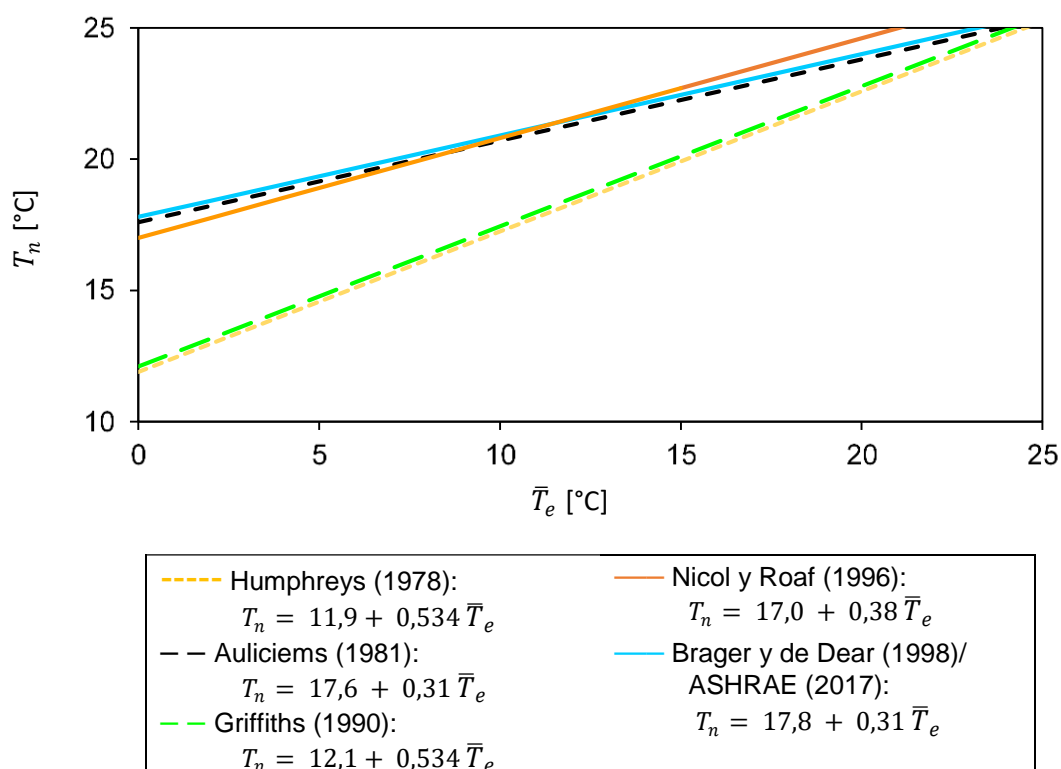


Figura 1. Modelos de bienestar térmico adaptativo representados para la variación de temperaturas exteriores (\bar{T}_e) entre 0 °C y 25°C.

Tabla 1. Modelos de bienestar térmico adaptativo, según diversos autores.

Autor	Ecuación
Humphreys (1978)[15]	$T_n = 11,9 + 0,534 \bar{T}_e$
Auliciems (1981) [19]	$T_n = 17,6 + 0,31 \bar{T}_e$
Griffiths (1990) [28]	$T_n = 12,1 + 0,534 \bar{T}_e$
Nicol y Roaf (1993) [29]	$T_n = 17,0 + 0,38 \bar{T}_e$
Brager y de Dear (1998) [16]	$T_n = 17,8 + 0,31 \bar{T}_e$
ASHRAE (2017) [74]	$T_n = 17,8 + 0,31 \bar{T}_e$

2.6. Estándares internacionales

A nivel mundial se vienen realizando muchos tipos de evaluaciones con diversos estándares como el “ASHRAE Estándar 55 Condiciones ambientales térmicas para la ocupación humana” [74], el cual establece los rangos de las condiciones ambientales interiores para lograr un bienestar térmico aceptable para los ocupantes de los edificios.

También existe la norma “ISO 7730: Ergonomía del entorno térmico - Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico utilizando el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios locales de bienestar térmico” [13], el cual presenta los métodos para predecir la sensación térmica general y el grado de insatisfacción térmica de los individuos expuestos a ambientes térmicos moderados. En la norma ISO 7730 define una base de datos completa para las tasas metabólicas de diferentes actividades (anexo B de la norma) y el aislamiento térmico de los conjuntos de ropa (anexo C de la norma).

2.7. Bienestar térmico del poblador altoandino

El bienestar térmico depende de muchos aspectos personales y externos. Entre los personales destacan: el estado de salud que puede afectar la capacidad de mantener la temperatura corporal, el tipo de alimentación y las bebidas que se ingieren, o el proceso de aclimatación. Un factor externo es la uniformidad del ambiente que rodea a la persona ya que esto genera diferentes temperaturas en partes del cuerpo lo que provoca un estado de incomodidad, ya sea de calor o frío. La incomodidad térmica no es simplemente una sensación subjetiva desagradable resultante del estrés en un momento particular en el tiempo. Hay efectos acumulativos que se traducen en respuestas fisiológicas o se compensan con el comportamiento [19].

Para lograr una protección adecuada en lugares con bajas temperaturas, una persona debe mantener una alta producción de calor metabólico por actividad o reducir la pérdida de calor controlando el entorno cercano del cuerpo con la vestimenta. Las extremidades (por ejemplo, dedos de manos y pies) están en mayor riesgo que el torso porque, como cilindros delgados, son particularmente susceptibles a la pérdida de calor y difíciles de aislar sin aumentar la superficie para la pérdida de calor. La vasoconstricción puede reducir el flujo de calor circulatorio hacia las extremidades en más del 90 % [70].

2.8. Adaptación del poblador altoandino

Los factores que afectan al poblador altoandino son la altitud, que modifica su respuesta fisiológica, y el clima frío que lo rodea. Como resultado de vivir periodos largos en estas zonas elevadas, el poblador ya está aclimatado. Entendiéndose por aclimatación al conjunto complejo de reajustes fisiológicos y psicológicos que tienen lugar cuando el organismo está expuesto al estrés, y restablecen los umbrales orgánicos y celulares y las tasas de funcionamiento de los sistemas cardiovascular, pulmonar, endocrino, digestivo y nervioso [19].

Las personas que frecuentan las zonas a gran altura encuentran gradualmente la "nueva condición" de la hipoxia hipobárica.⁸ Darwin predijo que los descendientes de las poblaciones residentes a gran altitud durante "mil generaciones" diferirían en "estructura, hábitos o instintos" de sus ancestros colonizadores [102]. Siguiendo esta afirmación, la altitud tiene un efecto característico sobre la arquitectura del cuerpo, como el agrandamiento del tórax para aumentar la función respiratoria del cuerpo [103]. La función pulmonar mejora en los residentes y muestran volúmenes pulmonares más grandes y una mayor capacidad de difusión del monóxido de carbono.

Todas las poblaciones que viven a gran altura no tienen la misma respuesta. Estudios indican que existen diferencias significativas por ejemplo entre los pobladores tibetanos y andinos, los primeros tienen un mayor potencial para la selección natural de rasgos beneficiosos para la residencia a gran altitud comparados con las poblaciones andinas [104]. Esto tal vez se relacione con las poblaciones encontradas en la meseta tibetana hace más de 20000 años, mientras que las poblaciones altoandinas solo pasaron la mitad de ese tiempo a gran altitud. Aunque no hay datos suficientes para determinar si la fisiología a gran altitud realmente difiere con la geografía [105].

Por otro lado, según Hurtado [106], el hombre de la altura, en reposo y en actividad física, tiene una mayor ventilación pulmonar que el hombre que reside en baja altura en condiciones similares; en un tiempo dado entra y sale de los pulmones un elevado volumen de aire, y este proceso compensa en parte la caída de la presión parcial del oxígeno en el aire inspirado. En la sangre, hay un marcado aumento en la hemoglobina que es el vehículo transportador del oxígeno contenido en los glóbulos rojos. Además, los habitantes andinos, a pesar del adverso factor ambiental, son capaces de tolerar más tiempo, comparados con los habitantes de baja altitud, una determinada actividad física. También menciona que la "aclimatación natural" del hombre andino, en su experiencia es siempre superior que aquella correspondiente a la "aclimatación adquirida".

Respecto a la alimentación, no se ha establecido requerimientos nutricionales en forma específica, por lo que se utilizan los establecidos en estándares de la FAO/OMS/UNU. Es preciso mencionar que los alimentos proveen la energía necesaria para equilibrar el gasto energético, los tejidos corporales (incluidas las grasas y los músculos), se utilizan para

⁸ Descenso en el aporte de oxígeno a los tejidos debido a una caída en la presión parcial del aire por la exposición a una atmósfera de bajas presiones.

alimentar el organismo. Sin embargo, debido a la pobreza de estas zonas, no todos los pobladores acceden a una alimentación balanceada.

La composición de la ingesta de energía en la altitud debe aproximarse a las recomendaciones de los expertos para minimizar el riesgo de enfermedades crónicas (de 15 % a 30 % de la energía de las grasas totales, 12 % a 20 % de la energía de las proteínas y 55 % a 60 % de la energía de carbohidratos) [107]. La ingesta de carbohidratos y proteínas puede estar en los extremos superiores de la recomendación si se va a realizar una actividad extenuante.

Respecto a la exposición al frío, la respuesta fisiológica inicial es la vasoconstricción de la piel periférica y una reducción en el flujo sanguíneo de la piel. Esto reduce la transferencia de calor por convección entre el núcleo y la cubierta del cuerpo (piel, grasa subcutánea y músculo esquelético), aumentando efectivamente el aislamiento por la cubierta del cuerpo. Sin embargo, el calor aún se pierde de la superficie del cuerpo expuesto más rápido de lo que se reemplaza; por lo tanto, la temperatura de la piel disminuye. La respuesta vasoconstrictora a la exposición al frío ayuda a retrasar la pérdida de calor y defender la temperatura interna, pero a expensas de la adecuación de la temperatura del tejido periférico [108].

La exposición al frío también provoca un aumento de la producción metabólica de calor en los humanos, lo que puede ayudar a compensar la pérdida de calor. El temblor, que consiste en contracciones musculares rítmicas repetitivas involuntarias durante las cuales se libera la mayor parte de la energía metabólica gastada, se inicia por una disminución en temperatura de la piel. Las personas mayores de 60 años pueden ser menos tolerantes al frío que las personas más jóvenes, debido a la reducción de la vasoconstricción y la conservación del calor en comparación con sus contrapartes más jóvenes.

III. CENTRO POBLADO DE IMATA

El tercer capítulo presenta una descripción general de Imata, lugar donde se desarrolla el trabajo de tesis. Se analiza sus principales características climáticas durante el año 2019. Los parámetros como la temperatura (T), la humedad relativa (HR), la velocidad del viento (v), la radiación solar y las precipitaciones son detalladas.

3.1. Descripción general

Imata se sitúa en el sur del Perú en la latitud $-15^{\circ} 50' 20,68''$, longitud $-71^{\circ} 5' 6,36''$ y a una altitud de 4500 msnm, en el distrito de San Antonio de Chuca, en la provincia de Caylloma, región Arequipa (figura 2). El acceso al centro poblado es por vía terrestre desde la ciudad de Arequipa (aproximadamente a 32 km), con un viaje de alrededor de 3 horas.

Este centro poblado fue creado el 14 de noviembre de 1944, a raíz de la instalación de la estación de tren que une Arequipa y Puno. Muchos de los trabajadores de la empresa de ferrocarril se trasladaron a la zona a fin de cumplir con su trabajo y poco a poco sus familias también se instalaron alrededor de la estación de tren [109].

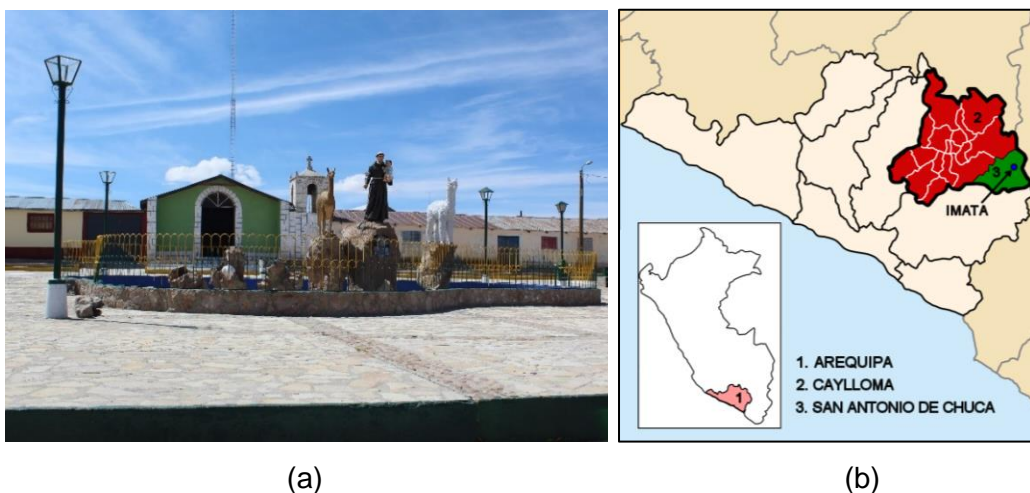


Figura 2. (a) Fotografía de la plaza de Imata y (b) ubicación en el mapa del Perú: latitud $15,8391^{\circ}$ S, longitud $71,0906^{\circ}$ O y altitud 4500 msnm.

Según el SIG (sistema de información geográfica) [110], Imata tiene una población de 400 habitantes que habitan en alrededor de 200 viviendas agrupadas a lo largo de la carretera y algunas de estas construcciones son de uso ocasional. El idioma predominante es el castellano. Asimismo, las viviendas cuentan con los servicios de energía eléctrica, agua y desagüe por red pública. Entre las principales infraestructuras presentes en Imata (figura 3) se tienen: un albergue (A) operado por un grupo de mujeres a cargo del cuidado y control de las habitaciones, una pequeña iglesia (I), un salón comunal, una estación de radio, la instituciones educativa (I.E.) de nivel inicial (J), la I.E. de nivel primario y nivel secundario (E), un puesto de salud (S), un puesto policial (P) y la municipalidad distrital (M) situada en su plazuela, por último, canchas deportivas (D). Las principales actividades productivas son la actividad pecuaria y el comercio. A lo largo de la carretera se sitúan diferentes tipos de bodegas, comerciantes de combustible y restaurantes.



Figura 3. Principales construcciones en Imata: albergue (A), iglesia (I), I.E. de nivel inicial (J), I.E. de nivel primario y nivel secundario (E), puesto de salud (S), puesto policial (P), la municipalidad (M), canchas deportivas (D) y “Plataforma de Servicios Tambos” (T).

Las viviendas típicas en Imata son construcciones rústicas con un predominio del adobe en las paredes, calamina metálica en los techos (una o dos aguas) sobre los que en algunos casos se distribuyen piedras para su sujeción, las puertas metálicas y marcos metálicos en las ventanas de vidrio simple (figura 4).

Algunos programas estatales se desarrollan en Imata, por ejemplo la “Plataforma de Servicios Tambos” (T, en la figura 3) del Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social (MIDIS), que permiten la presencia del Estado en el ámbito rural, cuentan con personal y

equipamiento moderno, facilitan de forma gratuita que las entidades públicas y privadas brinden sus servicios en materias sociales y productivas a la población [111]. Otro proyecto es “Mi abrigo”, acondicionando térmicamente algunas viviendas de Imata, con el objetivo de proteger a las personas altamente vulnerables de las heladas, especialmente los niños y adultos mayores, que se encuentren dentro del grupo de pobreza⁹ y pobreza extrema¹⁰. Las modificaciones que realizan se enfocan en la implementación de un muro Trombe con el aislamiento térmico interno y el reforzamiento de muros.



Figura 4. Vivienda típica en Imata (a) puerta de calamina y ventanas de vidrio con marco metálico, (b) techos de calamina [109].

Por último, algunas investigaciones se han desarrollado en Imata con la participación de la Universidad Nacional de Ingeniería, por ejemplo el “Círculo de Investigación 024-2016: Desarrollo de materiales y dispositivos para la aplicación de estrategias renovables y medioambientales que permitan el suministro de energía y agua para una vivienda rural sostenible” financiado por el CONCYTEC, “Desarrollo de sistemas de calefacción solar para zonas altoandinas como una opción energética sostenible para mejorar la calidad de vida de los pobladores” financiado por el Banco Mundial y “Evaluación energética de módulos habitables y diseñados bioclimáticamente para condiciones extremas de bajas temperaturas y alta radiación solar usando una plataforma experimental” financiado por SENCICO . Todos los proyectos tienen el objetivo de mejorar las condiciones del poblador altoandino.

3.2. El clima de Imata

Las características climáticas del Perú son peculiares tanto por su extensión o su relieve topográfico. El mapa de clasificación climática del Perú presenta 38 climas [112] tomando

⁹ Personas cuyo gasto mensual es menor a S/ 360 (equivalente a un costo de una canasta básica de consumo de alimentos y no alimentos).

¹⁰ Personas cuyo gasto mensual es menor a S/ 191 (equivale a el costo de la canasta básica de consumo alimentaria)

como base la clasificación de Thornthwaite; esta clasificación se elaboró con información de 501 estaciones meteorológicas a nivel nacional y se calculó con las normales climáticas a paso mensual de las temperaturas del aire y de la precipitación, para el periodo de referencia de 30 años (1981 - 2010). Según esta información a Imata le corresponde un clima lluvioso semifrío con invierno seco C (i) D' [113], caracterizado por un periodo de lluvias durante los meses de primavera y verano, con humedad relativa calificada como húmeda. Por otro lado, según la clasificación de Köppen, Imata posee el clima ET- Clima de tundra, propio de las zonas altoandinas.

Para una mejor comprensión del clima de Imata, se analizan la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del aire, las precipitaciones y la radiación solar para el año 2019.

3.2.1. Análisis climático

Para tener un análisis climático más confiable, son necesarios datos climáticos por un periodo de 10 años, sin embargo, sólo se analiza el año 2019, periodo en el cual se instaló una estación meteorológica marca Davis Vantage Pro 2 Plus (la ficha técnica es presentada en el ANEXO III) en Imata. También se utiliza la base de datos de la NSRDB (*National Solar Radiation Database*) [114] del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL- *National Renewable Energy Laboratory*) de Estados Unidos y a la base de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) del Perú [115], para obtener los parámetros del clima. Para periodos donde la estación meteorológica no registró información se completó la información con las otras 2 bases de datos.

Primero se analiza la temperatura, la tabla 2 y la figura 5a presentan los promedios mensuales de la temperatura exterior (\bar{T}_e), la temperatura media máxima ($\bar{T}_{e,máx}$), la temperatura media mínima ($\bar{T}_{e,mín}$) y la oscilación térmica diaria ($\Delta\bar{T}_e$) durante el año 2019. La media anual \bar{T}_e es 3,7 °C, el mes menos frío es diciembre con 5,3 °C con temperaturas entre -1,6 °C y 13,8 °C en promedio y el mes más frío es julio con 1,0 °C con temperaturas entre -8,0 °C y 10,6 °C en promedio. La media anual de $\Delta\bar{T}_e$ es 15,3 °C, por lo que hay noches muy frías y mañanas soleadas. Por lo general, $\bar{T}_{máx}$ se presenta entre 12:00 y 14:00, mientras $\bar{T}_{mín}$ se presenta entre 5:00 y 6:00. Los registros históricos (figura 6) muestran temperaturas extremas mínimas que alcanzan hasta -20 °C [116], principalmente en temporada de heladas.

Tabla 2. Temperaturas y humedades relativas características en Imata para el año 2019.

Mes	\bar{T}_e [°C]	$\bar{T}_{e,máx}$ [°C]	$\bar{T}_{e,mín}$ [°C]	$\Delta\bar{T}_e$ [°C]	\overline{HR}_e [%]	$\overline{HR}_{e,máx}$ [%]	$\overline{HR}_{e,mín}$ [%]
Enero	5,0	12,1	0,3	11,8	77,7	91,9	47,8
Febrero	4,8	11,1	1,2	9,9	83,1	92,1	56,0
Marzo	5,1	11,6	0,8	10,7	78,9	91,6	50,0
Abril	4,5	11,8	-0,7	12,6	74,9	90,1	46,7
Mayo	2,4	11,3	-5,4	16,7	56,1	82,3	27,9
Junio	1,6	11,4	-7,7	19,0	49,8	78,5	22,7
Julio	1,0	10,6	-8,0	18,6	48,2	74,2	23,0
Agosto	2,0	12,2	-7,4	19,7	38,8	66,7	16,8
Setiembre	3,7	13,2	-4,7	17,9	57,3	82,9	26,2
Octubre	3,8	12,9	-4,4	17,3	52,8	79,4	26,3
Noviembre	4,8	13,2	-1,3	14,5	69,7	90,6	34,8
Diciembre	5,3	13,8	-1,6	15,3	66,7	89,4	34,2
Media	3,7	12,1	-3,2	15,3	62,8	84,1	34,4

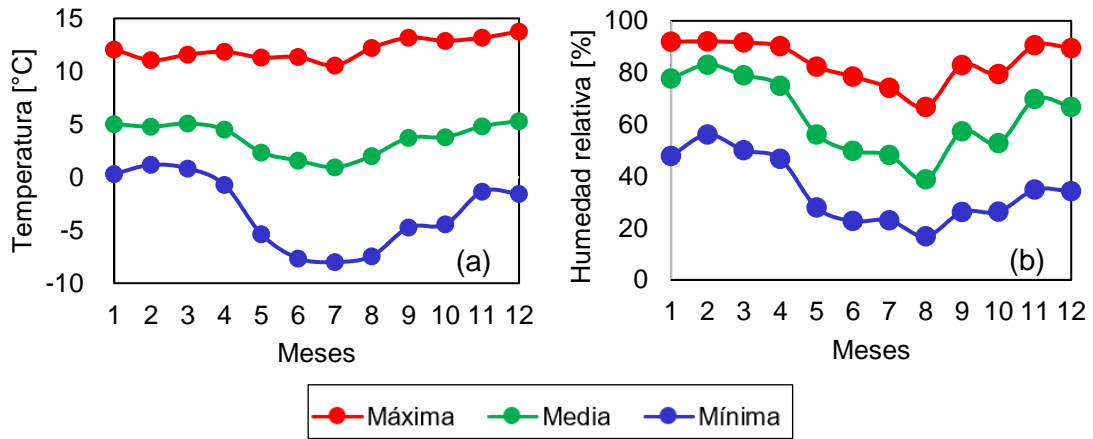


Figura 5. (a) Temperaturas y (b) humedades relativas mensuales: máximas, medias y mínimas de Imata para el año 2019.

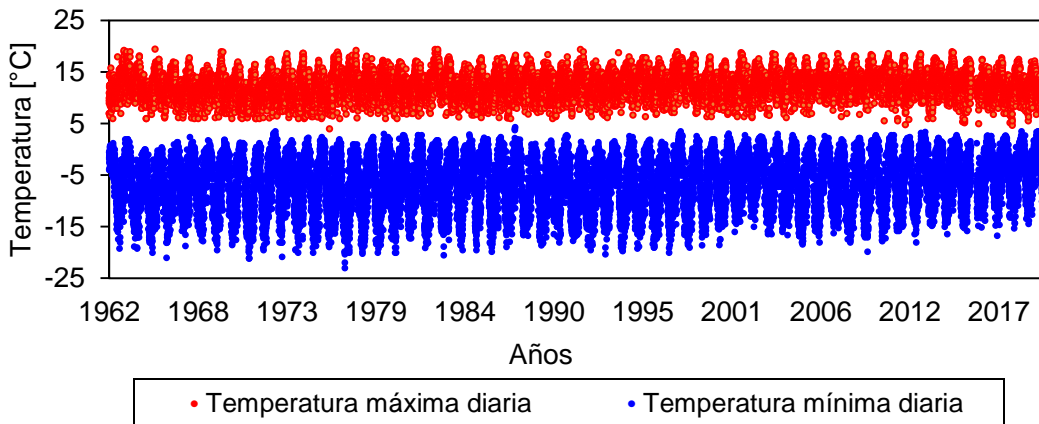


Figura 6. Estación de SENAMHI [116]: Registro histórico de las temperaturas máximas y mínimas diarias en Imata, desde el año 1962 hasta el año 2019.

El segundo parámetro a analizar es HR exterior; la tabla 3 y la figura 5b presentan la HR media exterior (\overline{HR}_e), la HR exterior máxima ($\overline{HR}_{e,máx}$) y la HR exterior mínima ($\overline{HR}_{e,mín}$) de Imata. El mes con menor \overline{HR}_e corresponde a agosto (38,8 %), el mes con mayor \overline{HR}_e es febrero (83,1 %, temporadas de lluvias) y la media anual \overline{HR}_e es 62,8 %. $\overline{HR}_{e,máx}$ ocurre entre las 5:00 y 7:00, mientras $\overline{HR}_{e,mín}$ se presenta entre las 13:00 y 14:00.

El tercer parámetro es la precipitación (figura 7), es frecuente y más intensa durante los meses de enero a marzo; en el año 2019, febrero tiene el mayor registro (200,1 mm). Las precipitaciones no son comunes durante los meses de heladas (de mayo a agosto). La figura 8 muestra los registros históricos diarios según SENAMHI [116], los máximos diarios se registraron en marzo del 1999 (57,2 mm), enero del 2006 (55,4 mm) y enero del 2001 (52,5 mm).

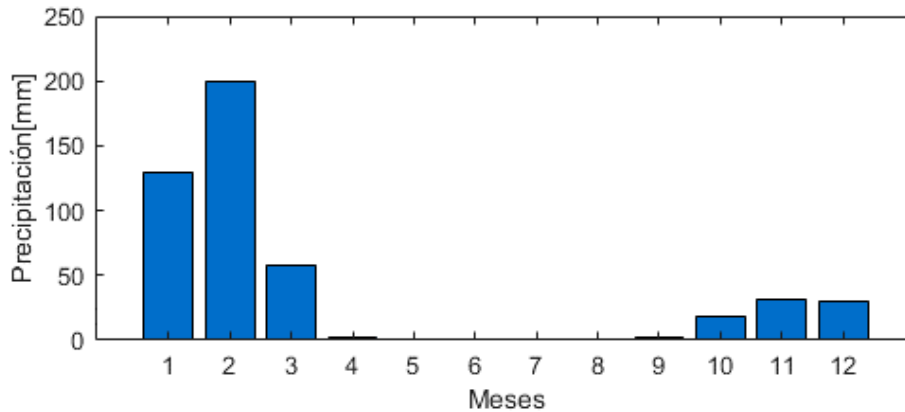


Figura 7. Precipitación mensual en Imata durante el 2019.

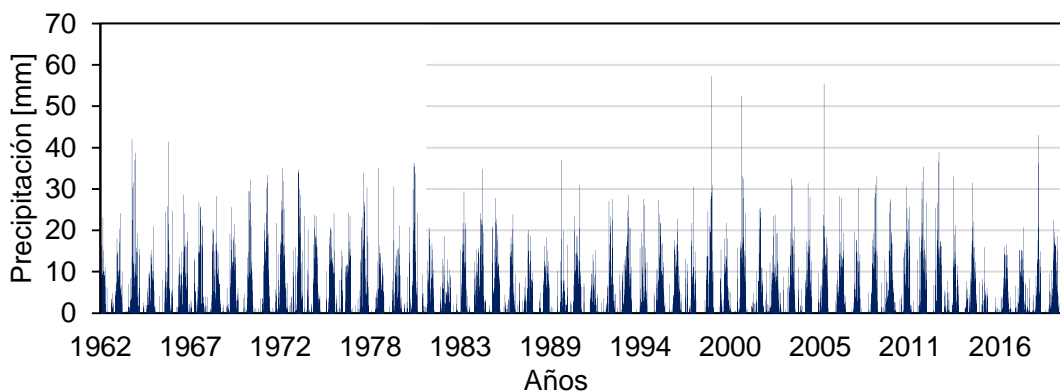


Figura 8. Estación de SENAMHI [116]: registro histórico de la precipitación diaria en Imata.

Imata posee un alto potencial solar; la energía solar diaria que incide sobre la superficie horizontal es 5,8 kWh/m². En la figura 9 se presenta la irradiancia solar mensual que incide

sobre el plano horizontal; el mes con mayor potencial solar fue octubre y los meses con menor radiación solar son febrero y marzo (temporada con precipitaciones máximas). En la figura 10 se ilustra la posición aparente del Sol para Imata, el sol se ubica completamente hacia el norte durante los meses de marzo a setiembre, mientras en los meses de noviembre, diciembre y enero, se ubica completamente hacia el sur. El resto de los meses (octubre y febrero), amanece y oscurece con el Sol orientado hacia el sur, situándose al norte al medio día solar.

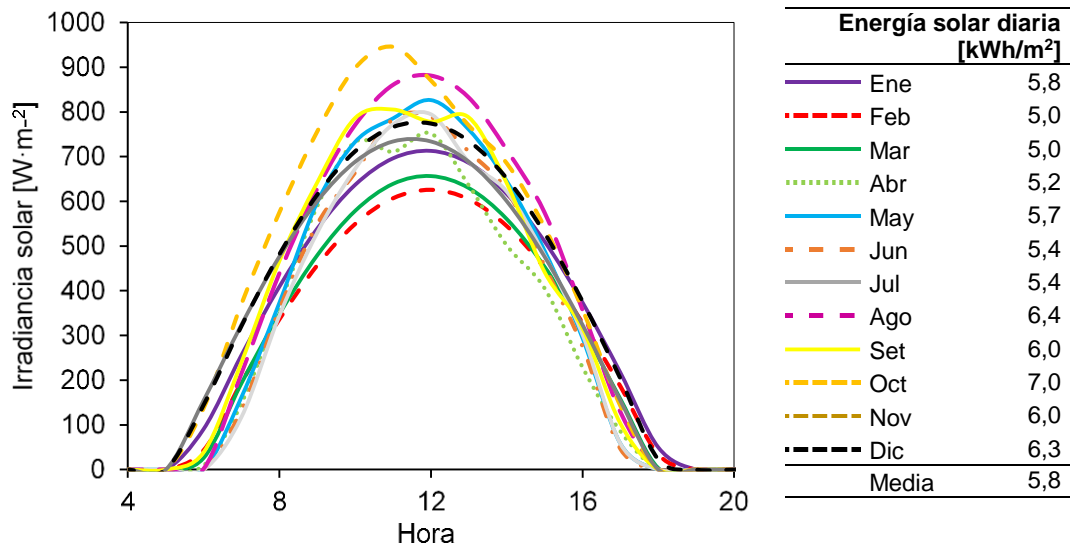


Figura 9. Radiación solar que incide sobre el plano horizontal para Imata, año 2019.

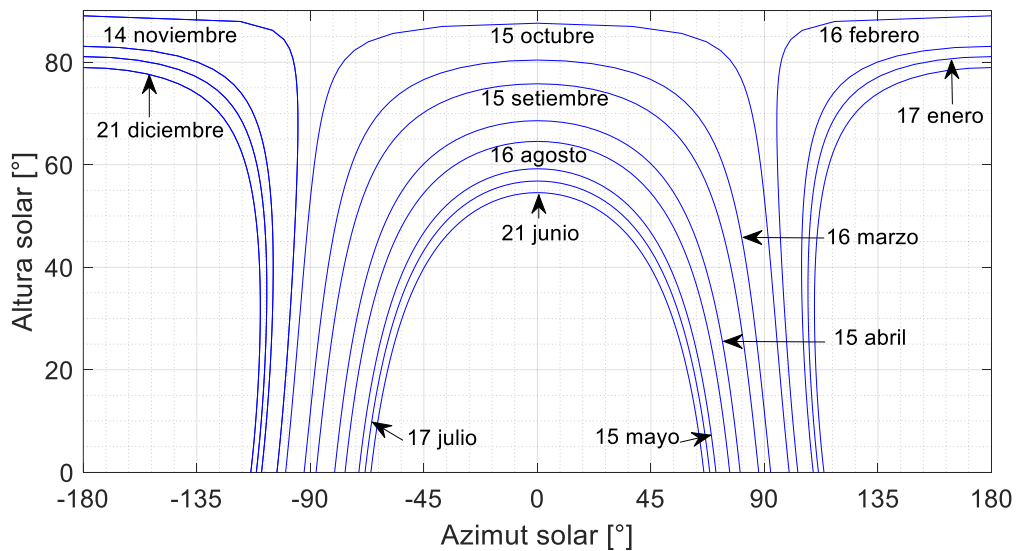


Figura 10. Gráfico solar cilíndrico para Imata, elaborado a partir del cálculo del azimut y altura solar para la latitud de 15,8391° S.

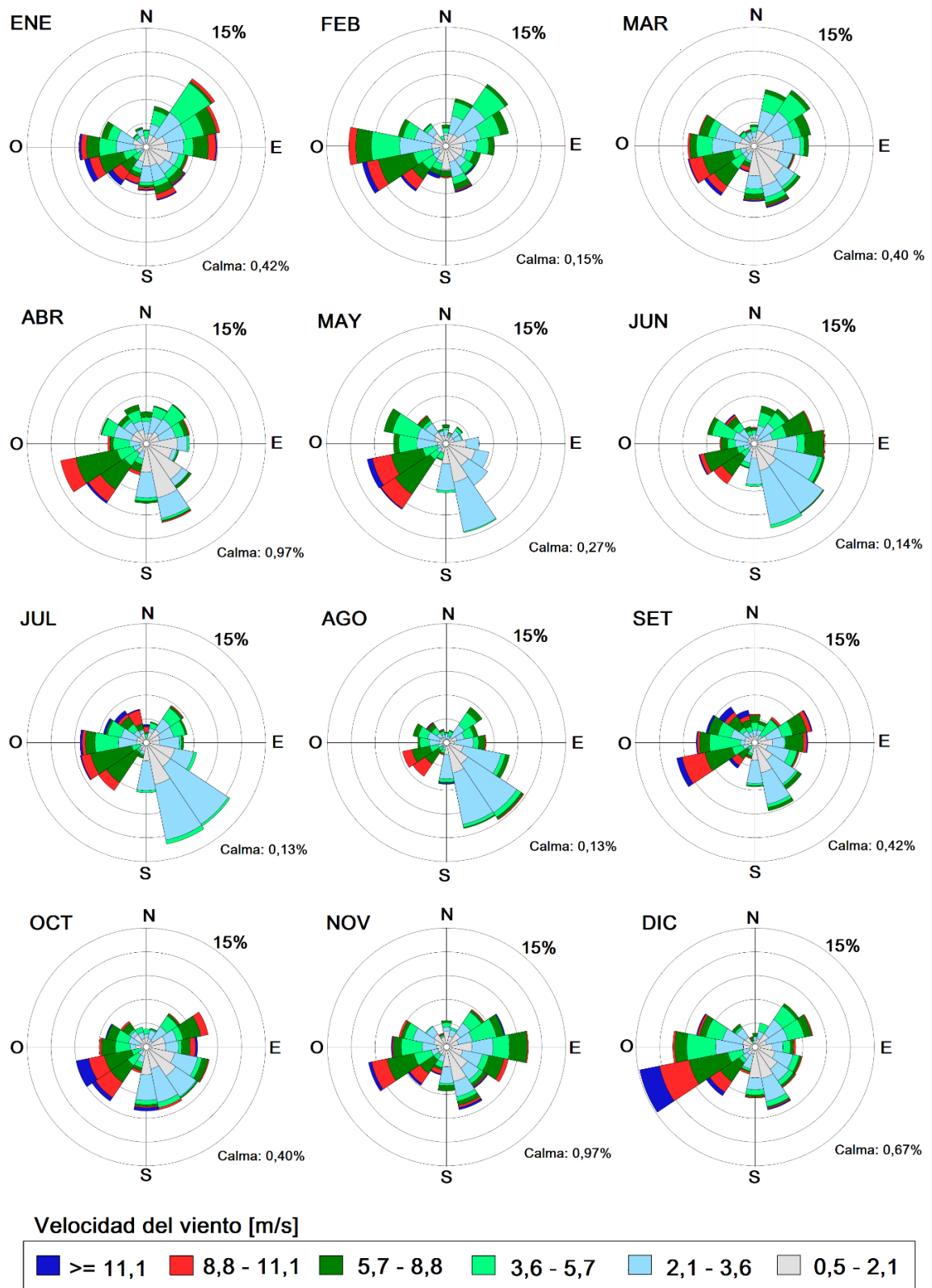


Figura 11. Rosa de viento mensual para Imata, año 2019.

En la figura 11 se presenta la rosa de viento para cada mes del año 2019. La velocidad media anual del viento es 3,7 m/s, siendo más intensos en enero y diciembre; y menos

intensos en agosto (ver tabla 3), las velocidades predominantes provienen de la dirección oeste sudoeste (vientos de mayor magnitud) y del sur sudeste (vientos de menor magnitud). El 0,42 % de horas permanece en estado de calma. En la figura 12, se aprecia un análisis mensual y las velocidades de viento entre 0,5 m/s y 3,6 m/s son más frecuentes durante todo el año, seguidas del intervalo 2,1 m/s a 3,6 m/s.

Tabla 3. Velocidad y dirección predominante del viento durante el año 2019.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Velocidad promedio	4,1	3,8	3,4	3,4	3,6	3,7	3,8	3,0	4,0	3,9	3,7	4,1
Dirección predominante	NE	O	OSO	OSO	SSE	SSE	SSE	SE	OSO	OSO	OSO	OSO
Dirección secundaria	ENE	OSO	NE	SSE	SSO	SE	SE	SSE	SSE	SO	E	O

En calma: 0,42 %

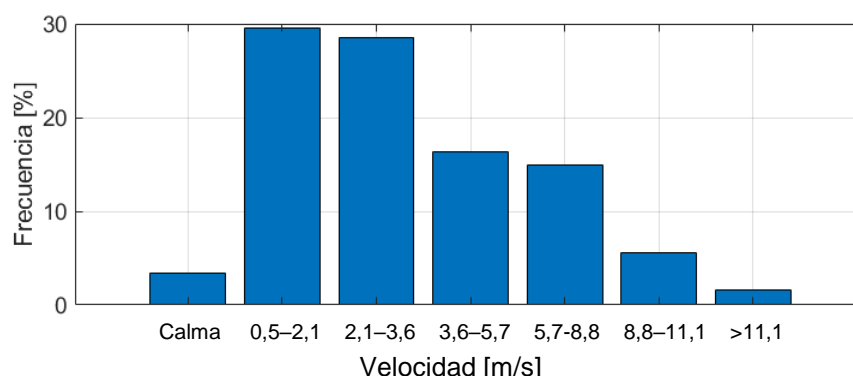


Figura 12. Frecuencia de la velocidad del viento en Imata, año 2019. Velocidad media igual a 3,6 m/s.

3.2.2. Comparación con otros climas

El clima de Imata es comparado con el clima de otros lugares por ejemplo Lima. La figura 13 muestra la clasificación climática para el Perú según Köppen-Geiger, se observa que Imata pertenece al clima ET: tundra alpina, con temperaturas bajas durante todo el año, mientras Lima se encuentra en la zona BWh árido cálido.

A estos dos lugares (Imata y Lima) se les compara con el clima de otra ciudad que posee cuatro estaciones bien definidas durante el año, por ejemplo, París con clasificación climática según Köppen Cfb: clima oceánico. En la tabla 4 se presenta las medias anuales y en la figura 14 se muestran los valores medios mensuales, así como las medias máximas

y mínimas. Respecto a las temperaturas medias, Imata posee menor la media anual $\bar{T}_e = 3,7\text{ }^\circ\text{C}$, con medias mensuales que varían de $5,3\text{ }^\circ\text{C}$ y $1,0\text{ }^\circ\text{C}$. La oscilación térmica diaria anual es de $15,3\text{ }^\circ\text{C}$. Pese a que la ciudad de Lima (media anual $\bar{T}_e = 18,7\text{ }^\circ\text{C}$) tiene mayor temperatura promedio que la de París (media anual $\bar{T}_e = 11,3\text{ }^\circ\text{C}$), su amplitud térmica diaria anual ($7,7\text{ }^\circ\text{C}$) es menor a la de París ($16,1\text{ }^\circ\text{C}$). Las estaciones del año en París están bien definidas, a diferencia de Lima o Imata.

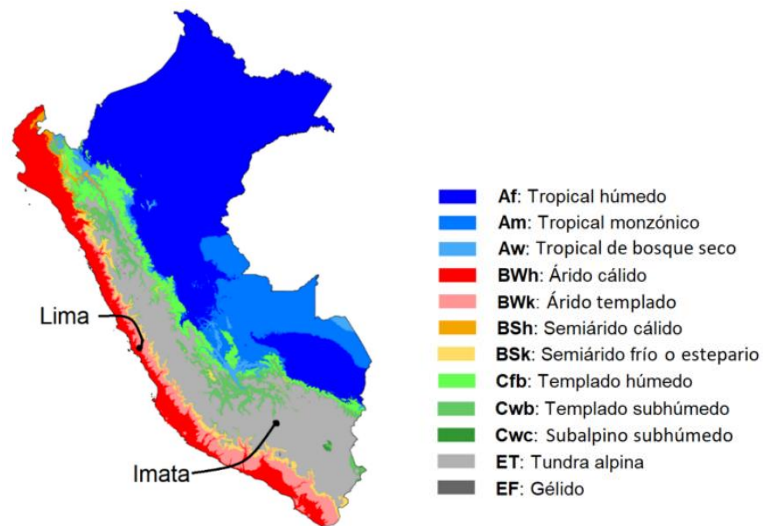


Figura 13. Clasificación climática del Perú según Köppen-Geiger [117].

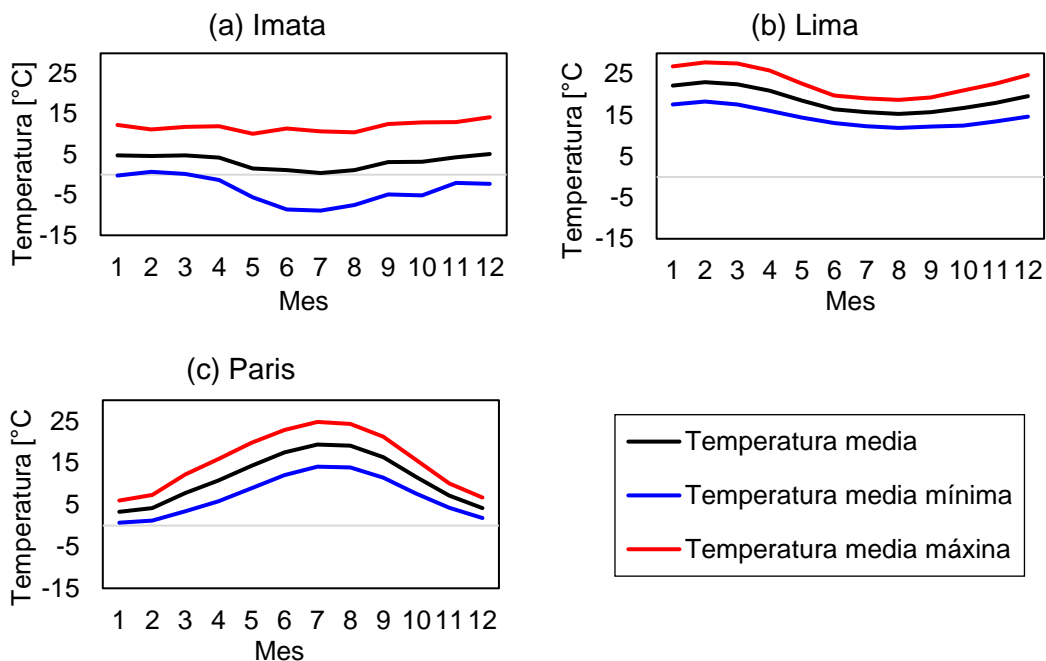


Figura 14. Temperaturas mensuales para (a) Imata, (b) Lima y (c) París.

Tabla 4. Temperaturas características de 3 lugares.

	\bar{T} [°C]	$\bar{T}_{m\acute{a}x}$ [°C]	$\bar{T}_{m\acute{i}n}$ [°C]
Imata	3,7	12,1	-3,2
Lima	18,7	23,0	15,3
Paris	11,3	19,4	3,3

Es importante tener en cuenta que las características de las estaciones del año en Perú dependen de muchos factores como las condiciones geográficas, la altitud y dan como resultados climas muy particulares en cada zona del país.

3.3. Conclusión del capítulo

Imata es un centro poblado altoandino situado al Sur del Perú a 4500 msnm. Le corresponde un clima ET: tundra alpina según la clasificación climática del Perú basada en Köppen-Geiger.

Se analizó el clima de Imata para el año 2019, obteniéndose los valores promedios de temperatura y humedad relativa iguales a 3,7 °C y 62,8 %, respectivamente. En el registro histórico se alcanzó temperaturas de hasta -20 °C, principalmente en época de heladas (entre junio y agosto). Aunque se registró temperaturas bajas en Imata, principalmente durante las noches, la oscilación térmica diaria fue igual a 15,3 °C en promedio anual. Asimismo, se confirmó que en Imata no puede hablarse de meses cálidos, simplemente hay meses menos fríos como noviembre o diciembre y meses fríos como junio o julio. También es una región con un alto potencial solar obteniéndose una energía solar diaria que incide sobre el plano horizontal igual a 5,8 kWh/m².

Las precipitaciones son frecuentes principalmente entre enero y marzo, mientras en la época de heladas es escasa. La velocidad promedio fue de 3,7 m/s y los vientos predominantes provienen de la dirección oeste sudoeste (vientos de mayor magnitud) y del sur sudeste (vientos de menor magnitud).

IV.DESARROLLO EXPERIMENTAL, METROLÓGICO Y ANÁLISIS DE DATOS

Este capítulo presenta el proceso de recolección y análisis de datos. La primera parte se enseña el desarrollo e implementación del dispositivo de registro de datos, que permitió recolectar información en Imata sin la necesidad de trasladarnos hasta Imata con tanta frecuencia. Se muestra la idea conceptual y los detalles técnicos del dispositivo; así como el proceso de calibración. El segundo punto, se enfoca en el proceso de recolección de datos realizados con los dispositivos implementados y encuestas presenciales a modo de complemento. La tercera parte abarca un análisis de los parámetros registrados, tanto parámetros físicos como personales de la preferencia térmica de los pobladores. Se analizan la temperatura interior, la humedad relativa interior, el aislamiento de la vestimenta, nivel de actividad y los parámetros climáticos exteriores registrados con la estación Davis Vantage Pro 2 Plus.

4.1. Dispositivo de registro de datos

Se desarrolló un dispositivo electrónico para el registro de 7 parámetros: temperatura, humedad relativa, voto de sensación térmica, miembro de la familia (selector lineal de 6 posiciones), vestimenta (con 9 pulsadores con el tipo de vestimenta usada por los habitantes de la zona); así como el voltaje de la batería y la fecha y hora del registro [118]. Más adelante, se le nombró: “Dispositivo TSVR” por sus siglas en inglés (*Thermal Sensation Vote Recorder*), el cual utiliza el sensor DHT22, que mide la temperatura y la humedad relativa. Dicho dispositivo se empleó para el registro de información sin la presencia del investigador. La inversión para el desarrollo de dispositivo TSVR fue alrededor de 140 soles y cada uno de sus componentes fue adquirido en el mercado local. La programación se llevó a cabo mediante el Arduino IDE [119], el cual es un software gratuito. Se construyeron 8 dispositivos para el registro de información necesaria que posteriormente fueron entregados a pobladores de Imata.

El algoritmo de funcionamiento del dispositivo TSVR se explica en la figura 15. El dispositivo TSVR utiliza un microcontrolador Atmega328PU, que está programado para permanecer en modo de suspensión (modo de ahorro de energía) cuando el dispositivo no

se esté utilizando. El microcontrolador funciona en paralelo en dos modos: el primero corresponde al chip del reloj y el segundo funciona cuando se presiona algún botón en el dispositivo. El reloj tiene una salida que genera una señal de onda cuadrada de 1 Hz. Una vez que se establece en alto, el temporizador aumenta en 1 segundo. Lo siguiente es determinar si la hora actual se encuentra entre un cierto rango de tiempo (por ejemplo, una hora de inicio 6:00 y una hora de finalización 19:00). Dentro de ese intervalo, "¿se presionó algún botón durante el último intervalo de una hora?" se pregunta. Si no se registró información, se activa una alarma (durante 5 segundos) como recordatorio para que las personas utilicen el dispositivo. Si los usuarios registran datos durante la última hora, la alarma no se activa.

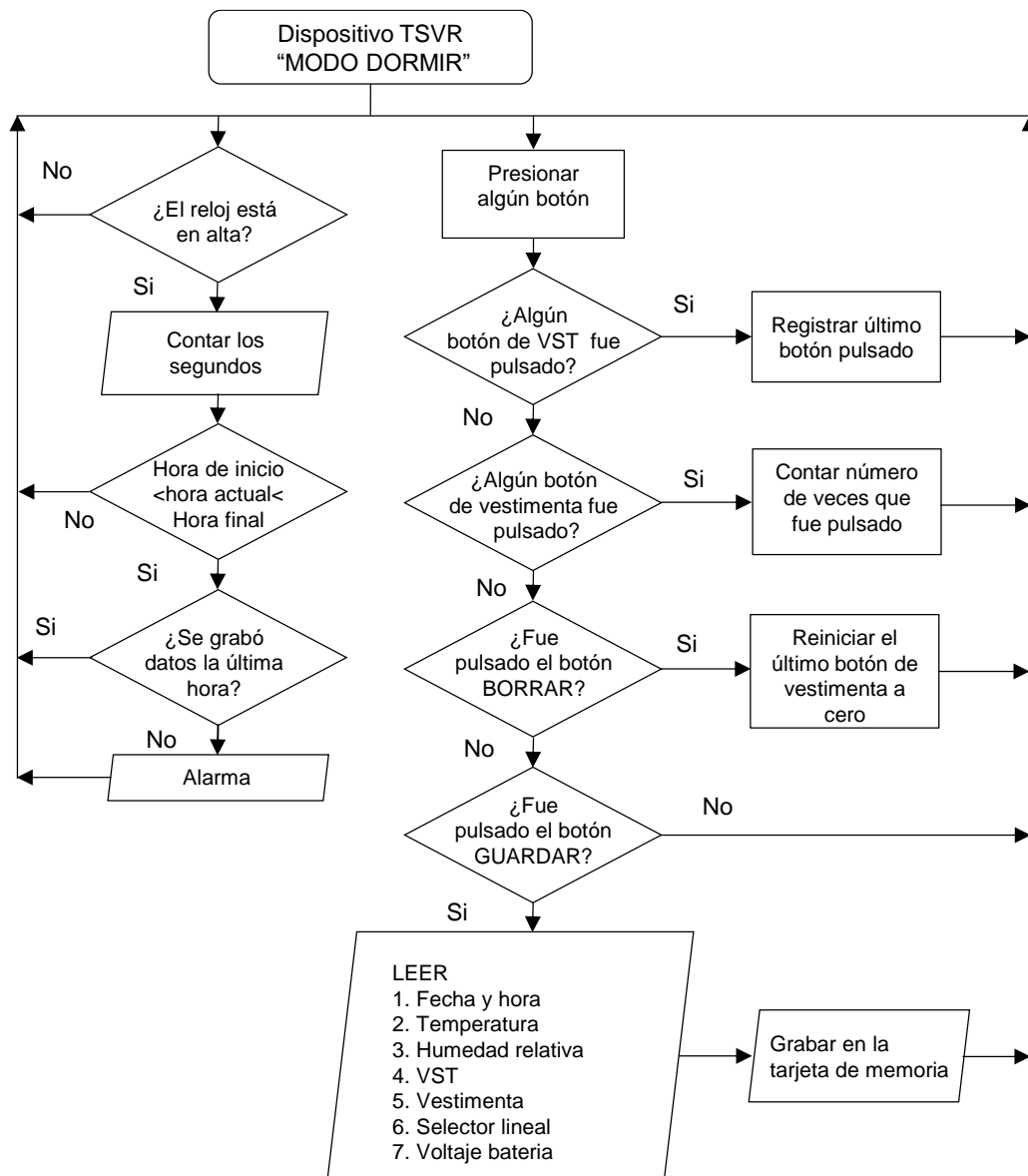


Figura 15. Algoritmo de funcionamiento del dispositivo TSVR [118].

En paralelo, cuando un botón es presionado, comienza a buscar dicho botón mediante las siguientes interrogantes: (a) ¿se presionó algún botón de sensación térmica? con respuesta afirmativa se registra el último botón presionado, (b) ¿se presionó algún botón de vestimenta? con una respuesta afirmativa aumenta el contador correspondiente a cada botón, (c) ¿se presionó el botón de borrado? ante la respuesta afirmativa, reinicia a cero el contador del último botón de vestimenta borrado, (d) ¿el botón de guardar fue presionado? ante respuesta afirmativa, el microcontrolador lee toda la información anterior, junto con los demás parámetros deseados y son transferidos a la tarjeta de memoria microSD.

Cada dispositivo cuenta con un selector lineal de 6 posiciones que permite el registro de personas que viven en la misma vivienda. Cada posición indica un miembro de la familia que está registrando información.

El diseño del circuito impreso se desarrolló en el programa KiCad (previamente se implementó en un protoboard para verificar su correcto funcionamiento). Se diseñaron dos placas: una con una placa de fibra de vidrio laminada revestida de cobre de doble cara y la otra con una placa de baquelita laminada revestida de cobre de una cara. La figura 16 muestra el esquema de pistas realizado en el software KiCad. El proceso de transferencia de calor del circuito se llevó a cabo en ambas placas.

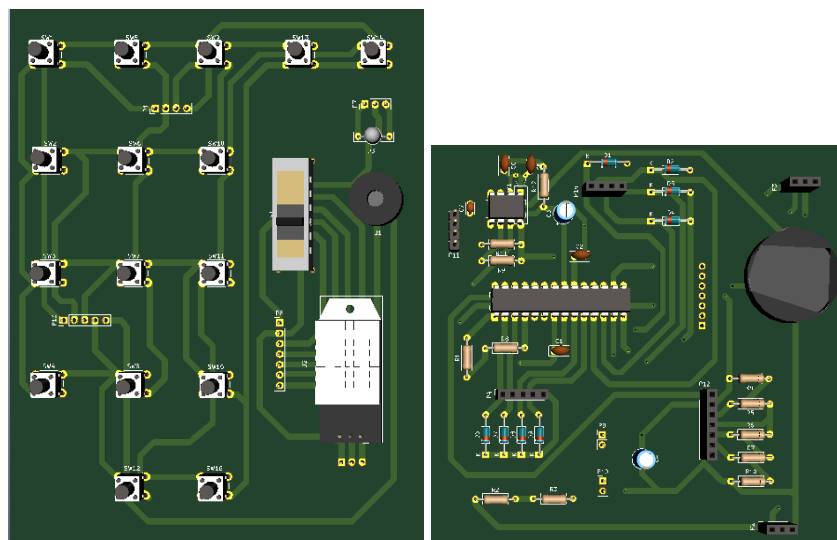


Figura 16. Diseño de las dos placas del dispositivo TSVR, realizado en KiCad.

El sensor DHT22, un sensor digital de temperatura y humedad de bajo costo, es utilizado en el dispositivo, su sensor de temperatura tiene una precisión de $\pm 0,5^\circ \text{C}$ y su sensor de

humedad relativa tiene una precisión de 2-5%. Las características de los componentes utilizados en el dispositivo TSVR se exponen en la tabla 5.

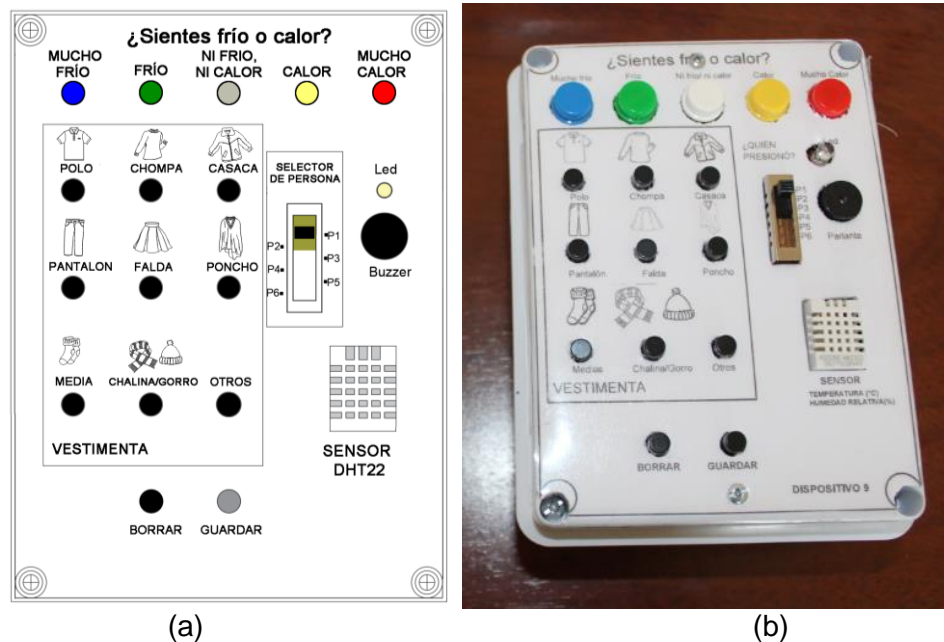


Figura 17. (a) Ilustración de la disposición de botones y sensores; y (b) fotografía del dispositivo TSVR desarrollado para la investigación.

Tabla 5. Especificación de los componentes del dispositivo TSVR.

Componente	Características
Sensor Temperatura/HR DHT22 ¹¹	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3 a 5 V de potencia y E/S ▪ Máximo 2,5 mA durante la conversión ▪ 0 -100% de lecturas de humedad con 2 - 5 % de precisión ▪ Precisión de temperatura de -40 a 80 °C ± 0,5 °C
Microcontrolador ATMEGA 3228P ¹²	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 8-bit ▪ Voltaje de funcionamiento 1,8 V - 5 V ▪ 23 entradas/salidas programables ▪ Memoria Flash de 32 KB ▪ SRAM 2 KB and EEPROM 1 KB
Reloj serial en tiempo real DS1307	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 56 bytes, con respaldo de batería ▪ Interfaz serial I²C ▪ Señal de salida de onda cuadrada programable ▪ Consume menos de 500 nA en batería de respaldo con oscilador en marcha ▪ Rango de temperatura: -40 °C a + 85 °C
Otros	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tarjeta microSD, selector lineal (6 posiciones), zumbador (5V) resistencias, condensadores, LED RGB, oscilador, diodos, caja de paso, porta pilas, interruptor, cables.

¹¹ Aosong Electronics Co., Ltd. Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22

¹² ATMEL Corporation, ATMEGA328P Datasheet

El dispositivo fue diseñado para almacenar información en una tarjeta microSD en formato csv. Además, el voltaje requerido es de 4,5 V, e internamente, hay una batería CR2032 como respaldo para el reloj.

Por último, todos los componentes están contenidos dentro de una caja de plástico (largo: 0,15; ancho: 0,10 m y altura: 0,07 m) como se muestra en la figura 17. El tiempo total requerido para completar el montaje de un dispositivo fue de 3 días, laborando 8 horas cada día (24 horas).

4.1.1. Calibración de los dispositivos

La calibración de los dispositivos TSVR se realizó con el dispositivo de registro Delta Ohm HD 32.3 (en el ANEXO III se presentan sus especificaciones técnicas), el proceso se llevó a cabo al interior de una vivienda en el centro poblado de Imata (ver figura 18) antes de ser entregados a pobladores de Imata.



Figura 18. Fotografía de los dispositivos Delta Ohm HD 32.3 y TSVR al interior de una vivienda de Imata.

La figura 19 presenta la curva de calibración del dispositivo TSVR 1 (D1) donde T_{TSVR} representa la temperatura registrada con el dispositivo TSVR y T_{DO} representa la temperatura registrada con el sensor Delta Ohm HD 32.3; mientras HR_{TSVR} representa la humedad relativa medida con el dispositivo TSVR y HR_{DO} representa la humedad relativa registrada con el sensor Delta Ohm HD 32.3. Además, en la tabla 6 se presenta la correlación para cada dispositivo implementado.

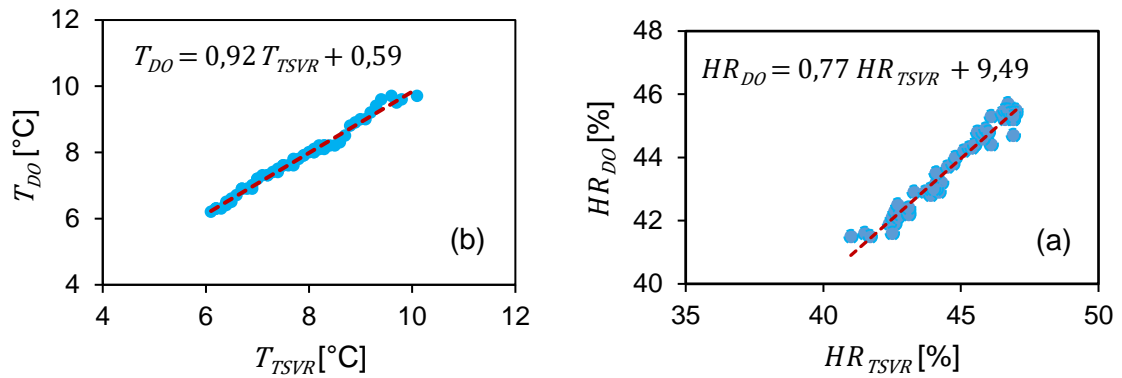


Figura 19. Curva de calibración de D1: (a) temperatura de TSVR (T_{TSVR}) y temperatura del dispositivo Delta Ohm (T_{DO}) y (b) humedad relativa de TSVR (HR_{TSVR}) y la humedad relativa del sensor de referencia Delta Ohm (HR_{DO}).

Tabla 6. Resultado de la calibración de dispositivos TSVR.

Dispositivo	Temperatura [°C]	Humedad relativa [%]
D1	$T_{DO} = 0,92T_{TSVR} + 0,59$	$HR_{DO} = 0,77 HR_{TSVR} + 9,49$
D2	$T_{DO} = 0,92T_{TSVR} + 1,12$	$HR_{DO} = 0,72 HR_{TSVR} + 8,41$
D3	$T_{DO} = 0,91T_{TSVR} + 1,37$	$HR_{DO} = 0,78 HR_{TSVR} + 12,98$
D4	$T_{DO} = 0,96T_{TSVR} + 0,66$	$HR_{DO} = 0,77 HR_{TSVR} + 4,09$
D5	$T_{DO} = 0,94T_{TSVR} + 0,67$	$HR_{DO} = 0,81 HR_{TSVR} + 5,00$
D6	$T_{DO} = 0,98T_{TSVR} + 0,71$	$HR_{DO} = 0,73 HR_{TSVR} + 1,86$
D7	$T_{DO} = 0,88T_{TSVR} + 1,70$	$HR_{DO} = 0,84 HR_{TSVR} + 6,23$
D8	$T_{DO} = 0,87T_{TSVR} + 1,24$	$HR_{DO} = 0,70 HR_{TSVR} + 9,44$

4.1.2. Dispositivos entregados

Luego del proceso de calibración se identificó a posibles usuarios para la entrega de dispositivos, así ellos registren información durante los periodos que el investigador no se encuentre en Imata. Los seleccionados para la entrega de dispositivos fueron 4 familias para que lo utilicen al interior de sus viviendas, 10 alumnos de la institución educativa para registrar información en su aula de clases (2 dispositivos para alumnos de quinto y sexto de educación primaria), una en la posta médica, una en un ambiente de la municipalidad.

Antes de entregar los dispositivos se realizó una breve explicación de su funcionamiento y el manejo adecuado a los usuarios. Se les recomendó protegerlo de golpes, también se les entregó un pequeño manual de uso e indicaciones a seguir y se les informó a que persona le correspondía la posición (número) en el selector lineal. Se indicó que los

dispositivos permanezcan en un mismo ambiente y fueron entregados a partir de abril del 2019. Algunas fotografías de la entrega de los dispositivos se aprecian en la figura 20.



Figura 20. Entrega de dispositivos TSVR a dos usuarios.

4.2. Encuestas realizadas y proceso de evaluación

Se elaboró una encuesta como apoyo para recolectar características relevantes para el estudio. Esta encuesta se dividió en 3 secciones, la primera parte corresponde a información personal, la segunda a información de vestimenta y de alimentación y la tercera a información sobre la sensación térmica de los encuestados respecto al ambiente que los rodea. El modelo de la encuesta utilizado en Imata se muestra en el ANEXO IV.

Tabla 7. Escalas utilizadas para el voto de sensación térmica (VST) y la preferencia térmica en el estudio.

Voto de sensación térmica (VST)	Muy frío (MF), Frío (F), Neutro (N), Calor (C), Mucho calor (MC)
Preferencia térmica	Más frío (+F), Sin cambio (SC), Más caliente (+C)

El dispositivo Delta Ohm HD 32.3 (figura 21) fue utilizado para registrar los parámetros físicos (la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad de aire, la temperatura del globo y la temperatura radiante) cuando se realizaban las encuestas in situ, con la presencia de la investigadora. Las encuestas se realizaron principalmente en las aulas de los niveles primario y secundario del centro educativo durante las horas académicas (ver figura 22). Las escalas utilizadas para el voto de sensación térmica (VST) fueron 5 y para

la preferencia térmica fueron 3 y son mostradas en la tabla 7. Las encuestas se realizaron durante el año 2019.



Figura 21. Instrumento Delta Ohm HD 32.3 para la medición de parámetros como la temperatura, la humedad relativa y la velocidad de viento en Imata.



(a)



(b)



(c)

Figura 22. Encuestas realizadas en el centro educativo de Imata: (a) aula de 3° de secundaria, (b) aula del 4° de primaria y (c) aula de 1° de secundaria.

4.3. Análisis de datos obtenidos

Las mediciones fueron desarrolladas en ambientes interiores y exteriores (ver tabla 8), se obtuvo un total de 524 conjuntos de datos, de los cuales 292 fueron realizadas con encuestas presenciales y 232 fueron registradas con los dispositivos. Se encuestó a 114 personas en ambientes interiores.

Tabla 8. Número de personas encuestadas por ambiente.

Tipo de registro	Lugar	N° de personas	N° de encuestas
Encuestas	Albergue	4	30
	Jardín de niños	12	12
	Aulas	93	235
	Otros	7	17
Dispositivos	Viviendas	4	51
	Aulas	10	140
	Otros	3	41

Tabla 9. Número de personas encuestadas por género y edad.

Edad	N° de personas	Género	
		Mujer	Hombre
3 a 5	11	4	7
6 a 9	13	7	7
10 a 13	41	18	26
14 a 17	36	13	23
18 a 21	4	3	1
22 a 25	4	4	0
26 a 29	5	1	4
30 a 33	2	1	1
34 a 37	1	0	1
Más de 38	5	4	1

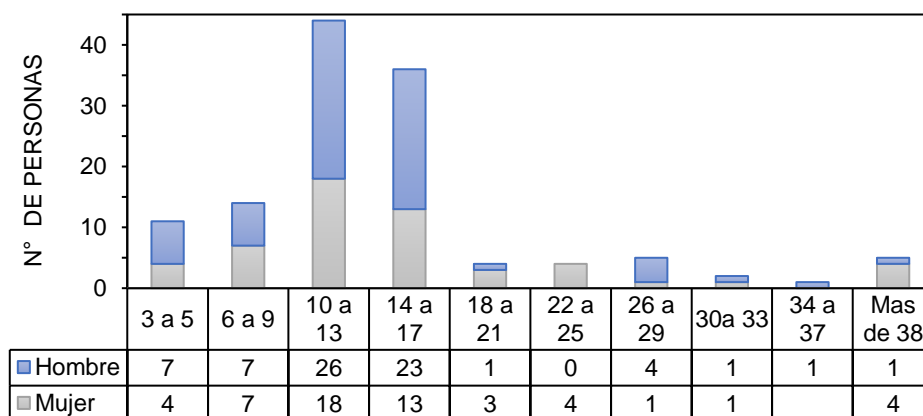


Figura 23. Número de mujeres y hombres encuestados en Imata.

De la población encuestada, un mayor porcentaje de la población tiene entre 10 y 17 años de edad, del total de datos las mujeres representan el 46 % y los hombres el 54 % (ver tabla 9 y figura 23). La edad promedio de los encuestados es $16,3 \pm 8,6$ años.

4.3.1. Análisis del voto de sensación térmica VST

El VST reportado por las personas de Imata se presenta en la tabla 10 y la figura 24. En las encuestas, la mayoría fue realizada a los alumnos de la institución educativa y el VST que predomina es el de N (33,8 %), seguido de F (31,7 %), MF (14,4 %), C (14,4 %) y MC (5,7 %) para los ambientes interiores.

Tabla 10. VST de los pobladores según el ambiente evaluado y tipo de registro de datos.

Tipo de registro	Lugar	Voto de sensación térmica VST (*)						
		MF	F	N	C	MC		
Encuestas	Albergue	N°	6	15	8	1	0	
		%	20,0	50,0	26,7	3,3	0,0	
	Jardín de niños	N°	2	4	2	3	1	
		%	16,7	33,3	16,7	25,0	8,3	
	Aulas	N°	11	71	94	45	13	
		%	4,7	30,3	40,2	18,8	6,0	
	Otros	N°	2	5	3	6	1	
		%	11,8	29,4	17,7	35,3	5,8	
	Dispositivos	Viviendas	N°	14	14	19	1	3
			%	27,5	27,5	37,2	2,0	5,8
Aulas		N°	9	42	52	24	13	
		%	6,4	30,0	37,2	17,1	9,3	
Otros		N°	26	13	1	1	0	
		%	63,4	31,7	2,4	2,4	0,0	

(*) Muy frío (MF), frío (F), neutro(N), calor (C), mucho calor (MC).

La institución educativa, para el año 2019, tenía 120 alumnos matriculados entre el nivel primaria (61 alumnos [120]) y el nivel secundario (60 alumnos [121]), de acuerdo a la información recolectada, al menos se les encuestó una vez a 103 estudiantes, representando el 85,1 % del total de los alumnos.

De la tabla 11, el voto de preferencia térmica sólo se obtuvo a través de encuestas presenciales. Un mayor porcentaje de encuestados indicaron una preferencia térmica de más caliente (+C) en ambientes interiores. Respecto al total de encuestas realizadas en ambientes interiores el 69,9 % de personas prefieren ambientes más calientes, el 23 % consideraron ambientes sin cambios y el 7,1 % ambientes más fríos.

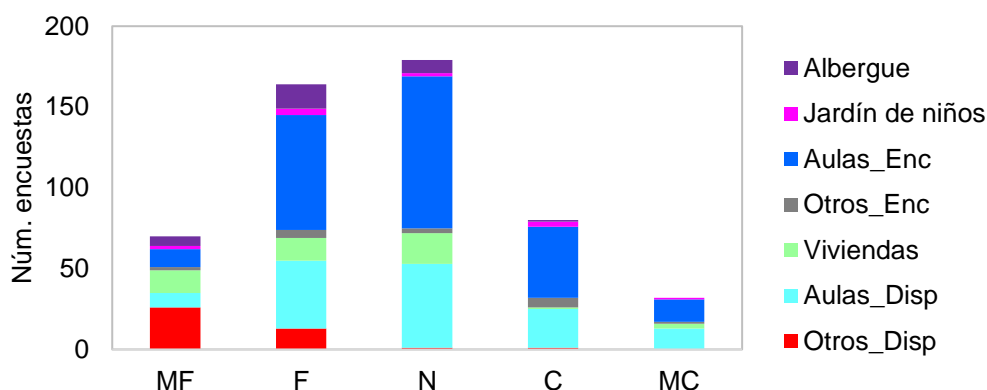


Figura 24. Votos de sensación térmica según el ambiente evaluado.

Tabla 11. Preferencia térmica indicada por los encuestados en el trabajo de campo.

Tipo de registro	Lugar	Preferencia térmica*			
			+F	SC	+C
Encuestas	Albergue	Nº	0	3	32
		%	0,0	8,6	91,4
	Jardín de niños	Nº	0	6	6
		%	0,0	50,0	50,0
	Aulas Enc.	Nº	23	60	180
		%	8,7	22,8	68,4
	Otros Enc.	Nº	0	6	10
		%	0,0	37,5	62,5

(*) Más frío (+F), sin cambio (SC), más caliente (+C).

4.3.2. Análisis de la temperatura

Con la información recopilada se analiza la temperatura interior (T_i) y la temperatura exterior (T_e). Asimismo, la información es dividida según el tipo de actividad reportada.

4.3.2.1. Temperatura interior

Para estudiar T_i , se analizan dos casos. La primera se denomina “datos totales” y utiliza toda la información recolectada. La segunda se denomina “datos por tipo de actividad” y abarca la información según el tipo de actividad reportada por los encuestados (actividad pasiva, moderada y elevada).

a. Caso 1: “datos totales”

En la figura 25, se presentan los valores de T_i registrados con los dispositivos y durante las encuestas. Los círculos representan el número de respuestas de VST para una T_i dada y están en proporción con el radio (círculo más grande equivalente a 11 votos). Se realizó

un análisis para determinar T_n y los rangos aceptables de bienestar. Además, se consideró la base de datos que corresponde a las 524 observaciones (una observación es igual a un conjunto de datos) y por último se calculó la temperatura media \bar{T}_i y la desviación estándar (σ) para cada conjunto de T_i con similar VST, tal como aparecen en la tabla 12.

La σ se emplea como una medida de la dispersión de las respuestas del VST, y por lo tanto sirve para determinar los estratos en que se pueden ordenar éstas. Se estima que, para datos normalmente distribuidos, el rango de $\pm 1\sigma$ incluye al 68 % de las respuestas y $\pm 2\sigma$ incluye al 95 %. Para datos no distribuidos normalmente este porcentaje puede variar, por lo que se recomienda obtener el mayor número de respuestas en los estudios de campo para lograr una distribución lo más cercana a la “normal” [122].

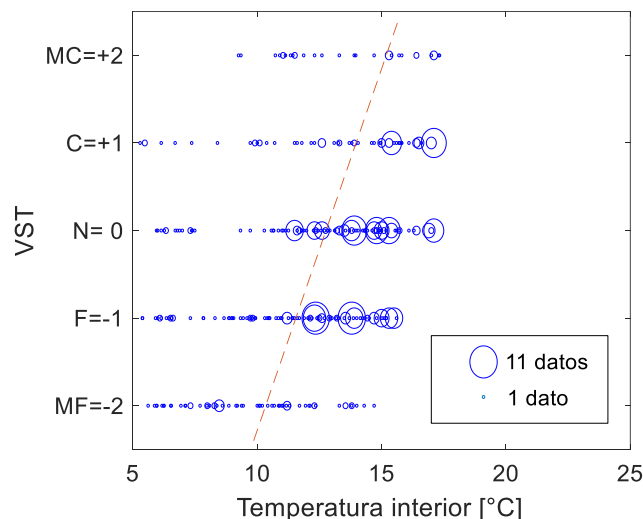


Figura 25. La temperatura interior (T_i) y el VST de los encuestados en Imata. El radio de los círculos está en proporción del número de datos obtenidos para cada punto T_i y VST.

En la tabla 12, para cada grupo de valores de T_i correspondiente a un mismo VST, se calcularon las temperaturas medias (\bar{T}_i), las temperaturas mínimas ($\bar{T}_i - \sigma$), las temperaturas mínimas extensas ($\bar{T}_i - 2\sigma$), las temperaturas máximas ($\bar{T}_i + \sigma$) y las temperaturas máximas extensas ($\bar{T}_i + 2\sigma$). Las temperaturas mínimas y máximas permiten determinar la zona reducida (ZR); mientras las temperaturas mínimas extensas y máximas extensas delimitan la zona extensa (ZE).

Tabla 12. Valores de T_i [°C] para el caso 1 (“datos totales”): media (\bar{T}_i), mínimo extenso ($\bar{T}_i - 2\sigma$), mínimo ($\bar{T}_i - \sigma$), máximo ($\bar{T}_i + \sigma$) y máximo extenso ($\bar{T}_i + 2\sigma$) para cada VST.

σ	VST		$\bar{T}_i - 2\sigma$	$\bar{T}_i - \sigma$	\bar{T}_i	$\bar{T}_i + \sigma$	$\bar{T}_i + 2\sigma$
2,91	MF	-2	3,50	6,41	9,33	12,24	15,16
3,07	F	-1	5,61	8,69	11,76	14,83	17,90
2,72	N	0	7,86	10,58	13,30	16,02	18,75
3,36	C	1	7,07	10,43	13,79	17,15	20,51
2,60	MC	2	8,56	11,16	13,76	16,36	18,96

La figura 26 presenta la regresión lineal entre el VST (MF, F, N, C, MC) y las temperaturas: mínimas extensas (línea roja), mínimas (línea azul), promedios (línea negra), máximas (línea verde) y máximas extensas (línea magenta). Se observa que estas líneas no son paralelas; además la gráfica es acompañada con las relaciones lineales obtenidas.

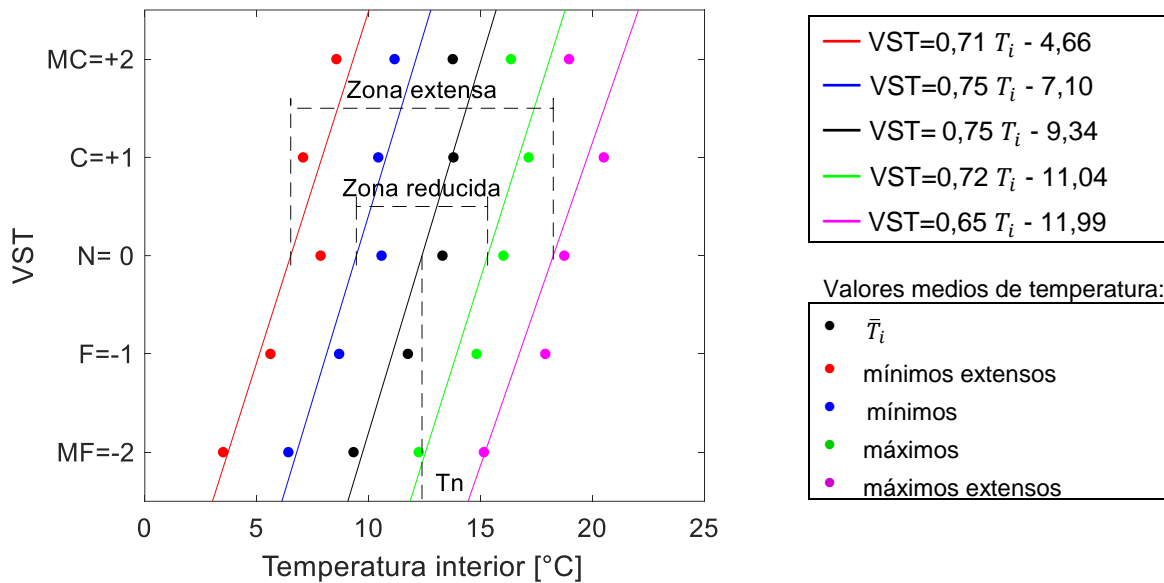


Figura 26. Caso 1: “datos totales”: valores medios de temperatura para cada VST (MF, F, N, C, MC) y sus relaciones lineales (líneas de colores). $T_n = 12,39$ °C; $T_{min,ZE} = 6,52$ °C;

$$T_{max,ZE} = 18,26$$
 °C; $T_{min,ZR} = 9,45$ °C y $T_{max,ZR} = 15,32$ °C para VST = N.

Teniendo en cuenta la dispersión de todos los datos, llamaremos T_n a la temperatura que indica la correlación lineal para un VST = N ($0_{(VST=N)} = 0,75T_i - 9,34$), obteniendo $T_n = 12,39$ °C. La temperatura mínima de la ZR ($T_{min,ZR}$) y la temperatura máxima de la ZR ($T_{max,ZR}$) son calculadas con un procedimiento similar, se utiliza la corrección lineal para un VST = N, obteniendo $T_{min,ZR} = 9,45$ °C ($0_{(VST=N)} = 0,75T_i - 7,10$) y $T_{max,ZR} = 15,32$ °C ($0_{(VST=N)} = 0,72T_i - 11,04$). También, la temperatura mínima de la ZE ($T_{min,ZE}$) y la temperatura máxima de la ZE ($T_{max,ZE}$) son estimadas con su correlación lineal para un

VST = N; logrando los valores de $T_{min,ZE} = 6,52 \text{ °C}$ ($0_{(VST=N)} = 0,71T_i - 4,66$) y $T_{max,ZE} = 18,26 \text{ °C}$ ($0_{(VST=N)} = 0,65T_i - 11,99$). La diferencia entre los límites máximo y mínimo de temperatura de la ZR es $5,8 \text{ °C}$ y de la ZE es $11,74 \text{ °C}$.

De forma similar, se analiza la influencia del género de los encuestados (tabla 13), se obtiene $T_n = 12,14 \text{ °C}$ para los hombres, cuyo valor es menor respecto a T_n de las mujeres ($12,99 \text{ °C}$). La diferencia entre los límites máximo y mínimo de la temperatura de la ZE ($T_{max,ZE} - T_{min,ZE}$) es menor para las mujeres ($10,84 \text{ °C}$) en comparación con la diferencia obtenida por los hombres ($12,13 \text{ °C}$). Los hombres son más tolerantes a temperaturas más bajas y las mujeres son levemente más tolerantes a temperaturas altas.

Tabla 13. Límites de T_i [°C] de ZR y ZE determinados para el caso 1 (“datos totales”) y considerando el género del encuestado.

Temperatura			Total	Hombre	Mujer
Mínima	ZE	$T_{min,ZE}$	6,52	6,07	7,57
	ZR	$T_{min,ZR}$	9,45	9,10	10,28
Neutral		T_n	12,39	12,14	12,99
Máxima	ZR	$T_{max,ZR}$	15,32	15,17	15,70
	ZE	$T_{max,ZE}$	18,26	18,20	18,41

b. Caso 2: “datos por tipo de actividad”

En esta sección se clasifica la información considerando el nivel de actividad reportado por el encuestado, se utiliza sólo la información de las encuestas presenciales debido a que fue el único método de registro de datos de la actividad del poblador. El nivel de actividad es estimado con las tablas presentes en la norma ISO 7730. Se clasificó el nivel de actividad en tres, dependiendo de su intensidad: pasiva (menores a $1,2 \text{ met}$), moderada (entre $1,2 \text{ met}$ y 2 met) y elevada (mayor a 2 met). La unidad de medida del nivel de actividad es el met ($1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$).

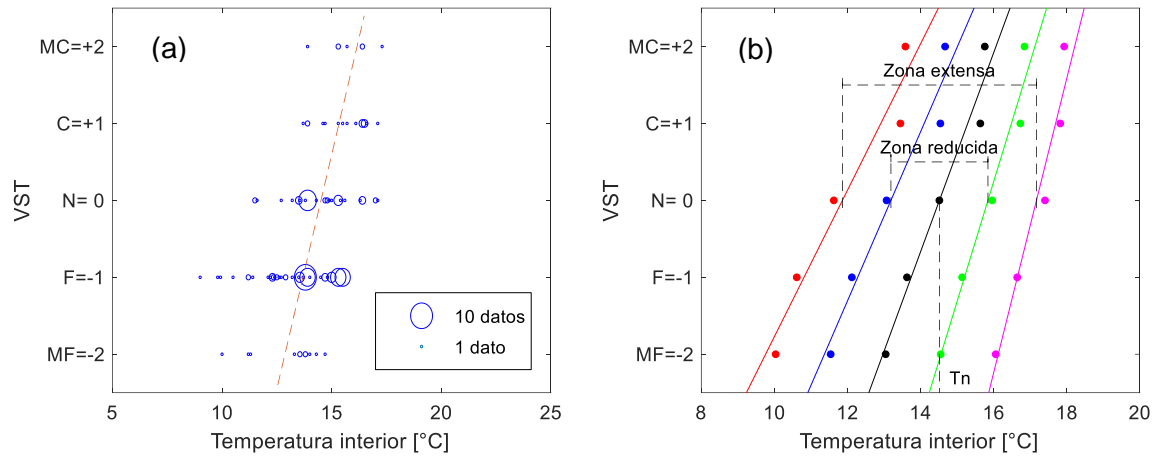


Figura 27. Actividad pasiva: (a) VST y T_i ; (b) cálculo de $T_n = 14,52$ °C y rangos de la ZE ($T_{min,ZE} = 11,86$ °C y $T_{max,ZE} = 17,17$ °C) y la ZR ($T_{min,ZR} = 13,19$ °C y $T_{max,ZR} = 15,84$ °C) a partir de las correlaciones lineales de temperatura media \bar{T}_i (•), mínimo extenso (•), mínimo (•), máximo (•) y máximo extenso (•) para VST=N.

El proceso de cálculo de los límites de temperaturas fue similar a la sección 4.3.2.1.a. De los datos recopilados para individuos con un nivel de actividad pasivo (figura 27), se obtiene los valores mínimo y máximo de la ZR ($T_{min,ZR} = 13,19$ °C y $T_{max,ZR} = 15,84$ °C); mientras que para la ZE resultan $T_{min,ZE} = 11,86$ °C y $T_{max,ZE} = 17,17$ °C. Además $T_n = 14,52$ °C. Las correlaciones lineales determinadas para las temperaturas medias \bar{T}_i ($VST=1,29T_i - 18,78$), mínima extensa ($VST=0,95T_i - 11,28$), mínima ($VST=1,10T_i - 14,49$), máximas ($VST=1,56T_i - 24,66$), y máxima extensa ($VST=1,91T_i - 32,85$) no son líneas paralelas.

Los datos recopilados para individuos con un nivel de actividad moderada son presentados en la figura 28 donde se estiman los valores mínimos y máximos de la ZR ($T_{min,ZR} = 12,09$ °C y $T_{max,ZR} = 15,38$ °C), los valores mínimos y máximos de la ZE ($T_{min,ZE} = 10,44$ °C y $T_{max,ZE} = 17,03$ °C) y $T_n = 13,74$ °C. Las correlaciones lineales obtenidas para las temperaturas promedio \bar{T}_i ($VST=0,74T_i - 10,22$), mínima extensa ($VST=0,87T_i - 9,14$), mínima ($VST=0,83 T_i - 9,99$), máximas ($VST=0,65 T_i - 10,09$), y máxima extensa ($VST=0,58T_i - 9,79$) no son líneas paralelas.

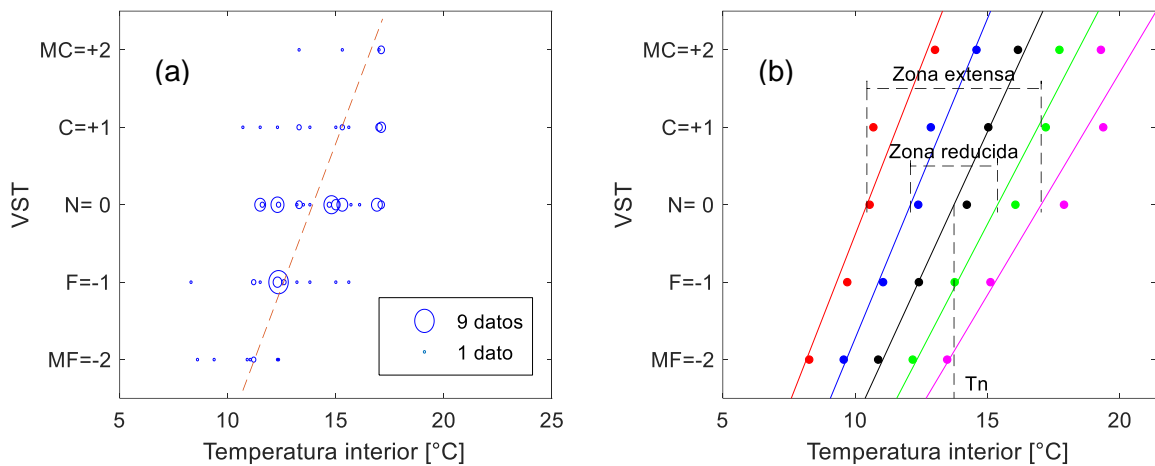


Figura 28. Actividad moderada: (a) VST y T_i ; (b) cálculo de $T_n = 13,74$ °C y rangos de la ZE ($T_{min,ZE} = 10,44$ °C y $T_{max,ZE} = 17,03$ °C) y ZR ($T_{min,ZR} = 12,09$ °C y $T_{max,ZR} = 15,38$ °C) a partir de las correlaciones lineales de temperaturas medias \bar{T}_i (•), mínimo extenso (•), mínimo (•), máximo (•) y máximo extenso (•) para VST=N.

Los datos recopilados para individuos con un nivel de actividad elevada (valores mayores a 2 met) son presentados en la figura 29. Al obtenerse sólo 47 datos, el análisis no es recomendable, principalmente por la falta de información para VST igual F, MF y MC. Por tanto, no se tienen en cuenta para el análisis porque no son representativos.

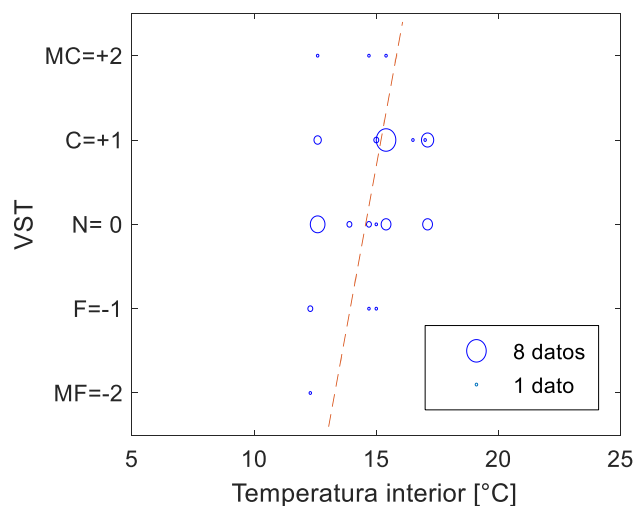


Figura 29. Datos para la actividad elevada. VST de los pobladores y T_i .

La tabla 14 muestra los rangos de temperatura para respuestas con un nivel de actividad pasiva y moderada. A medida que va en aumento el nivel de actividad de las personas, T_n disminuye y los rangos de temperatura también se desplazan.

Tabla 14. Límites de T_i [°C] de ZR y ZE determinados para el caso 2 (“datos por tipo de actividad”).

Temperatura		Pasiva	Moderada
Mínimo	ZE	$T_{min,ZE}$	11,86
	ZR	$T_{min,ZR}$	13,19
Neutra		T_n	14,52
Máximo	ZR	$T_{max,ZR}$	15,84
	ZE	$T_{max,ZE}$	17,17

4.3.2.2. Temperatura interior y exterior

La temperatura interior de bienestar o neutra se ve afectada por la temperatura exterior. El análisis se divide en dos: primero, la relación que existe entre la temperatura exterior media mensual (\bar{T}_e) frente a la temperatura interior (T_i) registrada durante la encuesta; y segundo, la relación entre la temperatura exterior (T_e) y T_i , ambas registradas durante la encuesta y en forma simultánea. La figura 30 muestra las mediciones de T_e respecto a los VST obtenidos, existen pocas respuestas de los individuos para VST igual a MC.

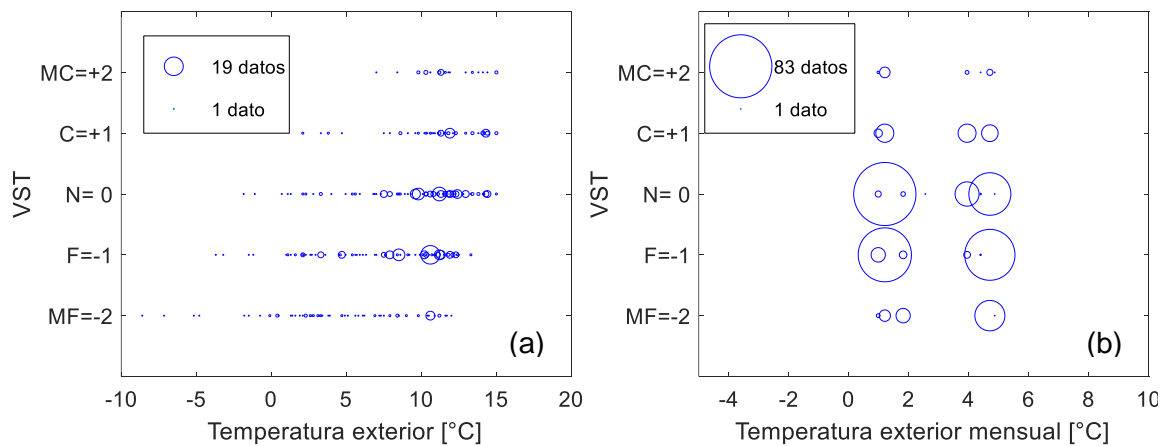


Figura 30. Información recopilada en Imata: (a) temperatura exterior (T_e) y VST registradas en forma simultánea; (b) temperatura exterior promedio mensual (\bar{T}_e) y VST.

a. Caso 1: “datos totales”

Primero, se analiza \bar{T}_e y T_i para todos los datos obtenidos (encuestas y dispositivos). En la figura 31, los valores de \bar{T}_e se ubican en el eje x, mientras los de T_i están en el eje y, los rangos de la ZE y la ZR son calculados utilizando $\sigma = 2,72$ °C de la tabla 12 y sólo para los

registros correspondientes a VST = N (círculos negros). Las respuestas para otros VST (MF, F, C y MC) están representados por los puntos azules.

En la figura 31, la línea magenta representa la correlación lineal entre \bar{T}_e y T_n (ecuación 1) sólo para los registros correspondientes a VST = N (círculos negros), considerándose T_n como la temperatura neutra T_n . Para determinar los límites de la ZE y la ZR se adiciona a la ecuación 1: $\pm\sigma$ (límites de la ZR = $T_n \pm \sigma$) y $\pm 2\sigma$ (límites de la ZE = $T_n \pm 2\sigma$). Las líneas discontinuas verdes representan los límites de la ZR ($T_{min,ZR} = 0,57 \bar{T}_e + 14,52$ y $T_{max,ZR} = 0,57 \bar{T}_e + 9,08$), mientras las líneas discontinuas negras simbolizan a los límites de la ZE ($T_{min,ZE} = 0,57 \bar{T}_e + 17,24$ y $T_{max,ZE} = 0,57 \bar{T}_e + 6,36$), todas estas líneas son paralelas a la línea que representa a la ecuación 1. La diferencia entre los límites máximo y mínimo de temperatura de la ZR es 5,44 °C y de la ZE es 10,88 °C. Las personas encuestadas parecen mostrar una preferencia por una gama más amplia de temperatura. Además, el 92,7 % de datos se ubican dentro de la ZE, mientras el 77,0 % se encuentra en la ZR.

$$T_n = 0,57 \bar{T}_e + 11,80 \quad (1)$$

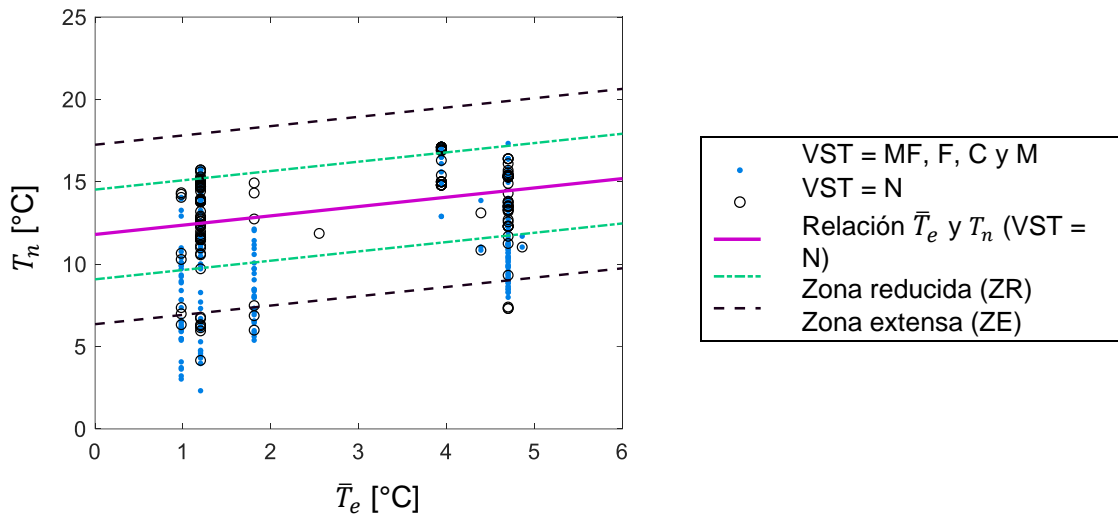


Figura 31. Relación entre \bar{T}_e y T_n (línea magenta) obtenida para valores de VST = N (○). Diferencia del rango de temperatura de la ZE es 10,88 °C y de la ZR es 5,44 °C estimados con $\sigma = 2,72$ °C.

De las ecuaciones de temperatura adaptativa mencionadas en la tabla 1, la propuesta por Humphreys [15] ($T_n = 11,9 + 0,534 \bar{T}_e$) posee coeficientes cercanos a los que se determinaron en la ecuación 1. La influencia de \bar{T}_e en las respuestas del VST es evidente.

Segundo, la correlación lineal de T_e y T_i (figura 32) con datos de $VST = N$ está expresada en la ecuación 2 y representada con la línea magenta de la figura 32. Debido a que la correlación lineal se realizó para valores de $VST = N$, a T_i es representada como T_n . Como la σ es la misma para el conjunto de datos de T_i , las amplitudes de los rangos de temperatura fueron iguales al caso anterior, resultando: 4,44 °C (ZR) y 10,88 °C (ZE). Las líneas discontinuas son paralelas a la línea magenta. Asimismo, se presentan los demás datos (puntos azules) que corresponden a las otras respuestas de VST (MF, F, C y MC). Se observa que solo el 87,9 % de valores de $VST = N$ se encuentran dentro de la ZE, mientras la ZR contiene 48,6 % de los datos. Este tipo de correlación no permite evaluar la neutralidad térmica ya que existe una mayor dispersión de datos.

$$T_n = 0,68 T_e + 6,36 \quad (2)$$

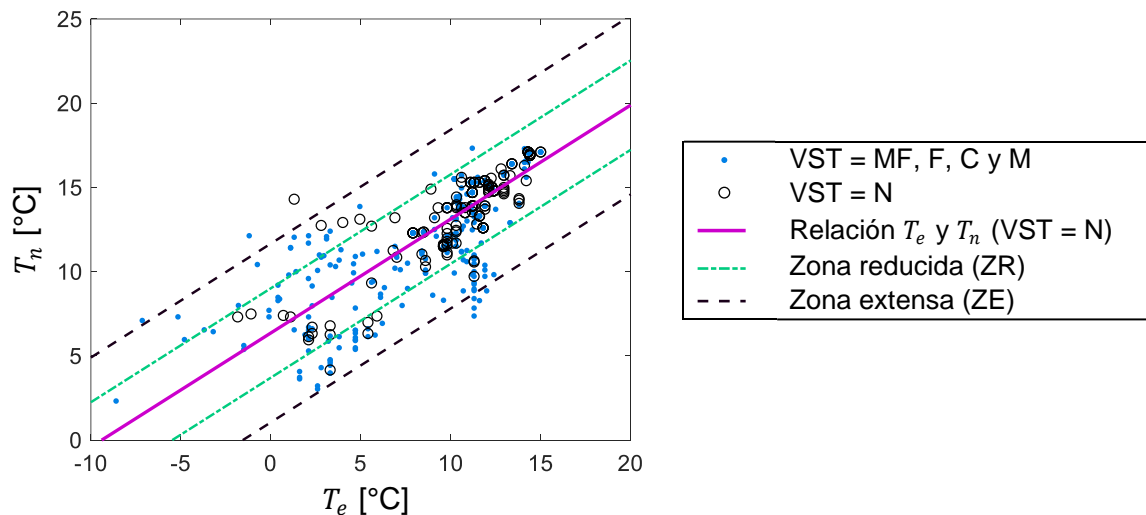


Figura 32. Relación entre T_e y T_n (línea magenta) obtenida para valores de $VST = N$ (\circ), y La amplitud de la ZE es 10,88 °C y de la ZR es 5,44 °C estimados con $\sigma = 2,72$ °C.

Como comentario final, las preferencias de las personas son el resultado de factores tanto interiores como exteriores. Se muestra en el análisis, que los valores de \bar{T}_e están vinculados fuertemente a los valores de T_n . Además, las personas encuestadas parecen mostrar una preferencia por un rango más amplio de temperaturas.

b. Caso 2: “datos por tipo de actividad”

Se analiza de manera similar a la sección 4.3.2.2a el análisis se divide en dos: el primero es la relación entre \bar{T}_e y T_i ; y el segundo es la relación entre T_e y T_i , cada uno según el nivel de actividad. El valor de σ no es el mismo para la actividad pasiva y actividad moderada, ya que cada actividad reportada tiene un conjunto de datos T_i diferentes.

De la información registrada para la actividad pasiva, examinando \bar{T}_e y T_i (figura 33a) se obtiene la correlación lineal entre ambos (para respuestas del VST = N) y está dada por la ecuación 3 (línea magenta). Se observa que el 100% de los datos están dentro de la ZE, mientras el 63,2 % de datos están en la ZR. Cuando se analiza T_e y T_i (figura 33b), la correlación lineal entre ambas (para respuestas del VST = N) se representa por la ecuación 4 (línea magenta). Se observa que el 97,4 % de los datos están dentro de la ZE y la ZR. Además, en ambos casos se presentan las otras respuestas de VST (puntos azules). La diferencia entre los límites máximo y mínimo de la ZE (5,44 °C) y la ZR (2,88 °C) son similares en ambos análisis y dependen de $\sigma = 1,44$ °C, además están representadas como líneas discontinuas en la figura 33a y la figura 33b.

$$T_n = 0,36 \bar{T}_e + 13,34 \text{ (actividad pasiva)} \quad (3)$$

$$T_n = 0,34 T_e + 10,78 \text{ (actividad pasiva)} \quad (4)$$

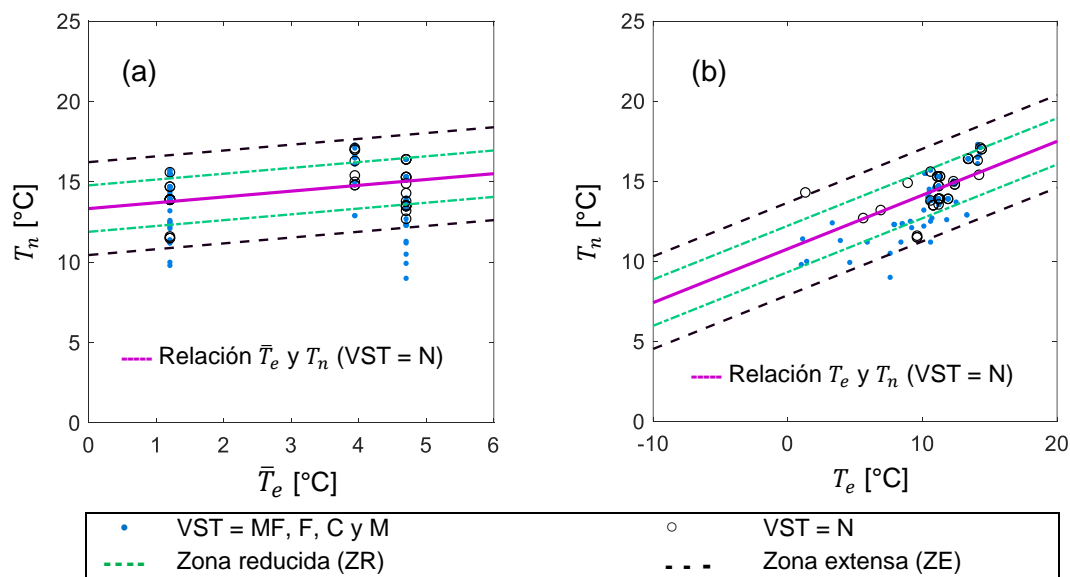


Figura 33. Datos registrados para la actividad pasiva. Correlación lineal entre: (a) \bar{T}_e y T_i ; y (b) T_e y T_i para VST = N (se considera $T_i = T_n$). El valor de σ es 1,44 °C y la diferencia entre los límites máximo y mínimo de la ZR es 2,88 °C y de la ZE es 5,76 °C.

Los datos para la actividad moderada son mostrados en la figura 34. Examinando \bar{T}_e y T_i (figura 34a), la correlación lineal entre ambos con datos de VST = N es representada por la ecuación 5 (línea magenta). Se observa al 100% de los datos dentro de la ZE, mientras el 81,6 % de datos están en la ZR. Examinando T_e y T_i (figura 34b), la correlación lineal entre ambas con datos de VST = N está dada por la ecuación 6 (línea magenta). Se observa que el 100 % de datos están dentro de la ZE y el 97,37 % de datos están en la ZR. También,

se muestran las respuestas de VST diferentes a N (puntos azules). Asimismo, la diferencia entre los límites máximo y mínimo de las zonas son 3,68 °C para ZE y 7,36 °C para ZR, calculados con $\sigma = 1,84$ °C, son similares en ambos análisis y están representadas con líneas discontinuas en la figura 34a y la figura 34b.

$$T_n = 0,60 \bar{T}_e + 12,19 \text{ (actividad moderada)} \quad (5)$$

$$T_n = 0,79 T_e + 5,28 \text{ (actividad moderada)} \quad (6)$$

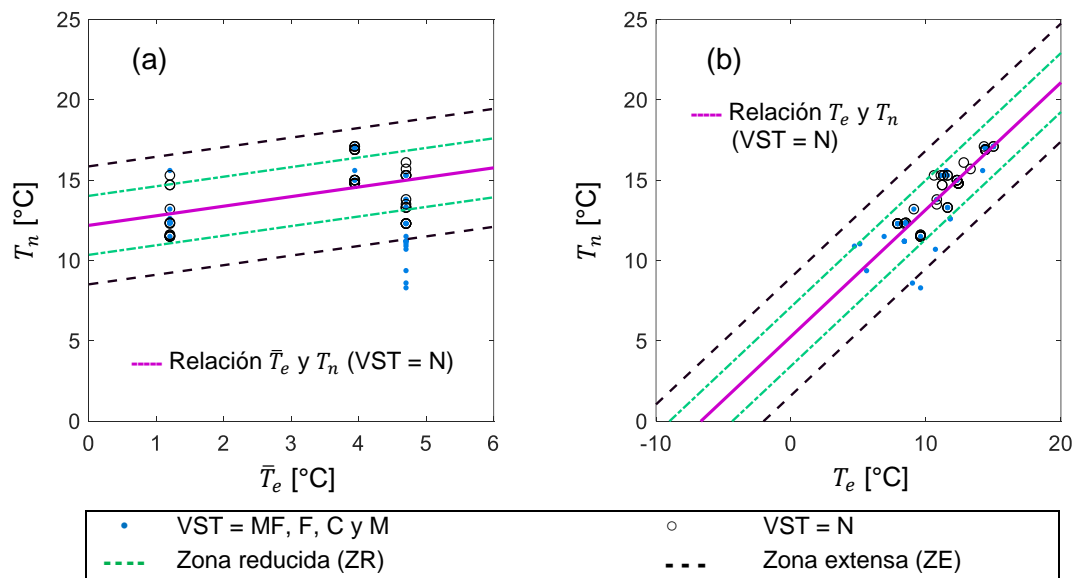


Figura 34. Datos registrados para la actividad moderada. Correlación lineal entre: (a) \bar{T}_e y T_i ; y (b) T_e y T_i para VST = N (se considera $T_i = T_n$). El valor de σ es 1,84 °C y la diferencia entre los límites máximo y mínimo de la ZR es 3,68 °C y de la ZE es 7,36 °C.

Debido a que valores de VST = N son utilizados en los análisis de correlación lineal, a T_i se la representa como T_n en las ecuaciones 1 a la 6 y en la figura 33 y la figura 34.

En esta sección se observa que los valores de \bar{T}_e están vinculados fuertemente a los valores de T_n , así como los valores de T_e y T_n . Pocos porcentajes de datos se encuentran fuera de la ZE y la ZR. También, con el análisis del caso 2 (“datos por tipo de actividad”) se deduce que las diferencias de temperaturas entre los límites máximo y mínimo, bajo los cuales las personas reportaron un VST = 0, tienen valores más bajos respecto a las diferencias determinadas para el caso 1 (“datos totales”). Estas diferencias entre los límites de temperatura para la actividad pasiva son ligeramente menores a las diferencias para la actividad moderada.

4.3.2.3. Comparación de T_n con modelos existentes

Algunos de los modelos de T_n existentes se citan en la tabla 1, cuyos valores de T_n fueron determinados para personas con trabajo sedentario, en su entorno habitual, vistiendo la ropa de su elección y siendo desarrolladas para T_n entre 17 °C y 30 °C. Dichos modelos y los calculados en Imata son graficados en la figura 35. Son tres propuestas para Imata: la primera obtenida en el caso 1 (“datos totales”, sección 4.3.2.2a) se representa con la ecuación 1, la segunda y tercera elaboradas en el caso 2 (“datos por tipo de actividad”, sección 4.3.2.2b) subdividiendo el caso en dos: “actividad pasiva” (ecuación 3) y “actividad moderada” (ecuación 5). Los valores de T_n de la figura 35 varían para valores de \bar{T}_e desde 0 °C a 25 °C.

En la figura 35a, se aprecia la tendencia de todos los modelos de T_n , se distinguen tres grupos: el primer grupo abarca a ASHRAE (línea celeste), Auliciems (línea discontinua negra), y Nicol y Roaf (línea naranja), el segundo grupo contiene las dos propuestas “datos totales” (línea magenta) y “actividad moderada” (línea azul) en Imata y las propuestas por Humphreys (línea amarilla discontinua) y Griffiths (línea verde discontinua); y el tercer grupo es la propuesta “actividad pasiva” (línea roja) en Imata.

En la figura 35b, se presenta los modelos desarrollados en Imata: “datos totales” (línea magenta), “actividad pasiva” (línea roja) y “actividad moderada” (línea azul). La línea que representa a T_n para la “actividad pasiva” tiene una tendencia diferente a “datos totales” y “actividad moderada”, estos dos últimos son bastante similares y las diferencias de los valores de sus pendientes (0,03) y ordenadas (0,39 °C) son bajas.

Las propuestas hechas por Humphreys (figura 35c) y Griffiths (figura 35d) son muy parecidas a la propuesta “datos totales” para Imata. Siendo la de Humphreys más cercana, entonces se puede interpretar que la propuesta de Humphreys podría ser utilizada para valores bajos de T_n (menores a 17 °C), aunque sin tener en cuenta una clasificación según el nivel de actividad.

La figura 35e representa a las propuestas de ASHRAE (que fue desarrollado por las investigaciones de Brager y de Dear en 1998), Auliciems y Nicol y Roaf. Este grupo en particular no representa a la temperatura de neutralidad en Imata, no son válidas ya que se obtendría valores más altos de T_n en comparación a los determinados en este trabajo.

Para los pobladores de Imata la temperatura estaría sobrevalorada si calculamos T_n en base a esos modelos, ya que ellos están adecuados a temperaturas más bajas.

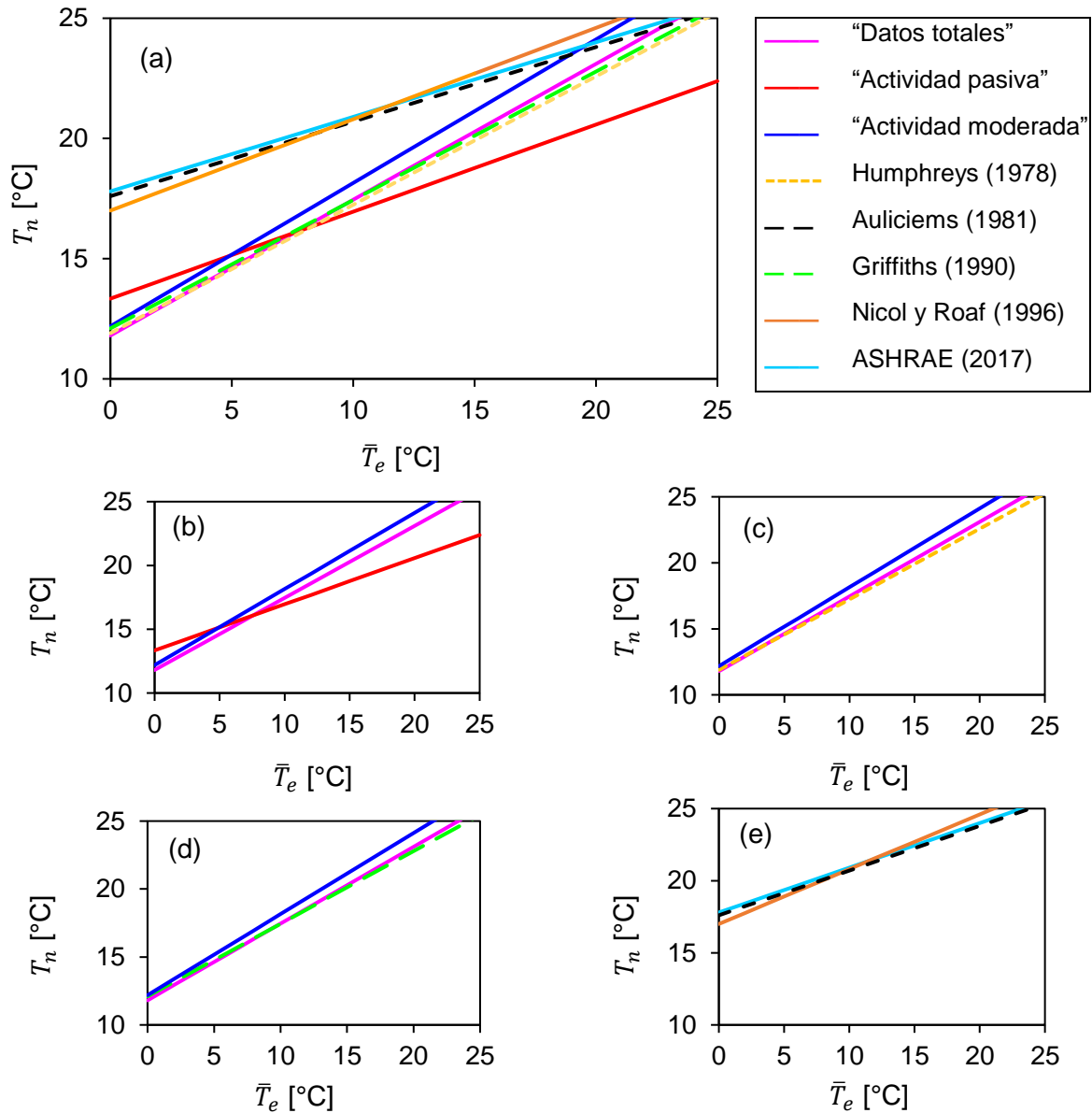


Figura 35. Comparación entre modelos de T_n . Propuestas: (a) “datos totales”, “actividad pasiva”, “actividad moderada” y otros autores, (b) determinadas para Imata, (c) “datos totales”, “actividad moderada” y Humphreys, (d) “datos totales”, “actividad moderada” y Griffiths, (e) Auliciems, Nicol y Roaf, y ASHRAE.

Debido a que Imata tiene temperaturas mensuales que varían de 1,0 °C a 5,3 °C, con un promedio anual de 3,7 °C, los valores de T_n que se obtienen son bajos, con lo que nos ubicaremos en el cuadrante inferior izquierdo de todos los gráficos de la figura 35.

4.3.3. Análisis de humedad

En esta sección se estudia los parámetros de la humedad relativa interior (HR_i) y la relación de mezcla interior (w_i) de los ambientes evaluados. Los análisis se realizan de manera similar a la sección 4.3.2.1 y se determinan los rangos aceptables de bienestar de cada parámetro.

4.3.3.1. Humedad relativa interior

Dos casos son analizados: el primero denominado “datos totales” que utiliza toda la información recolectada; y el segundo denominado “datos por tipo de actividad” abarca la información según el tipo de actividad reportada por los encuestados (actividad pasiva o moderada).

a. Caso 1: “datos totales”

Los valores de HR_i registrados con los dispositivos y las encuestas son presentados en la figura 36. Los círculos representan el número de respuestas de VST para HR_i y están en proporción con su radio (círculo más grande igual a 11 votos). Se determina la humedad relativa neutra (HR_n) y los rangos aceptables de bienestar.

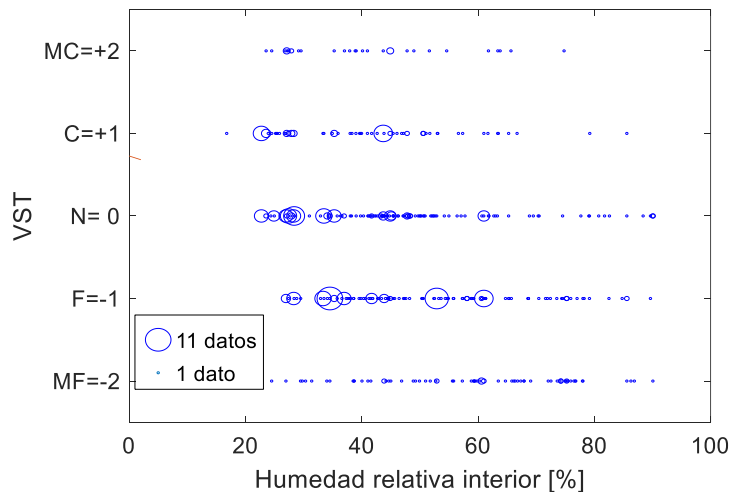


Figura 36. Humedad relativa interior (HR_i) y VST de los pobladores de Imata. El radio de los círculos está en proporción al número de datos obtenidos para cada punto HR_i y VST.

Asimismo, para cada grupo de valores de HR_i correspondiente a un VST, se calcula las humedades relativas medias (\overline{HR}_i), mínima ($\overline{HR}_i - \sigma$), mínima extensa ($\overline{HR}_i - 2\sigma$), máxima ($\overline{HR}_i + \sigma$) y máxima extensa ($\overline{HR}_i - 2\sigma$), los resultados son mostrados en la tabla 15. En la

figura 37, se establece la regresión lineal entre el VST (MF, F, N, C, MC) y las humedades relativas: mínima extensa (línea roja), mínima (línea azul), promedio (línea negra), máxima (línea verde) y máxima extensa (línea magenta). También se muestran las regresiones lineales que representan a cada línea, las cuales no son paralelas.

Tabla 15. Valores de HR_i [%] para el caso 1 (“datos totales”): media \overline{HR}_i , mínimo extenso ($\overline{HR}_i - 2\sigma$), mínimo ($\overline{HR}_i - \sigma$), máximo ($\overline{HR}_i + \sigma$) y máximo extenso ($\overline{HR}_i + 2\sigma$) para cada VST.

σ	VST		$\overline{HR}_i - 2\sigma$	$\overline{HR}_i - 1\sigma$	\overline{HR}_i	$\overline{HR}_i + 1\sigma$	$\overline{HR}_i + 2\sigma$
16,2	MF	-2	26,3	42,5	58,6	74,8	91,0
15,2	F	-1	18,8	34,0	49,2	64,4	79,6
16,0	N	0	11,3	27,3	43,2	59,2	75,1
14,2	C	+1	10,5	24,7	39,0	53,2	67,5
14,0	MC	+2	12,8	26,8	40,8	54,8	68,8

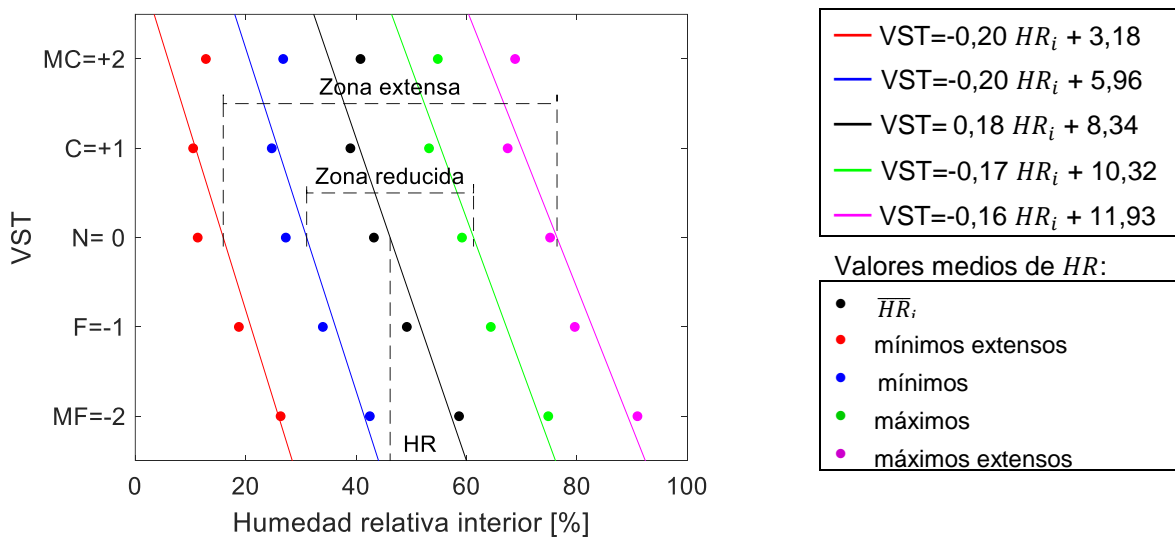


Figura 37. Caso 1: “datos totales”: valores medios de HR_i para cada VST (MF, F, N, C, MC) y sus correlaciones lineales (líneas de colores). $HR_n = 46,16$ %; $HR_{min,ZE} = 15,93$ %; $HR_{max,ZE} = 76,39$ %; $HR_{min,ZR} = 31,05$ % y $HR_{max,ZR} = 61,28$ % para VST = N.

Considerando la dispersión de todos los datos, se denomina humedad relativa neutral (HR_n) a la que indica la correlación lineal para un VST = N ($0_{(VST=N)} = -0,18 HR_i + 8,34$), HR_n es igual a 46,16 %. La HR mínima de la ZR ($HR_{min,ZR}$) y la HR máxima de la ZR ($HR_{max,ZR}$) son calculadas con un procedimiento similar, se utiliza la corrección lineal para un VST = N, consiguiendo $HR_{min,ZR} = 31,05$ % ($0_{(VST=N)} = -0,20 HR_i + 5,96$) y $HR_{max,ZR} =$

61,28 % ($0_{(VST=N)} = -0,17 HR_i + 10,32$). La HR mínima de la ZE ($HR_{min,ZE}$) y La HR máxima de la ZE ($HR_{max,ZE}$), también son estimadas por la correlación lineal para un $VST = N$; obteniendo $HR_{min,ZE} = 15,93$ % ($0_{(VST=N)} = -0,20 HR_i + 3,18$) y $HR_{max,ZE} = 76,39$ % ($0_{(VST=N)} = -0,16HR_i + 11,93$). La diferencia entre los límites máximo y mínimo de la humedad relativa de la ZR es 30,23 % y de la ZE es 60,46 %.

El análisis es similar considerando el género de los encuestados (tabla 16); la HR_n para hombres es 47,56 %, el cual es mayor a la HR_n correspondiente a las mujeres (43,95 %). Mientras, la diferencia entre los límites máximo y mínimo de la humedad relativa de la ZE ($HR_{max,ZE} - HR_{min,ZE}$) para las mujeres (60,38 %) es mayor respecto a la diferencia determinada para los hombres (58,97 %). Las mujeres toleran HR más bajas y los hombres toleran HR ligeramente más altas.

Tabla 16. Límites de HR_i [%] de ZR y ZE determinados para el caso 1 (“datos totales”) y considerando el género del encuestado.

Humedad relativa			Total	Hombre	Mujer
Mínima	ZE	$HR_{min,ZE}$	15,93	18,08	13,76
	ZR	$HR_{min,ZR}$	31,05	32,82	28,85
Neutra		HR_n	46,16	47,56	43,95
Máxima	ZR	$HR_{max,ZR}$	61,28	62,31	59,04
	ZE	$HR_{max,ZE}$	76,39	77,05	74,14

a. Caso 2: “datos por tipo de actividad”

Las observaciones para la actividad pasiva ($\leq 1,2$ met) y moderada (entre 1,2 met y 2,0 met) son analizadas de manera análoga a la sección 4.3.3.1a, cuyos resultados son presentados en la tabla 17. Se observa que el valor de HR_n aumenta cuando aumenta la actividad reportada. Asimismo, la diferencia de los límites máximo y mínimo de HR de la ZE para la actividad pasiva (35,81 %) son menores respecto a la diferencia de HR para la actividad moderada (45,3 %). Lo mismo ocurre para la diferencia de HR de la ZR para la actividad pasiva (17,91 %) y la actividad moderada (22,66%). Con esto se deduce que a medida que aumenta el nivel de actividad de las personas, la HR_n aumenta y la diferencia de los límites máximo y mínimo de la ZE y la ZR también se incrementan.

Tabla 17. Límites de HR_i [%] de ZR y ZE determinados para el caso 2 (“datos por tipo de actividad”).

			Pasiva	Moderada
Mínima	ZE	$HR_{min,ZE}$	19,80	18,27
	ZR	$HR_{min,ZR}$	28,75	29,59
Neutra		HR_n	37,70	40,92
Máxima	ZR	$HR_{max,ZR}$	46,66	52,25
	ZE	$HR_{max,ZE}$	55,61	63,57

4.3.3.2. Relación de mezcla interior w_i

La relación de mezcla es la cantidad de vapor de agua presente por cada kilogramo de aire seco (g de agua/kg de aire). La w_i registrada en los ambientes se presenta en la figura 38 y el análisis para obtener los valores máximos y mínimos de bienestar se muestra en la figura 39; la relación de mezcla depende de varios parámetros como la presión atmosférica a la altitud de Imata (4500 msnm), la presión de saturación que depende de T_i , y finalmente HR_i .

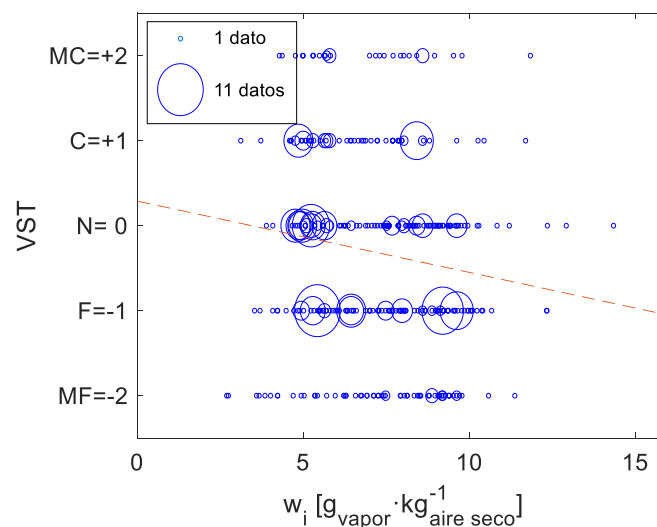


Figura 38. Relación de mezcla interior (w_i) y el VST de los encuestados. El radio de los círculos está en proporción al número de datos obtenidos para cada punto w_i y VST.

El procedimiento de estimación de los datos es análogo a la sección 4.3.3.1a y los resultados son presentados en la tabla 18. Para el caso 1 (“datos totales”) se estima la relación de mezcla neutra (w_n) igual a 7,07 g/kg (g de agua/kg de aire), la diferencia entre los límites máximo y mínimo de la ZE es 7,47 g/kg y de la ZR es 3,73 g/kg. Considerando el género de los encuestados (hombres y mujeres), los valores estimados para los hombres son ligeramente mayores respecto al de las mujeres a excepción de la w_i máxima de la ZE ($w_{max,ZE}$).

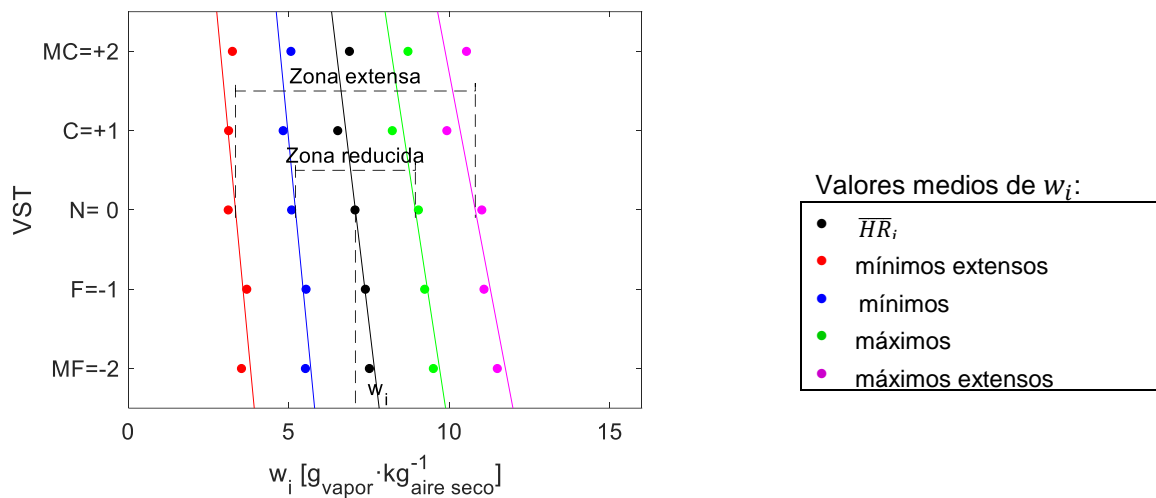


Figura 39. Caso 1: “datos totales”: valores medios de w_i para cada VST (MF, F, N, C, MC) y sus correlaciones lineales (líneas de colores), se calculó $w_n = 7,07$ g/kg, la diferencia entre los límites máximo y mínimo de la ZE = 7,47 g/kg y de la ZR = 3,73 g/kg para VST = N.

Considerando al caso 2 (“datos por tipo de actividad”), se incluye el análisis para la actividad: pasiva y actividad moderada. Los resultados muestran que a medida que aumenta el nivel de actividad de las personas, el valor de w_n aumenta ligeramente, también aumentan los valores del límite máximo de la ZE y la ZR. En el caso de la actividad pasiva, la diferencia de los límites máximo y mínimo de la ZE es 5,75 g/kg y de la ZR es 2,88 g/kg. Mientras, para la actividad moderada, la diferencia de los límites máximo y mínimo de la ZE es 6,23 g/kg y de la ZR es 3,11 g/kg. Las diferencias de ambas zonas aumentan al incrementar el nivel de actividad.

Tabla 18. Límites de w_i [g vapor/kg aire] de ZR y ZE determinados para el caso 1 (“datos totales”) según género del encuestado y caso 2 (“datos por tipo de actividad”).

Relación de mezcla	Datos totales			Nivel de actividad			
		Total	Hombre	Mujer	Pasiva	Moderada	
Mínima	ZE	$w_{min,ZE}$	3,34	3,48	3,18	3,87	3,72
	ZR	$w_{min,ZR}$	5,21	5,30	5,10	5,30	5,28
Neutra		w_n	7,07	7,13	7,01	6,74	6,84
Máxima	ZR	$w_{max,ZR}$	8,94	8,96	8,92	8,18	8,39
	ZE	$w_{max,ZE}$	10,81	10,79	10,84	9,62	9,95

4.3.3.3. Relaciones de mezcla interior y exterior

En la figura 40, se analiza HR del ambiente exterior (HR_e) y su efecto sobre el VST obtenido en el trabajo de campo. En la figura 41, w_i y relación de mezcla del ambiente exterior (w_e) son mostradas, la ecuación 7 representa la correlación lineal encontrada entre ambos parámetros (sólo se examinó las respuestas VST = N).

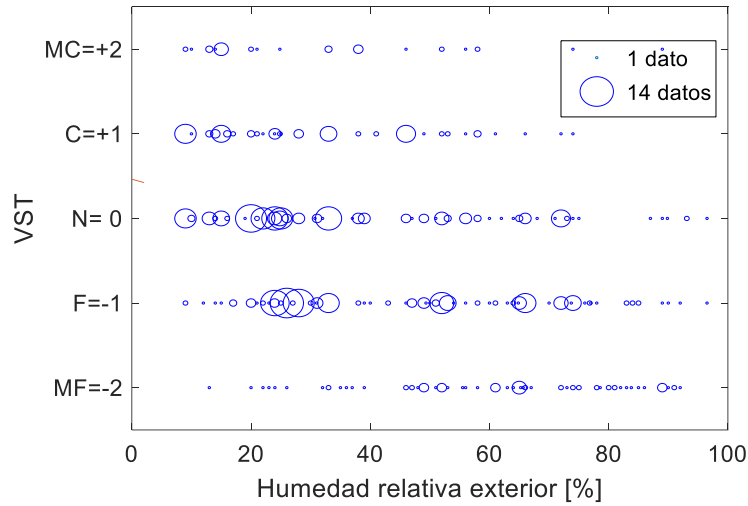


Figura 40. Humedad relativa exterior (HR_e) y el VST de los encuestados. El radio de los círculos está en proporción al número de datos obtenidos para cada punto HR_e y VST.

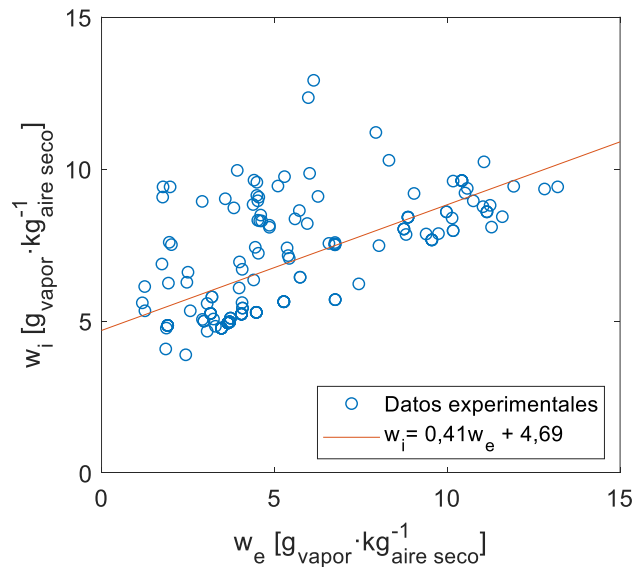


Figura 41. Correlación lineal entre los valores de w_i y w_e registrados en Imata para respuestas de VST = N.

$$w_i = 0,41 w_e + 4,69 \quad (7)$$

En un estado ideal la humedad que contiene el aire sea exterior o interior debería ser la misma, esto es cierto si el ambiente interior estuviera vacío (sin personas en su interior). En nuestro caso, la humedad al interior es mayor que la del exterior, esto es probablemente debido a la presencia de personas dentro de los espacios evaluados, quienes al respirar aportan vapor de agua al ambiente.

4.3.4. Análisis de actividad

El nivel de actividad es descrito por medio de la producción metabólica (M), cuya unidad de medida es el met ($1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$). Para este estudio se establecieron 3 clases de nivel de actividad, estos son: la actividad pasiva (menor igual a 1,2 met), la actividad moderada (entre 1,2 met y 2,0 met) y la actividad elevada (mayor a 2,0 met). Cada uno depende de la actividad realizada por el encuestado. Para estimar M se utilizan la norma ISO 7730 [13] y el ASHRAE 55 [74]. La norma ISO 7730 está basada en una lista detallada de las tasas metabólicas presentada en la norma ISO 8996 [123]. Mientras, el ASHRAE 55 presenta una lista basada en una recopilación de diversas fuentes.

El poblador fue consultado sobre las actividades realizadas durante 60 minutos antes de la encuesta, a partir de eso se estimó el valor de M a través de un promedio ponderado de las actividades reportadas respecto al tiempo como se recomienda en ASHRAE [70]. Las principales actividades indicadas por los encuestados y sus valores de M son presentadas en tabla 19.

Tabla 19. Valores de M para diversas actividades durante las encuestas en Imata.

Actividad	M [met]
Reposar recostado	0,8
Reposar sentado	1,0
Actividad sedentaria (oficina, domicilio, escuela)	1,2
Actividad ligera, de pie (de compras)	1,6
Actividad media de pie (tareas domésticas)	2,0
Caminar a 2 km/h	1,9
Caminar a 4 km/h	2,8
Caminar a 6,8 km/h	3,8
Actividades de deporte: ejercicios	3,0 a 4,0 ^b

^a ISO 7730 [13]; ^b ASHRAE 55 [74]

La distribución del nivel de actividad respecto a los encuestados se muestra en la figura 42, fueron registrados con las encuestas presenciales; se estima un mayor número de

individuos para la actividad pasiva, seguida de la actividad moderada y muy pocos individuos reportaron actividad elevada.

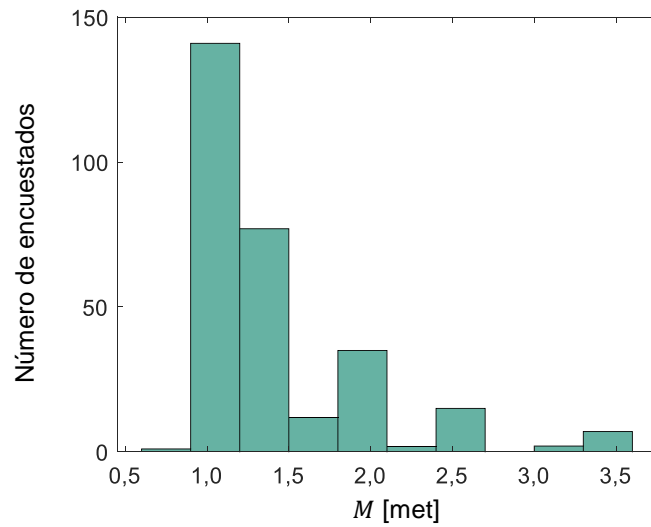


Figura 42. Distribución del nivel de actividad (M) de los encuestados en Imata.

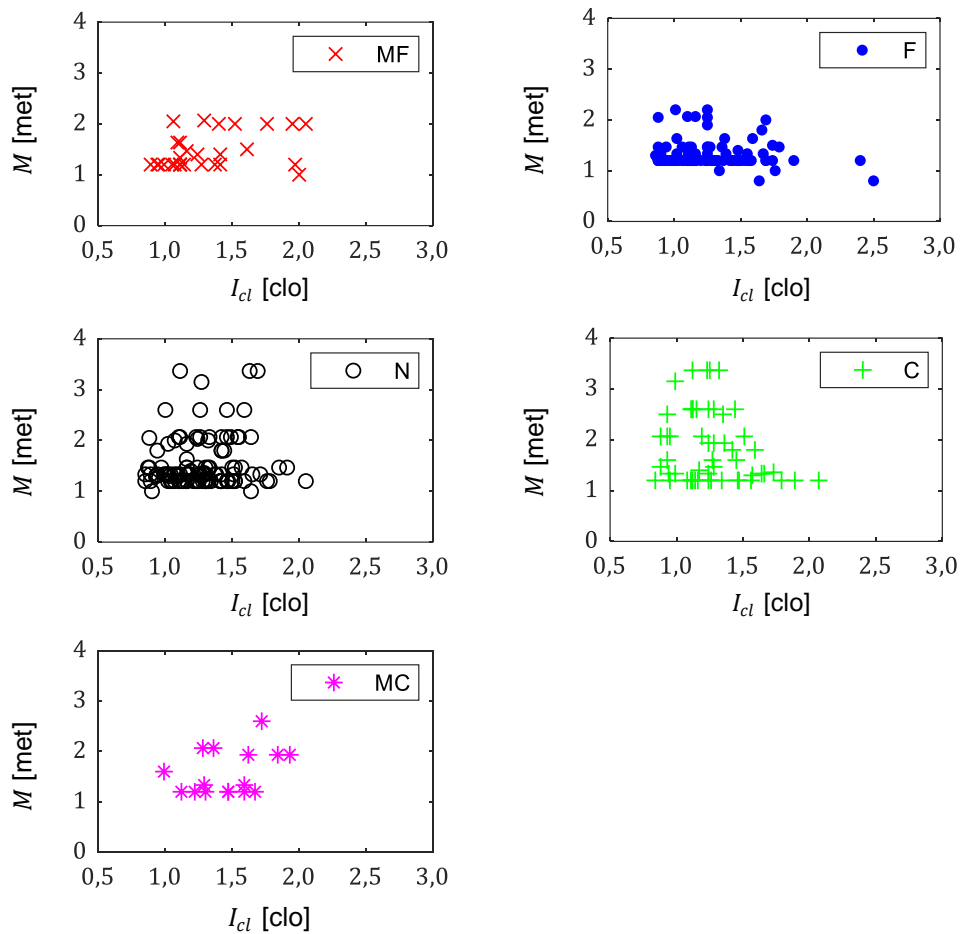


Figura 43. Nivel de vestimenta (M) y nivel de actividad (I_{cl}) de los encuestados en Imata, según el VST.

En la figura 43, se presenta el nivel de actividad realizado (M) y el nivel de vestimenta del encuestado (I_{cl}), esta información se clasifica también por el VST reportado. Estos tres parámetros fueron obtenidos con las encuestas presenciales. En ninguno de los casos existe una tendencia predominante, esto está ligado a que los pobladores de Imata no varían su vestimenta ni cuando realizan un tipo de actividad moderada o elevada.

4.3.5. Análisis de vestimenta

El nivel de vestimenta (I_{cl}) se estima utilizando las tablas de la norma ISO 7730. También, se observó que la vestimenta utilizada por los pobladores de Imata no posee alguna característica en particular, ellos visten con ropa no tradicional. La unidad de medida del nivel de vestimenta es 1 clo que equivale a un nivel de aislamiento de $0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ y corresponde a una vestimenta compuesta de pantalones, una camisa y una chaqueta. Para determinar el valor I_{cl} total de los encuestados, se suman los valores I_{cl} parciales de cada vestimenta. Mientras el poblador utiliza mayor número de prendas de vestir, mayor es el valor del nivel de vestimenta. De las respuestas obtenidas en el trabajo de campo (figura 44), existe un mayor número de personas con un nivel de vestimenta entre 1,0 clo a 1,2 clo y son muy pocas las que reportaron una vestimenta mayor a 1,8 clo.

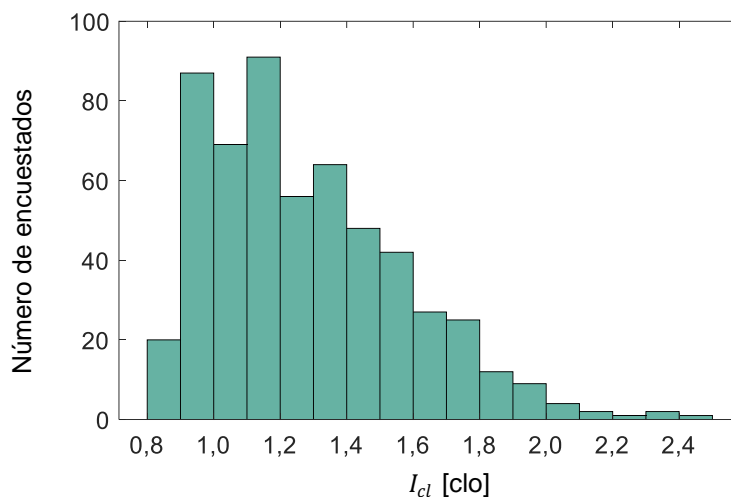


Figura 44. Distribución del nivel de vestimenta (I_{cl}) de encuestados en Imata.

De la información recolectada, el promedio del nivel de vestimenta es $(1,28 \pm 0,30)$ clo considerando las respuestas para la actividad pasiva; mientras para la actividad moderada se obtiene $(1,28 \pm 0,28)$ clo y la actividad elevada es $(1,24 \pm 0,22)$ clo. Por otro lado, ignorando la actividad realizada por los encuestados, para el caso 1 (“datos totales”) que

incluye la información obtenida por los dispositivos TSVR y las encuestas presenciales, se obtiene $(1,28 \pm 0,30)$ clo.

En las figura 45, 46 y 47, se analizan el nivel de vestimenta considerando las temperaturas interiores, exteriores y promedios mensuales según el VST reportado por los encuestados de Imata.

La figura 45 muestra el comportamiento de I_{cl} respecto a las T_i . Para VST = N, se observa un desplazamiento sutil de los datos hacia la esquina inferior, zona de temperaturas más elevadas y nivel de vestimenta más bajo. Para las otras respuestas de VST no se puede establecer ninguna tendencia.

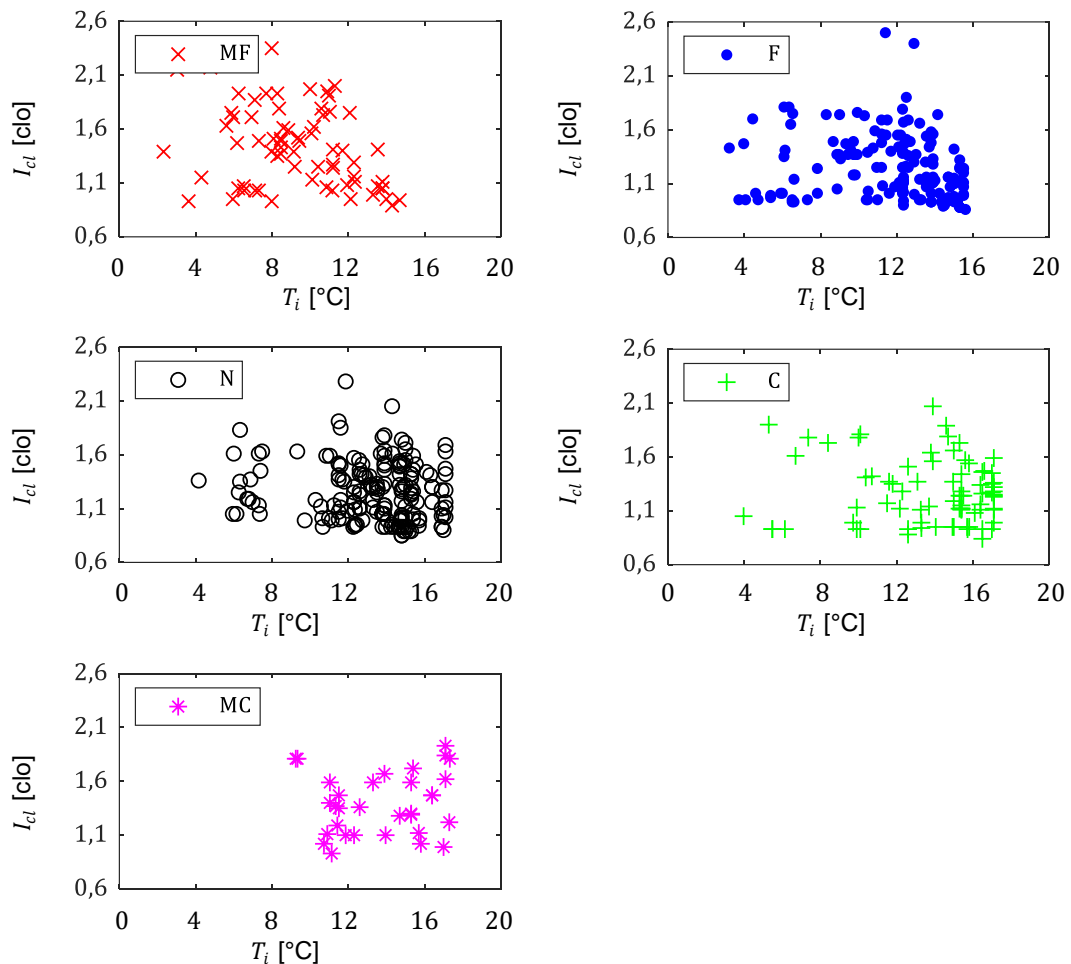


Figura 45. Nivel de vestimenta (I_{cl}) respecto a la temperatura interior (T_i) y el VST (MF, F, N, C y MC) de los encuestados en Imata.

La figura 46 muestra el comportamiento de I_{cl} respecto a las T_e durante el proceso de evaluación. Para valores de VST igual a N, C y MC, se observa un desplazamiento ligero hacia la derecha de I_{cl} (zona de temperaturas más altas). Para las otras respuestas de VST (MF y F) no se puede determinar una tendencia clara.

En la figura 47, no hay una tendencia establecida de I_{cl} respecto a T_a , con lo que se deduce que el poblador de Imata no varía la vestimenta que utiliza día a día, no importa la temperatura, incluso realizando alguna actividad moderada, no modifica su vestimenta, permanece con la misma. Esto se observó en los alumnos de la institución educativa, mientras realizaban actividades moderadas, como caminar, permanecían con la misma ropa, incluso cuando realizaban actividades elevadas, como practicar un deporte, no se quitaban alguna de las vestimentas que usaban.

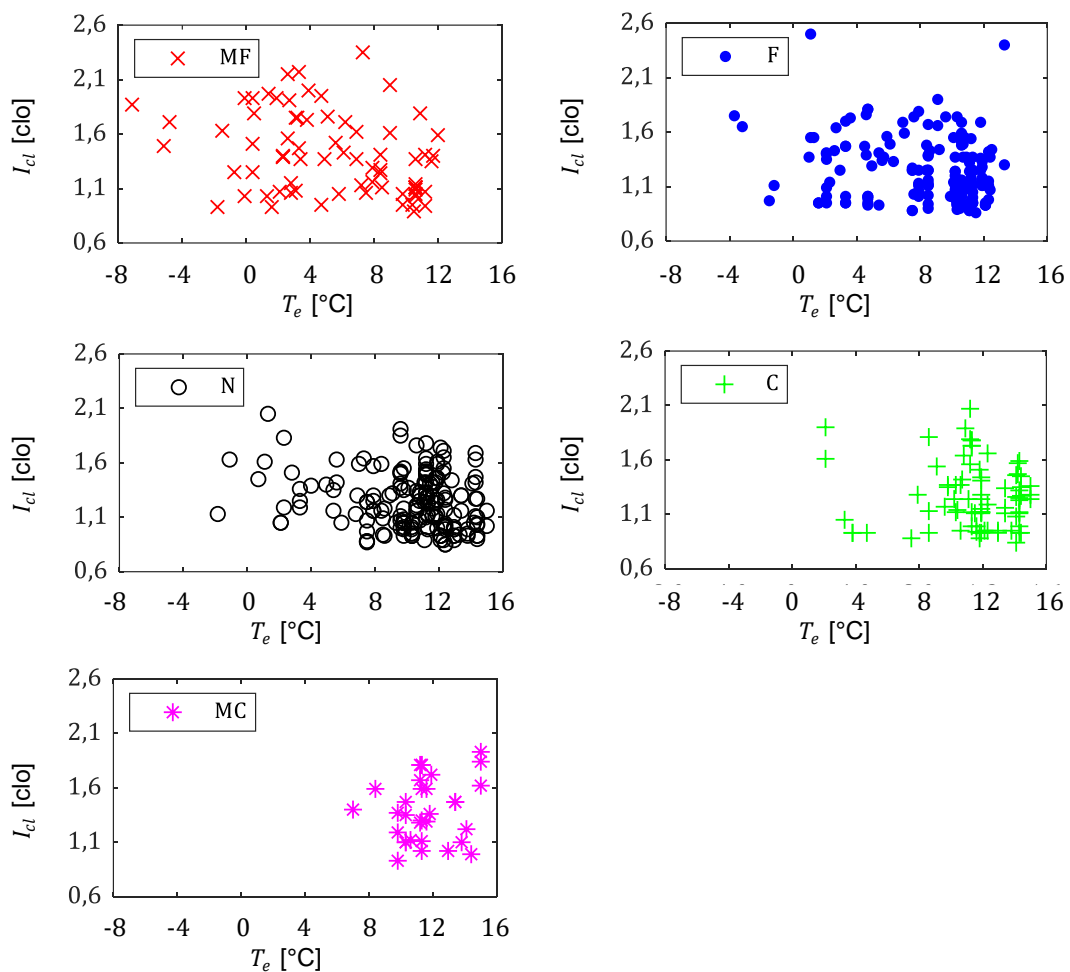


Figura 46. Nivel de vestimenta (I_{cl}) respecto a la temperatura exterior (T_e) y el VST (MF, F, N, C y MC) de los encuestados en Imata.

Una observación general sobre la evaluación de este parámetro es el número de respuestas obtenidas en el centro educativo; los alumnos utilizaban una vestimenta básica característica (el uniforme escolar) para las mujeres (una falda, una blusa, una chompa, un par de medias largas y un par de zapatos cerrados) y los varones (un pantalón, una camisa, una chompa, par de medias y un par de zapatos cerrados); y a pesar de las bajas temperaturas no todos los alumnos utilizaban alguna prenda de vestir adicional para protegerse del frío.

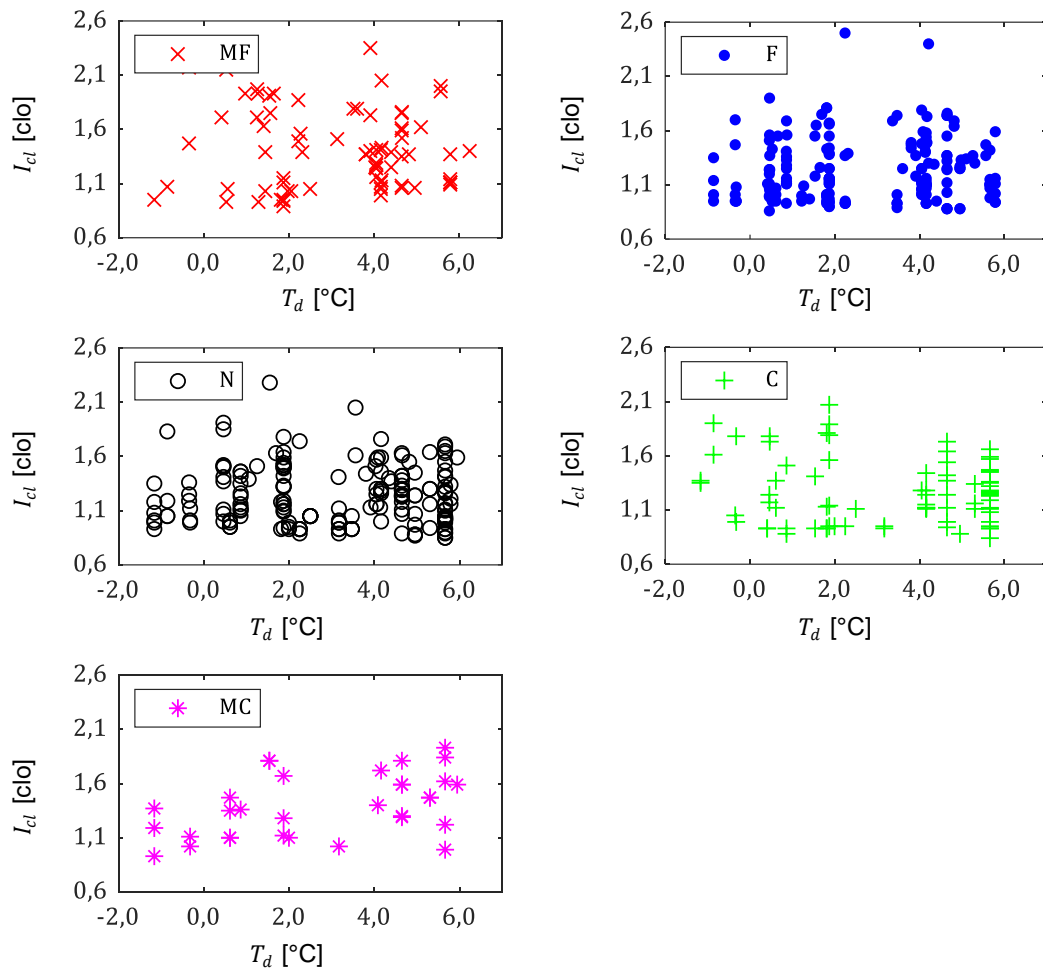


Figura 47. Nivel de vestimenta (I_{cl}) respecto a la temperatura exterior diaria (T_d) y el VST (MF, F, N, C y MC) de los encuestados en Imata.

4.4. Conclusión del capítulo

En esta sección se mostró el tratamiento de datos registrados en Imata por los dispositivos TSVR y encuestas presenciales. El uso de los dispositivos TSVR permitieron recolectar información, siendo una herramienta útil para este tipo de trabajo.

Se determinó los valores neutrales (o de bienestar) de T_i , HR_i , w_i de los pobladores de Imata para el caso 1: “datos totales” (análisis con todos los datos disponibles) y caso 2 “datos según el tipo de actividad” (se subdivide en: pasiva o moderada). Se mostró que cuando el nivel de actividad aumenta, el rango de la temperatura de bienestar también aumenta, y los valores máximos y mínimos de la ZE y la ZR disminuyen.

En el análisis del nivel de vestimenta (I_{cl}), no se encontraron relaciones útiles para este estudio. Las causas pueden estar relacionadas a que la mayoría de los encuestados fueron estudiantes de la institución educativa y vestían el uniforme escolar. Otra causa puede ser que los pobladores ingresaron mal la información de la vestimenta, también la personalidad tímida de los encuestados dificultó que registren la información correcta.

Se establecieron las ecuaciones de temperatura neutra que pueden ser utilizadas por los profesionales o especialistas para estimar las condiciones interiores adecuadas al momento de diseñar las viviendas en regiones a la misma altitud o con condiciones climáticas similares.

V. PROPUESTA DE EVALUACIÓN DEL BIENESTAR TÉRMICO EN IMATA

Este capítulo presenta las propuestas para estimar el bienestar térmico en Imata y la comparación con datos experimentales de la temperatura y humedad relativa. La primera parte propone áreas de comodidad térmica trazados sobre la carta psicrométrica para una altitud de 4500 msnm en base a los rangos de T_i , HR_i y w_i determinados en las secciones 4.3.2.1, 4.3.3.1 y 4.3.3.2, respectivamente. Se tienen en cuenta los casos estudiados “datos totales” (caso 1) y “datos por tipo de actividad” (caso 2) subdividiéndose en: actividad pasiva y actividad moderada. La segunda parte muestra los valores experimentales de T_e y HR_e en Imata y se las compara con las zonas propuestas. También, se presenta T_i y HR_i de dos edificaciones de Imata y se analizan los periodos de cumplimiento del bienestar térmico al interior de estas construcciones. La última parte, compara las zonas de bienestar desarrolladas en Imata con las zonas de bienestar de Givoni y según el índice PMV.

5.1. Áreas propuestas de bienestar térmico

Las zonas establecidas en este estudio son cuatro y se delimitan con los valores máximos y mínimos de la ZR y la ZE para los parámetros T_i , HR_i y w_i . Las zonas 1, 2 y 3 toman en cuenta la temperatura y la humedad relativa, la zona 4 no considera la humedad relativa, sino la relación de mezcla. Estas cuatro zonas de bienestar tienen las siguientes características:

- La zona 1 (Z1) está limitada por los parámetros de temperatura y humedad relativa, considera los valores mínimos y máximos de la ZR de ambos parámetros: $T_{min,ZR}$, $T_{max,ZR}$, $HR_{min,ZR}$ y $HR_{max,ZR}$.
- La zona 2 (Z2) está limitada por los parámetros de temperatura y humedad relativa, considera los valores mínimos y máximos de la ZE de ambos parámetros: $T_{min,ZE}$, $T_{max,ZE}$, $HR_{min,ZE}$ y $HR_{max,ZE}$.
- La zona 3 (Z3) está limitada por los parámetros de temperatura y humedad relativa, considera los valores mínimo y máximo de la ZR de la temperatura ($T_{min,ZR}$ y $T_{max,ZR}$) y los valores mínimo y máximo de la ZE de la humedad relativa ($HR_{min,ZE}$ y $HR_{max,ZE}$).

- La zona 4 (Z4) está limitada por los parámetros de la temperatura y la relación de mezcla, considera los valores mínimo y máximo de la ZR de la temperatura ($T_{min,ZR}$ y $T_{max,ZR}$) y los valores mínimo y máximo de la ZE de la relación de mezcla ($w_{min,ZE}$ y $w_{max,ZE}$).

Las líneas de humedad relativa siguen la curva en la carta psicrométrica. Se estudia los casos con toda la información recolectada (“datos totales”) y “datos por tipo de actividad” reportada.

5.1.1. Caso 1: “datos totales”

Todas las observaciones recolectadas (obtenidas por encuestas y dispositivos) son analizadas. Las cuatro zonas propuestas son graficadas sobre la carta psicrométrica para la altitud de Imata (4500 msnm) y presentadas en la figura 48 y la figura 49. Asimismo, los valores máximos y mínimos de la ZR y de la ZE de los parámetros T , HR y w son presentados en la tabla 20.

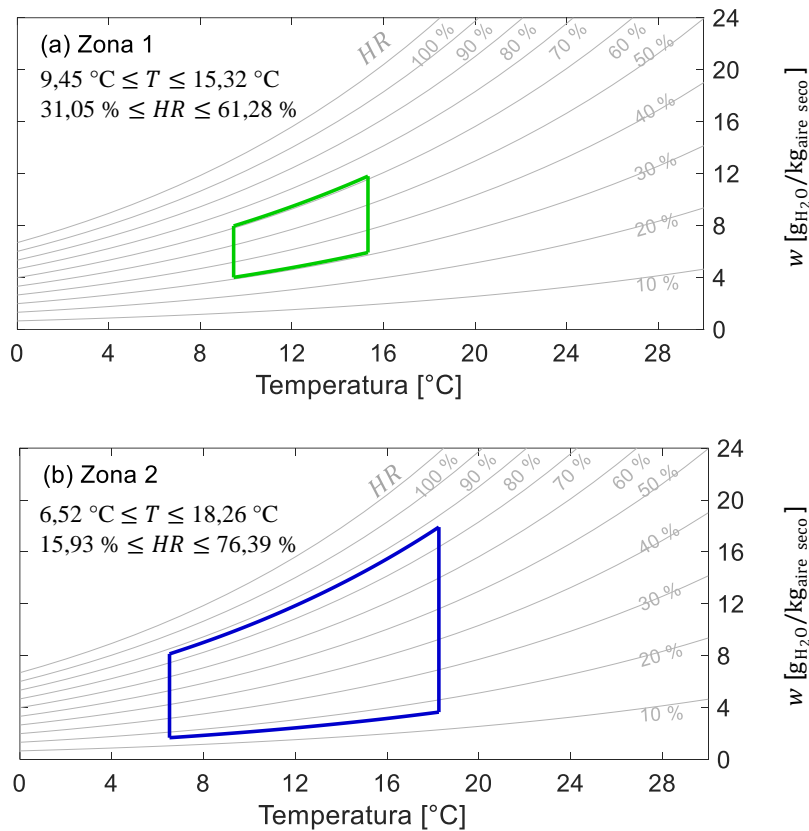


Figura 48. Zonas de bienestar propuestas con datos recolectados con las encuestas y los dispositivos. (a) Zona 1 (línea verde) con los límites de la ZR y (b) zona 2 (línea azul) con los límites de la ZE.

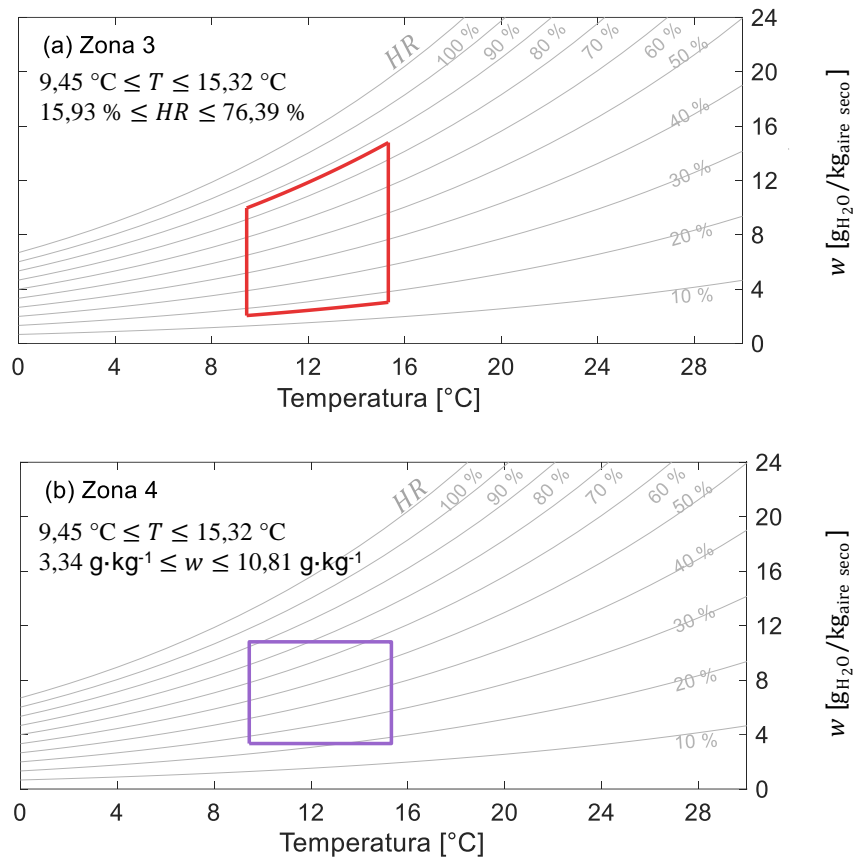


Figura 49. Zonas de bienestar propuestas con datos de las encuestas y los dispositivos. (a) Zona 3 (línea roja): los límites de la temperatura (ZR) la humedad relativa (ZE), y (b) zona 4 (línea morada): los límites de la temperatura (ZR) la relación de mezcla (ZE).

Tabla 20. Caso 1 (“datos totales”): límites de bienestar de la temperatura (T), la humedad relativa (HR) y la relación de mezcla (w).

Límites		T [°C]	HR [%]	w [g/kg]
Mínimo	ZE	6,52	15,93	3,34
	ZR	9,45	31,05	5,21
Neutro		12,39	46,16	7,07
Máximo	ZR	15,32	61,28	8,94
	ZE	18,26	76,39	10,81

5.1.2. Caso 2: “datos por tipo de actividad”

En esta sección se trabaja con la información de la tabla 14, la tabla 17 y la tabla 18, resumiéndose en la tabla 21. Se consideraron los límites de la temperatura, humedad relativa y la relación de mezcla para la actividad pasiva ($M \leq 1,2$ met) y la actividad

moderada ($1,2 \text{ met} < M \leq 2,0 \text{ met}$). Como se observó en el capítulo anterior, los valores del rango para la actividad moderada son mayores a los del caso de actividad pasiva.

Tabla 21. Caso 2 (“datos por tipo de actividad”): límites de bienestar de la temperatura (T), la humedad relativa (HR) y la relación de mezcla (w).

Límites		Actividad pasiva			Actividad moderada		
		T [°C]	HR [%]	w [g/kg]	T [°C]	HR [%]	w [g/kg]
Mínimo	ZE	11,86	19,80	3,87	10,44	18,27	3,72
	ZR	13,19	28,75	5,30	12,09	29,59	5,28
Neutro		14,52	37,70	6,74	13,74	40,92	6,84
Máximo	ZR	15,84	46,66	8,18	15,38	52,25	8,39
	ZE	17,17	55,61	9,62	17,03	63,57	9,95

Al analizar el caso 1 (“datos totales”), se observa valores elevados de HR y w , que en su mayoría fueron recolectados con los dispositivos TSVR. Al analizar el caso 2 (“datos por tipo de actividad”), los valores elevados de HR y w no son considerados para determinar los límites máximos de la ZR y la ZE para la actividad pasiva y la actividad moderada. En consecuencia, los valores obtenidos para $HR_{min,ZR}$, $HR_{min,ZE}$, $w_{max,ZR}$ y $w_{max,ZE}$ no son tan altos en comparación al caso 1 de la sección 5.1.1.

Aunque no se ha logrado comprobar con datos experimentales que las regiones con humedades altas (dentro de los límites de la ZE o la ZR de la temperatura) formen parte de las zonas de bienestar propuestas para la actividad pasiva y la actividad moderada, estas regiones son representadas en las gráficas con líneas discontinuas y podrían ser una ampliación de las Z2, Z3 y Z4, sin embargo, la única forma de estimarlo es realizar evaluaciones de campo considerando un rango de HR más grande. Estas ampliaciones consideradas son las siguientes: para la Z2 y la Z3, HR se amplía hasta 80%; y para la Z4, w se extiende hasta $12 \text{ g}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$.

5.1.2.1. Caso 2a: actividad pasiva

Analizando las respuestas para la actividad pasiva, en la figura 50 se presentan las cuatro zonas propuestas en una sola gráfica, así como las zonas ampliadas (representadas con líneas discontinuas). Además, se muestran las respuestas del VST = N (neutro) obtenidas en el trabajo de campo (38 datos). Los círculos (\circ), los triángulos (Δ), los signos más (+) y los asteriscos (*) representan puntos (T y HR) con 1, 2, 3 y 5 datos,

respectivamente. Dentro de Z1, Z2, Z3 y Z4 se ubican el 28,9 %, 89,5 %, 68,4 % y 71,1 % de datos con VST = N, respectivamente, siendo la Z2 la que contiene más datos.

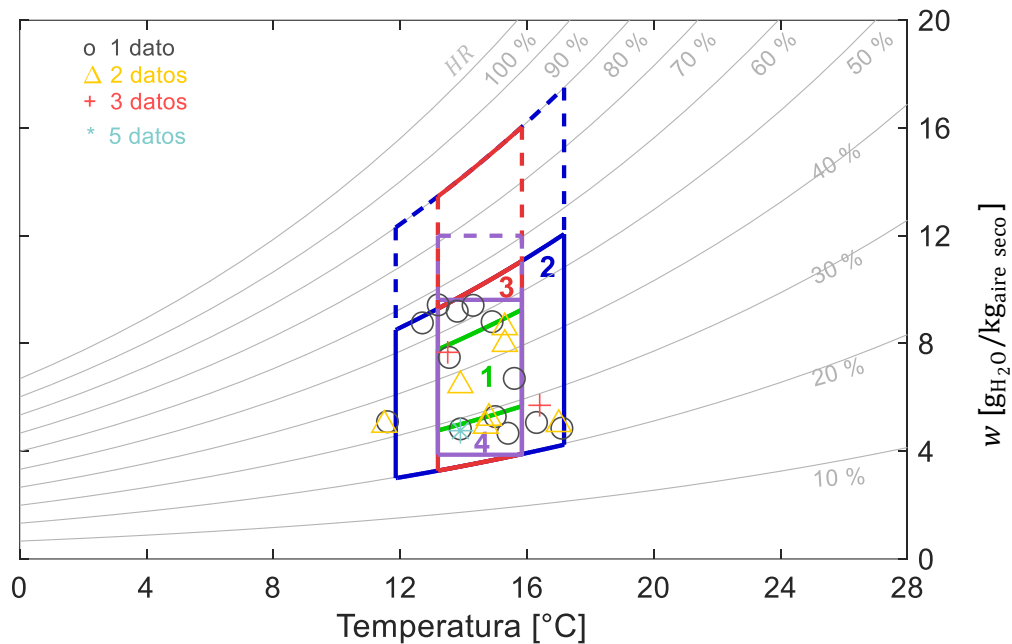


Figura 50. Caso2a: actividad pasiva. Zonas de bienestar térmico propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para Imata, acompañadas de las respuestas de VST = N.

Tabla 22. Número de respuestas dentro de las zonas de bienestar propuestas en Imata y según el VST, caso2a: actividad pasiva.

VST	Número de respuestas				Total
	Z1	Z2	Z3	Z4	
MF	4	6	6	5	11
F	27	58	47	47	69
N	11	34	26	27	38
C	5	17	8	8	17
MC	3	6	4	4	7

En la tabla 22, se observa que hay un mayor número de respuestas para VST = F (69 datos) y la Z2 tiene un número de respuestas mayor en comparación a las otras zonas debido principalmente a que posee un rango más amplio de temperatura. Además, en la figura 51 se aprecia la información de la tabla 23, se presentan las otras respuestas del VST (MF, F, C y MC) junto a las zonas propuestas. Muchas de estas respuestas se ubican dentro de las zonas de bienestar, sobre todo para el VST = F con más datos dentro de la Z2, Z3 y Z4.

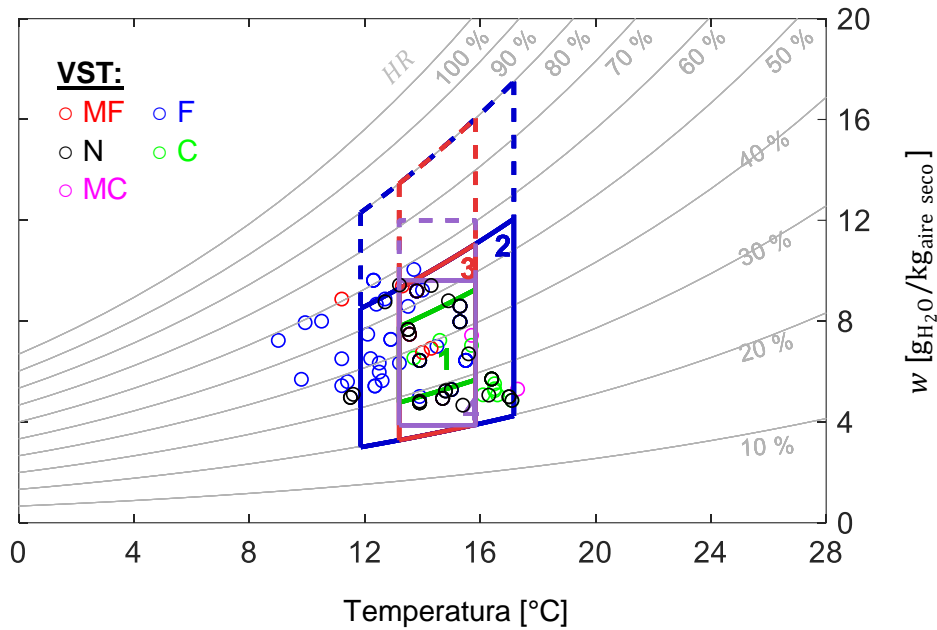


Figura 51. Caso2a: actividad pasiva. Zonas de bienestar térmico propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para Imata, acompañadas de las respuestas del VST: MF (círculos rojos), F (círculos azules), N (círculos negros), C (círculos verdes) y MC (círculos magenta).

Se introduce el parámetro del nivel de vestimenta (I_{cl}) para analizar si las respuestas del VST se vieron afectados por la ropa que vestían las personas durante la evaluación. Se dividió en 5 grupos dependiendo del valor de I_{cl} : el primer grupo para $I_{cl} \leq 1$ clo; el segundo grupo para $1 \text{ clo} < I_{cl} \leq 1,2$ clo; el tercer grupo para $1,2 \text{ clo} < I_{cl} \leq 1,5$ clo; el cuarto grupo para $1,5 \text{ clo} < I_{cl} \leq 2,0$ clo y el quinto grupo para $I_{cl} > 2,0$ clo. Asimismo, en el análisis se agrupan las respuestas del VST en tres: el primero es VST = MF, el segundo es VST = F + N + C y el tercero es VST = MC. Se asume que para los pobladores de Imata sólo existen tres respuestas para reportar su estado de sensación térmica siendo estas: mucho frío (VST = MF), neutro (VST = F + N + C) y muy caliente (VST = MC). En las figuras 52, 53 y 54, se presentan estos tres nuevos grupos de respuestas del VST.

Respecto a las respuestas de VST = MF (figura 52), los datos recolectados deben situarse a la izquierda de las zonas propuesta, sin embargo se observa que más del 50% de datos se ubican dentro de la Z2 y la Z3, esto probablemente es debido a la vestimenta de los encuestados que no fue considerada en las zonas propuestas. También, la media de los valores de I_{cl} para VST = MF es de 1,24 clo, siendo menor a la media de los valores de I_{cl} para la actividad pasiva (1,28 clo). De la figura 52 se observa:

- ❖ Para $I_{cl} \leq 1$ clo, los 4 datos se sitúan dentro de Z4, cuyas condiciones de T y HR son las de bienestar establecidas, los valores de I_{cl} son menores a la media para la actividad pasiva (1,28 clo) lo que pudo originar respuestas de VST = MF. Por ejemplo, el dato recolectado con mayor valor de temperatura posee $I_{cl} = 0,94$ clo.
- ❖ Hay 3 datos fuera de las zonas propuestas (para $T < 13,19$ °C) y tienen I_{cl} igual a 1,27 clo; 1,97 clo y 2 clo. Aunque estas respuestas tienen un valor I_{cl} alto, las personas indicaron que sentían frío.
- ❖ Los 4 datos restantes, se encuentran dentro de las zonas propuestas y son cercanos al límite mínimo de la ZR de la temperatura (13,19 °C). Tres de los datos son menores al valor medio de I_{cl} para la actividad pasiva (1,28 clo).

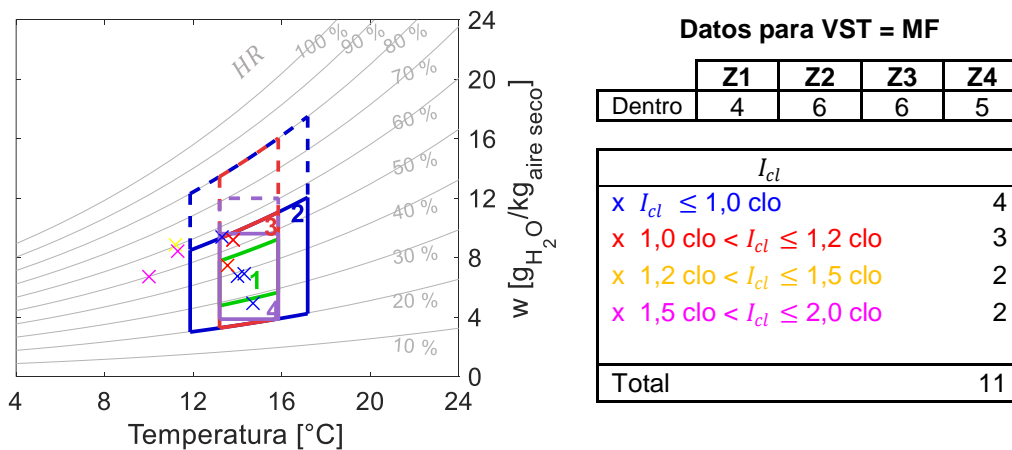


Figura 52. Caso 2a: actividad pasiva. Análisis de las respuestas VST = MF, obtenidas dentro de las zonas propuestas y según el valor de I_{cl} .

En cuanto a las respuestas del VST = F + N + C, de la figura 53 se observa lo siguiente:

- ❖ Para $I_{cl} \leq 1$ clo, los 18 datos se ubican dentro de la Z2. En promedio tienen I_{cl} igual a 0,92 clo, valor menor a la media estimada para la actividad pasiva (1,28 clo). Los valores de la temperatura varían entre 12,4 °C y 17,0 °C.
- ❖ Para $1 \text{ clo} < I_{cl} \leq 1,2$ clo existen 42 datos, de los cuales 37 datos están dentro de la Z2 y los 5 datos restantes se ubican fuera de las zonas. De estos últimos, 2 datos (con $T < 11,86$ °C) tienen I_{cl} iguales a 1,03 clo y 1,11 clo; y los otros 3 datos se encuentran dentro de las Z2, Z3 y Z4 ampliadas.
- ❖ Para $1,2 \text{ clo} < I_{cl} \leq 1,5$ clo existen 41 datos, de los cuales 37 datos están dentro de la Z2. Los 4 datos restantes se ubican fuera de las zonas propuestas: 2 datos con $T < 11,86$ °C tienen valores de 1,37 clo y 1,41 clo, probablemente al tener

valores I_{cl} mayores a la media según actividad pasiva (1,28 clo) es la razón de que el VST reportado sea igual a F, N o C. Los otros 2 datos están dentro de la Z2 ampliada.

- ❖ Para $1,5 \text{ clo} < I_{cl} \leq 2 \text{ clo}$ existen 19 datos, 14 de ellos se ubican dentro de la Z2, los otros 5 restantes tienen $T < 11,86 \text{ °C}$, ubicándose fuera de las zonas propuestas, pero al tener valor alto de I_{cl} pudieron tener el VST igual a F, N o C.
- ❖ Para $I_{cl} > 2 \text{ clo}$ existen 4 datos, de los cuales 3 datos se ubican dentro de la Z2, mientras 1 dato (con $T < 11,86 \text{ °C}$) se ubica fuera de las zonas propuestas, pero tiene el valor alto de $I_{cl} = 2,5 \text{ clo}$.
- ❖ Existen 10 datos con valores de temperatura bajos ($T < 11,86 \text{ °C}$), de los cuales 8 datos tienen valores de I_{cl} mayores a la media para la actividad pasiva (1,28 clo) y los otros 2 datos cumplen con $1,0 \text{ clo} < I_{cl} \leq 1,2 \text{ clo}$.

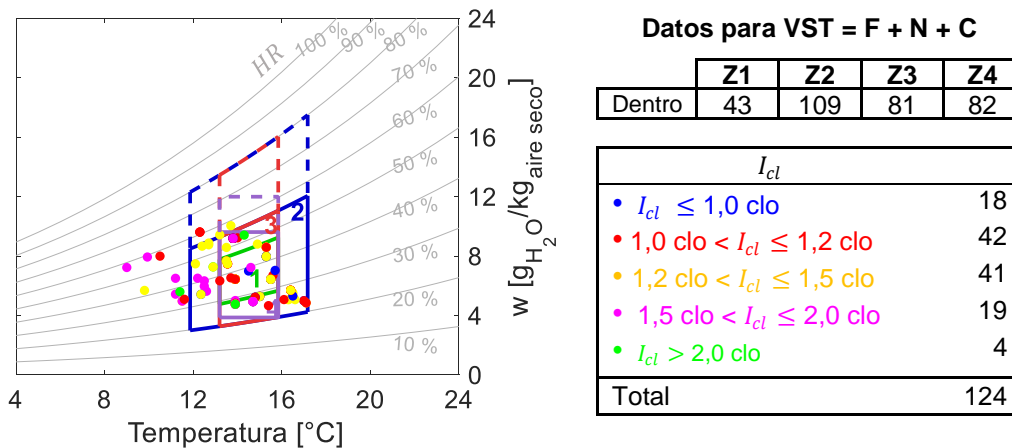


Figura 53. Caso 2a: actividad pasiva. Análisis de las respuestas VST = F, N y C, obtenidas dentro de las zonas propuestas y según el valor de I_{cl} .

En relación a las respuestas del VST = MC (figura 54), al tener Imata un clima muy frío, es poco probable encontrar ambientes con temperaturas altas, sólo se obtuvo 7 datos para personas con actividad pasiva, estos datos tienen un promedio de I_{cl} igual a 1,41 clo (mayor a la media de los valores para la actividad pasiva). Aunque 6 datos se encuentran dentro de las zonas de bienestar (ligeramente hacia las temperaturas máximas de la ZR y ZE), al tener valores de I_{cl} altos explica la respuesta de VST = MC.

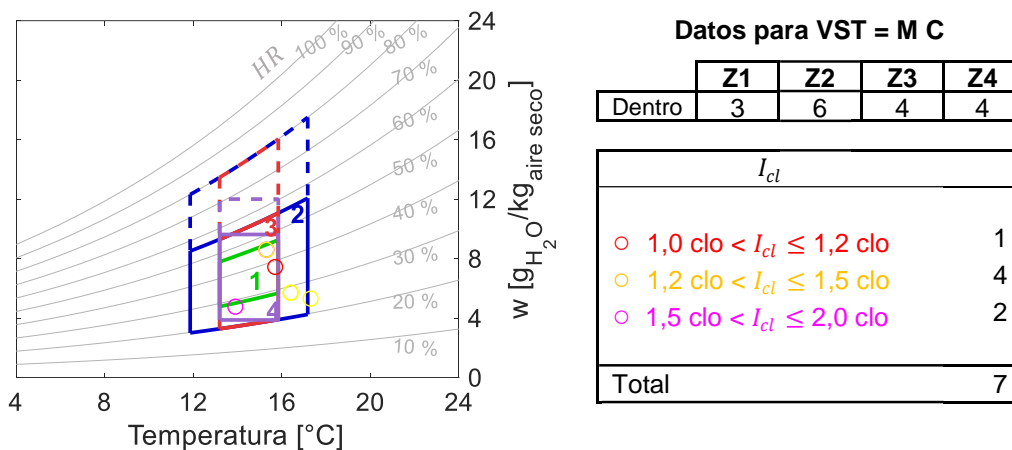


Figura 54. Caso 2a: actividad pasiva. Análisis de las respuestas VST = MC, obtenidas dentro de las zonas propuestas y según el valor de I_{cl} .

5.1.2.2. Caso 2b: actividad moderada

Del mismo modo en la figura 55, las zonas propuestas (líneas continuas) para la actividad moderada son dibujadas en un solo gráfico, acompañadas con las zonas ampliadas (líneas discontinuas) y las respuestas VST = N obtenidas en el trabajo de campo (49 datos). Se representan por los círculos (○), los triángulos amarillos (Δ), los signos más (+), las equis (x), los triángulos azules (Δ) y los asteriscos (*) a los puntos (T y HR) con 1, 2, 3, 4, 5 y 7 datos, respectivamente. El 38,8 %, 93,9 %, 65,3 % y 65,3 % de datos se encuentra dentro de la Z1, la Z2, la Z3 y la Z4, respectivamente, siendo la Z2 la que contiene más datos registrados. Además, en la tabla 23 se presentan los datos para las otras respuestas del VST (MF, F, C y MC), los cuales en mayor porcentaje se ubican dentro de la Z2 y en menor porcentaje en la Z1.

Tabla 23. Número de respuestas dentro de las zonas de bienestar propuestas en Imata y según el VST, caso2b: actividad moderada.

VST	Número de respuestas				Total
	Z1	Z2	Z3	Z4	
MF	1	6	2	1	8
F	14	22	18	18	23
N	18	44	31	31	49
C	6	13	7	7	17
MC	2	3	2	2	6

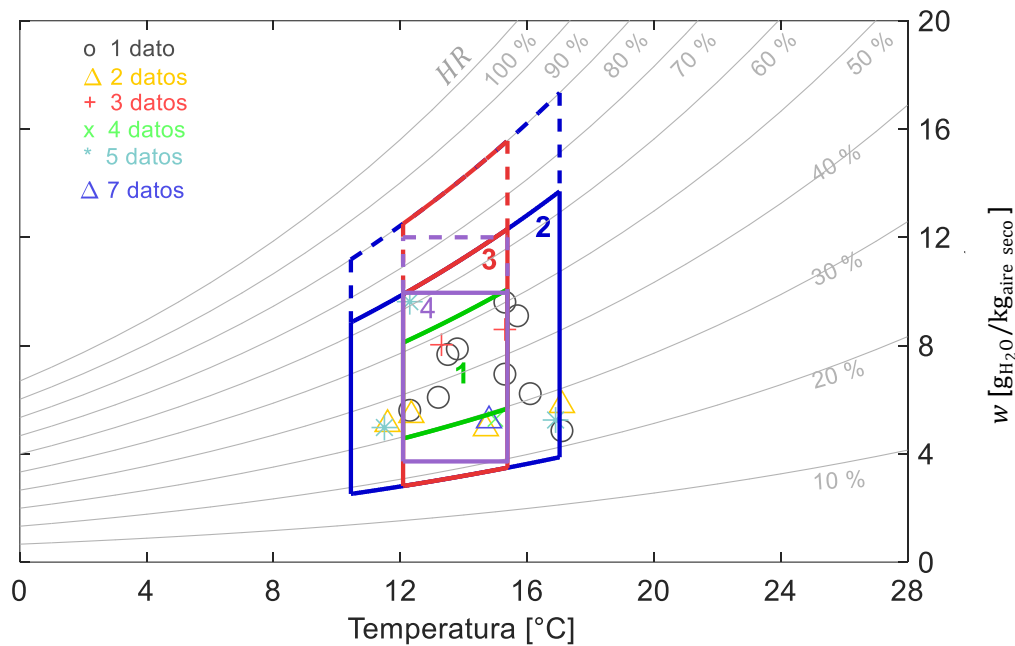


Figura 55. Zonas de bienestar térmico propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para Imata en base a encuestas, acompañadas de las respuestas de VST = N. Caso: actividad moderada.

Al igual que en el caso actividad pasiva, se analiza los datos clasificándolos según el valor de I_{cl} (4 grupos: $I_{cl} \leq 1$ clo; $1 \text{ clo} < I_{cl} \leq 1,2$ clo; $1,2 \text{ clo} < I_{cl} \leq 1,5$ clo y $1,5 \text{ clo} < I_{cl} \leq 2,0$ clo), el promedio de I_{cl} de datos con actividad moderada es igual a 1,28 clo. También se reagrupa las respuestas del VST, similar al caso anterior. Se asume que para los pobladores de Imata sólo existen tres respuestas para reportar su estado de sensación térmica siendo estas: frío (VST = MF), neutro (VST = F + N + C) y caliente (VST = MC). En las figuras 56, 57 y 58, se presentan estos tres nuevos grupos.

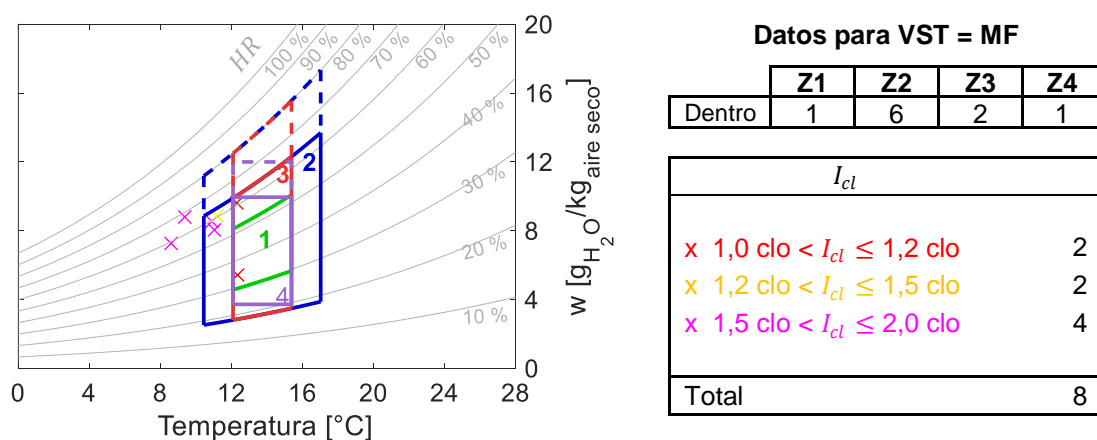


Figura 56. Caso: actividad moderada. Análisis de las respuestas VST = MF, obtenidas dentro de las zonas propuestas y según el valor de I_{cl} .

Primero, se analiza las respuestas de VST = MF (figura 56), 8 datos fueron recolectados. Por lo general los valores de I_{cl} van aumentando cuando T disminuye, así el único dato dentro de la Z1 tiene $I_{cl} = 1,11$ y los datos más a la izquierda (fuera de la Z2) tienen I_{cl} de 1,52 clo y 1,61 clo. Estos datos tienen en promedio $I_{cl} = 1,44$ clo.

Segundo, se analiza las respuestas de VST = F + N + C (figura 57), 89 datos fueron recolectados, la mayoría de datos se ubican dentro de las zonas de bienestar y los 8 datos restantes se ubican fuera. El dato con temperatura más baja (8,3 °C) presenta I_{cl} igual a 1,74 clo, mientras los otros 7 datos tienen valores temperatura igual a 17,1 °C muy próximos a $T_{max,ZE}$ (17,03 °C).

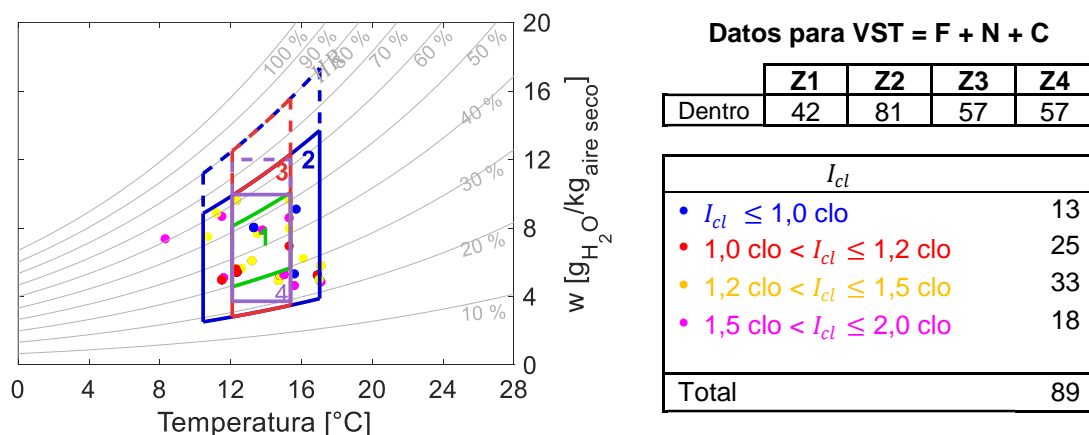


Figura 57. Caso: actividad moderada. Análisis de las respuestas VST = F, N y C, obtenidas dentro de las zonas propuestas y según el valor de I_{cl} .

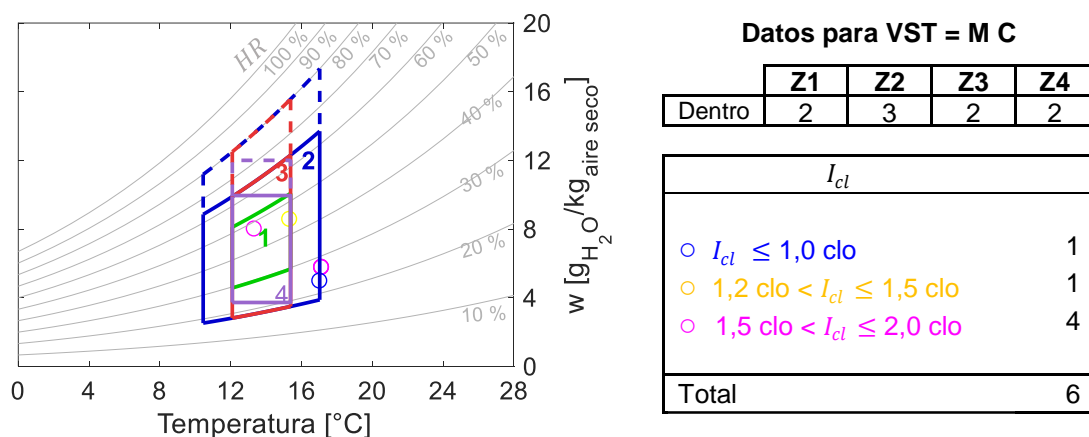


Figura 58. Caso: actividad moderada. Análisis de las respuestas VST = MC, obtenidas dentro de las zonas propuestas y según el valor de I_{cl} .

Tercero, se analiza las respuestas de VST = MC (figura 58), es poco probable encontrar ambientes con temperaturas altas sólo se registró 6 datos, de los cuales 3 datos tienen T

mayor a $T_{max,ZE}$ (17,03 °C), además sus valores de I_{cl} son mayores al promedio determinado para la actividad pasiva. Mientras los otros 3 datos (dentro de la Z2) presentan I_{cl} igual a 1,0 clo ($T= 17,0$ °C), 1,29 clo ($T= 15,3$ °C) y 1,59 ($T= 13,3$ °C), se aprecia que cuando la temperatura aumenta, el valor de I_{cl} disminuye.

En ambos casos (actividad pasiva y actividad moderada), la Z2 tiene mayor porcentaje de datos experimentales al tener rangos más amplios para T y HR , le siguen la Z4, la Z3 y en menor porcentaje la Z1. Z2 contiene a Z1 y Z3 completamente y también contiene casi a toda Z4, a excepción de una pequeña región cercana a $T_{min,ZR}$ y $w_{max,ZR}$. Además, se cuenta con mayor información registrada para respuestas de VST = F y con menor número de datos para VST igual MC y MF. También se observa que las zonas se desplazan hacia la izquierda para el caso 2b respecto al caso 2a; lo cual indica que, al aumentar el nivel de actividad de un individuo, los límites de comodidad disminuyen. Por último, respecto al análisis de I_{cl} , no se puede afirmar que exista una tendencia clara, la información es muy dispersa.

5.2. Comparación de las zonas propuestas con datos de temperatura y humedad

En esta sección se analiza los datos de temperatura y humedad relativa registrados en el ambiente exterior y también el interior de dos edificaciones construidas con adobe. Se estima los porcentajes de horas que ambos parámetros están dentro de las zonas de bienestar propuestas.

5.2.1. Comparación con parámetros exteriores

Los datos horarios de T_e y HR_e en Imata registrados durante el año 2019 (8760 horas) son presentados junto a las zonas de bienestar propuestas para el caso 2a (actividad pasiva) en la figura 59, cada par de T_e y HR_e es representado por un punto gris. Del total de las horas analizadas: 1,1 %, 5,8 %, 2,4 % y 2,3% se ubican dentro de la Z1, Z2, Z3 y Z4, respectivamente. El resto de las horas se distribuyen de la siguiente manera:

- El porcentaje de horas con $T_e < T_{min,ZE}$ (para Z2) y $T_e < T_{min,ZR}$ (para Z1, Z3 y Z4) representa 92,5 % (fuera de Z2) y 96,9 % (fuera de Z1, Z3 y Z4), respectivamente, del total de horas del año.
- Los porcentajes de horas con T_e dentro de los límites de temperatura, pero con HR_e menores a los valores mínimos de la humedad, representan 2,0 % (Z1), 1,7 % (Z2), 0,7 % (Z3) y 0,8 % (Z4) del total de las horas del año.

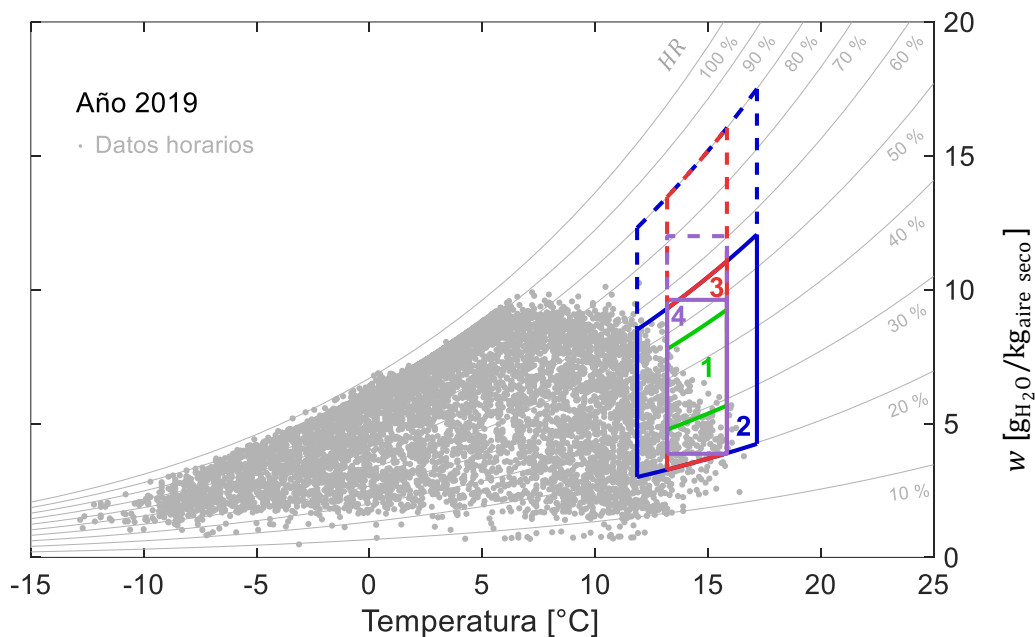


Figura 59. Zonas de bienestar propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para el caso 2a (“la actividad pasiva”) y datos horarios de T_e y HR_e (puntos grises) en Imata, año 2019.

Los puntos T_e y HR_e del mes más frío (julio) y del mes menos frío (diciembre) en Imata son graficados en la figura 60. Durante julio (744 horas) se obtienen porcentajes bajos dentro de las zonas de bienestar Z1 (0 %), Z2 (1,5 %), Z3 (0,1 %) y Z4 (0,1 %) respecto al total de las horas del mes. De forma similar para diciembre (744 horas), también hay pocas horas dentro de las zonas de bienestar Z1 (4,6 %), Z2 (14,9 %), Z3 (7,8 %) y Z4 (7,1 %) respecto al total de las horas del mes, aunque los porcentajes son mayores en comparación al mes de julio.

Los puntos se ubican en mayor porcentaje en las regiones donde T_e es menor a los límites mínimos de temperatura representando 96,5 % (Z2) y 99,3 % (Z1, Z3 y Z4) en julio; además 84,3 % (Z2) y 91,1 % (Z1, Z3 y Z4) en diciembre. Otros puntos se ubican para humedades menores a al límite mínimo de humedad y dentro de los límites de temperaturas (entre el mínimo y máximo), alcanzando 0,7 % (Z1), 2,0 % (Z2), 0,5 % (Z3 y Z4) en julio; y 4,3 % (Z1), 0,8 % (Z2 y Z3), 1,6 % (Z4) en diciembre. Al examinar todos los meses del año, se observa:

- Todas las horas de febrero y de junio a agosto están fuera de Z1. Diciembre es el mes con mayor número de horas dentro de Z1.
- Algunas horas de cada mes están dentro de Z2, siendo julio y diciembre los meses con menos y más horas dentro de Z2, respectivamente.

- Todas las horas de febrero a agosto prácticamente no se encuentran dentro de la Z3 y la Z4.

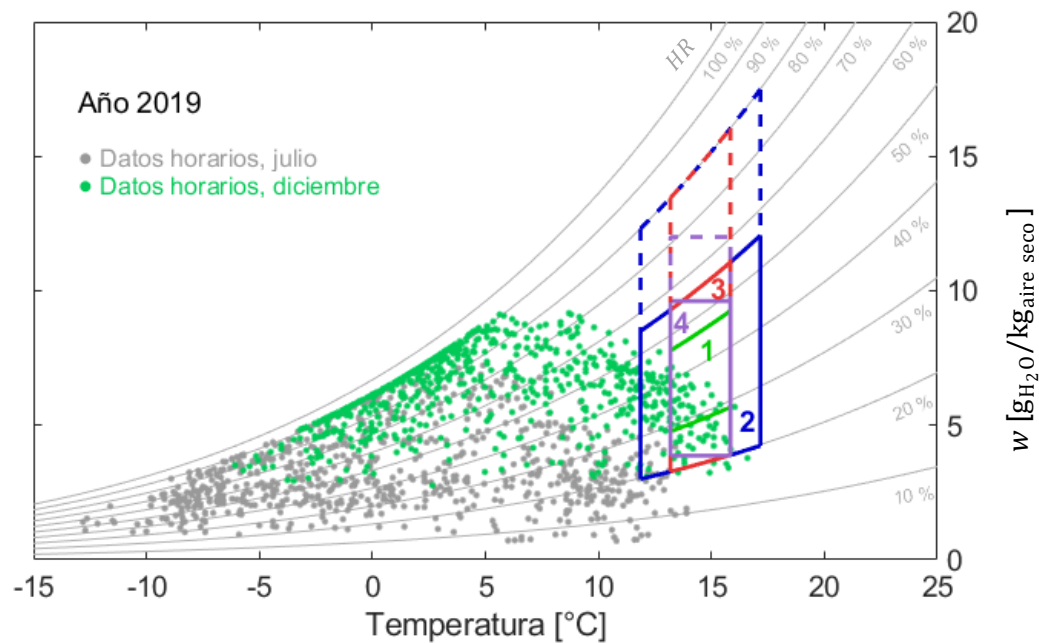


Figura 60. Zonas de bienestar propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para el caso 2a (actividad pasiva) y datos horarios de T_e y HR_e en Imata, para julio (puntos grises) y diciembre (puntos verdes).

De forma similar en la figura 61, se presenta las zonas de bienestar propuestas para el caso 2b (actividad moderada) junto con los puntos T_e y HR_e horarios registrados para Imata. El 85,1 % de las horas del año tienen valores menores a $T_{min,ZE}$ (10,44 °C); mientras el 93,2% de las horas del año tienen valores menores a $T_{min,ZR}$ (12,09 °C). Se observa lo siguiente:

- El 2,6 % de las horas del año están dentro de la Z1. Diciembre (9,5 %) posee más horas con bienestar.
- El 12,3 % de las horas del año están dentro de la Z2. Julio (4,6 %) y diciembre (22,8 %) son los meses con menos y más horas dentro de Z2. El 85,1 % de las horas son menores del límite inferior ($T_{min,ZE} = 10,44$ °C).
- El 5,4 % de horas del año están dentro de Z3. Febrero y junio poseen cada uno 0,8 % de horas dentro de Z3. Diciembre es el mes que tiene un mayor porcentaje (13,8 %) de horas dentro de Z3.
- El 4,8 % de horas del año están dentro de la Z4, los meses de julio (0,9 %) y diciembre (13,4 %) tienen menos y más horas, respectivamente

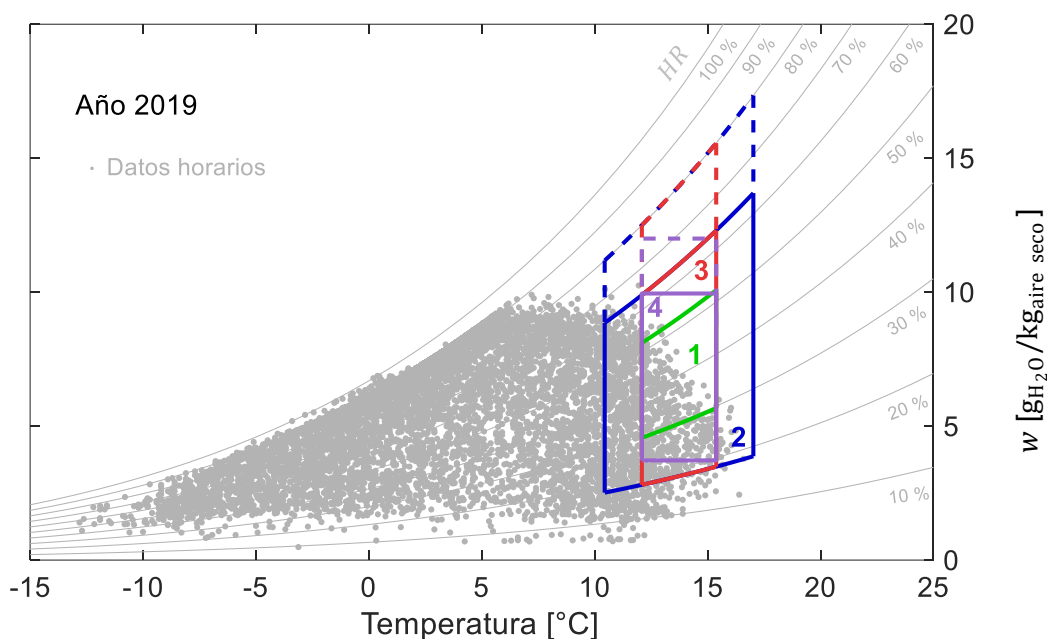


Figura 61. Zonas de bienestar propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para el caso 2b (actividad moderada) y datos horarios de T_e y HR_e (puntos grises) en Imata, año 2019.

5.2.2. Comparación con parámetros interiores

En esta sección se analizan las zonas de bienestar propuestas con mediciones experimentales al interior de dos módulos de viviendas de Imata, ambos módulos poseen un ambiente y cuentan con estrategias de calentamiento solar pasivo: módulo 1 (vivienda de 3,8 m x 4,8 m con una claraboya) y módulo 2 (vivienda de 3,8 m x 4,8 m con claraboya y un invernadero adosado a la fachada principal de 2,0 m x 4,8 m). Estos módulos son descritos con mayor detalle en el capítulo VI. Los datos de temperatura interior (T_i) y humedad relativa interior (HR_i) corresponden a información horaria de 49 días medidos experimentalmente del 13 de setiembre al 31 de octubre del 2019, monitoreando 1158 horas.

Primero se analiza el módulo 1 (M1), las mediciones de T_i y HR_i se presentan junto a las zonas de bienestar propuestas para el caso 2a (actividad pasiva) en la figura 62 y para el caso 2b (“actividad moderada”) en la figura 63.

De la figura 62, las zonas propuestas para el caso 2a (actividad pasiva) contienen el 10,9 % (Z1), 24,4 % (Z2), 12,6 % (Z3) y 11,6 % (Z4) de las horas analizadas. Además, el 0,2 % de datos están dentro de Z2 ampliada. Hay un porcentaje elevado de horas (más del

71,2 %) con T_i menor a sus límites inferiores ($T_{min,ZE} = 11,86 \text{ °C}$ o $T_{min,ZR} = 13,19 \text{ °C}$). Todos los puntos T_i y HR_i de 0:00 a 8:00 y de 18:00 a 23:00 se ubican a la izquierda de las zonas propuestas ($T_i < 13,19 \text{ °C}$). En cambio, entre las 9:00 y 17:00 ocurren principalmente: horas con T_i y HR_i dentro de las zonas de bienestar y horas donde se cumple $T_i > T_{max,ZE} = 17,17 \text{ °C}$ (o $T_{max,ZR} = 15,8 \text{ °C}$). Otro grupo de puntos (en menor porcentaje) se presenta para T_i entre los límites de bienestar de la temperatura, pero con HR_i fuera de los límites de humedad.

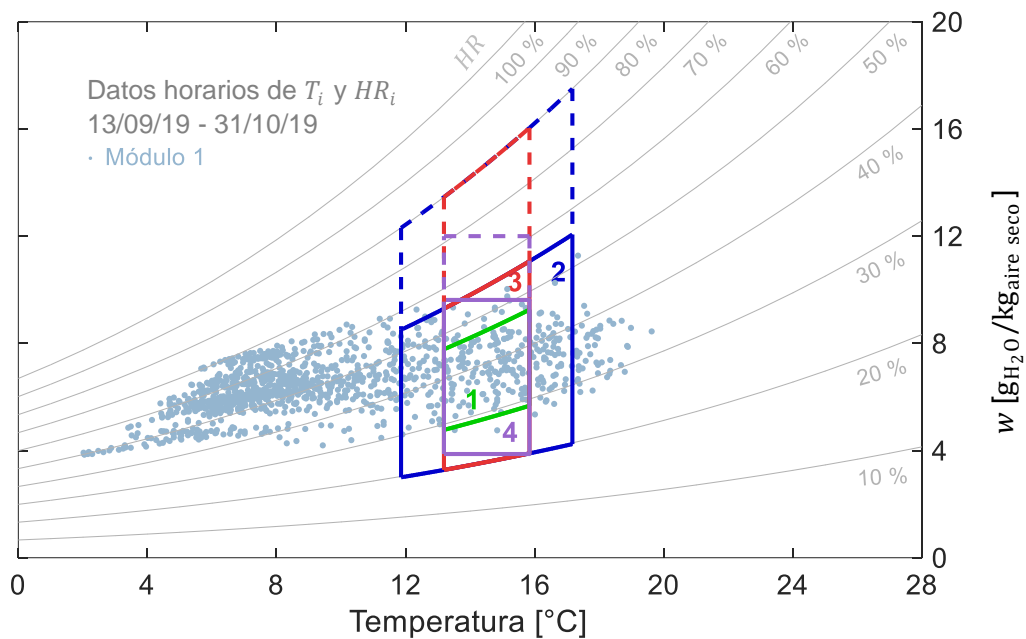


Figura 62. Zonas de bienestar propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para el caso 2a (actividad pasiva) y datos horarios de T_i y HR_i (*) de M1, del 13 de setiembre al 31 de octubre de 2019.

De la figura 63, las zonas propuestas para el caso 2b (actividad moderada) contienen 14,6 % (Z1), 31,9 % (Z2), 15,8 % (Z3) y 15,2 % (Z4) de las horas analizadas. Siendo estos porcentajes mayores respecto al caso 2a. Hay un mayor porcentaje de horas (63,6 %) con T_i menor a los límites mínimos de temperatura ($T_{min,ZE} = 10,44 \text{ °C}$ o $T_{min,ZR} = 12,09 \text{ °C}$). Respecto a los horarios, de 0:00 a 9:00 y 17:00 a 23:00 los puntos T_i y HR_i (en promedio) se ubican a la izquierda de las zonas propuestas. En cambio, entre 8:00 y 16:00 existen periodos con T_i y HR_i dentro de las zonas de bienestar y otras horas con T_i mayor al límite máximo de temperatura ($T_{max,ZR} = 15,38 \text{ °C}$ o $T_{max,ZE} = 17,03 \text{ °C}$). Muy pocas horas los puntos T_i y HR_i se ubican en regiones con T_i dentro de los límites de bienestar de la temperatura, pero con HR_i fuera de los límites de humedad establecidos.

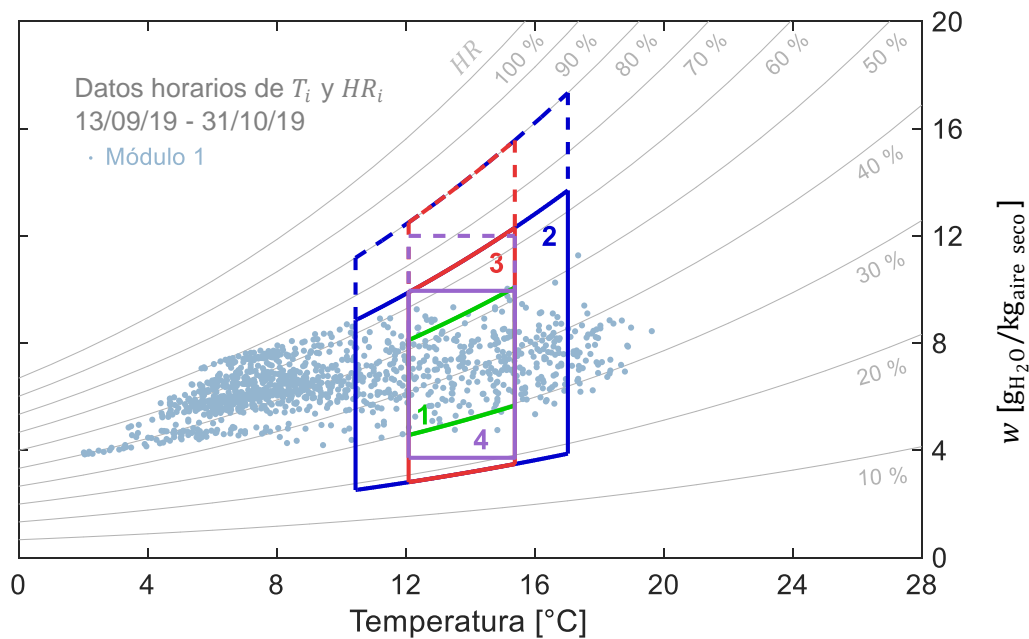


Figura 63. Zonas de bienestar propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para el caso 2b (actividad moderada) y datos horarios de T_i y HR_i (•) de M1, del 13 de setiembre al 31 de octubre de 2019.

A continuación, se analiza el módulo 2 (M2), los valores medidos de T_i y HR_i son mayores respecto a los valores obtenidos para M1, ambos módulos se diferencian por el invernadero adosado que posee M2. Se presentan estos valores junto a las zonas propuestas para el caso 2a (actividad pasiva) en la figura 64 y caso 2b (actividad moderada) en la figura 65. El periodo de estudio es similar (1158 horas) al análisis de M1.

Para zonas con actividad pasiva (figura 64), hay porcentajes menores dentro de las zonas de bienestar en comparación con M1, esto debido a valores mayores de la HR_i dentro de M2. En ningún instante los puntos se ubican dentro de la Z1, y las otras zonas tuvieron porcentajes bajos: 3,3 % (Z2), 1,5 % (Z3) y 0,1 % (Z4). En Z2, Z3 y Z4 ampliadas se situaron 29,7 %, 13,1 % y 14,5 % de datos, respectivamente, siendo porcentajes mayores a las zonas propuestas. Sin embargo, los mayores porcentajes de datos se ubican para las regiones que cumplen $T_i < T_{min,ZR} = 13,19$ °C (o $T_{min,ZE} = 11,86$ °C). Respecto a los periodos, de 0:00 a 8:00 y 19:00 a 23:00 todos los puntos T_i y HR_i están a la izquierda de las zonas propuestas (fuera de la zona de bienestar). En cambio, entre las 10:00 y 15:00 ocurre principalmente horas con T_i mayor $T_{max,ZR}$ (o $T_{max,ZE}$) dependiendo de la zona que se analice y otro grupo de puntos se sitúan en las zonas ampliadas.

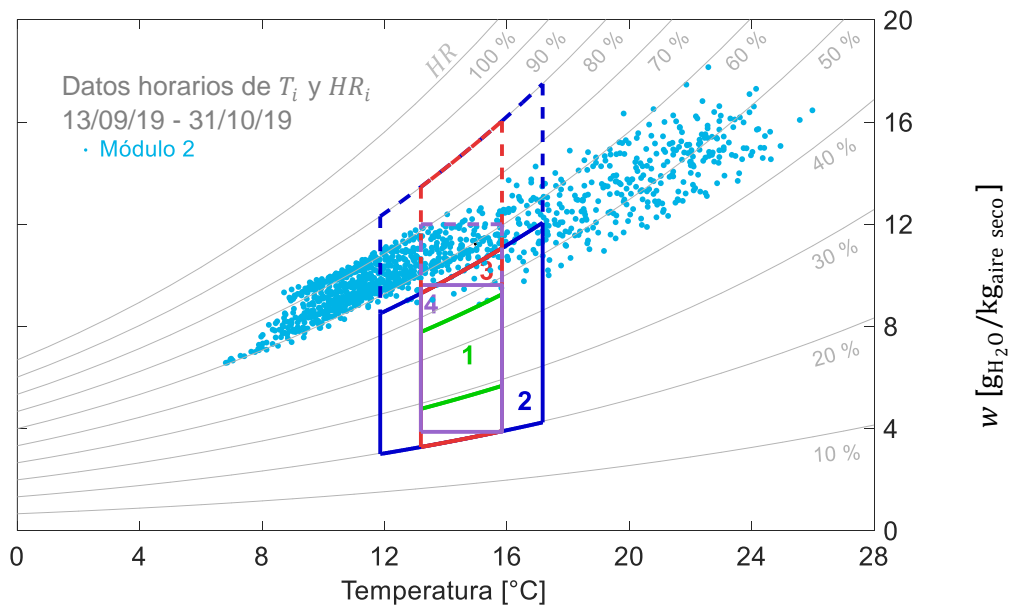


Figura 64. Zonas de bienestar propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para el caso 2a (actividad pasiva) y datos horarios de T_i y HR_i (puntos celestes) de M2, del 13 de setiembre al 31 de octubre de 2019.

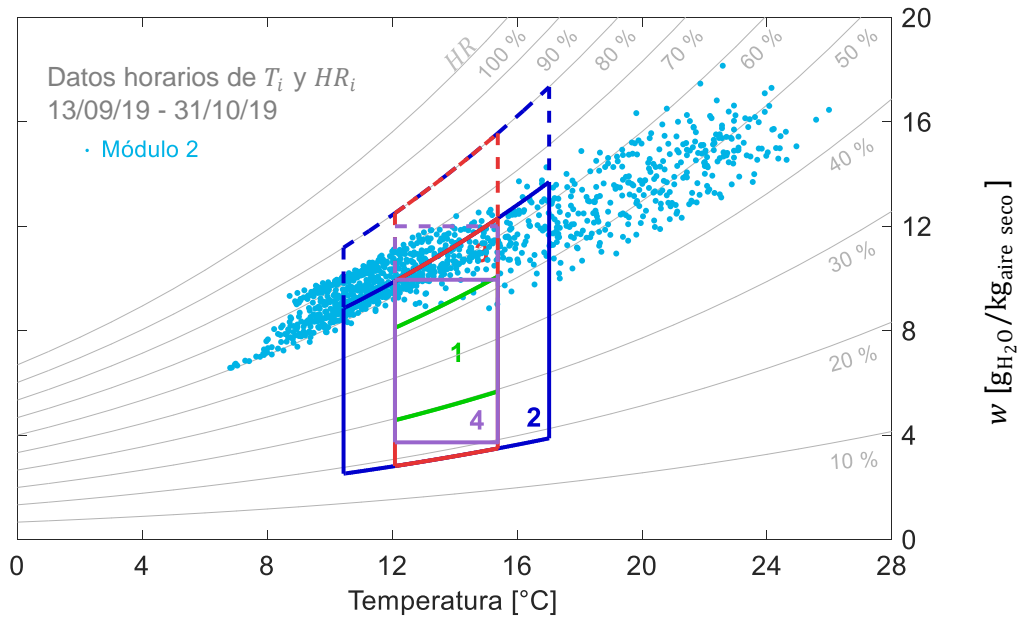


Figura 65. Zonas de bienestar propuestas Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada) para el caso 2b (actividad moderada) y datos horarios de T_i y HR_i (•) de M2, del 13 de setiembre al 31 de octubre de 2019.

Las zonas propuestas con actividad moderada se muestran en la figura 65 y contienen 0,3 % (Z1), 27,5 % (Z2), 14,0 % (Z3) y 0,6 % (Z4) de horas analizadas. En Z2, Z3 y Z4

ampliadas se ubican 25,6 %, 9,2 % y 22,6 % de datos, respectivamente. Hay mayores porcentajes en las regiones fuera de las zonas propuestas. En relación a las horas, de 0:00 a 7:00 y 21:00 a 23:00 todos los puntos T_i y HR_i se localizan a la izquierda de las zonas propuestas, en cambio entre 10:00 y 17:00 ocurre horas con T_i mayor al límite máximo. La humedad es elevada de 8:00 a 9:00 y 18:00 a 21:00 situándose dentro de las zonas ampliadas.

Tabla 24. Porcentaje de puntos T_i y HR_i de M1 y M2, dentro de las zonas propuestas (1, 2, 3 y 4) y otras regiones de la carta psicrométrica, del 13 de setiembre al 31 de octubre.

	Límites	Actividad pasiva				Actividad moderada			
		Z1	Z2	Z3	Z4	Z1	Z2	Z3	Z4
T [°C]	Mínimo ($T_{min,Z}$)	13,2	11,9	13,2	13,2	12,1	10,4	12,1	12,1
	Máximo ($T_{max,Z}$)	15,8	17,2	15,8	15,8	15,4	17,0	15,4	15,4
HR [%]	Mínimo ($HR_{min,Z}$)	28,7	19,8	19,8	-	29,6	18,3	18,3	-
	Máximo ($HR_{max,Z}$)	46,7	55,6	55,6	-	52,2	63,6	63,6	-
w [g/kg]	Mínimo ($w_{min,Z}$)	-	-	-	4,2	-	-	-	4,0
	Máximo ($w_{max,Z}$)	-	-	-	10,4	-	-	-	10,7
Porcentajes para M1 [%]	$T_{min,Z} \leq T \leq T_{max,Z}$	10,8	24,4	12,6	11,6	14,6	31,9	15,8	15,2
	$T < T_{min,Z}$	77,4	71,2	77,4	77,4	72,4	63,6	72,4	72,4
	$T > T_{max,Z}$	10,0	4,2	10,0	10,0	11,8	4,5	11,8	11,8
	$HR > HR_{min,Z}$ ($T_{min,Z} \leq T \leq T_{max,Z}$)	1,6	0,2	0,0	0,9	0,9	0,0	0,0	0,6
	$HR < HR_{max,Z}$ ($T_{min,Z} \leq T \leq T_{max,Z}$)	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0
Porcentajes para M2 [%]	$T_{min,Z} \leq T \leq T_{max,Z}$	0,0	3,3	1,5	0,1	0,3	27,5	14,0	0,6
	$T < T_{min,Z}$	54,8	41,5	54,8	54,8	43,9	20,5	43,9	43,9
	$T > T_{max,Z}$	30,6	25,6	30,6	30,6	32,9	26,4	32,9	32,9
	$HR > HR_{min,Z}$ ($T_{min,Z} \leq T \leq T_{max,Z}$)	14,6	29,7	13,1	14,5	22,9	25,6	9,2	22,6
	$HR < HR_{max,Z}$ ($T_{min,Z} \leq T \leq T_{max,Z}$)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Asimismo, los porcentajes de T_i y HR_i de M1 y M2 son presentados en la tabla 24, con información detallada para cada región de las cartas psicrométricas ilustradas.

En esta sección, se aprecia que M2 tiene temperaturas más altas respecto a M1, en particular, entre 10:00 y 17:00, situándose fuera de las zonas propuestas. En estos periodos se puede disminuir el valor de T_i promoviendo una ventilación natural, ya que al exterior se tienen temperaturas más bajas. Por otro lado, durante la noche aún se debe

buscar mejores estrategias para lograr aumentar el valor de T_i . Por último, M1 aún requiere mejoras ya que los porcentajes dentro de las zonas propuestas fueron bajos.

Cuando las temperaturas son altas, las zonas de bienestar se desplazarían hacia la derecha cuando la velocidad del aire (v) aumente. Haciendo todos los parámetros constantes del índice PMV y variando sólo v , se estima cuantos grados de temperatura se desplazaría la zona de bienestar. Se considera el mismo desplazamiento de la zona respecto a la temperatura para nuestras propuestas, que fueron estimadas en base a un promedio de $v = 0,05$ m/s. Por lo que se determinan las variaciones de temperatura para v igual a 1 m/s y 2 m/s respecto a $v = 0,05$ m/s. Estos gráficos son presentados en la figura 66 y corresponden sólo a Z2, van acompañados con los datos horarios de M2 entre 10:00 y 17:00. Al aumentar la velocidad un mayor porcentaje de datos se ubican dentro de la zona de bienestar.

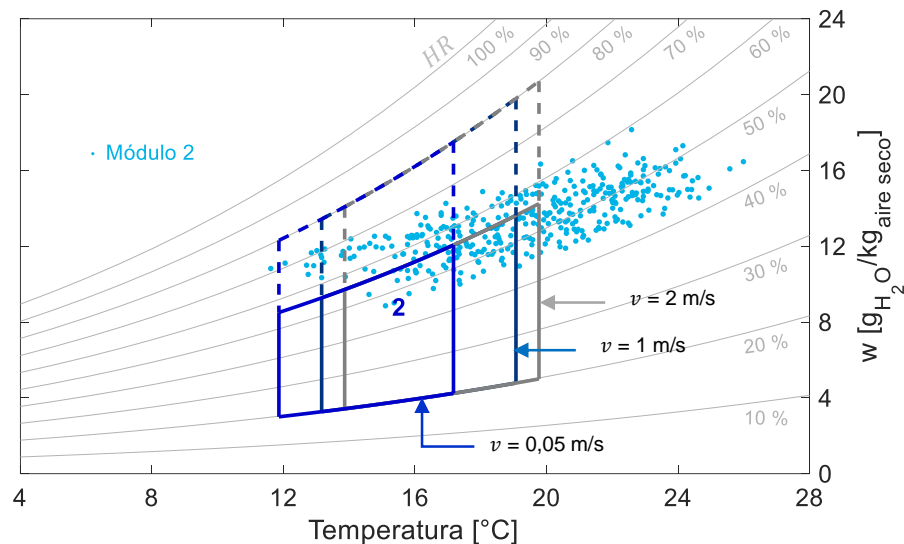


Figura 66. Desplazamiento de la zona de bienestar propuesta Z2 (línea azul) para la actividad moderada respecto a la variación de v y datos horarios de T_i y HR_i (•) de M2, del 13 de setiembre al 31 de octubre de 2019 entre 10:00 y 17:00.

5.3. Comparación con otras zonas de bienestar

En esta sección son analizados otras zonas o índices ya conocidos (Givoni e índice PMV). Asimismo, las zonas de bienestar son mostradas junto a datos del ambiente exterior en Imata (T_e y HR_e) y datos medidos al interior (T_i y HR_i) de los módulos M1 y M2.

El primer análisis es presentado en la figura 67, donde se muestra la zona de confort de Givoni acompañada de las zonas propuestas para el caso 2a (“la actividad pasiva”) en

Imata. La zona de Givoni se ubica a la derecha de las zonas del caso 2a, como ya se analizó en la sección 5.2.2, ningún punto T_e y HR_e sobrepasa a $T_{max,ZE}$. Por lo que, en la figura 67, ningún punto T_e y HR_e se encuentran dentro de la zona de confort de Givoni.

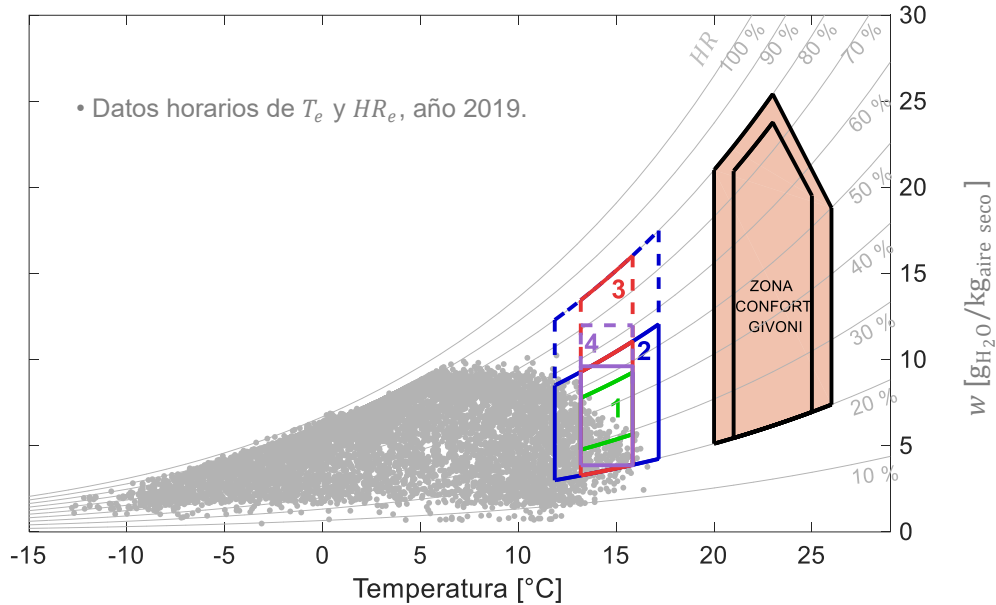


Figura 67. Comparación de la zona de confort de Givoni (región naranja) y las zonas del caso 2a (“la actividad pasiva”): Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada), acompañadas de datos horarios de T_e y HR_e (*) del año 2019 en Imata.

Continuando con este análisis, la figura 68 presenta nuevamente a la zona de confort de Givoni acompañada de las zonas propuestas para el caso 2a (“la actividad pasiva”), pero con datos horarios de T_i y HR_i registrados en M1 y M2. Estos datos horarios ya fueron estudiados en la sección 5.2.2 y comparados con las zonas de bienestar propuestas en el caso 2a. Todos los puntos T_i y HR_i de M1 se ubican a la izquierda de la zona de Givoni. Mientras algunas horas del día (14,7 % del total de horas), los puntos T_i y HR_i de M2 se ubican dentro de la zona de Givoni, principalmente alrededor del mediodía

El segundo análisis es presentado considera la zona de Givoni construida a partir de T_n propuestas por Brager y de Dear ($T_n = 17,8 + 0,31 \bar{T}$, donde $\bar{T} = 3,7$ °C es la temperatura anual de Imata), resultando T_n igual a 18,9 °C y con la zona tiene una amplitud de 5 °C. En la figura 69 se presenta esta zona modificada de Givoni junto a las zonas propuestas del caso 2a (actividad pasiva). Parte de la zona modificada de Givoni se solapa con Z2, pero ningún punto T_e y HR_e se ubica dentro de la zona modificada. En la figura 70, los puntos T_i y HR_i se disponen dentro de la zona modificada: 7,2 % (M1) y 19,2 % (M2), que son porcentajes bajos, para M1 alrededor del mediodía y para M2 algunas horas antes y

después del mediodía. Además, los datos para M2, superan al límite superior de esta zona, principalmente al mediodía.

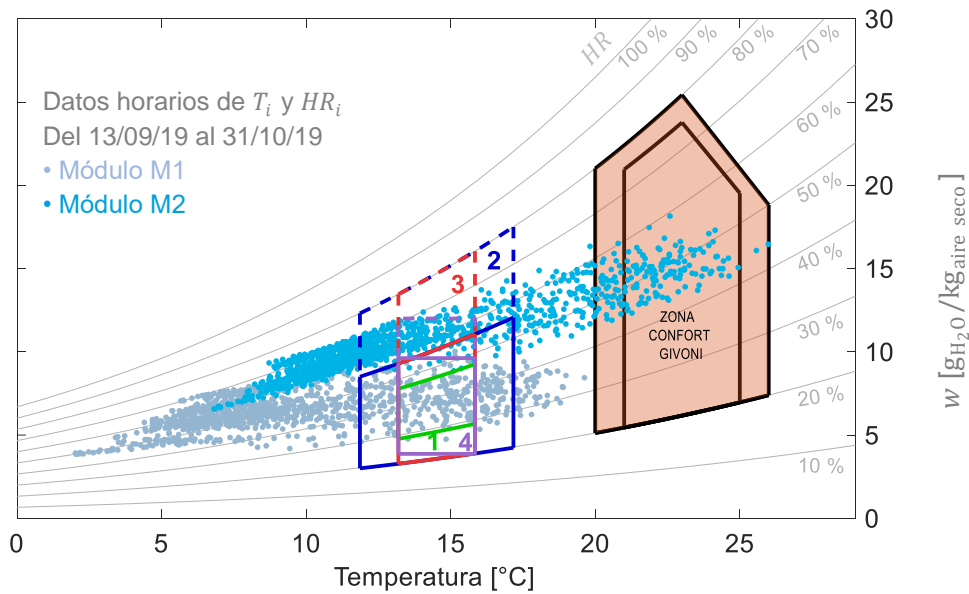


Figura 68. Comparación de la zona de confort de Givoni (región naranja) y las zonas del caso 2a (“la actividad pasiva”): Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada), acompañadas de datos horarios de T_i y HR_i (•) de M1 (•) y M2 (•), del 13 de setiembre al 31 de octubre de 2019.

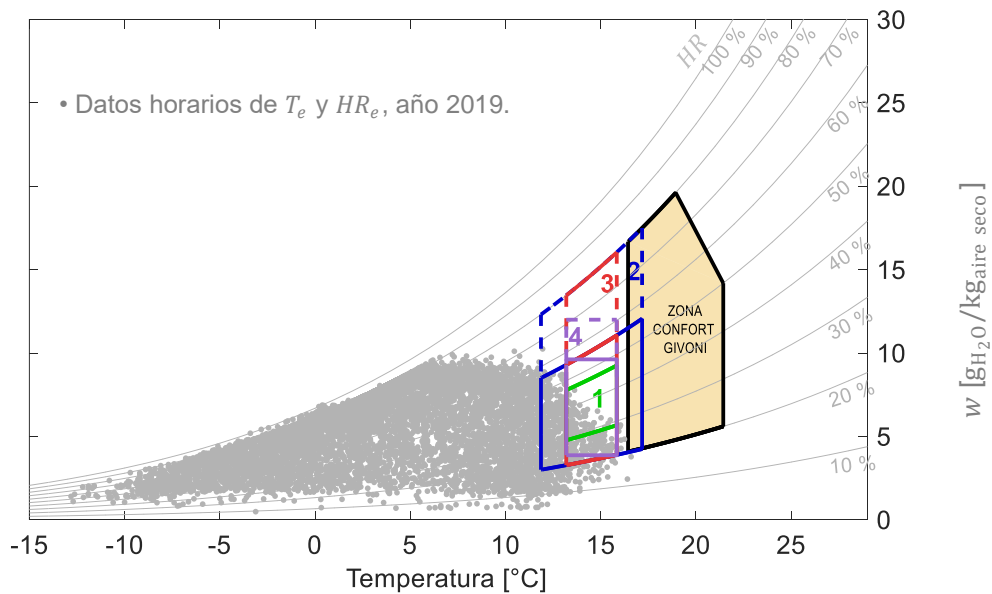


Figura 69. Comparación de la zona de Givoni (calculada con $T_n = 17,8 + 0,31 \bar{T}$, región amarilla) y las zonas del caso 2a (“la actividad pasiva”): Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada), acompañadas de datos horarios de T_e y HR_e (•) del año 2019 en Imata.

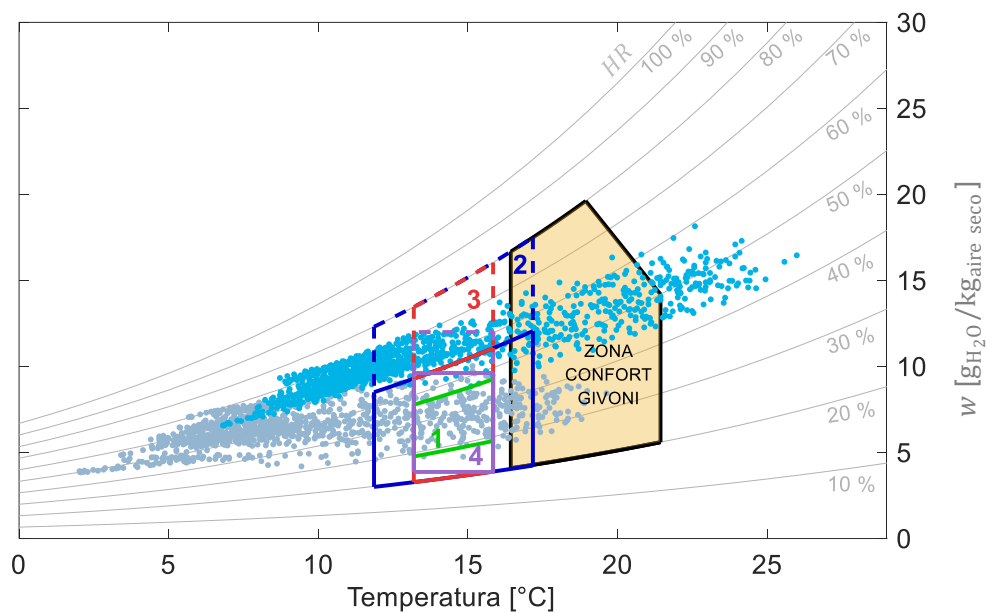


Figura 70. Comparación de la zona de Givoni (calculada con $T_n = 17,8 + 0,31 \bar{T}$, región amarilla) y las zonas del caso 2a (“la actividad pasiva”): Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada), acompañadas de datos horarios de T_i y HR_i de M1 (*) y M2 (*), del 13 de setiembre al 31 de octubre de 2019.

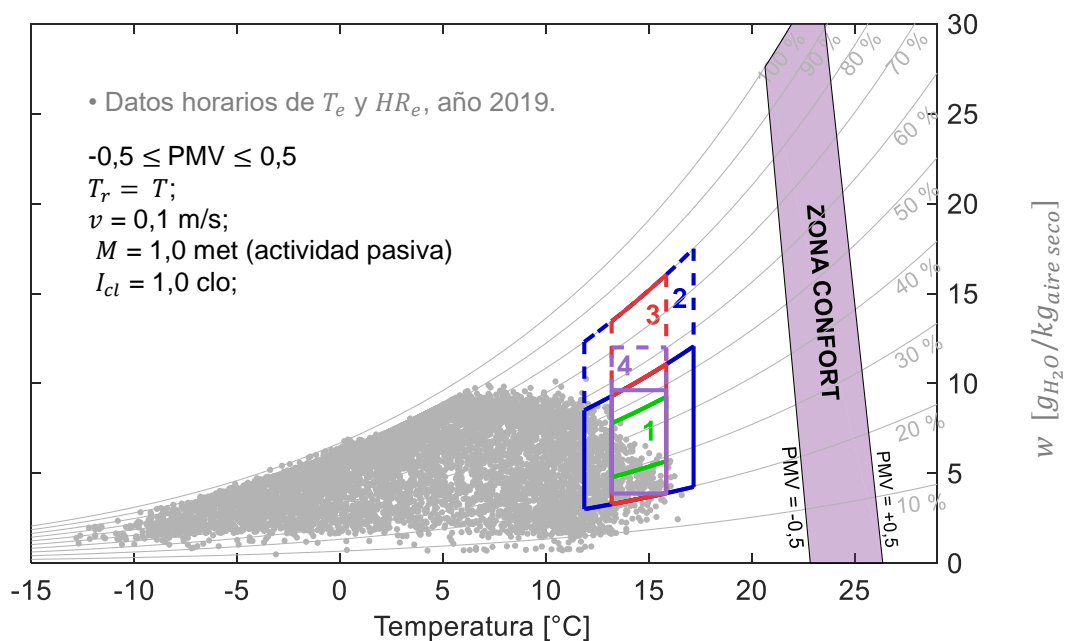


Figura 71. Comparación de la zona de confort del índice PMV ($-0,5 \leq PMV \leq 0,5$, para $T_r = T$; $v = 0,1$ m/s; $M = 1,0$ met; $I_{cl} = 1,0$ clo) y las zonas del caso 2a (“la actividad pasiva”): Z1 (línea verde), Z2 (línea azul), Z3 (línea roja) y Z4 (línea morada), acompañadas de datos horarios de T_e y HR_e (*) del año 2019 en Imata.

El tercer análisis involucra la estimación del índice PMV (calculado con el ANEXO I) cuyos valores entre -0,5 y +0,5 son considerados como las condiciones de bienestar. En la figura 71, los puntos grises representan los valores horarios de T_e y HR_e del año 2019 en Imata. El índice PMV se determina considerando $T_r = T$; $v = 0,1$ m/s; $M = 1,0$ met y $I_{cl} = 1,0$ clo. Las zonas de bienestar propuestas en el caso 2a (actividad pasiva) se ubican a la izquierda de la zona de confort del PMV y los valores T_e y HR_e no alcanzan a la zona de confort del PMV en ningún instante. Además, para T_r diferente a T , la zona PMV se traslada a la derecha para T_r elevado, en cambio si T_r disminuye la zona se desplaza a la izquierda.

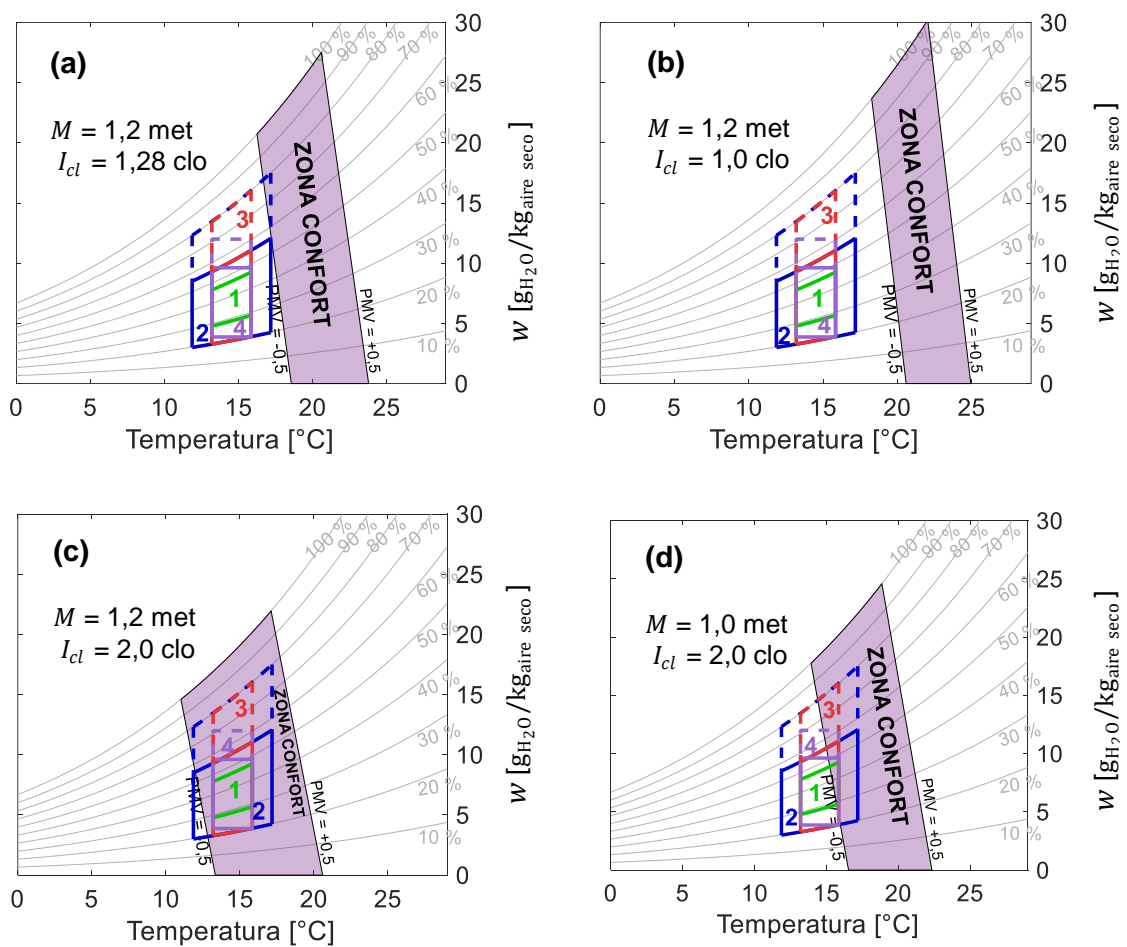


Figura 72. Zonas de bienestar propuestas para el caso 2a (actividad pasiva) y zonas de confort del índice PMV ($-0,5 \leq PMV \leq 0,5$) calculadas para $T_r = T$; $v = 0,05$ m/s y valores diferentes de M y I_{cl} : (a) $M = 1,2$ met; $I_{cl} = 1,28$ clo; (b) $M = 1,2$ met; $I_{cl} = 1,0$ clo; (c) $M = 1,2$ met; $I_{cl} = 2,0$ clo; y (d) $M = 1,0$ met; $I_{cl} = 2,0$ clo.

De manera similar, en la figura 72 se presenta las cuatro zonas de confort del PMV calculadas en base a diferentes valores de los parámetros I_{cl} y M . Para todos los casos se

consideró $T_r = T$, y la velocidad del aire promedio de las evaluaciones en Imata, $v = 0,05$ m/s. En la figura 72a, la zona PMV se determina para los valores medios $I_{cl} = 1,28$ clo y $M = 1,2$ met, obtenidos en el análisis de la actividad pasiva. En el caso de la figura 72b, $I_{cl} = 1,0$ clo y $M = 1,2$ met, la zona PMV se desplaza hacia la derecha cuando I_{cl} disminuye y la amplitud de la zona se estrecha. Para la figura 72c, $I_{cl} = 2,0$ clo y $M = 1,2$ met, la zona PMV se traslada a la izquierda con valores de I_{cl} mayores y la amplitud de la zona se ensancha. Las zonas de bienestar propuestas y las zonas de confort del índice PMV se solapan parcialmente. Por último, en la figura 72d, $I_{cl} = 2,0$ clo y $M = 1,0$ met, la zona PMV se desplaza a la derecha cuando el valor de M aumenta y la amplitud de la zona se reduce.

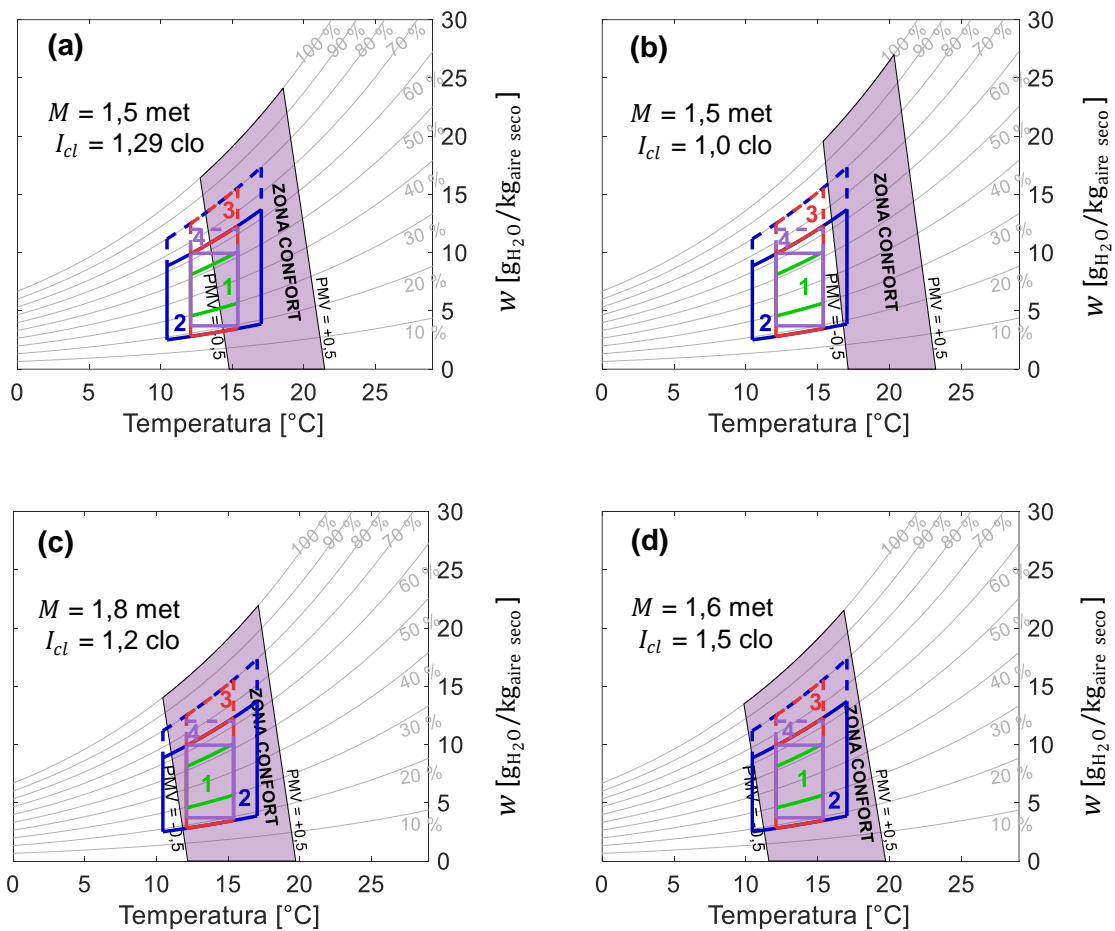


Figura 73. Zonas de bienestar propuestas para el caso 2b (actividad moderada) y zonas de confort según el índice PMV ($-0,5 \leq PMV \leq 0,5$) calculadas para $T_r = T$; $v = 0,05$ m/s y valores diferentes de M y I_{cl} : (a) $M = 1,5$ met; $I_{cl} = 1,29$ clo; (b) $M = 1,5$ met; $I_{cl} = 1,0$ clo; (c) $M = 1,8$ met; $I_{cl} = 1,2$ clo; y (d) $M = 1,6$ met; $I_{cl} = 1,5$ clo.

Los resultados del análisis para el caso 2b (actividad moderada) son presentados en la figura 73, donde las zonas PMV también fueron estimadas considerando cuatro casos,

dependiendo de la variación de los valores de M y I_{cl} . De nuevo se considera $T_r = T$, y $v = 0,05$ m/s. En la figura 73^a, la zona PMV es calculada para los valores medios de $I_{cl} = 1,29$ clo y $M = 1,5$ met obtenidos para el caso 2b. En el caso de la figura 73b, $I_{cl} = 1,0$ clo y $M = 1,5$ met, la zona PMV se desplaza hacia la derecha cuando el valor de I_{cl} disminuye y la amplitud de la zona se estrecha. Para la figura 73c, $I_{cl} = 1,2$ clo y $M = 1,8$ met, la zona PMV se traslada a la izquierda cuando los valores de I_{cl} y M aumentan, además la amplitud de la zona aumenta. Por último en la figura 73d, $I_{cl} = 1,5$ clo y $M = 1,6$ met, la zona PMV se desplaza ligeramente a la izquierda cuando I_{cl} aumenta y M disminuye. Se observa que las zonas del caso 2b y las zonas del índice PMV se solapan en regiones pequeñas (figura 73a y figura 73b) o casi por completo (figura 73a y figura 73b). Con un mayor valor de I_{cl} , la zona PMV se desplaza hacia la izquierda, disminuyendo sus límites de temperatura.

De nuevo la zona del PMV es presentada en la figura 74, teniendo en consideración $T_r = T$, $v = 0,2$ m/s y valores medios de $M = 1,2$ met y $I_{cl} = 1,28$ clo estimados para la actividad pasiva. También los datos horarios de T_i y HR_i de M1 y M2 son representados Durante algunas horas, M2 alcanza a la zona PMV (20,8 %), antes y después del mediodía. Mientras M1 tiene 3 % de horas (alrededor del mediodía) dentro de esta zona.

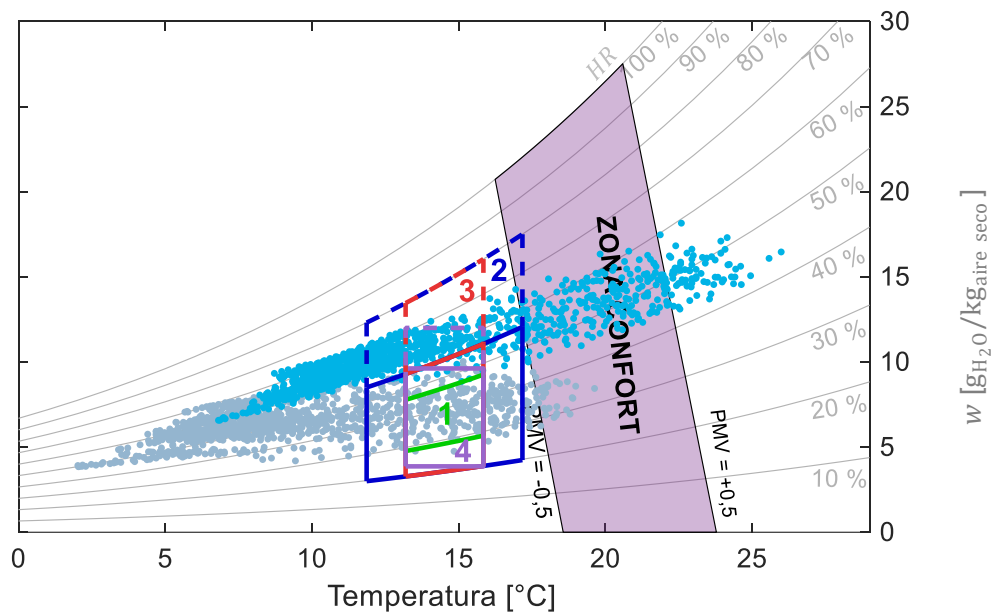


Figura 74. Zonas de bienestar propuestas (1, 2, 3 y 4) para el caso 2a (actividad pasiva), datos horarios de T_i y HR_i de M1 (•) y M2 (•) y zona de confort para el índice PMV ($-0,5 \leq \text{PMV} \leq 0,5$) calculado para $T_r = T$; $v = 0,05$ m/s; $M = 1,2$ met; $I_{cl} = 1,28$ clo.

Por último, estimaciones del índice PMV con datos experimentales de temperatura, humedad relativa, temperatura radiante, nivel de vestimenta y nivel de actividad registrados durante las encuestas en Imata son presentadas en el ANEXO V. Se analiza si es posible realizar una simplificación para no recurrir a métodos recursivos para su estimación. Asimismo, se examina como varía el índice PMV con diferentes valores de sus parámetros.

5.4. Conclusión del capítulo

Este capítulo comprueba que los límites de bienestar determinados para las zonas Z1, Z2, Z3 y Z4 dependen del nivel de actividad reportado por los encuestados. Los límites fueron menores para la actividad pasiva en comparación a los límites determinado para la actividad moderada. Las zonas de bienestar propuestas se desplazan hacia la izquierda al aumentar el valor de I_{cl} . Utilizar más prendas de vestir mejora a las condiciones acercando a la persona dentro de la zona de bienestar en un lugar con clima frío. Sin embargo, no se logró establecer en forma clara con nuestros datos esta tendencia, probablemente los datos recolectado de I_{cl} tengan algún error de registro.

Con los registros de T_e y HR_e se confirma que no existen meses cálidos en Imata, no existe inviernos ni veranos marcados. El clima es frío con temperaturas bajas durante la época de las heladas entre junio y agosto. Mientras el clima es menos frío durante diciembre, aumentan algunos grados la temperatura, pero sigue siendo frío.

Para los datos de T_i y HR_i de los módulos M1 y M2 son pocas las horas dentro de las zonas Z1, Z2, Z3 y Z4, siendo M2 con más horas; sin embargo, se debe disminuir T_i al mediodía con una ventilación natural, ya que se obtuvieron valores elevados. Además, se resalta la necesidad de calentamiento en ambos módulos durante las noches, debido a que las temperaturas son menores a los límites de bienestar propuestos.

Por otro lado, comparar las zonas Z1, Z2, Z3 y Z4 con la zona de confort de Givoni demuestra que los límites de Givoni no son aceptables en Imata, sus límites sobreestiman las condiciones requeridas para alcanzar el bienestar térmico. Aunque estos límites disminuyen al utilizar la zona modificada de Givoni (calculada con $T_n = 17,8 + 0,31 T_a$), aún la mayor parte de esta zona considera temperaturas altas (mayor a 18,9 °C) y se solapa con Z2 entre 17,2 °C y 18,9 °C. La última zona, del índice PMV, depende de muchos parámetros que se desplazan dependiendo de los valores de I_{cl} y M , la zona se desplaza hacia la izquierda y se ensancha para valores altos de I_{cl} y M .

VI. ANÁLISIS ENERGÉTICO DE VIVIENDAS EN IMATA CON *m2m*

En esta sección se realiza el análisis energético de dos módulos experimentales (M1 y M2) situados en Imata. Primero, M1 y M2 son descritos y son presentadas sus características principales. Segundo, se muestran las simulaciones iniciales de la temperatura de ambos módulos realizadas con el programa *m2m* [22] y las validaciones con los datos experimentales de T_i de M1 y M2 medidos del 13 de setiembre al 31 de octubre de 2019. Como resultado, se obtienen los caudales de aire que M1 y M2 intercambian con el exterior. Tercero, las tasas de renovación de aire se asumen como valores constantes y se simulan las temperaturas para todo el año 2019. Los resultados son analizados y comparados con los límites mínimos de temperaturas establecidos previamente ($T_{min,ZR}$, $T_{min,ZE}$) y T_n . Cuarto, se presentan las energías estimadas para alcanzar los límites $T_{min,ZR}$, $T_{min,ZE}$ y T_n al interior de los módulos M1 y M2. Por último, se muestran los aportes de energía de cada superficie interior de M1 y M2, como consecuencia del balance energético de cada módulo.

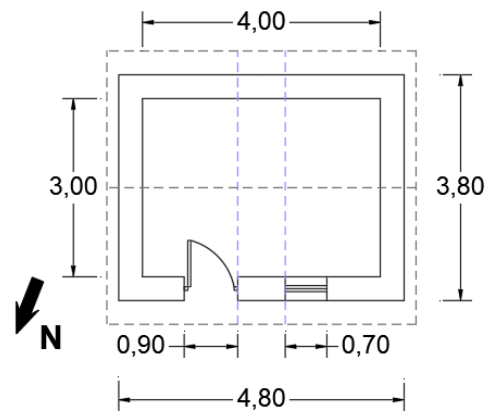
6.1. Módulos experimentales M1 y M2

M1 y M2 fueron construidos en el año 2018 con materiales característicos de las viviendas tradicionales de Imata. Las paredes están compuestas de adobe de espesor (e) = 0,40 m, con revestimiento de yeso en ambas caras ($e = 0,015$ m) y están construidas sobre un cimientado y un sobrecimientado de piedras y barro. El piso está compuesto por una capa de piedras ($e = 0,15$ m), un entramado de listones de madera de $e = 0,05$ m, (contribuyendo con una capa de aire) y tablas de madera ($e = 0,0125$ m). El techo a dos aguas es de fibrocemento con una claraboya de policarbonato alveolar transparente (en ambas alas del techo y en la parte central). Además, la puerta (0,90 m x 2,10 m) tiene un marco de madera y una hoja de calamina. La ventana es de vidrio simple con marco metálico. Por último, M1 y M2 cuentan con un falso techo compuesto de placas de triplay ($e = 0,004$ m) y planchas de poliestireno expandido ($e = 0,05$ m). Debajo de la claraboya existe un falso techo de policarbonato alveolar y sobre este (en forma vertical) se colocaron laterales de triplay pintados de blanco.

M2 posee un invernadero adosado delante de la puerta, siendo este elemento adicional respecto a M1. En la figura 75 y la figura 76 son presentados los planos y fotografías de M1 (18,24 m²) y M2 (27,84 m²), respectivamente. El invernadero de 9,6 m² tiene las siguientes características: paredes de adobe con un cemento y sobrecimiento de piedra y barro. La pared de adobe tiene 1 m de altura y $e = 0,40$ m, con recubrimiento de yeso en ambas caras. La cubierta es de policarbonato alveolar transparente. El piso está compuesto por una capa de piedras ($e = 0,10$ m) y concreto simple con terminación pulida ($e = 0,10$ m). La puerta tiene marco de madera y la hoja es de policarbonato.



(a)

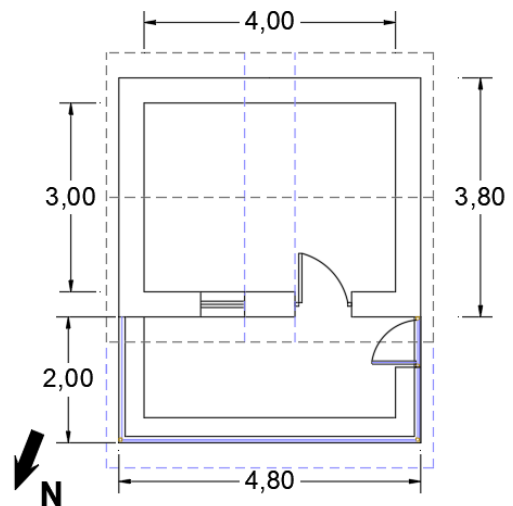


(b)

Figura 75. Módulo 1 (M1) construido en Imata: (a) fotografía y (b) plano.



(a)



(b)

Figura 76. Módulo 2 (M2) construido en Imata: (a) fotografía y (b) plano.

En la sección 5.2, se compararon las zonas de bienestar con mediciones de T_i y HR_i , pero sólo se analizaron 49 días. Con las simulaciones dinámicas se determina las temperaturas de los 316 días restantes del año 2019. Para este fin, se utilizó el software *m2m*; se escogió *m2m* porque es una herramienta de investigación que proporciona información que otras herramientas de simulación más conocidas no pueden (fácilmente) proporcionar, ya que son herramientas cerradas que generalmente se encapsulan en una interfaz gráfica de usuario. Además, *m2m* es muy fácil de usar y no requiere un cálculo o recursos de memoria muy grande [22]. En el ANEXO VI se presenta más información de *m2m*.

6.2. Simulaciones térmicas iniciales

Las temperaturas medidas en los módulos M1 y M2 son comparadas con las temperaturas obtenidas en la simulación con *m2m* de manera que se correspondan, y así obtener, con un proceso de identificación paramétrica, las tasas de renovación de aire. Posteriormente, se simulan para todo el año 2019 y se determinan los periodos durante los cuales las temperaturas se ubican dentro de la zona de bienestar. En este caso sólo se analiza la temperatura, debido a que *m2m* no estima la humedad relativa.

Toda simulación energética requiere información de entrada, el programa *m2m* requiere lo siguiente:

- ❖ Propiedades térmicas de los materiales: conductividad térmica (k), densidad (ρ) y calor específico (C_p), establecidas en la tabla 25 para M1 y M2.
- ❖ Características de las viviendas (área de las superficies, composición de los materiales, zonas térmicas). En las tablas 26 a 28 se presentan las principales características de M1 y M2. Para estimar el área se consideró la longitud media (promedio de la longitud interior y la longitud exterior) de cada superficie de la envolvente.
- ❖ Datos de clima de Imata: es necesario entregar a *m2m* la temperatura exterior horaria y la irradiancia solar que incide sobre las diferentes superficies de la envolvente de los módulos.

Los módulos M1 y M2 tienen materiales similares, sólo se diferencian en el invernadero adosado presente en M2. La composición y espesor de los elementos de la envolvente son mostrados en la tabla 26.

Tabla 25. Propiedades térmicas de los materiales utilizados en M1 y M2.

Material	k [W/(m·K)]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/(kg·K)]
Adobe	0,35 ^a	1400 ^c	1000 ^c
Aire	0,026 ^b	1,2 ^b	1000 ^b
Calamina*	237 ^b	7200 ^b	380 ^b
Concreto	1,51 ^b	2300 ^b	1000 ^b
Fibrocemento	0,23 ^b	1250 ^b	1500 ^b
Madera	0,14 ^b	500 ^b	1600 ^b
Piedra	2,30 ^b	2300 ^b	1000 ^b
Policarbonato	0,043 ^b	216 ^d	1200 ^b
Poliestireno	0,033 ^b	30 ^b	1700 ^b
Triplay	0,14 ^b	560 ^b	1400 ^b
Yeso	0,40 ^b	1000 ^b	1000 ^b

^a Piñas *et al* [124]

^b EM110 [33]

^c Rempel [125]

^d Ficha técnica Makrolon

*Propiedades del Zinc

Tabla 26. Composición de los elementos de la envolvente y espesor de los materiales en M1 y M2.

Módulo	Envolvente	Composición	Espesor [m]
M1 y M2	Pared de adobe	Yeso	0,015
		Adobe	0,400
		Yeso	0,015
	Pared de triplay	Triplay	0,004
	Tejado	Fibrocemento	0,004
	Puerta	Calamina	0,0003
	Piso de madera	Piedra	0,150
		Aire	0,050
		Madera	0,0125
	Cielo raso translúcido	Policarbonato alveolar	0,006
	Cielo raso	Triplay	0,004
		Poliestireno	0,050
	Ventana	Vidrio simple	0,003
Claraboya	Policarbonato alveolar	0,006	
Piso de concreto	Piedra	0,100	
	Concreto	0,100	
	Yeso	0,015	
Muro de invernadero	Adobe	0,400	
	Yeso	0,015	
	Policarbonato alveolar	0,006	
Cubierta del invernadero	Policarbonato alveolar	0,006	
Puerta invernadero	Policarbonato alveolar	0,006	

Tabla 27. Superficie de los elementos que componen el módulo M1.

Módulo	Ítems	Valores
Altura máxima [m]		3,00
Área total de la envolvente (incluido ventanas y techos) [m ²]		66,24
Volumen de aire dentro de M1 [m ³]		31,20
Superficies de la envolvente* [m ²]	Techo de fibrocemento	13,28
	Claraboya (norte y sur)	2,96
	Pared de adobe norte	7,47
	Pared de adobe este	8,99
	Pared de adobe sur	10,05
	Pared de adobe oeste	8,99
	Piso de madera	12,00
	Ventana	0,70
	Puerta	1,80
	Superficies interiores [m ²]	Cielo raso triplay
Cielo raso policarbonato		2,40
Pared de triplay		2,40

* Cálculo realizado con la longitud media de las superficies de M1.

Tabla 28. Superficie de los elementos que componen el módulo M2.

Módulo	Ítems	Valores
Altura promedio [m]		3,00
Área total de la envolvente (incluido ventanas y techos) [m ²]		86,01
Volumen de aire dentro de M2 [m ³]		41,96
Superficies de la envolvente* [m ²]	Techo de fibrocemento	15,99
	Claraboya (norte y sur)	2,96
	Pared de adobe norte	3,52
	Pared de adobe este	10,59
	Pared de adobe sur	10,05
	Pared de adobe oeste	10,36
	Cubierta invernadero vertical	6,21
	Cubierta invernadero techo	6,83
	Puerta invernadero	1,10
	Piso de madera	12,00
	Piso concreto	6,40
Superficies interiores [m ²]	Ventana	0,70
	Puerta	1,80
	Pared de adobe interior	7,47
	Cielo raso triplay	9,60
	Cielo raso policarbonato	2,40
	Pared de triplay	2,40

* Cálculo realizado con la longitud media de las superficies de M2.

Primero se analiza el módulo M1, con la simulación en *m2m* entre mayo y junio de 2019, se dedujo las tasas de intercambios de aire (que no pudieron ser medidas). La figura 77 presenta las simulaciones; en ella se observa que las temperaturas medidas y simuladas de las noches son cercanas, a excepción del 2 y 3 de junio, probablemente porque la puerta permaneció abierta durante esos días, enfriando el ambiente interior. El caudal de aire se considera constante e igual a 0,025 m³/s. Una simulación similar se realiza con otras fechas, entre setiembre y octubre, obteniendo una tasa similar.

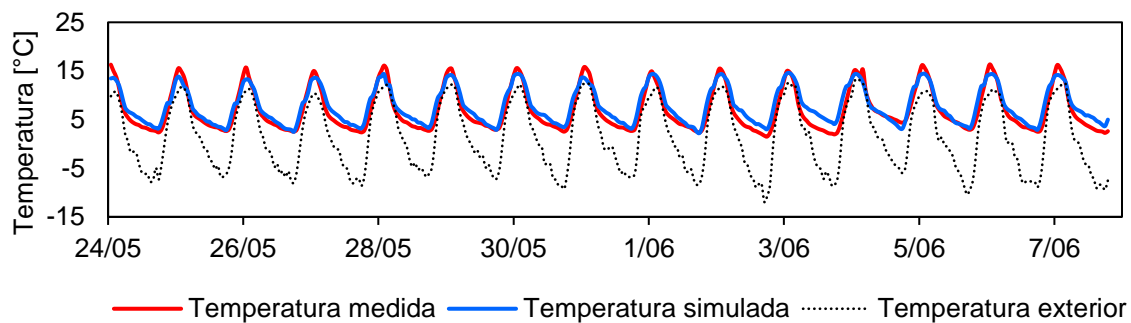


Figura 77. Temperatura experimental y temperatura simulada con *m2m* de M1, periodo mayo y junio 2019.

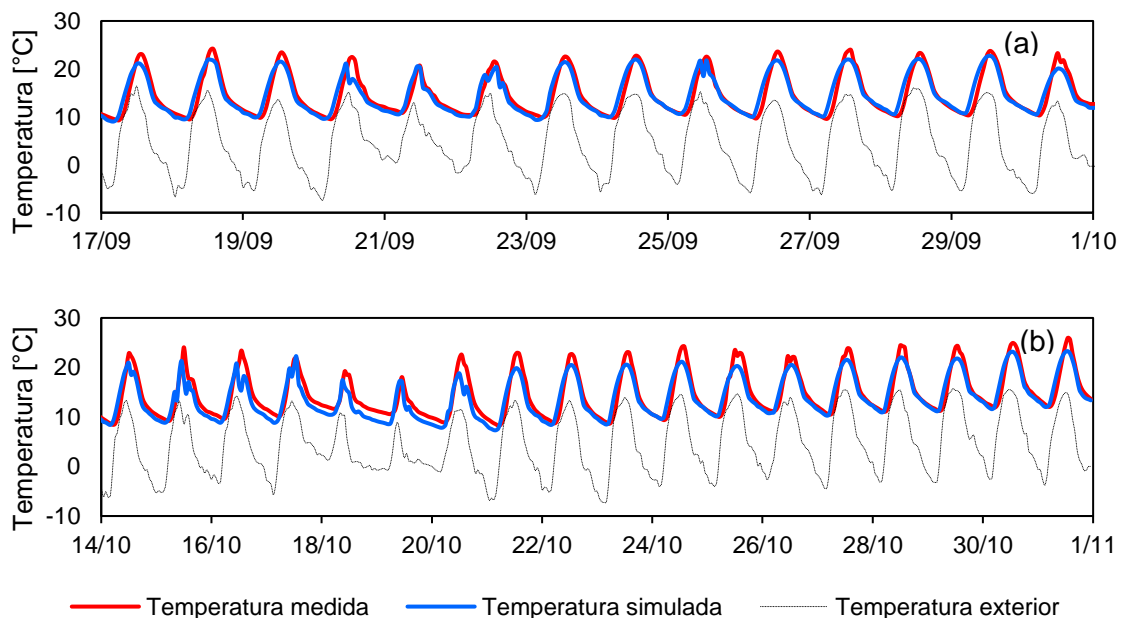


Figura 78. Temperatura experimental y temperatura simulada de M2: (a) periodo 1 setiembre 2019 y (b) periodo 2 octubre 2019.

De forma similar para M2, la simulación en *m2m* entre setiembre y octubre de 2019, es presentada en la figura 78, las temperaturas simuladas y experimentales del periodo de

análisis son mostradas. La tasa de intercambios de aire entre el interior y exterior se considera constante e igual a $0,015 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que ocasiona que las diferencias de temperaturas al mediodía sean mayores; además se deduce un caudal de $0,018 \text{ m}^3/\text{s}$ entre el invernadero adosado y el exterior.

6.3. Simulación anual de temperatura

Una vez determinados los caudales de aire, se simulan ambos módulos, obteniendo T_i horaria para todo el 2019. A partir de T_i se estiman los periodos de bienestar de ambos módulos. La temperatura base (T_b) es considerada como un valor mínimo de temperatura que asegure el bienestar térmico. Para este estudio, se asume que T_b puede tener tres valores: $T_b = T_{min,ZE}$; $T_b = T_{min,ZR}$ y $T_b = T_n$. Estos valores ya fueron establecidos para la actividad pasiva y la actividad moderada en el capítulo IV.

6.3.1. Temperatura interior de M1

En la tabla 29, se observan los resultados de T_i en promedio mensual y horario de M1 durante el 2019. El promedio mensual más bajo corresponde a julio ($7,2 \text{ }^\circ\text{C}$) que coincide con el periodo de menor temperatura exterior; diciembre posee el promedio mensual más elevado ($10,6 \text{ }^\circ\text{C}$). M1 tiene T_i más bajo de 5:00 a 6:00 y T_i más altas alrededor de 13:00.

Las temperaturas T_i y T_e del mes más frío (julio) y $T_{min,ZE}(-)$, $T_{min,ZR}(- \cdot -)$ y $T_n(- -)$ determinados para ambos tipos de actividad son presentados en la figura 79. Respecto a la actividad pasiva, al considerar T_b igual a $T_{min,ZE}$ ($10,44 \text{ }^\circ\text{C}$) hay un intervalo de bienestar entre 10:00 y 16:00. En cambio, con T_b igual a $T_{min,ZR}$ ($12,09 \text{ }^\circ\text{C}$) y T_n ($13,74 \text{ }^\circ\text{C}$), M1 requiere calentamiento durante todas las horas. En cuanto a la actividad moderada, T_i es mayor a $T_{min,ZE}$ ($11,86 \text{ }^\circ\text{C}$) y $T_{min,ZR}$ ($13,19 \text{ }^\circ\text{C}$) de 11:00 a 16:00 y de 11:00 a 15:00 respectivamente; fuera de esos horarios se requiere calentamiento y siempre T_i es menor a T_n ($14,52 \text{ }^\circ\text{C}$).

Tabla 29. Temperaturas interiores (T_i , en °C) horarias y mensuales de M1. Temperaturas: máximas (rojo) y mínimas (azul).

Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
0	7,8	7,4	7,9	7,6	6,2	5,5	4,5	5,9	6,5	6,8	7,6	8,4	6,8
1	7,6	7,2	7,8	7,4	6	5,2	4,2	5,5	6,2	6,4	7,4	8,1	6,6
2	7,4	7,1	7,6	7,2	5,6	4,8	3,8	5,1	5,9	6,1	7,2	7,9	6,3
3	7,3	7,0	7,4	7,0	5,4	4,5	3,5	4,8	5,6	5,8	7,0	7,6	6,1
4	7,1	6,9	7,3	6,8	5,2	4,2	3,2	4,4	5,4	5,6	6,8	7,4	5,9
5	7,0	6,8	7,1	6,7	4,9	3,9	3,0	4,1	5,2	5,3	6,6	7,2	5,6
6	7,3	6,9	7,1	6,7	4,8	3,6	2,8	4,1	5,2	5,8	7,2	7,7	5,8
7	8,3	7,7	8,0	7,5	6,2	5,0	3,9	5,6	6,6	7,4	8,5	8,9	7,0
8	9,6	8,7	9,2	9,1	8,3	7,2	6,1	7,7	8,8	9,5	10,0	10,5	8,7
9	10,9	9,8	10,6	11,2	10,6	9,7	8,4	10,1	10,8	11,4	11,5	12,1	10,6
10	12,1	11,0	11,9	12,9	12,4	11,5	10,3	12,1	12,5	13,1	12,7	13,4	12,2
11	13,0	11,8	12,9	13,5	13,5	13,0	11,8	13,5	13,4	14,1	13,6	14,4	13,2
12	13,7	12,5	13,5	14,3	14,4	13,8	12,6	14,4	14,0	14,4	14,2	15,0	13,9
13	13,9	12,8	13,8	14,1	14,6	13,9	12,6	14,7	14,4	14,2	14,3	15,2	14,1
14	13,8	12,7	13,6	13,5	14,4	13,9	12,6	14,5	14,0	13,9	14,0	15,1	13,8
15	13,3	12,3	13,0	12,9	13,7	13,2	12,1	14,0	12,9	13,2	13,2	14,4	13,2
16	12,4	11,4	12,0	11,8	12,4	12,2	11,1	12,8	11,9	12,1	12,1	13,4	12,1
17	11,3	10,3	10,8	10,6	10,6	10,4	9,2	11,1	10,4	10,7	10,9	12,1	10,7
18	10,1	9,1	9,5	9,3	8,8	8,4	7,3	9,0	9,0	9,3	9,6	10,7	9,2
19	9,2	8,4	9,0	8,8	8,1	7,5	6,6	8,0	8,3	8,5	9,0	9,9	8,4
20	8,8	8,1	8,7	8,5	7,5	7,0	6,1	7,4	7,8	8,0	8,6	9,4	8,0
21	8,5	7,9	8,4	8,2	7,2	6,6	5,7	7,0	7,5	7,7	8,3	9,1	7,7
22	8,2	7,7	8,2	8,0	6,9	6,2	5,3	6,6	7,2	7,4	8,0	8,8	7,4
23	8,0	7,5	8,1	7,8	6,5	5,9	5,0	6,3	6,9	7,1	7,8	8,6	7,1
\bar{T}_i	9,9	9,1	9,7	9,6	8,9	8,2	7,2	8,7	9,0	9,3	9,8	10,6	9,2

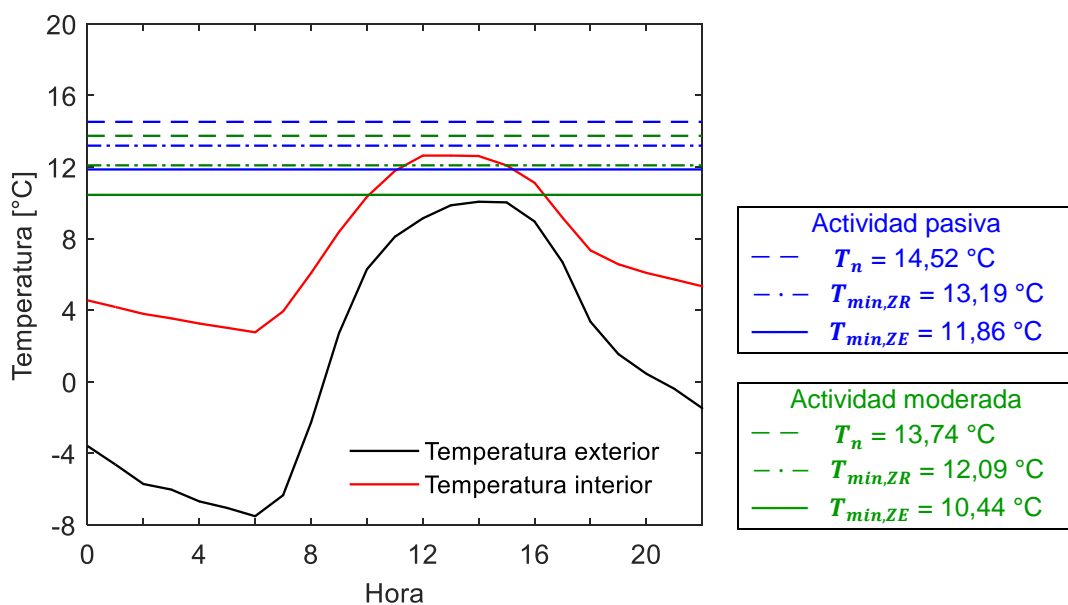


Figura 79. Temperatura interior horaria de M1 (línea roja) y temperatura exterior de Imata (línea negra), promedio durante julio del 2019.

6.3.2. Temperatura interior de M2

En la tabla 30 se observa los resultados de T_i en promedio mensual y horario de M2 durante el 2019. El mes con temperatura media más baja es 10,5 °C (en julio), coincidiendo con el periodo de T_e más bajo y la temperatura media diaria más elevada es 14,4 °C (diciembre). M2 posee las temperaturas más bajas entre 4:00 y 6:00 y las temperaturas más altas se obtienen a las 13:00.

Tabla 30. Temperaturas interiores (T_i , en °C) horarias y mensuales de M2. Temperaturas: máximas (rojo) y mínimas (azul)

Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
0	10,7	10,1	10,9	10,6	9,8	9,1	7,9	9,8	10,1	10,8	11,0	11,9	10,2
1	10,5	10,0	10,7	10,4	9,5	8,7	7,5	9,4	9,7	10,5	10,7	11,6	10,0
2	10,4	9,8	10,5	10,2	9,2	8,4	7,2	9,1	9,4	10,2	10,5	11,4	9,7
3	10,2	9,7	10,4	10,0	8,9	8,1	6,9	8,8	9,2	9,9	10,3	11,1	9,5
4	10,0	9,6	10,2	9,8	8,7	7,8	6,7	8,4	8,9	9,6	10,1	10,9	9,2
5	9,9	9,5	10,0	9,6	8,5	7,5	6,4	8,1	8,7	9,4	9,9	10,7	9,0
6	10,4	9,7	10,2	9,7	8,4	7,2	6,2	8,0	8,9	10,2	10,7	11,4	9,3
7	11,5	10,6	11,2	10,6	9,7	8,5	7,3	9,7	10,4	12,0	12,1	12,7	10,5
8	12,9	11,7	12,5	12,3	11,7	10,7	9,4	11,8	12,6	14,2	13,7	14,4	12,3
9	14,3	13,0	13,9	14,5	14,1	13,0	11,6	14,2	14,7	16,2	15,3	16,1	14,2
10	15,6	14,2	15,2	16,3	15,9	14,7	13,5	16,1	16,5	17,9	16,6	17,5	15,8
11	16,6	15,1	16,2	16,9	17,0	16,2	15,0	17,5	17,4	19,0	17,5	18,5	16,9
12	17,2	15,7	16,9	17,7	17,9	17,0	15,8	18,4	17,9	19,3	18,1	19,1	17,6
13	17,6	16,1	17,2	17,6	18,2	17,3	15,9	18,8	18,4	19,1	18,3	19,4	17,8
14	17,5	16,0	17,1	16,9	18,0	17,2	15,9	18,6	18,1	18,9	18,0	19,3	17,6
15	17,0	15,6	16,5	16,3	17,3	16,5	15,4	18,1	16,9	18,1	17,2	18,6	17,0
16	16,0	14,8	15,5	15,1	16,1	15,5	14,4	16,9	15,9	17,0	16,1	17,5	15,9
17	14,8	13,5	14,2	13,9	14,1	13,7	12,4	15,1	14,3	15,3	14,7	16,1	14,3
18	13,5	12,2	12,8	12,5	12,4	11,8	10,6	12,9	12,6	13,5	13,1	14,6	12,7
19	12,4	11,4	12,1	11,9	11,6	11,0	9,9	11,9	11,9	12,7	12,4	13,5	11,9
20	11,9	11,0	11,7	11,6	11,1	10,4	9,4	11,3	11,4	12,2	12,0	13,0	11,4
21	11,6	10,7	11,5	11,3	10,7	10,1	9,0	10,9	11,0	11,8	11,7	12,6	11,1
22	11,3	10,5	11,2	11,0	10,4	9,7	8,6	10,5	10,7	11,5	11,4	12,4	10,8
23	11,1	10,3	11,1	10,8	10,1	9,4	8,3	10,2	10,4	11,2	11,2	12,1	10,5
	13,1	12,1	12,9	12,8	12,5	11,6	10,5	12,7	12,8	13,8	13,4	14,4	12,7

La figura 80 presenta a T_i y T_e horarias del mes más frío (julio), así como los límites $T_{min,ZE}(-)$, $T_{min,ZR}(- \cdot -)$ y $T_n(- -)$ para ambos tipos de actividades. T_i es mayor a T_b en los siguiente periodos: (a) de 10:00 a 17:00 ($T_{min,ZE} = 11,86$ °C), 10:00 a 16:00 ($T_{min,ZR} = 13,19$ °C) y 11:00 a 15:00 ($T_n = 14,52$ °C) para la actividad pasiva, y (b) de 9:00 a 18:00 ($T_{min,ZE} = 10,44$ °C), 10:00 a 17:00 ($T_{min,ZR} = 12,09$ °C) y 11:00 a 16:00 ($T_n = 13,74$ °C) para la actividad moderada.

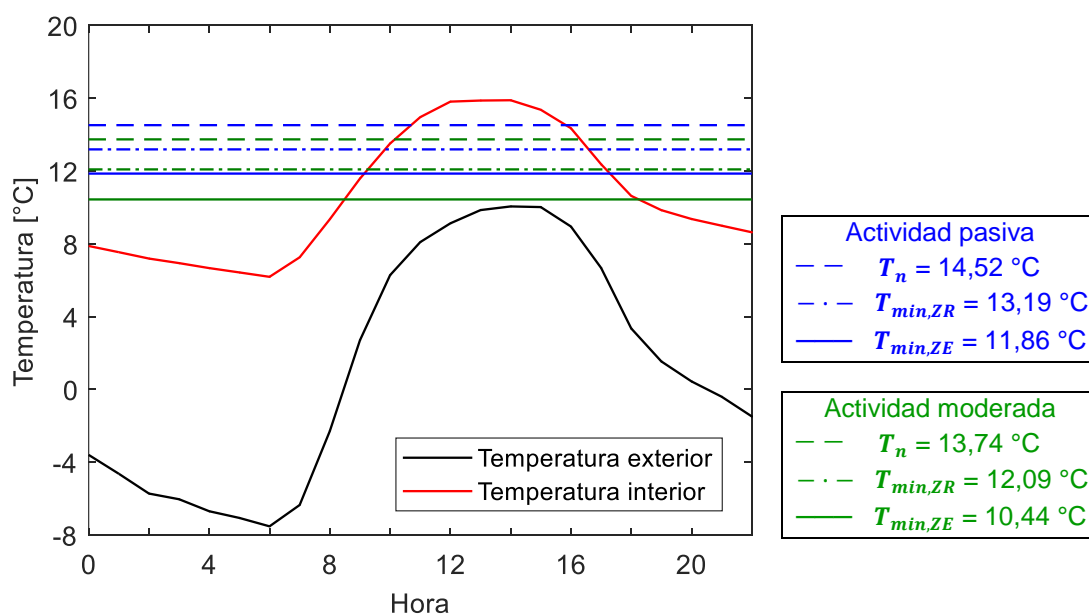


Figura 80. Temperatura horaria al interior de M2 (línea roja) y del ambiente exterior en Imata (línea negra), promedio durante julio de 2019.

6.3.3. Comparación de temperaturas de M1 y M2

La temperatura de M2, en promedio anual, es 3,5 °C mayor a M1, esto se debe al aporte energético del invernadero adosado. En la tabla 31, se presentan los valores medios mensuales de la T_i simulada, julio posee los valores más bajos. En M2, alrededor de las 13:00, T_i sobrepasan los límites superiores de la ZE; entonces existe la necesidad de enfriar el ambiente en este periodo, esto puede lograrse con la ventilación natural, abrir puertas y/o ventanas, disminuyendo los valores de T_i . Durante el intervalo de la noche, T_i de M2 también son mayores respecto a M1.

A medida que el valor de T_b tienen un mayor valor, el número de horas con necesidad de calentamiento del ambiente interior también aumenta. Los límites de temperatura de bienestar para la actividad moderada requieren menos horas de calefacción para alcanzar T_b respecto a los límites para la actividad pasiva, ya que los primeros tienen valores menores de temperaturas. Del análisis de M1, el porcentaje del total de las horas del año con necesidad de calentamiento representa: (a) 75 % ($T_b = T_{min,ZE}$), 84 % ($T_b = T_{min,ZR}$) y 100 % ($T_b = T_n$) para la actividad pasiva, y (b) 67 % ($T_b = T_{min,ZE}$), 77 % ($T_b = T_{min,ZR}$) y 88 % ($T_b = T_n$) para la actividad moderada. Respecto a M2, el porcentaje del total de las horas del año con necesidad de calentamiento representa: (a) 49 % ($T_b = T_{min,ZE}$), 61 %

($T_b = T_{min,ZR}$) y 100 % ($T_b = T_n$) para la actividad pasiva, y (b) 29 % ($T_b = T_{min,ZE}$), 52 % ($T_b = T_{min,ZR}$) y 65 % ($T_b = T_n$) para la actividad moderada. En la tabla 32 se presenta en detalle el número de horas por cada mes con necesidad de calentamiento. Mientras el color es más fuerte, mayor es el número de horas; con un color claro el número de horas con requerimiento de calor es menor.

Tabla 31. Promedios mensuales de la temperatura interior de los módulos M1 y M2 y la temperatura exterior en Imata.

	Temperatura [°C]		
	M1	M2	Exterior
Enero	9,9	13,1	5,0
Febrero	9,1	12,1	4,8
Marzo	9,7	12,9	5,1
Abril	9,6	12,8	4,5
Mayo	8,9	12,5	2,4
Junio	8,2	11,6	1,6
Julio	7,2	10,5	1,0
Agosto	8,7	12,7	2,0
Setiembre	9,0	12,8	3,7
Octubre	9,3	13,8	3,8
Noviembre	9,8	13,4	4,8
Diciembre	10,6	14,4	5,3
Anual	9,2	12,7	3,7

Tabla 32. Número de horas con necesidad de calentamiento ($T_i < T_b$) para M1 y M2 con diferentes valores de T_b .

Número de horas												
T_b [°C]	M1						M2					
	Act. pasiva			Act. moderada			Act. pasiva			Act. moderada		
	$T_{min,ZE}$	$T_{min,ZR}$	T_n	$T_{min,ZE}$	$T_{min,ZR}$	T_n	$T_{min,ZE}$	$T_{min,ZR}$	T_n	$T_{min,ZE}$	$T_{min,ZR}$	T_n
	11,86	13,19	14,52	10,44	12,09	13,74	11,86	13,19	14,52	10,44	12,09	13,74
Ene.	554	633	696	480	564	662	315	435	510	143	348	472
Feb.	569	625	658	485	580	641	370	463	540	229	392	506
Mar.	565	651	723	488	577	686	360	466	530	121	385	487
Abr.	549	604	664	479	561	634	369	457	523	193	389	492
May.	539	600	682	497	548	632	415	467	523	281	425	488
Jun.	549	609	683	508	560	638	437	481	527	339	445	507
Jul.	617	675	737	569	625	703	508	552	592	440	513	573
Ago.	541	599	686	489	550	621	399	454	492	280	409	473
Set.	552	598	645	496	557	616	352	447	512	245	369	479
Oct.	543	603	671	485	558	631	310	399	463	171	327	424
Nov.	523	591	671	459	536	627	305	415	478	116	327	440
Dic.	491	562	632	425	497	584	196	356	434	29	232	400
Total	6592	7350	8148	5860	6713	7675	4336	5392	6124	2587	4561	5741

Se considera una combinación de los requerimientos de calentamiento para las actividades pasiva y moderada. Se supone que las personas descansan al interior de la vivienda de 0:00 a 5:00 y de 20:00 a 23:00, entonces en ese intervalo se utiliza T_b igual a los límites para la actividad pasiva. De manera similar, se asume que el resto del día (entre 6:00 y 19:00), las personas realizan actividad moderada al interior de la vivienda, así que T_b es igual a los límites estimados para la actividad moderada.

El módulo M1 requiere calefacción de 0:00 a 5:00 y de 20:00 a 23:00 (3650 horas) durante el año analizado. De 6:00 a 19:00 requiere calefacción durante 2213 horas (figura 81a), 3063 horas (figura 81b) y 4025 horas (figura 81c) del año. El módulo M2 necesita calefacción de 0:00 a 5:00 y 20:00 a 23:00 durante 3156 horas (figura 82a), 3564 horas (figura 82b) y 3645 horas (figura 82a). También requiere calefacción de 6:00 a 19:00 para 590 horas (figura 82a), 1293 horas (figura 82b) y 2120 horas (figura 82c).

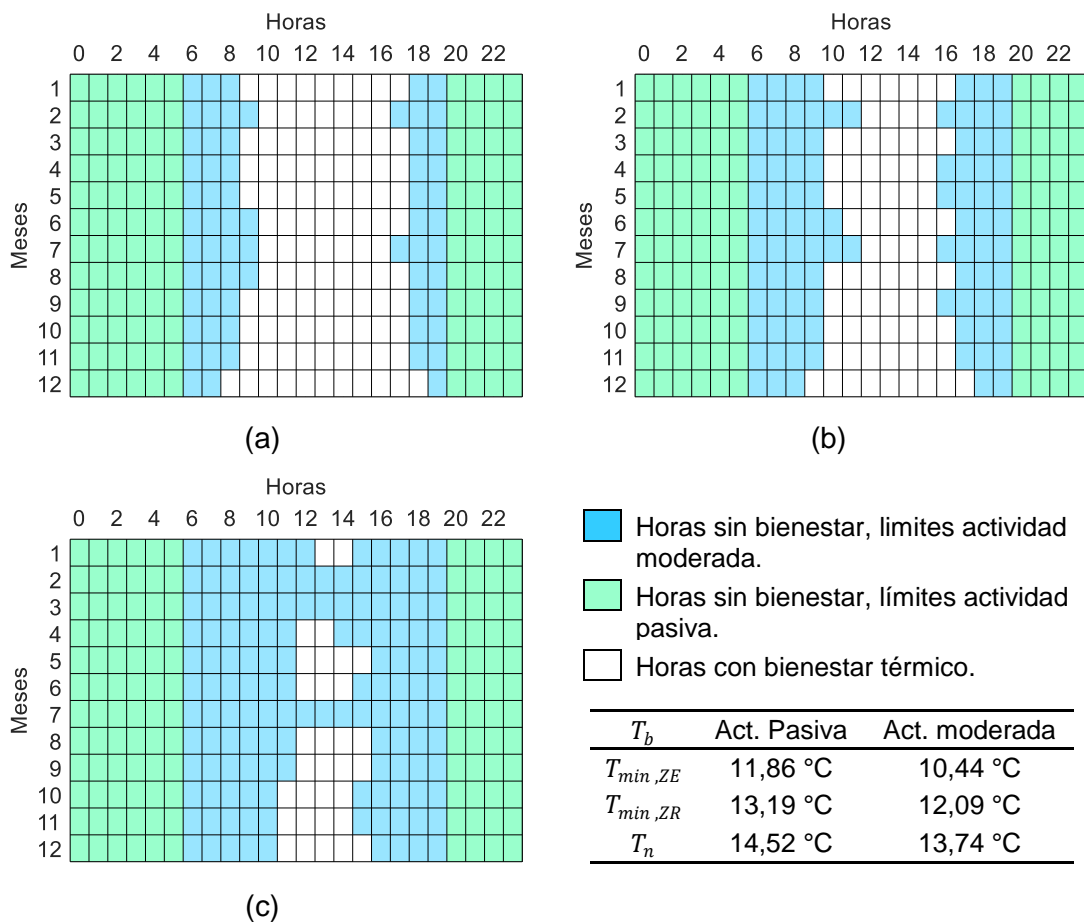


Figura 81. Horas con y sin bienestar térmico en M1, para la actividad moderada de 6:00 a 19:00 y la actividad pasiva durante el resto de horas del día. Considerando T_b igual a:

(a) $T_{min,ZE}$, (b) $T_{min,ZR}$ y (c) T_n .

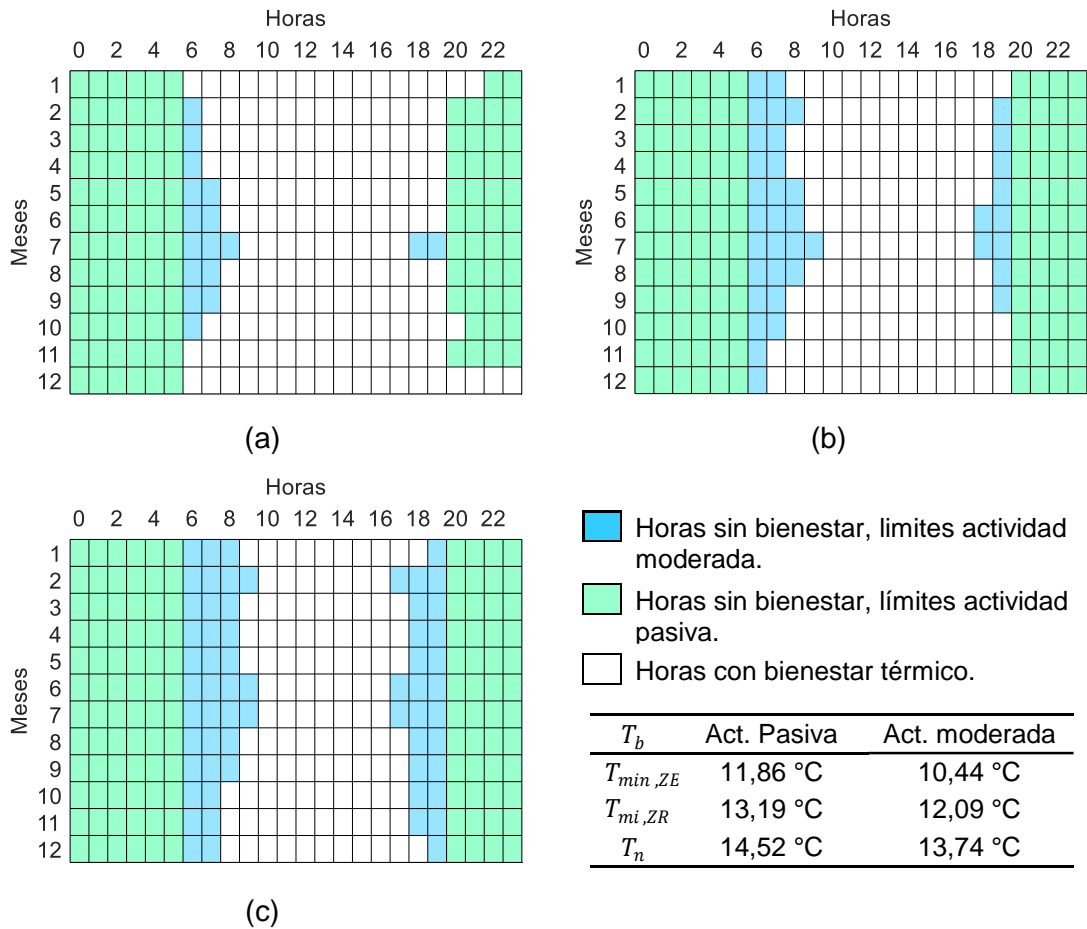


Figura 82. Horas con y sin bienestar térmico en M2, para la actividad moderada de 6:00 a 19:00 y la actividad pasiva durante el resto de horas del día. Considerando T_b igual a:

(a) $T_{min,ZE}$, (b) $T_{min,ZR}$ y (c) T_n .

Aunque M2 posee temperaturas interiores más altas respecto a M1, las horas con necesidad de calor son casi similares durante las noches en ambos módulos, a excepción del caso de la figura 82a (caso $T_b = T_{min,ZE}$), en el cual se aprecia que diciembre y enero son los meses con menores horas. En el intervalo del día se observa una clara diferencia, en M2 hay más horas que sobrepasan a T_b establecidas en comparación a M1, esto es gracias al aporte del invernadero adosado que calienta el ambiente principal de M2.

6.4. Energía requerida para lograr el bienestar térmico

La energía de calentamiento Q_h (en Wh) para lograr la T_b puede ser determinada con el modelo mensual simplificado de la norma ISO 13790 [126] (ecuación 8) y depende del coeficiente de pérdidas totales de la edificación H_T (en $W/°C$) el cual incluye las pérdidas por conducción, convección e intercambios de aire (\dot{Q}_{inf} , en $W/°C$); los grados-horas GH

para obtener T_b con respecto a T_e ; las ganancias de energía Q_g (en Wh) debido a la radiación solar y las ganancias internas (en este estudio este aporte es cero). El factor de utilización de las ganancias η (ecuación 9, adimensional) se estima como la ratio entre las ganancias brutas y las pérdidas del edificio γ (ecuación 10). La constante de tiempo del edificio τ (ecuación 13, en h) depende de la inercia de la vivienda. Además, a es un parámetro adimensional que depende de τ y para una estimación mensual se utiliza se recomienda la ecuación 11.

τ es estimada como la relación entre la capacidad térmica útil del edificio C (en Wh/°C) y H_T . Para determinar C se utiliza la ecuación 12, donde e_i es el espesor de cada material del lado interior del ambiente, se considera la mitad del espesor si la envolvente no tiene aislamiento o tiene un aislamiento repartido, limitado por un espesor total igual a 10 cm, ρ_i (en kg/m³) es la densidad de cada elemento, c_i en J/(kg·K) es el calor específico de cada elemento y A_i (en m²) es el área de las superficies consideradas en el análisis.

$$Q_h = H_T \cdot GH - \eta \cdot Q_g \quad (8)$$

$$\eta = \begin{cases} \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}}, & \text{si } \gamma \neq 1; \\ \frac{a}{a + 1}, & \text{si } \gamma = 1; \\ \frac{1}{\gamma}, & \text{si } \gamma < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{Q_g}{H_T \cdot GH} \quad (10)$$

$$a = 1 + \frac{\tau}{15} \quad (11)$$

$$C = \sum \rho_i c_i e_i A_i \quad (12)$$

$$\tau = \frac{C}{H_T} \quad (13)$$

Empleando las ecuaciones desde la 8 hasta la 13, se obtiene la energía de calefacción Q_h necesaria para alcanzar los límites inferiores de las zonas de bienestar de los ambientes principales de M1 y M2. En la tabla 33, los resultados las estimaciones de Q_h de ambos módulos, considerando T_b igual a $T_{min,ZE}$, $T_{min,ZR}$ y T_n , son presentados. Un color oscuro corresponde a una mayor necesidad de energía, mientras un color claro significa menor energía requerida. Para M1, el ambiente analizado tiene $H_{T-M1} = 77,0 \text{ W/°C}$ (con $\sum A \cdot U = 50,1 \text{ W/°C}$ y $\dot{Q}_{inf} = 26,9 \text{ W/°C}$), la capacidad térmica útil $C = 1101 \text{ Wh/°C}$ (igual para M1 y M2), la constante de tiempo $\tau_{M1} = 14,3 \text{ h}$, el factor $a_{M1} = 2,0$ y el factor γ varía cada mes. Las ganancias solares se determinan multiplicando la radiación solar que atraviesa la ventana y claraboya por la transmitancia de las superficies y su respectiva área. En el caso

de M2, se estima $H_{total-M2} = 58,5 \text{ W/}^\circ\text{C}$ (con $\sum A \cdot U = 40,1 \text{ W/}^\circ\text{C}$ y $\dot{Q}_{inf} = 18,4 \text{ W/}^\circ\text{C}$), la constante de tiempo $\tau_{M2} = 18,8 \text{ h}$ y el factor $a_{M2} = 2,3$.

Tabla 33. Energía diaria [kWh] requerida por M1 y M2 para alcanzar T_b (casos actividad pasiva y actividad moderada).

Mes	M1						M2					
	Act. pasiva			Act. moderada			Act. pasiva			Act. moderada		
	$T_{min,ZE}$	$T_{min,ZR}$	T_n	$T_{min,ZE}$	$T_{min,ZR}$	T_n	$T_{min,ZE}$	$T_{min,ZR}$	T_n	$T_{min,ZE}$	$T_{min,ZR}$	T_n
1	5,0	6,9	9,0	3,3	5,4	7,8	2,7	4,0	5,3	1,7	2,9	4,5
2	5,0	6,2	10,2	3,8	5,3	8,9	3,4	4,8	6,3	2,1	3,6	5,4
3	4,5	6,3	9,5	3,4	5,4	8,3	3,0	4,4	5,8	1,8	3,2	4,9
4	4,8	5,6	10,0	3,7	4,8	8,8	3,3	4,7	6,1	2,1	3,6	5,3
5	6,2	5,4	12,2	5,1	4,6	11,0	4,7	6,1	7,6	3,4	5,0	6,7
6	7,2	7,8	13,6	6,0	6,9	12,3	5,7	7,1	8,7	4,3	5,9	7,8
7	8,0	8,8	14,9	6,8	7,9	13,6	6,5	8,0	9,6	5,0	6,7	8,7
8	6,2	8,9	12,3	5,1	8,0	11,0	4,7	6,1	7,5	3,6	5,0	6,7
9	5,2	8,5	10,6	4,1	7,6	9,4	3,7	5,0	6,4	2,7	3,9	5,6
10	4,8	6,2	9,9	3,7	5,4	8,7	3,2	4,5	5,8	2,3	3,4	5,0
11	4,3	6,8	9,2	3,3	6,0	8,0	2,9	4,1	5,5	1,9	3,1	4,7
12	3,6	5,4	8,1	2,8	4,6	6,9	2,4	3,4	4,7	1,5	2,5	3,9
Anual	5,4	6,9	10,8	4,3	6,0	9,6	3,9	5,2	6,6	2,7	4,1	5,8

La figura 83 presenta la energía diaria (media anual) necesaria para alcanzar T_b considerando los límites de la actividad pasiva y moderada en M1. De manera análoga la figura 84 muestra la media anual de la energía diaria necesaria en M2.

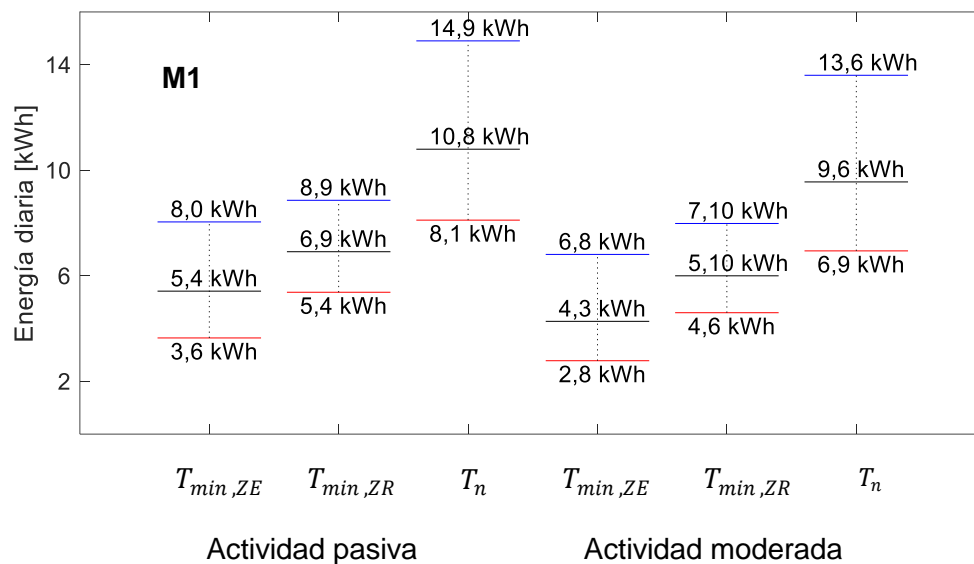


Figura 83. Energía diaria requerida para asegurar el bienestar térmico en M1: promedio anual (línea negra), máxima anual (línea azul) y mínima anual (línea roja) para diferentes valores de T_b .

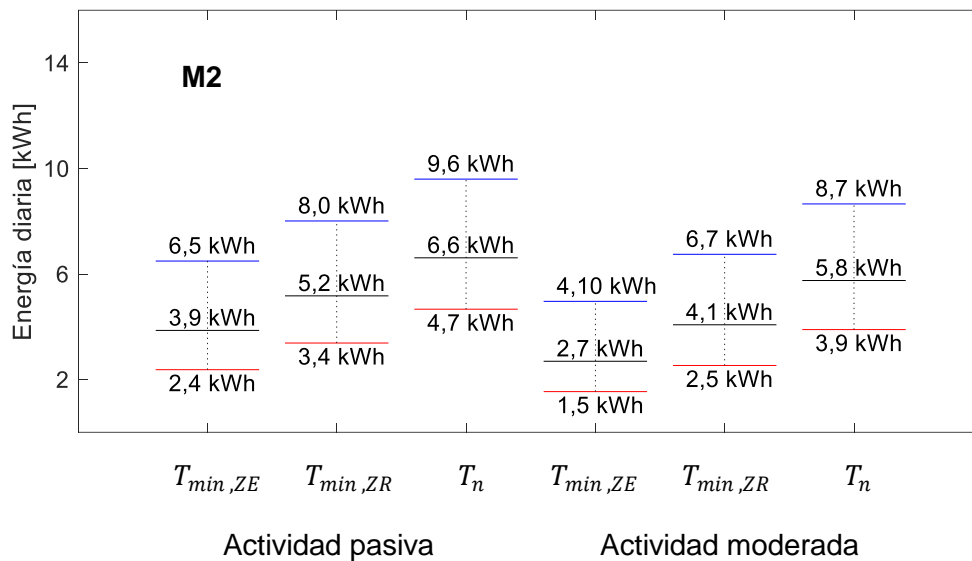


Figura 84. Energía diaria requerida para asegurar el bienestar térmico en M2: promedio anual (línea negra), máxima anual (línea azul) y mínima anual (línea roja) para diferentes valores de T_b .

Asimismo, M2 se considera como “M1 mejorado” debido al invernadero adosado, que contribuye con el calentamiento del ambiente principal. Al comparar las medias anuales de ambos módulos, M2 reduce los requerimientos de energía respecto a M1: (a) la energía necesaria para alcanzar T_b se reduce en 28,7 % ($T_{min,ZE} = 11,86$ °C), 25,2 % ($T_{min,ZR} = 13,19$ °C) y 38,7 % ($T_n = 14,52$ °C) considerando los límites pasivos y (b) los requerimientos también disminuyen en 37,0 % ($T_{min,ZE} = 10,44$ °C), 32,1 % ($T_{min,ZR} = 12,09$ °C) y 39,8 % ($T_n = 13,74$ °C) para los límites moderados.

El módulo M2 aún con el invernadero adosado requiere energía, entonces se simula de nuevo ambos módulos con pequeñas modificaciones en la composición de los elementos de la envolvente: se modifican la puerta de calamina por una de madera, una ventana de doble vidrio y aislamiento interior del techo de fibrocemento con poliestireno ($e = 5$ cm), además se considera reducir las infiltraciones a la tercera parte, los resultados son presentados en la tabla 34.

Luego de simular las modificaciones de M1 se obtienen: (a) una reducción del requerimiento de energía del 11,8 % ($T_b = 11,86$ °C); 9,4 % ($T_b = 13,19$ °C) y 5,7 % ($T_b = 14,52$ °C) para la actividad pasiva y (b) el requerimiento disminuye en 14,3 % ($T_b = 10,44$ °C), 10,8 % ($T_b = 12,09$ °C) y 6,3 % ($T_b = 13,74$ °C) para la actividad moderada. En

el caso de M2, se estiman: (a) una disminución de demanda de energía del 9,9 % ($T_b = 11,86$ °C), 7,5 % ($T_b = 13,19$ °C) y 5,9 % ($T_b = 14,52$ °C) para la actividad pasiva y (b) el requerimiento se reduce en 12,6 % ($T_b = 10,44$ °C), 9,3 % ($T_b = 12,09$ °C) y 6,8 % ($T_b = 13,74$ °C) para la actividad moderada.

Tabla 34. Energía diaria [kWh] requerida en los módulos M1 y M2, con mejoras y sin mejoras.

		T_b [°C]	Energía requerida para alcanzar T_b [kWh]			
			Sin mejoras		Con mejoras	
			M1	M2	M1	M2
Límites pasivos	$T_{min,ZE}$	11,86	5,4	3,9	4,8	3,5
	$T_{min,ZR}$	13,19	6,9	5,2	6,3	4,8
	T_n	14,52	10,8	6,6	10,2	6,2
Límites moderados	$T_{min,ZE}$	10,44	4,3	2,7	3,7	2,4
	$T_{min,ZR}$	12,09	6,0	4,1	5,4	3,7
	T_n	13,74	9,6	5,8	9,0	5,4

6.5. Energía en las superficies de la envolvente

La simulación de M1 y M2 con *m2m* permitió determinar T_i para todas las horas del año 2019, junto con este parámetro se obtuvieron las temperaturas superficiales interiores (T_{si}) y se realizó el análisis energético de cada elemento de la envolvente interior de los módulos. El procedimiento es similar al utilizado en el análisis de una vivienda altoandina del Perú [127].

El análisis energético se divide en dos periodos: el intervalo 1 ("día") de 6:00 a 17:00 y el intervalo 2 ("noche") de 18:00 a 5:00. Los resultados del análisis de estos dos intervalos se presentan en el ANEXO VII. En esta sección se presenta el análisis diario de energía (intervalo 1 más intervalo 2) de M1 y M2.

Es importante tener en cuenta lo siguiente, relacionando a las expresiones ganancia y pérdida de calor:

- Ganancia de calor se refiere al calor que el ambiente interior está obteniendo desde alguna superficie o por el ingreso de los rayos solares.
- Pérdida de calor se refiere al calor que el ambiente interior está cediendo a alguna superficie o intercambiando por infiltraciones.

6.5.1. Análisis energético de M1

De la figura 85, la claraboya es el principal elemento de ganancia de calor y a través de este ingresan los rayos solares a M1 permitiendo el calentamiento solar directo. En octubre la ganancia solar diaria es la más alta (15,7 kWh), en cambio en febrero la ganancia diaria es la más baja (11,2 kWh). Existen pérdidas diarias a través de este componente, que varían de 2,8 kWh (en febrero) a 3,9 kWh (en octubre), estas pérdidas son menores respecto a las ganancias.

La pared de adobe absorbe el calor que ingresa a M1 durante el intervalo 1 y cede el calor durante el intervalo 2. La pérdida de calor de la pared interior hacia el ambiente interior, en promedio diario, varía de 3,6 kWh (en febrero) a 6,0 kWh (en agosto). De igual forma, la energía diaria promedio que la pared interior absorbe varía de 2,5 kWh (en febrero) a 4,4 kWh (en agosto).

El piso de madera absorbe energía durante ambos intervalos, mientras las pérdidas sólo ocurren en el intervalo 1. Las ganancias diarias varían de 1,4 kWh (en febrero) a 2,7 kWh (en junio) y las pérdidas diarias abarcan de 1,9 kWh (en febrero) a 2,9 kWh (en junio).

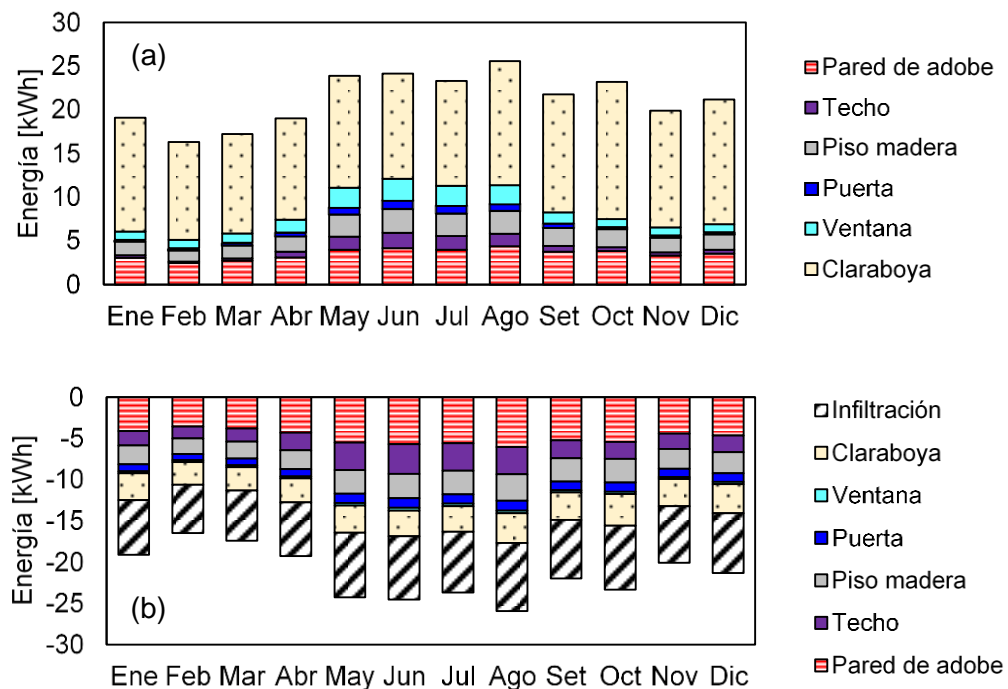


Figura 85. Análisis energético diario de la envolvente de M1. (a) Ganancias de energía y (b) pérdidas de energía.

El techo de fibrocemento cede energía al ambiente interior durante el intervalo 1, también pierde calor en ambos intervalos. Las ganancias diarias varían de 0,1 kWh (en febrero) a 1,8 kWh (en junio) y las pérdidas diarias de 1,4 kWh (en febrero) a 3,6 kWh (en junio).

Respecto a la ventana y puerta, estos elementos pierden energía durante las noches. En las puertas, las ganancias diarias oscilan entre 0,2 kWh (en febrero) y 0,9 kWh (en junio) y las pérdidas diarias varían entre 0,8 kWh (en febrero) y 1,2 kWh (en agosto). En las ventanas, las ganancias diarias oscilan de 0,9 kWh (en febrero) a 2,5 kWh (en junio) y las pérdidas diarias varían de 0,2 kWh (en noviembre) a 0,3 kWh (en agosto).

Las fugas de aire por infiltraciones ocasionan pérdidas de energía del ambiente interior, las cuales oscilan de 5,8 kWh (en febrero) a 8,2 kWh (en agosto).

El balance de ganancias-pérdidas de energía y el balance neto de energía diaria, en promedio mensual, al interior de M1 son presentadas en la figura 86. La energía neta diaria (en promedio mensual) varía de 0,2 kWh (en marzo) a 0,4 kWh (en junio) y tiene un promedio anual de 0,24 kWh.

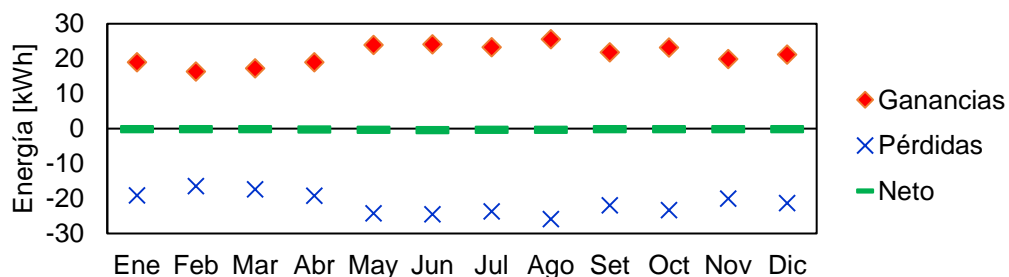


Figura 86. Balance de ganancias-perdidas y energía neta diaria de la envolvente de M1.

En la figura 87, las ganancias y las pérdidas diarias, en promedio anual, son presentadas. Los dos elementos que entregan mayor energía al ambiente son la claraboya (60,9 %) y la pared de adobe (16,6 %), siendo este último el elemento que tiene mayor superficie en M1. Otros elementos también aportan energía en menor proporción, estos son el piso de madera (9,6 %), la ventana (7,0 %), el techo (3,7 %) y la puerta (2,1 %). En cambio, las pérdidas de energía del ambiente interior son debido a las fugas de aire por infiltraciones (33,1 %), las paredes de adobe (22,6 %), la claraboya (15,1%), el piso de madera (12,1 %), la ventana (7,0 %), el techo (3,7 %) y la puerta (2,1 %). Por último, la

ganancia diaria en promedio anual es 21,2 kWh, la pérdida diaria de calor es 21,4 kWh y la energía neta es 0,2 kWh.

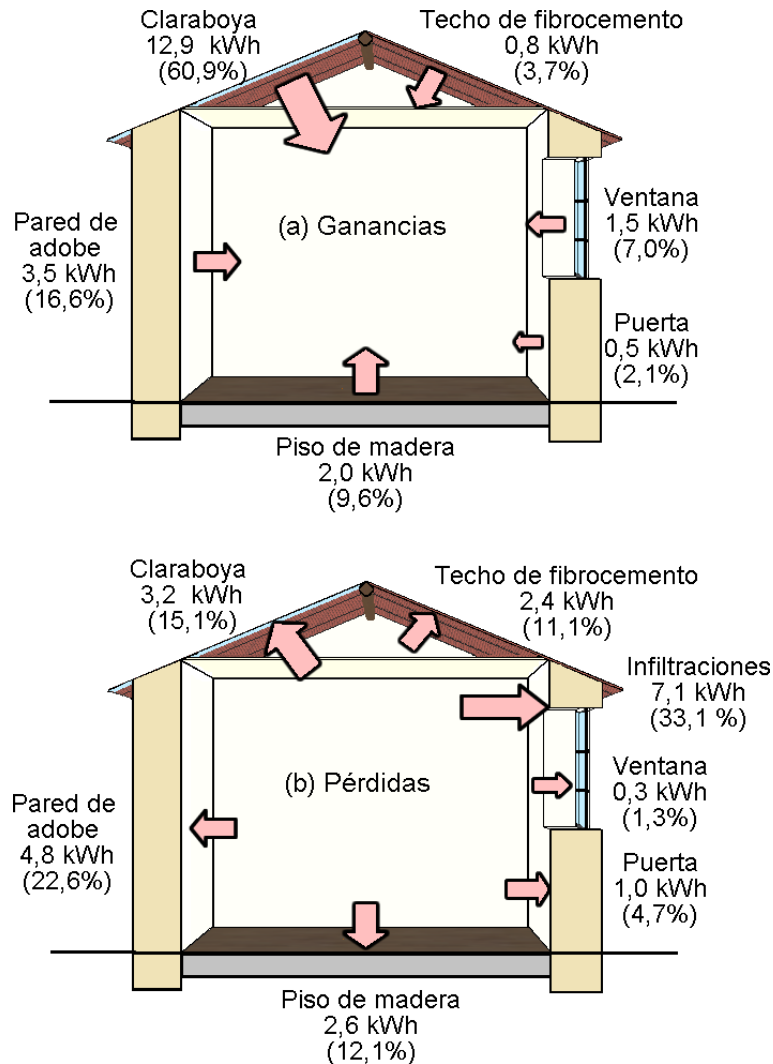


Figura 87. Energía diaria promedio en las superficies interiores de la envolvente de M1 para el año 2019. (a) Ganancias de energía y (b) pérdidas de energía.

6.5.2. Análisis energético de M2

En la figura 88, la cubierta transparente de policarbonato alveolar del invernadero adosado (superficie vertical e inclinada) es el principal elemento que aporta energía a M2. La ganancia solar a través de este elemento es mayor en agosto (65,4 kWh) y menor en febrero (41,2 kWh). Existen pérdidas a través de esta cubierta que oscilan entre 12,5 kWh (en febrero) y 19,9 kWh (en agosto). Existen pérdidas de calor, pero son menores respecto a las ganancias.

El segundo elemento que proporciona más energía diaria al ambiente de M2 es la claraboya debido a ganancias solares que varía, en promedio mensuales, de 15,7 kWh (en octubre) a 11,2 kWh (en febrero). Existen pérdidas a través de este componente, pero son menores en comparación a las ganancias, estas pérdidas diarias varían de 3,1 kWh (en marzo) a 4,0 kWh (en agosto).

La pared de adobe absorbe el calor que ingresa a M2 en periodos del intervalo 1 y lo cede durante el intervalo 2. Las pérdidas diarias varían de 3,6 kWh (en febrero) a 6,3 kWh (en agosto) y las ganancias diarias oscilan de 7,5 kWh (en febrero) a 12,3 kWh (en agosto). Para este análisis, se considera a la pared de adobe dentro del invernadero adosado y del ambiente principal, ambos en contacto con el ambiente exterior. Aunque la superficie de pared de adobe que se encuentra dentro del invernadero posee menor valor, contribuye con alrededor del 50% de ganancia y pérdida.

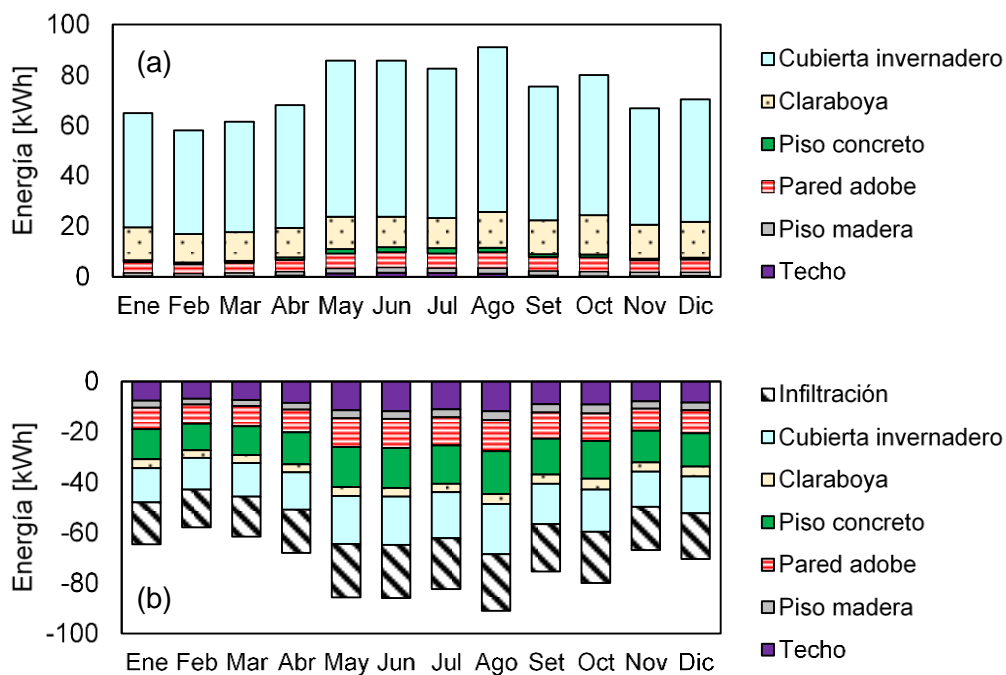


Figura 88. Análisis energético diario de la envolvente M2. (a) Ganancias de energía y (b) pérdidas de energía.

Las ganancias diarias de calor para los pisos de madera varían de 1,3 kWh (en febrero) a 2,2 kWh (en junio) y para el piso de concreto oscilan de 0,7 kWh (en noviembre) a 2,1 kWh (en junio). Las pérdidas diarias de calor para los pisos de madera varían de 2,4 kWh (en febrero) a 3,6 kWh (en agosto) y para el piso de concreto oscilan de 10,6 kWh (en febrero) a 17,1 kWh (en agosto). Aunque el piso de concreto tiene menor superficie

respecto al piso de madera, sus pérdidas diarias son mayores, sobre todo en periodos de la noche (con el descenso de la temperatura del invernadero).

Para el caso del techo de fibrocemento, las ganancias diarias oscilan de 0,1 kWh (en marzo) a 1,6 kWh (en junio) y las pérdidas diarias de calor varían de 6,8 kWh (en febrero) a 11,7 kWh (en agosto).

Las fugas de aire por infiltraciones ocasionan pérdidas de calor del ambiente interior. Estas pérdidas diarias varían de 15,0 kWh (en febrero) a 22,5 kWh (en agosto). Durante el día y la noche son la principal fuente de pérdida de calor.

En la figura 89 se presenta el balance neto, y las ganancias-pérdidas de energía diaria, en promedio mensual, al interior de M2. La energía neta diaria varía de -0,2 kWh (en junio) a 0,3 kWh (en marzo) y tiene un promedio diario anual de 0,0 kWh.

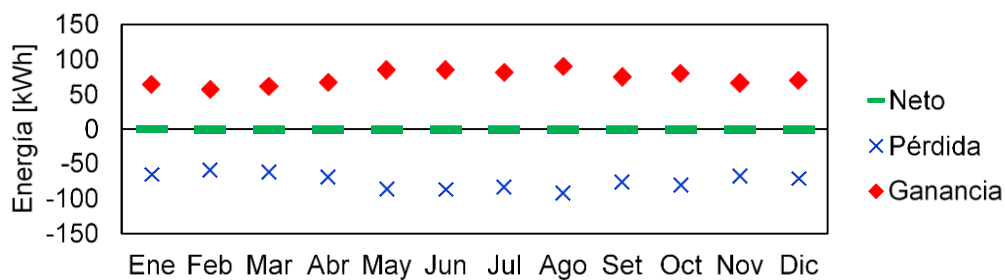


Figura 89. Balance ganancias-perdidas y energía neta de la envolvente de M2.

Por último, los promedios anuales de ganancia y pérdida de energía diaria son presentados en la figura 90. Los dos elementos que aportan mayor calor al ambiente son la cubierta del invernadero (70,9 %) y la claraboya (17,4 %). Otros elementos que también aportan calor, pero en pequeños porcentajes, son la pared de adobe con 6,8 % (elemento con mayor superficie), el piso de madera (2,4 %), la ventana (7,0 %), el techo (3,7 %) y la puerta (2,1 %). Mientras las pérdidas diarias de calor son debido a las fugas de aire por infiltraciones (33,1 %), las paredes de adobe (22,6 %), la claraboya (15,1 %), el piso de madera (12,1 %), el piso de concreto (1,6 %) y el techo (0,8 %). Finalmente, la ganancia diaria en promedio anual es 74,2 kWh, la pérdida diaria de calor es 74,1 kWh y la energía neta es 0,1 kWh.

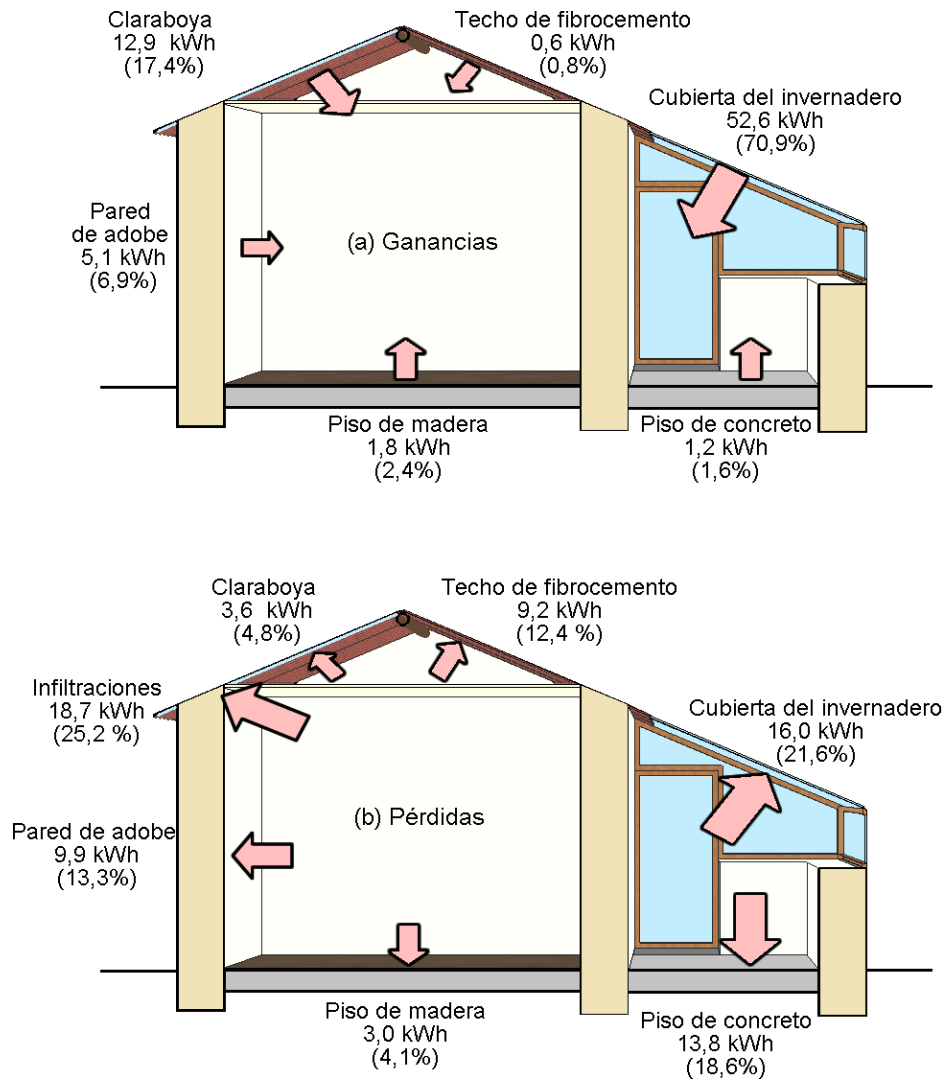


Figura 90. Energía diaria promedio en la envolvente de M2 para el año 2019. (a) Ganancias de energía y (b) pérdidas de energía.

VII. CONCLUSIONES GENERALES

Este trabajo de investigación se realizó para analizar y estimar los rangos del bienestar térmico adaptado al centro poblado de Imata (4500 msnm), cuya temperatura exterior media anual es 3,7 °C y experimenta una baja oscilación térmica anual. El análisis se realizó al encuestar a los pobladores de Imata sobre las sensaciones térmicas en ambientes interiores.

En este sentido, el registro de datos se realizó con el dispositivo implementado TSVR, un dispositivo de bajo costo (140 soles) utilizando componentes del mercado local y cuyo software de control fue implementado sobre la base de Arduino (software libre), que permitió el registro de información del VST de los individuos de Imata en ausencia de los investigadores. Además, se complementó con encuestas presenciales desarrolladas principalmente en la institución educativa de Imata. Este dispositivo aún puede ser mejorado de manera que incluya el registro de otros parámetros por ejemplo el nivel de actividad.

Para el caso 1 (“datos totales”), la T_n obtenida fue 12,39 °C; al considerar el género se obtuvo que los hombres ($T_n = 12,14$ °C) son ligeramente más tolerantes al frío que las mujeres ($T_n = 12,99$ °C). En general, los individuos encuestados estaban muy satisfechos con las condiciones del interior ya que las respuestas del VST igual a N fueron del 33,8 %, seguido de respuestas del VST igual a F (31,7 %). Las respuestas VST igual a MC fueron las de menor porcentaje (5,7 %). Los resultados indican que las personas desean ambientes térmicos más cálidos (44,7 %). Del mismo modo, el 71,5 % de los votos femeninos y el 61,2 % de los votos masculinos fueron repartidos entre F y N.

Para el caso 2 (“datos por tipo de actividad”), la temperatura de bienestar aceptable al interior de los ambientes evaluados para individuos realizando actividad pasiva (menores a 1,2 met) se encuentra entre las temperaturas de 11,86 °C a 17,17 °C, siendo 14,52 °C la temperatura interior óptima de bienestar. De forma similar, para personas realizando actividad moderada (mayor a 1,2 met y menor igual a 2 met) el rango de temperatura fue de 10,44 °C a 17,03 °C, con 13,74 °C como la temperatura interior óptima de bienestar.

Mientras aumentó el nivel de actividad también aumentó el rango de temperaturas bajo el cual el poblador tiene bienestar.

La temperatura interior de bienestar o neutra se ve afectada por la temperatura exterior, determinándose por una correlación lineal, en este caso se utilizó la temperatura exterior media mensual considerando los registros correspondientes a respuestas del VST = N, esta correlación lineal varió dependiendo de la información utilizada: caso 1 (“datos totales”) o caso 2 (“datos por el tipo de actividad”: pasiva o moderada). El resultado del caso 1 es bastante similar a las relaciones establecidas por Humphreys y Griffiths que fueron desarrolladas para temperaturas de confort T_n mayor a los 18 °C; podemos decir que nuestro estudio permite extrapolar las rectas citadas hacia temperaturas más bajas.

Respecto al nivel de vestimenta I_{cl} , con la clasificación según el tipo de actividad se obtuvo, en promedio, 1,28 clo para la actividad pasiva, 1,29 clo para la actividad moderada y 1,24 clo para la actividad elevada. No se logró establecer una tendencia clara entre I_{cl} y la temperatura o el nivel de actividad. Para el caso 1 (“datos totales”), el promedio de tI_{cl} es igual a 1,28 clo, estos incluyen la información de las encuestas y dispositivos. Este promedio fue principalmente debido a la vestimenta de los individuos encuestados que no posee alguna característica en particular, ellos vistieron con ropa no tradicional, y con pocas modificaciones a lo largo del año. Los individuos evaluados no variaron su vestimenta, no importa la temperatura, incluso realizando alguna actividad moderada no modifican su forma de vestir. Otra razón es que un mayor número de individuos encuestados pertenecen a la institución educativa, los alumnos utilizaban una vestimenta característica (uniforme escolar) y a pesar de las bajas temperaturas no todos utilizaban alguna prenda de vestir extra para protegerse del frío.

Se logró establecer los parámetros de bienestar y obtener zonas que permiten evaluar el bienestar térmico de los pobladores de Imata, dichos diagramas fueron graficados sobre la carta psicrométrica para la altitud de Imata (4500 msnm). Se utilizó como límites de bienestar los valores máximos y mínimos de la ZE y la ZR para la temperatura y la humedad relativa, en el caso del límite superior de la humedad relativa se extendió hasta 80 % ya que cuando se analizó el caso 2 (“datos por tipo de actividad”), las humedades evaluadas no alcanzaron valores altos. Esos límites sirven para delimitar zonas de bienestar en el diagrama psicrométrico.

Las cuatro zonas propuestas varían dependiendo del tipo de actividad reportada por los individuos de Imata. Con la actividad moderada (caso 2b), los gráficos se desplazan hacia la derecha respecto a las zonas propuestas para la actividad pasiva (caso 2a). La zona 2 es la que abarca un mayor número de porcentaje de datos al ser la que tiene un rango mayor de temperatura y humedad. Sin embargo, muchos de los datos analizados para respuestas VST iguales a F y C, se ubicaron dentro de estas zonas, lo que es indicativo que las personas de Imata podrían sólo distinguir 3 estados de sensación térmica: mucho frío, neutro y mucho calor. Las respuestas frío y calor se consideran como parte de las respuestas neutras. También estas respuestas pueden estar afectadas por el valor de I_{cl} , lamentablemente con los datos recolectados no se aprecian tendencias claras.

Por otro lado, se analizaron dos módulos de viviendas (M1 y M2), construcciones con características bioclimáticas ubicadas en Imata, las mediciones experimentales al interior de los módulos se realizaron durante 49 días. El módulo M1 fue construido en un área de 18,24 m², cuenta con una claraboya en ambas alas de su techo a 2 aguas que permite calentar el ambiente interior. El módulo M2 posee características similares a las de M1 con la diferencia que se construyó un invernadero adosado de 9,6 m² delante de la puerta. De los 49 días analizados dentro de M1, 24,0 % (caso pasivo) y 31,9 % (caso moderado) de las horas están dentro de las zonas de bienestar. De forma similar para M2, como máximo 26,7 % (caso pasivo) y 25,7 % (caso moderado) de horas corresponden a momentos de bienestar. Sin embargo; existieron horas con valores de T_i que sobrepasan los valores máximos de los límites de temperatura de las zonas de bienestar, principalmente alrededor del mediodía. En estos periodos se puede lograr el bienestar al ventilar el ambiente, una ventilación natural eliminaría este sobrecalentamiento logrando desplazar la temperatura hasta las zonas de bienestar, lo que también ocasionaría una disminución de la energía que se almacena al interior del módulo para ser aprovechada en momentos más fríos.

Se calcularon T_i horarias del año 2019 para ambos módulos, utilizando la herramienta de simulación dinámica *m2m*, que demostró simular las temperaturas con una alta precisión; se utilizó un método inverso al ajustar los caudales de renovación de aire para estimar temperaturas interiores; *m2m* permite obtener también flujos de calor y temperaturas superficiales para el análisis energético de las viviendas. Además, *m2m* es muy fácil de usar y no requiere un cálculo o recursos de memoria muy grandes.

La simulación de M1 y M2 con la herramienta *m2m* permitió determinar la temperatura interior promedio igual a 9,2 °C y 12,7 °C, respectivamente. El invernadero adosado le

aporta en promedio 3,5 °C al ambiente principal de M2. En ambos módulos, las temperaturas interiores mínimas se obtuvieron entre 5:00 y 6:00, periodo de temperaturas exterior más bajas. Si bien construir un invernadero adosado (M2) incrementa la temperatura interior, aún hay periodos que requieren calentamiento para lograr una temperatura mínima de bienestar térmico sobre todo durante la noche. En el caso de M1, se requiere más horas de calentamiento no sólo durante la noche sino también durante las primeras horas de la mañana y las últimas horas de la tarde.

A continuación, se estimó la energía diaria necesaria para lograr la temperatura de bienestar al interior de ambos módulos utilizando el modelo mensual simplificado de la norma ISO 13790; se aplicó el concepto de grados-horas (*GH*) calculados a partir de la temperatura exterior. Los resultados muestran que el coeficiente de pérdidas de calor de M2 es menor en 18,5 W/°C respecto a M1, esto se debe a que el invernadero adosado reduce las pérdidas de la pared norte y tiene menos fugas de aire entre el interior y exterior. La capacidad térmica útil es similar para el ambiente principal de ambos módulos ($C = 1101 \text{ Wh/°C}$); por último, la constante de tiempo de M2 es mayor por 4,5 h respecto a M1. Se requiere una energía diaria superior de 5,4 kWh (actividad pasiva) y 4,3 kWh (actividad moderada) en M1 para alcanzar el bienestar. De manera similar, M2 requiere la energía diaria mínima de 3,9 kWh (actividad pasiva) y 2,7 kWh (actividad moderada). El invernadero adosado disminuye en 28,7 % (1,5 kWh - actividad pasiva) y 37,0 % (1,6 kWh - actividad moderada) la energía necesaria para lograr el bienestar térmico. Cabe mencionar que las temperaturas alcanzadas alrededor del medio día son bastante altas, en este caso se ignora si en alguna hora analizada la temperatura sobrepasa alguno de los límites superiores de temperatura establecidos para los casos pasivo y moderado.

Después, se realizó un análisis energético para determinar cuáles son las superficies que aportan mayor calor a estos módulos y también por donde se pierde mayor calor. El análisis se realizó a partir de la información de temperatura superficial obtenida con la simulación de *m2m* para todo el año 2019.

En M1, la claraboya proporciona el 60,9 % de la energía ganada que es básicamente ganancia solar, mientras sus pérdidas representan el 15,1% y son principalmente durante la noche. La pared de adobe tiene mayor superficie, entrega energía al ambiente interior principalmente durante el periodo de la noche; toda la energía que fue absorbida durante el periodo del día. La ganancia de la ventana es principalmente relacionada con la radiación solar; durante las noches también pierde calor. El techo, que es la segunda superficie más

grande, aún puede minimizar sus pérdidas de energía con un aislamiento adecuado. La pérdida de calor es mayor (el 33,1 % del total) debido a la fuga de aire desde el interior al exterior.

En M2, las superficies del policarbonato del invernadero y la claraboya proporcionan el 88,3 % de la energía, principalmente durante el día, mientras sus pérdidas representan el 26,4% y son durante la noche, siendo el invernadero por donde se pierde mayor energía. Se requiere mejorar el aislamiento de este elemento durante el periodo de la noche. La pared de adobe que está en contacto con el ambiente exterior aún posee una mayor superficie, y hay una mayor pérdida de calor a través de este elemento en comparación a la ganancia. En este caso la pared de adobe dentro del invernadero aporta el 50% de las pérdidas y ganancias, aunque sólo tenga el 25 % de la pared de adobe dentro del ambiente principal. El techo es la segunda superficie más grande; se puede minimizar las pérdidas de energía a través de este elemento. Hay un mayor porcentaje de pérdidas de calor a través de la puerta y piso. Las pérdidas por infiltraciones representan el 25,2 % y las pérdidas a través del piso de concreto del invernadero son de 18,6 %.

Utilizar viviendas con calentamiento solar ayuda a mejorar las condiciones al interior de las viviendas, sin embargo, en los casos estudiados, no basta para lograr el bienestar térmico, principalmente en horas de las noches en el cual ocurren las temperaturas más bajas. Los pobladores de estas zonas suelen aumentar el nivel de aislamiento a través del uso de frazadas y mantas para mitigar el frío de la noche.

Aunque utilizar un sistema de calentamiento solar pasivo en Imata, un lugar con un clima muy frío permitió elevar la temperatura interior, aún no fue suficiente para alcanzar las condiciones óptimas de bienestar térmico; entonces se puede recurrir a otras estrategias como el uso de sistemas de calentamiento solar activo o el último recurso es el calentamiento convencional, sólo si los otros métodos no logran las temperaturas de adecuadas en estos climas adversos.

Sin embargo, antes de aplicar las estrategias de calentamiento solar activo o calefacción convencional, los módulos estudiados aún pueden mejorarse, esto a través del aislamiento de los techos, puertas y ventanas (marcos y utilizar vidrio doble) de ambos módulos y así como minimizar las infiltraciones de aire que ocasionan un mayor porcentaje del total de pérdidas en los módulos. Asimismo, para el módulo M2 se debe aislar la superficie de policarbonato del invernadero adosado durante periodos de la noche.

Aplicando de nuevo la norma ISO 13790, la energía requerida para alcanzar el bienestar térmico al interior de los módulos disminuyó. Estos cálculos sólo fueron estimados, no se modificaron los módulos para el presente trabajo. Las mejoras consistieron en cambiar los materiales de algunas superficies como una puerta de madera, una ventana de vidrio doble, aislar el techo con poliestireno y disminuir las infiltraciones a la tercera parte. De las estimaciones realizadas, la energía requerida en M1 disminuye de 5,7 % a 11,8% (actividad pasiva) y de 6,3 % a 14,3 % (actividad moderada); mientras que en M2 varían de 5,9 % a 9,7 % (actividad pasiva) y de 6,8 % a 12,6 % (actividad moderada).

Todo el análisis permitió determinar cuáles son las condiciones mínimas de bienestar térmico de los pobladores de Imata, a partir de encuestas presenciales y el uso de dispositivos de registro. Es necesario precisar que para tener resultados más confiables se requiere un mayor número de encuestas y más viviendas, junto con el monitoreo continuo de los parámetros del ambiente interior y exterior. Sin embargo, los resultados de esta investigación, que es la primera de este tipo en una zona altoandina, serán útiles a los profesionales para estimar las condiciones interiores adecuadas para diseñar las viviendas en regiones con condiciones bioclimáticas similares. Asimismo, el presente estudio puede servir como base y ampliarse a otros lugares de las zonas altoandinas del país. Como se vio en este estudio los modelos actuales como Givoni y el índice PMV, que fueron desarrollados en lugares de baja altitud, estiman valores más altos de temperatura de bienestar térmico para los pobladores de las zonas altoandinas.

Para futuros estudios se debe tener en cuenta realizar más charlas de sensibilización para que los encuestados reporten en forma adecuada la información solicitada, sobre todo para que describa de una forma apropiada la vestimenta que utiliza y el tipo de actividad que estuvo desarrollando antes y durante el registro de datos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SENAMHI (s.f.). Heladas y Friajes / Preguntas Frecuentes. [Consultado el 15/10/2021] Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=heladas-y-friajes-preguntas>
- [2] SENAMHI (2008) Atlas de heladas. Convenio de Cooperación Técnica Institucional SENAMHI -MINAG. Información agroclimática oportuna. Lima.
- [3] CENEPRED. (2018). Escenario de Riesgo por Heladas y Friajes Plan Multisectorial 2018. [Consultado el 18/12/2019] Disponible en: https://cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Escenarios/2018/Plan_Multi_H_yF_2018/Brochure%20Friaje%20y%20Helada.pdf
- [4] Presidencia del Consejo de Ministros (2017). Plan multisectorial para la atención de heladas y friaje 2017. Lima, pp. 3-10. [Consultado el 16/10/2017]. Disponible en: http://www.pcm.gob.pe/wp-content/uploads/2017/05/PMAHF_2017.pdf
- [5] Huaylla, F. (2010). Evaluación experimental de cambios constructivos para lograr confort térmico en una vivienda altoandina del Perú. Tesis para optar el título de ingeniero físico. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ciencias. Lima.
- [6] CER-UNI. Centro de Energías Renovables y Uso Racional de la Energía. Disponible en: <http://cer.uni.edu.pe/>
- [7] Grupo de apoyo al sector rural de la Universidad Pontificia Católica del Perú (Grupo-PUCP). Disponible en <http://gruporural.pucp.edu.pe/>
- [8] CARE, (2010). Confort Térmico en Vivienda Altoandinas. Un enfoque integral. Lima: Balcari Editores SAC.
- [9] GIZ. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH. Disponible en: <https://www.giz.de/en/worldwide/25819.html>
- [10] PNVR - MVCS. Programa Nacional de Vivienda Rural del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Disponible en: <https://www.gob.pe/programa-nacional-de-vivienda-rural>
- [11] FONCODES. Fondo para el desarrollo Social, Programa Mi Abrigo. Disponible en: <http://www.foncodes.gob.pe/portal/index.php/proyectos/miabrigo>
- [12] Espinoza, R. (2014). Evaluación experimental de la performance de dos componentes bioclimáticas de calentamiento aplicadas en un módulo de vivienda de San Francisco de Raymina-Ayacucho con el propósito de validarlas como técnicas de estrategias bioclimáticas para viviendas rurales altoandinas. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ciencias. Lima.
- [13] ISO. (2005). International standard ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (Vol. Third). Switzerland.

- [14] Givoni, B. (1969) *Man, climate and architecture*. Elsevier Publishing Company Limited, New York.
- [15] Humphreys, M. (1978). Outdoor temperatures and comfort indoors. *Building Research and Practice* 6(2), 92-102.
- [16] Brager, G. S., & de Dear, R. J. (1998). Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings*, 27(1), 83-96.
- [17] Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. Danish Technical Press, Copenhagen.
- [18] Ruiz, R. (2007). *Estándar local de confort térmico para la ciudad de Colima*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Arquitectura. Universidad de Colima. México.
- [19] Auliciems, A. & Szokolay, S. (2007). *Thermal comfort. PLEA: Passive and low energy architecture international*. Department of Architecture, University of Queensland. Brisbane, Australia.
- [20] Carlucci, S. (2013). A Review of long-term discomfort indices. In S. Carlucci (Ed.), *Thermal Comfort Assessment of Buildings* (pp. 1-20). Milano: Springer Milan.
- [21] Enescu, D. (2017). A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1353-1379.
- [22] LEFEBVRE, G., "Modal-based simulation of the thermal behavior of a building: the m2m software", *Energy and Buildings*, 25, 1, p. 19-30, jan.1997.
- [23] Gagge, A. P. (1936). The linearity criterion as applied to partitional calorimetry. *American Journal of Physiology*, 116(3), 656–668.
- [24] Olgay, V. (1963). *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton University Press, Princeton.
- [25] Givoni, B. (1963). *The effect of climate on man: development of a new thermal index*. Research report to UNESCO, Building Research Station, Technion, Haifa
- [26] Fabbri, K. (2015). A Brief history of thermal comfort: from effective temperature to adaptive thermal comfort. In K. Fabbri (Ed.), *Indoor thermal comfort perception: a questionnaire approach focusing on children* (pp. 7-23). Cham: Springer International Publishing.
- [27] Auliciems, A. (1981). Towards a psycho-physiological model of thermal perception. *International Journal of Biometeorology*, 25(2), 109-122.
- [28] Griffiths, I. D. (1990). *Thermal comfort in building with passive solar features*. Report to the Commission of the European Communities (EN3S-090-UK)
- [29] Nicol, F.; Jamy, G., Sykes, O., & Humphreys, M. (1993). *A survey of thermal comfort in Pakistan toward new indoor temperature standards*. School of Architecture, Oxford Brookes University.
- [30] de Dear, R.J., & Brager, G.S. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. In *ASHRAE Transactions* (Vol. 104).
- [31] Nicol, J.F., & Humphreys, M.A. (1973). Thermal comfort as part of a self-regulating system. *Building Research and Practice*, 1(3): p. 174-179.
- [32] Coley, D., Herrera, M., Fosas, D., Liu, C., & Vellei, M. (2017). Probabilistic adaptive thermal comfort for resilient design. *Building and Environment*, 123, 109-118.
- [33] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. y. (2014). *Norma Técnica EM.110 "Confort Térmico y Lumínico con Eficiencia Energética*. Lima.

- [34] Chandel, S., & Aggarwal, R. (2012). Thermal Comfort Temperature Standards for Cold Regions. *Innovative Energy Policies*, 2.
- [35] Luo, M., Ji, W., Cao, B., Ouyang, Q., & Zhu, Y. (2016). Indoor climate and thermal physiological adaptation: Evidences from migrants with different cold indoor exposures. *Building and Environment*, 98, 30-38.
- [36] Lai, D., Guo, D., Hou, Y., Lin, C., & Chen, Q. (2014). Studies of outdoor thermal comfort in northern China. *Building and Environment*, 77, 110-118.
- [37] Cao, B., Luo, M., Li, M., Zhu, Y. (2016). Too cold or too warm? A winter thermal comfort study in different climate zones in China. *Energy and Buildings*, 133, 469-477.
- [38] Yu, J., Cao, G., Cui, W., Ouyang, Q. and Zhu, Y. (2013), People who live in a cold climate: thermal adaptation differences based on availability of heating. *Indoor Air*, 23, 303-310.
- [39] Zhang, N., Cao, B., Wang, Z., Zhu, Y., & Lin, B. (2017). A comparison of winter indoor thermal environment and thermal comfort between regions in Europe, North America, and Asia. *Building and Environment*, 117, 208-217.
- [40] Rijal, H. B., Humphreys, M. A., & Nicol, J. F. (2017). Towards an adaptive model for thermal comfort in Japanese offices. *Building Research & Information*, 45(7), 717-729.
- [41] Antoniadou, P.; Papadopoulos, A. M. (2017). Occupants' thermal comfort: state of the art and the prospects of personalized assessment in office buildings. *Energy and Buildings*, 153, 136-149.
- [42] García, A., Olivieri, F., Larrumbide, E., & Ávila, P. (2019). Thermal comfort assessment in naturally ventilated offices located in a cold tropical climate, Bogotá. *Building and Environment*, 158, 237-247.
- [43] Ioannou, A., & Itard, L. (2017). In-situ and real time measurements of thermal comfort and its determinants in thirty residential dwellings in the Netherlands. *Energy and Buildings*, 139, 487-505.
- [44] Shao, T., & Jin, H. (2020). A field investigation on the winter thermal comfort of residents in rural houses at different latitudes of northeast severe cold regions, China. *Journal of Building Engineering*, 32, 101476.
- [45] Fabbri, K. (2015). *Indoor Thermal Comfort Perception: A Questionnaire Approach Focusing on Children*: Springer International Publishing.
- [46] Ning, H., Wang, Z., Zhang, X., & Ji, Y. (2016). Adaptive thermal comfort in university dormitories in the severe cold area of China. *Building and Environment*, 99, 161-169.
- [47] Zaki, S. A., Damiaty, S. A., Rijal, H. B., Hagishima, A., & Abd Razak, A. (2017). Adaptive thermal comfort in university classrooms in Malaysia and Japan. *Building and Environment*, 122, 294-306.
- [48] Golasi, I., Salata, F., de Lieto Vollaro, E., & Coppi, M. (2018). Complying with the demand of standardization in outdoor thermal comfort: a first approach to the Global Outdoor Comfort Index (GOCl). *Building and Environment*, 130, 104-119.
- [49] Yang, B., Olofsson, T., Nair, G., & Kabanshi, A. (2016). Outdoor thermal comfort under subarctic climate of north Sweden - A pilot study in Umeå. *A Sustainable Cities and Society*, 28, 387-397.

- [50] Yang, L., Yan, H., Xu, Y., & Lam, J. C. (2013). Residential thermal environment in cold climates at high altitudes and building energy use implications. *Energy and Buildings*, 62, 139-145.
- [51] Natarajan, S., Rodriguez, J. & Vellei, M. (2015). A field study of indoor thermal comfort in the subtropical highland climate of Bogota, Colombia. *Journal of Building Engineering*, 4, 237-246.
- [52] An, L., Hong, B., Cui, X., Geng, Y., & Ma, X. (2021). Outdoor thermal comfort during winter in China's cold regions: A comparative study. *Sci Total Environ*, 768, 144464.
- [53] Chen, Xin, Xue, Puning, Liu, Lin, Gao, Lixin, & Liu, Jing. (2018). Outdoor thermal comfort and adaptation in severe cold area: A longitudinal survey in Harbin, China. *Building and Environment*, 143, 548-560.
- [54] Rijal, H. B., Yoshida, H., & Umemiya, N. (2010). Seasonal and regional differences in neutral temperatures in Nepalese traditional vernacular houses. *Building and Environment*, 45(12), 2743-2753.
- [55] Ordóñez, F., Jácome, F., Castro, P., & Naranjo, C. (2019). Sensitivity analysis of the variables affecting indoor thermal conditions on unconditioned dwellings in equatorial high-altitude regions from an experimentally validated model. *Advances in Building Energy Research*, 1-24.
- [56] Thapa, S. (2020). Thermal comfort in high altitude Himalayan residential houses in Darjeeling, India - An adaptive approach. *Indoor and Built Environment*, 29(1), 84-100.
- [57] Thapa, S., Bansal, A. K. & Panda, G. (2017). Adaptive thermal comfort in the residential buildings of north east India-An effect of difference in elevation. *Building Simulation*, 11(2), 245-267.
- [58] Rosenlund, H. (2000). Climatic design of buildings using passive techniques. *Building Issues*, 10(1), 3-26.
- [59] Ohno, H., Kuno, S., Saito, T., Kida, M., & Nakahara, N. (1991). The effects of hypobaric conditions on man's thermal responses. *Energy and Buildings*, 16(1), 755-763.
- [60] Cui, W., Wang, H., Wu, T., Ouyang, Q., Hu, S., Zhu, Y. (2016). The influence of a low air pressure environment on human metabolic rate during short-term (< 2 h) exposures. *Indoor Air*, 27 (2), 282-290.
- [61] Wang, H., Hu, S., Liu, G., & Li, A. (2010). Experimental study of human thermal sensation under hypobaric conditions in winter clothes. *Energy and Buildings*, 42(11), 2044-2048.
- [62] Fuller, R. J., Zahnd, A., & Thakuri, S. (2009). Improving comfort levels in a traditional highaltitude Nepali house. *Building and Environment*, 44(3), 479-489.
- [63] Cena, K., Davey, N., & Erlandson, T. (2003). Thermal comfort and clothing insulation of resting tent occupants at high altitude. *Applied Ergonomics*, 34(6), 543-550.
- [64] Yao, R., Li, B., & Liu, J. (2009). A theoretical adaptive model of thermal comfort - Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV). *Building and Environment*, 44(10), 2089-2096.
- [65] Yu, W., Li, B., Yao, R., Wang, D., Li, K. (2017). A study of thermal comfort in residential buildings on the Tibetan Plateau, China, *Build. Environ.* 119, 71-86.
- [66] Nicol, F. (2004). Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy and Buildings*, 36, 628-637.

- [67] Djongyanga, N. T. R., Njomoa D. (2010). Thermal comfort: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(9), 2626–2640.
- [68] Attia, S., Hensen, J. (2014). Investigating the Impact of different thermal comfort models for zero energy buildings in hot climates. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Energy and Indoor Environment for Hot Climates*. ASHRAE, February 24-26, Doha, Qatar.
- [69] Li, Y. I., & Wong, A. S. W. (2006). 4 - Physiology of thermal comfort. In Y. Li & A. S. W. Wong. *Clothing Biosensory Engineering* (p. 60-73): Woodhead Publishing.
- [70] ASHRAE. (2013). Thermal Comfort. In *ASHRAE Handbook Fundamentals*. Virginia, p 9.1-9.32.
- [71] Fanger, P.O. (1967). Calculation of thermal comfort: Introduction of a basic comfort equation. *ASHRAE Transactions*, 73(2), III4.1- III4.20.
- [72] Schweiker, M., Fuchs, X., Becker, S., Shukuya, M., Dovjak, M., Hawighorst, M. and Kolarik, J. (2017). Challenging the assumptions for thermal sensation scales. *J. Building Research & Information*, 45(5) 572-589
- [73] Prek, M. (2005). Thermodynamic analysis of human heat and mass transfer and their impact on thermal comfort. *International Journal of Heat and Mass Transfer*; 48, 731-739.
- [74] ANSI/ASHRAE. (2017). Standard 55: 2017 Thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE, Atlanta.
- [75] de Dear, R. & Brager, G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. 34(6), 549-561.
- [76] Nicol, J. & Humphreys, M. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563-572.
- [77] Humphreys, M. A. & Fergus Nicol, J. (2002). The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings*, 34(6), 667-684.
- [78] Hensen, J. (1990). Literature review on thermal comfort in transient conditions. *Building and Environment*, 25(4), 309-316.
- [79] Humphreys, M. & Hancock, M. (2007). Do people like to feel 'neutral'? Exploring the variation of the desired thermal sensation on the ASHRAE scale. *Energy and Buildings*, 39(7), 867-874.
- [80] Holmes, M., Hacker, J. (2007). Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century. *Energy and Building*; 39 (7), 802-814.
- [81] Fanger P. O. (1972). *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. New York: McGraw-Hill.
- [82] Höppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Building*, 34(6), 661-665.
- [83] Liu, J., Yao, R., McCloy, R. (2012) A method to weight three categories of adaptive thermal comfort. *Energy and Building*; 47, 312-320.
- [84] Parsons, K. (2003) *Human thermal environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance* (Second ed.). New York: Taylor & Francis, p. 51.

- [85] Fanger, P. O. (1982). *The grid: Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering*. Malabar, FL: Krieger.
- [86] Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S. & Van den Dobbelsteen, A. (2013). A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 201-215.
- [87] Luks, A., Hopkins, S. (2014) Lung function and gas exchange. In E. Swenson & P. Bärtsch (Eds.), *High Altitude: Human Adaptation to hypoxia*. (1 ed., pp. 57-83). New York: Springer-Verlag.
- [88] Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. & Nishi, Y. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*, 77, 247-262
- [89] Winslow, C E A, Herrington, L P & Gagge, A P (1937): Physiological reactions to environmental temperature. *Am J of Physiology*, 120, 1-22
- [90] Yaglou, C. P. & Minard, D. (1957). Control of heat casualties at military centers. *AMA Archives of Industrial Health*, 16, 302.
- [91] National Weather Service (2019). Wind chill chart. [Consultado el 03/09/2021] Disponible en: <https://www.weather.gov/safety/cold-wind-chill-chart>.
- [92] Rothfus, L. (1990). The heat index equation (or, more than you ever wanted to know about heat index). Tech. Attachment, SR/SSD 90-23. [Consultado el 03/09/2021] Disponible en: https://www.weather.gov/media/ffc/ta_htindx.PDF
- [93] Djamila, H. (2017). Indoor thermal comfort predictions: Selected issues and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 569-580.
- [94] Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18(1), 11-23.
- [95] Givoni, B. (1976). *Man, Climate and Architecture*, Applied Science Publishers, London, 2nd edn.
- [96] Humphreys, M., Nicol, F., & Roaf, S. (2015). *Adaptive Thermal Comfort: Foundations and Analysis* (1st ed.). Routledge.
- [97] EN-15251. (2007). Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. 2007.
- [98] Karyono, K., Abdullah, B. M., Cotgrave, A. J., & Bras, A. (2020). The adaptive thermal comfort review from the 1920s, the present, and the future. *Developments in the Built Environment*, 4, 1-12.
- [99] Mishra, A. K., & Ramgopal, M. (2013). Field studies on human thermal comfort- An overview. *Building and Environment*, 64, 94-106.
- [100] Velt, K. B., & Daanen, H. A. M. (2017). Optimal bus temperature for thermal comfort during a cool day. *Applied Ergonomics*, 62, 72-76.
- [101] Nicol, F and Roaf, S (1996): Pioneering new indoor temperature standards: the Pakistan project. *Energy and Buildings*, 23, 169-174
- [102] Monge C. (1978). *Acclimatization in the Andes*. Reissued 1948 edition ed. Baltimore: The Johns Hopkins Press.
- [103] Monge (1952) *Man, climate, and changes of altitude*. Recent studies in bioclimatology.

- [104] Beall, C. M. (2007). Two routes to functional adaptation: Tibetan and Andean high-altitude natives. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(1), 8655-8660.
- [105] Baggish, A., Wolfel, E., & Levine, B. (2014). Cardiovascular system: heart and systemic circulation. In E. Swenson & P. Bärtsch (Eds.), *High Altitude: Human Adaptation to hypoxia*. (1 ed., pp. 128). New York: Springer-Verlag.
- [106] Hurtado, A. (1973). Influencia de la altura sobre el hombre. *Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana (OSP)*; 75(6), p 37-42
- [107] Organización Mundial de la Salud (OMS), Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO). Informe de Expertos Independientes sobre dieta, nutrición y prevención de enfermedades crónicas. Ginebra. Roma. 2003.
- [108] Castellani, J. W., Young, A. J. (2016). Human physiological responses to cold exposure: Acute responses and acclimatization to prolonged exposure. *Autonomic Neuroscience*, 196, 63-74.
- [109] Molina, J. O. (2018). Uso del programa Energyplus para la simulación del consumo energético de un módulo bioclimático ubicado en Imata, Arequipa a 4519 msnm. Tesis para optar el título de Ingeniería. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- [110] INEI (2018). Sistema de información geográfica: Sistema de consulta de centros poblados. Lima. Disponible en: <http://sige.inei.gob.pe/test/atlas/>
- [111] MIDIS (2019). Plataformas de acción para la inclusión social – PAIS. Disponible en: <http://www.pais.gob.pe/>
- [112] SENAMHI (2020). Resumen Ejecutivo: Climas del Perú Mapas de clasificación climática. Lima. [Consultado 05/02/2021]. Disponible en: <https://idesep.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/9f18b911-64af-4e6b-bbef-272bb20195e4>
- [113] SENAMHI (2020). Catálogo de metadatos geográficos. Climas del Perú Mapas de clasificación climática. Lima. [Consultado 05/02/2021]. Disponible en: <https://idesep.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/map>
- [114] NREL (2020). NSRDB: National Solar Radiation Database. NSRDB Data Viewer. [Consultado 12/10/2020]. Disponible en <https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer/>
- [115] SENAMHI. Descarga de datos hidrometeorológicos. Disponible en <https://web2.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos>
- [116] SENAMHI. Datos históricos. Disponible en <https://web2.senamhi.gob.pe/?p=data-historica>
- [117] Beck, H., Zimmermann, N., McVicar, T. et al. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci Data* 5, 180214 (2018)
- [118] J R Molina *et al* 2020 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1433** 012006
- [119] Arduino IDE. <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
- [120] MINEDU (2020). Estadística de la calidad educativa, ficha de datos. 40392 José A. Encinas Franco, nivel primario. [Consultado el 21/04/21] Disponible en: http://escale.minedu.gob.pe/PadronWeb/info/ce?cod_mod=0312728&anexo=0
- [121] MINEDU (2020). Estadística de la calidad educativa, ficha de datos. 40392 José A. Encinas Franco, nivel secundario. [Consultado el 21/04/21] Disponible en: http://escale.minedu.gob.pe/PadronWeb/info/ce?cod_mod=0796961&anexo=0

- [122] Bojorquez, G., Gómez, L., García, O., Ruiz, R. y Luna A. (2010). Temperatura neutral y rangos de confort térmico para exteriores, período cálido en clima cálido seco. *Ambiente Construido* 10 (2), 133-146
- [123] ISO (2004). International standard ISO 8996 Ergonomics - Determination of metabolic heat production (Vol. Second) Switzerland.
- [124] Piñas, Mc J., Cortez, L., Horn, M., Gómez, M. (2020). Influence of Stipa ichu on the thermal and mechanical properties of adobe as a biocomposite material. *Journal of Physics Conference Series*.
- [125] Rempel, A., & Rempel, A. (2013). Rocks, Clays, Water, and Salts: Highly Durable, Infinitely Rechargeable, Eminently Controllable Thermal Batteries for Buildings. *Geosciences*, 3(1), 63-101.
- [126] UNE EN ISO 13790 (2008) Eficiencia energética de los edificios. Cálculo del consumo de energía para calefacción y refrigeración de espacios
- [127] Molina, J. R., Lefebvre, G., Espinoza, R., Horn, M., & Gómez, M. M. (2021). Bioclimatic approach for rural dwellings in the cold, high Andean region: A case study of a Peruvian house. *Energy and Buildings*, 231, 110605.

ANEXOS

ANEXO I. BALANCE TÉRMICO DEL CUERPO HUMANO

El cuerpo humano puede ser modelado como un sistema abierto que intercambia energía con el ambiente que lo rodea para mantener una temperatura interna de aproximadamente 37 °C. El calor que produce el cuerpo humano se debe al metabolismo basal, base que permite mantener vivo al cuerpo, y al metabolismo muscular o al trabajo mecánico del cuerpo humano.

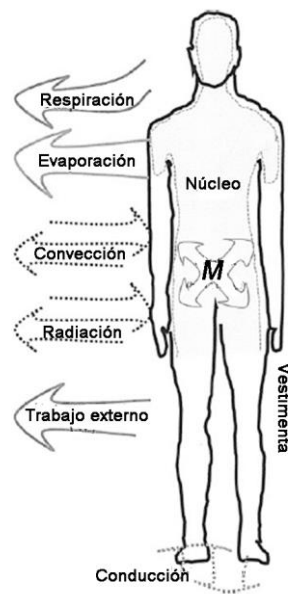


Figura 1. 1. Esquema de Intercambios de energía del cuerpo humano [A1-1].

El cuerpo humano permanece en equilibrio térmico con su entorno cuando pierde calor y trabajo exactamente al mismo ritmo que gana calor. El sistema de termorregulación del cuerpo tiene el objetivo principal de mantener una temperatura corporal interna constante e igual a 37°C. Matemáticamente, la relación entre la producción de calor y la pérdida de calor y trabajo se puede calcular mediante la ecuación 1.1, propuesta por Fanger en la cual no se respeta la convención de signo de la termodinámica [A1-2, A1-3]. Donde M [W/m²] es la tasa metabólica, W [W/m²] es la tasa de trabajo mecánico, C_v [W/m²] es la pérdida o la ganancia de calor por convección, K [W/m²] es la pérdida o la ganancia de calor por conducción térmica, R [W/m²] es la pérdida o la ganancia de calor por radiación térmica, E_{dif} [W/m²] es la pérdida de calor por difusión de vapor a través de la piel, E_{rsw} [W/m²] es

la pérdida de calor por sudoración, C_{res} [W/m²] es la pérdida de calor sensible debido a la respiración y E_{res} [W/m²] es la pérdida de calor latente debido a la respiración.

$$M - W - E_{dif} - E_{rsw} - E_{res} - C_{res} = K = R + C_v \quad (1.1)$$

Un ser humano requiere energía para el crecimiento, la regeneración y el funcionamiento de los órganos del cuerpo, para la contracción muscular, la circulación sanguínea y la respiración. El proceso de liberación, transformación y utilización de la energía en el cuerpo se conoce como metabolismo energético y las personas metabolizan u oxidan los alimentos ingeridos en el cuerpo, convirtiéndolos en energía electroquímica para que puedan realizar las funciones corporales normales [A1-4].

Para el cuerpo humano, solo alrededor del 20% de toda la energía química almacenada en los alimentos está disponible para un trabajo útil. La generación continua de calor dentro del cuerpo debe ser rechazada por medio de un flujo de calor sensible (radiación, convección o conducción) al ambiente circundante o evaporado a través de fluidos corporales como el sudor. Si se ingiere más energía alimentaria de la necesaria, se almacena como tejido graso para su uso posterior.

La tasa metabólica (M) es el calor liberado por el cuerpo por unidad de área de piel, cuya unidad de medida es met. 1 met (58,2 W/m²) es la cantidad promedio de calor producido por un hombre sedentario de corpulencia media (1,7 m² de área de piel). El metabolismo del cuerpo humano depende del estado de salud, edad, género y tipo de dieta, del ejercicio físico, peso, hormonas, consumo de alimentos, clima [A1-5].

El metabolismo energético basal procura los requerimientos calóricos necesarios para el mantenimiento de las funciones vitales en condiciones de reposo o neutralidad térmica (temperatura del entorno de 29 °C a 31 °C cuando se está desnudo, de 25 °C a 29 °C si está vestido).

La producción interna de calor (H) en el cuerpo humano es una magnitud que depende del metabolismo del cuerpo humano (M) y el trabajo mecánico (W), se determina con la ecuación 1.2.

$$H = M - W \quad (1.2)$$

Los flujos de calor por respiración (en W/m²) en el equilibrio térmico son a través de dos mecanismos: calor sensible C_{res} (ecuación 1.3) y calor latente E_{res} (ecuación 1.4), estos

dependen de la presión parcial de vapor de agua en el aire P_v , la temperatura ambiente T_a y la tasa de metabolismo (M) [A1-5].

$$C_{res} = 0,0014M(34 - T_a) \quad (1.3)$$

$$E_{res} = 1,72 \times 10^{-5}M(5867 - P_v) \quad (1.4)$$

La presión parcial de vapor de agua en el aire P_v [Pa] se determina a partir de la humedad relativa HR y la presión de vapor saturado P_{sat} (ecuación 1.5). La presión de vapor saturado, P_{sat} [Pa] a una temperatura T [°C] se determina, por ejemplo, con la ecuación de Antoine (ecuación 1.6) [A1-5].

$$P_a = HR \cdot P_{sat} \quad (1.5)$$

$$P_{sat} = 100 \exp\left(18,965 - \frac{4030}{T + 235}\right) \quad (1.6)$$

Los flujos de calor por evaporación (en W/m^2) en el equilibrio térmico son por difusión de vapor de a través de la piel y por sudoración. El primero, por difusión de vapor a través de la piel E_{dif} (ecuación 1.7) depende de la presión parcial de vapor de agua en el aire P_v y de la presión de vapor saturado P_s (ecuación 1.8) a la temperatura de la piel (T_s). El segundo, por sudoración E_{sw} (ecuación 1.10) depende de M y W . Las ecuaciones 1.9 - 1.10 basadas en datos de Rohles y Nevins (1971) [A1-6], indican valores de T_s y E_{sw} que proporcionan confort térmico.

$$E_{dif} = 0,00305 (P_s - P_v) \quad (1.7)$$

$$P_s = 256T_s - 3373 \quad (1.8)$$

$$T_s = 35,7 - 0,0275 (M - W) \quad (1.9)$$

$$E_{sw} = 0,42 (M - W - 58,15) \quad (1.10)$$

La evaporación es exclusivamente un proceso de enfriamiento. A temperaturas más bajas, la evaporación generalmente juega un papel insignificante en el balance de calor del cuerpo. A alta temperatura, cuando no se puede producir la pérdida de calor por radiación o conducción, la evaporación se convierte en el factor predominante de la pérdida de calor corporal.

La tasa de transferencia de calor por radiación R [W/m^2] entre el cuerpo y las superficies circundantes se determina con la ecuación 1.11. Dependen del coeficiente de transferencia de calor radiativo h_r (ecuación 1.12), la temperatura de la superficie de la ropa (T_{cl}), la temperatura radiante (T_r) y el factor de área de la vestimenta $f_{cl} = A_{cl}/A_D$ (el área del

cuerpo vestido entre el área de la superficie corporal). El área superficial del cuerpo (A_D) fue propuesta originalmente por DuBois y DuBois (1916) [A1-7] y es descrita por la ecuación 1.13, donde m [kg] es la masa del cuerpo y l [m] es la altura del cuerpo. Para un hombre con un peso de 70 kg y una talla de 1,73 m, A_D es igual a 1,8 m² [A1-5]. El coeficiente h_r [W/(m²·°C)], depende de la emisividad de la ropa (ε), la constante de Stefan-Boltzmann (σ), el área de radiación efectiva del cuerpo (A_r), el área de DuBois (A_D), T_{cl} y T_r . Cuando la temperatura superficial de la piel es más alta que la temperatura radiante media, el valor de R es positivo; de lo contrario, el valor de R es negativo. La ecuación 1.14 también permite determinar R [A1-3].

$$R = f_{cl} h_r (T_{cl} - T_r) \quad (1.11)$$

$$h_r = 4\varepsilon\sigma \frac{A_r}{A_D} \left[273,2 - \frac{T_{cl} - T_r}{2} \right]^3 \quad (1.12)$$

$$A_D = 0,202 m^{0,425} l^{0,725} \quad (1.13)$$

$$R = 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] \quad (1.14)$$

La tasa de transferencia de calor por convección C_v [W/m²] se determina con la ecuación 1.15 [A1-2, A1-3, A1-5]. El aire que pasa sobre la superficie de la piel no solo evapora la humedad, sino que también transfiere calor sensible hacia o desde el cuerpo. Cuanto más rápida sea la velocidad del movimiento del aire, mayor será la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el aire circundante o mayor sea el flujo de calor intercambiado; y cuanto mayor es el área de superficie corporal, mayor es la tasa de transferencia de calor por convección. La convección se vuelve cada vez más eficaz para disipar el calor a medida que disminuye la temperatura del aire y aumenta el movimiento del aire. La ecuación 1.15 depende del coeficiente del área de la ropa (f_{cl}) y el coeficiente de transferencia por convección (h_c) que depende de la velocidad del aire (v_a), la temperatura del aire (T_a) y la temperatura de la superficie de la ropa (T_{cl}).

$$C_v = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \quad (1.15)$$

La tasa de transferencia de calor por conducción K [W/m²] se puede calcular con la ecuación 1.16 y depende de la temperatura de la superficie de la piel (T_s), la temperatura de la superficie de la vestimenta (T_{cl}) y el nivel de vestimenta I_{cl} . La conducción permite perder calor a través de las plantas de los pies o del cuerpo cuando está acostado o sentado en una superficie más fría [A1-4] (gana calor si la superficie es más caliente).

$$K = (T_s - T_{cl})/I_{cl} \quad (1.16)$$

A1.1. Índice de voto medio previsto PMV

Fanger (1970) [A1-8] encontró una correlación entre el índice PMV (en inglés *Predicted Mean Vote*) y el desequilibrio entre el flujo de calor real del cuerpo en un ambiente dado y el flujo de calor requerido para una comodidad óptima de una actividad específica utilizando parámetros personales (M e I_{cl}) y parámetros ambientales térmicos (T_a , T_r , v_a y P_v). Fanger propuso que el grado de malestar depende de la carga térmica L (ecuación 1.17) y la definió como "la diferencia entre la producción de calor interno y la pérdida de calor al ambiente real para un hombre hipotéticamente manteniendo los valores de confort de la temperatura media de la piel y la secreción de sudor al nivel de actividad real". En condiciones de confort, la carga térmica es cero [A1-2].

$$L = M - W - E_{dif} - E_{rsw} - E_{res} - C_{res} - R - C_v \quad (1.17)$$

El PMV es un índice que refleja el valor medio de los votos emitidos por un grupo de muchas personas respecto de una escala de sensación térmica de 7 niveles (+3 muy caluroso, +2 caluroso, +1 ligeramente caluroso, 0 neutro, -1 ligeramente frío, -2 frío, -3 muy frío), basado en el equilibrio térmico del cuerpo humano. En un ambiente moderado, el sistema termorregulador trata de modificar automáticamente la temperatura de la piel y la secreción de sudor para mantener el equilibrio térmico [A1-9].

Las ecuaciones 1.18 – 1.22 permiten determinar el índice PMV según la norma ISO 7730 que se basa en las propuestas de Fanger; las ecuaciones para T_{cl} y h_c pueden ser resueltas mediante iteración. Al fijar $PMV = 0$, se establece una relación que predice las combinaciones de actividad, vestimenta y parámetros ambientales que, por término medio, dan lugar a una sensación térmica neutra [A1-9].

$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028)L \quad (1.18)$$

$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028) \times \left\{ \begin{array}{l} \frac{M - W}{- 0,00305(5733 - 6,99(M - W) - P_v)} \\ - 0,42(M - W - 58,15) \\ - 1,72 \times 10^{-5}M(5867 - P_v) \\ - 0,0014M(34 - T_a) \\ - 3,96 \times 10^{-8}f_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] \\ - f_{cl}h_c(T_{cl} - T_a) \end{array} \right\} \quad (1.19)$$

$$T_{cl} = 35,7 - 0,0275(M - W) - I_{cl} \times \left\{ \begin{array}{l} 3,96 \times 10^{-8}f_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] \\ + f_{cl}h_c(T_{cl} - T_a) \end{array} \right\} \quad (1.20)$$

$$h_c = \max(2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25}, 12,1\sqrt{v}) \quad (1.21)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,0 + 0,2I_{cl}; & I_{cl} \leq 0,5c_{lo} \\ 1,05 + 0,1I_{cl}; & I_{cl} > 0,5c_{lo} \end{cases} \quad (1.22)$$

A1.2. Porcentaje estimado de insatisfechos PPD

El PMV predice el valor medio de los votos de la sensación térmica que emite un grupo numeroso de personas sometidas al mismo ambiente. No obstante, los votos individuales están dispersos alrededor del valor medio, siendo útil el poder estimar el número de personas que, probablemente, sienten incomodidad debida al calor o al frío.

El PPD (en inglés *Predicted Percentage Dissatisfied*), es un índice que establece una predicción cuantitativa del porcentaje de personas que se sienten insatisfechas por notar demasiado frío o demasiado calor [A1-9]. Para la norma ISO 7730, las personas térmicamente insatisfechas son aquellas que votan muy caluroso, caluroso, frío o muy frío, sobre la escala de 7 niveles de sensación térmica incluida. Una vez determinado el valor del PMV, se calcula el PPD utilizando la ecuación 1.23 que se parece a la de una distribución de Gauss, muy frecuente en el análisis de características de poblaciones numerosas.

$$PPD = 100 - 95 \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (1.23)$$

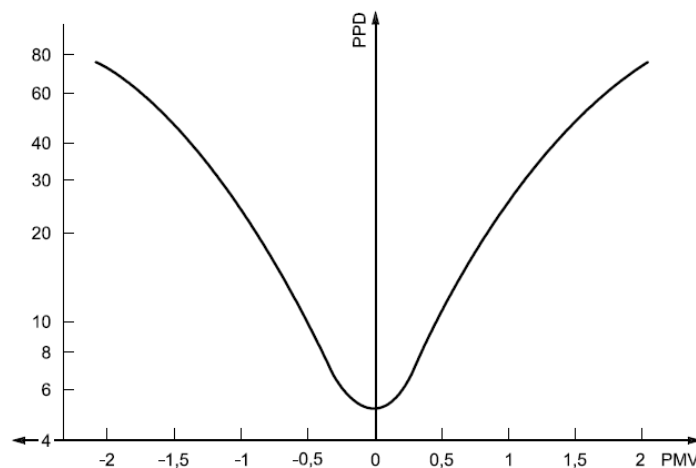


Figura 1. 2. Porcentaje estimado de insatisfechos (PPD) en función de PMV [A1-9].

La figura 1.2 presenta el gráfico PPD en función de PMV, para tener una situación satisfactoria para la mayoría de las personas los valores PPD deben ser hasta 10% (90% satisfechos), mientras que valores superiores indican una situación de malestar. Este valor

del índice PPD (10%) corresponde con los límites -0,5 y 0,5 indicados para el PMV. El mejor valor del porcentaje de personas insatisfechas que se puede obtener es de un 5%, corresponde a una situación de neutralidad térmica ($PMV = 0$). La ecuación 1.23 no contempla una situación ideal donde no exista ningún trabajador insatisfecho con las condiciones térmicas, estima que al menos un 5% puede no estar conforme con el ambiente.

Referencias bibliográficas

- A1-1. K. Fabbri, *Indoor Thermal Comfort Perception: A Questionnaire Approach Focusing on Children*, Springer International Publishing, 2015. P 25-50
- A1-2. Parsons, K. (2010). 5 - Thermal comfort in buildings. In M. R. Hall (Ed.), *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings* (pp. 127-147): Woodhead Publishing.
- A1-3. Parsons, K. (2006). *Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance* 2nd ed (London and New York: Taylor & Francis), p. 203-209.
- A1-4. Chowdhury, A., Majumdar, P. K., & Datta, C. (2011). Factors affecting comfort: Human physiology and the role of clothing (pp. 3-60).
- A1-5. ASHRAE. (2013). *Thermal Comfort*. In A. Inc (Ed.), *ASHRAE Handbook*. Virginia.
- A1-6. Rohles, F.H., Jr., and R.G. Nevins. 1971. The nature of thermal comfort for sedentary man. *ASHRAE Transactions* 77(1):239.
- A1-7. DuBois, D., and E.F. DuBois. 1916. A formula to estimate approximate surface area, if height and weight are known. *Archives of Internal Medicine* 17:863-871.
- A1-8. Fanger, P.O., 1970, *Thermal Comfort*, Copenhagen: Danish Technical Press.
- A1-9. ISO. (2005). *International standard ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria* (Vol. Third). Switzerland.

ANEXO II. ÍNDICES Y DIAGRAMAS RELACIONADOS AL BIENESTAR TÉRMICO

En esta sección se presentan de manera concisa algunos índices que de cierta manera estiman el bienestar térmico de los individuos. Primero se mencionan algunos índices empíricos y en la parte final se presentan los diagramas más utilizados en el diseño bioclimático.

La temperatura operativa T_o fue introducido por Winslow, Herrington y Gagge [A2-1] en 1937; se define como la temperatura de un recinto "negro" isotérmico uniforme en el que el hombre intercambia calor por radiación y convección a la misma velocidad que en el entorno no uniforme dado; o como el promedio de temperatura radiante media (T_r) y temperatura del aire (T_a) ponderado por sus respectivos coeficientes de transferencia. Puede ser estimada con la ecuación 2.1, donde h_r y h_c son los coeficientes de radiación y convección. Este índice integra el efecto de la temperatura del aire y la radiación, pero ignora la humedad y la velocidad del aire [A2-2].

$$T_o = \frac{h_r T_r + h_c T_a}{h_r + h_c} \quad (2.1)$$

La temperatura efectiva T_{ef} * está definida como la temperatura uniforme al 50% de humedad relativa que produce la misma pérdida total de calor de la piel que en el entorno real [A2-3]. Dos entornos con la misma T_{ef} deberían tener la misma respuesta térmica, aunque los valores de las temperaturas y las humedades sean diferentes, pero la misma velocidad del aire.

La temperatura de globo de bulbo húmedo (WBGT) fue definido para la prevención de enfermedades por el calor en los campos de entrenamiento militar, luego fue reconocido como un estándar validado por ISO 7243 (1989). La WBGT se basa en el análisis simultáneo de la temperatura del globo (T_g), la temperatura del bulbo húmedo (T_w) y la temperatura del aire (T_a). La WBGT para el entorno exterior se define con la ecuación 2.2.

$$WBGT = 0,7 T_w + 0,2 T_g + 0,1 T_a \quad (2.2)$$

Los resultados obtenidos por WBGT deben compararse con las tablas presentadas en la ISO 7243, que muestran para cada actividad metabólica el valor de confort correspondiente (aislamiento de ropa estándar: clo 0,6). La WBGT es un estándar bien establecido; para determinarla, se puede seguir el protocolo que se describe en la ISO 7243 [A2-4].

Wind chill temperature index (WCTI) es el índice de enfriamiento por efecto del viento. Publicado en 1945 por Siple y Passe [A2-5], considera el poder de enfriamiento del viento y sus impactos en el bienestar térmico para un ambiente frío. Se definió utilizando experimentos de campo en la Antártida [A2-4]. El índice describe la tasa de pérdida de calor de un cilindro por radiación y convección para una temperatura superficial de 33 °C, en función de la temperatura ambiente y la velocidad del viento [A2-3]. Se publicó un índice mejorado en 2001 en Estados Unidos, basado en que a medida que aumenta la velocidad del viento, la pérdida de calor también aumenta, haciendo que el aire "se sienta" más frío. Este índice es estimado con la ecuación 2.3, una fórmula útil para calcular los peligros de los vientos de invierno y las temperaturas de congelación [A2-6]. Donde v_{10} [km/h] es la velocidad del viento a 10 m de altura y T [°C] es la temperatura del aire. El WCTI puede utilizarse para climas fríos con vientos y eventos de viento elevados, pero no considera el impacto de la radiación solar y las características de las personas. Este índice es utilizado por los climatólogos para reportar la "sensación térmica" en invierno en la televisión.

$$WCTI = 13,12 + 0,6215 T - 11,37 v_{10}^{0,16} + 0,3965 T v_{10}^{0,16} \quad (2.3)$$

		Temperatura [°C]									
		5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40
Velocidad del viento [km/h]	10	3	-3	-9	-15	-21	-27	-33	-39	-45	-51
	20	1	-5	-12	-18	-24	-30	-37	-43	-49	-56
	30	0	-6	-13	-20	-26	-33	-39	-46	-52	-59
	40	-1	-7	-14	-21	-27	-34	-41	-48	-54	-61
	50	-1	-8	-15	-22	-29	-35	-42	-49	-56	-63
	60	-2	-9	-16	-23	-30	-36	-43	-50	-57	-64
	70	-2	-9	-16	-23	-30	-37	-44	-51	-58	-65
	80	-3	-10	-17	-24	-31	-38	-45	-52	-60	-67
	90	-3	-10	-17	-25	-32	-39	-46	-53	-61	-68
	100	-3	-11	-18	-25	-32	-40	-47	-54	-61	-69

Tiempo de congelación: 30 min 10 min 5 min

Figura 2.1. Carta de wind chill calculada con la ecuación 2.3 con datos de temperaturas [en °C] y velocidad de viento [en km/h].

Heat Index (HI) es la ecuación del índice de calor, deriva de un análisis de regresión múltiple y considera el impacto de la temperatura del aire y la humedad relativa en la comodidad humana [A2-7]. Este índice fue desarrollado en 1978 por G. Winterling como "humiture" y fue adoptado por el Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos un año después. La ecuación 2.4 permite calcular este índice, aunque tiene una incertidumbre de $\pm 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ [A2-8].

$$HI = c_1 + c_2 T + c_3 HR + c_4 T HR + c_5 T^2 + c_6 HR^2 + c_7 T^2 HR + c_8 T HR^2 + c_9 T^2 HR^2 \quad (2.4)$$

Donde los coeficientes tienen los siguientes valores: $c_1 = -8,784995$; $c_2 = 1,61169411$; $c_3 = 2,338549$; $c_4 = -0,14611605$; $c_5 = -0,012308094$; $c_6 = -0,016424828$; $c_7 = 0,02211732$; $c_8 = 7,2546 \times 10^{-4}$ y $c_9 = -3,582 \times 10^{-6}$. El HI es un número en grados (Fahrenheit o Celsius) que indica qué tan caliente se siente cuando se agrega humedad relativa a la temperatura real del aire. A medida que aumenta la humedad, la evaporación del sudor de una persona se ralentiza y se retiene más calor. El índice de calor representa la disminución de la tasa de evaporación y es una representación más precisa de la temperatura relacionada con los riesgos para la salud humana [A2-9].

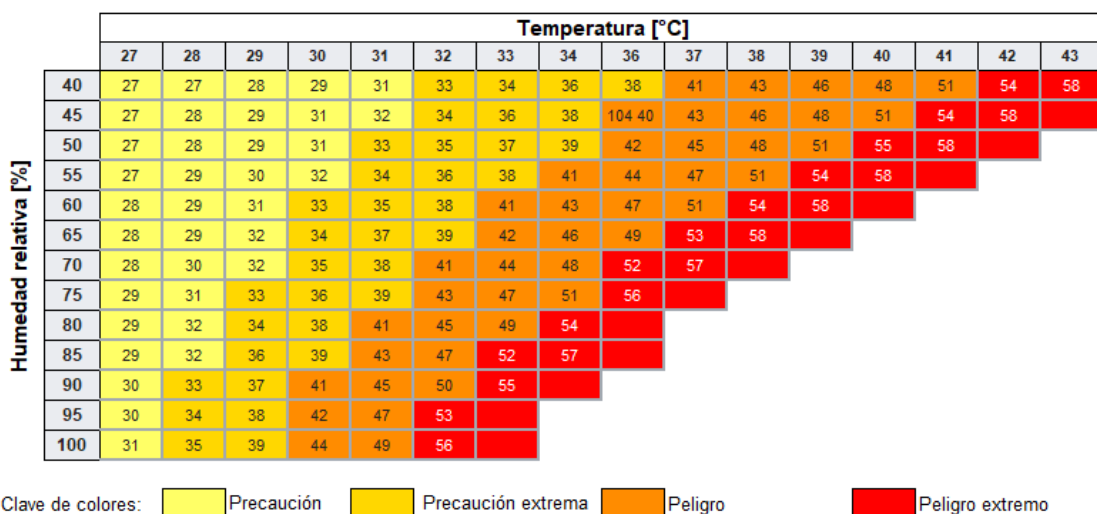


Figura 2.2. Índice de calor con temperaturas y humedad relativa [A2-8].

Diagramas bioclimáticos

Las cartas o diagramas bioclimáticos facilitan el análisis de las características climáticas de una ubicación dada, desde el punto de vista de la comodidad humana, ya que presentan en una sola gráfica varios parámetros, principalmente la temperatura y la humedad. Asimismo, estos diagramas pueden detallar pautas de diseño de edificaciones para asegurar el bienestar térmico en ambientes interiores de edificios que no cuenten con

sistemas de calefacción o aire acondicionado. Estos diagramas están dispuestos en torno a la "zona de bienestar" que se definen como las condiciones climáticas dentro del cual la mayoría de los individuos no sentirían disgustos térmicos, ni de calor ni de frío [A2-10].

Carta de Olgay

Olgay [A2-11] fue el primero en desarrollar su carta bioclimática (figura 2.3). En la carta de Olgay se presentan la humedad relativa (en el eje de la abscisa) y la temperatura del bulbo seco (en el eje de la ordenada). Sobre esta carta (figura 2.3) se encuentran los límites de bienestar térmico (zona de bienestar). Las regiones de la carta con temperaturas menores al límite inferior de la zona de bienestar son consideradas con condiciones de "subcalentamiento", mientras las zonas con temperaturas mayores al límite superior de la zona de bienestar son calificadas con condiciones de "sobrecalentamiento". La capacidad de extender el rango de bienestar de verano a temperaturas y humedades más altas con el aumento de la velocidad del viento, y la capacidad de reducir la temperatura del aire por evaporación del agua, también se presentan en la carta.

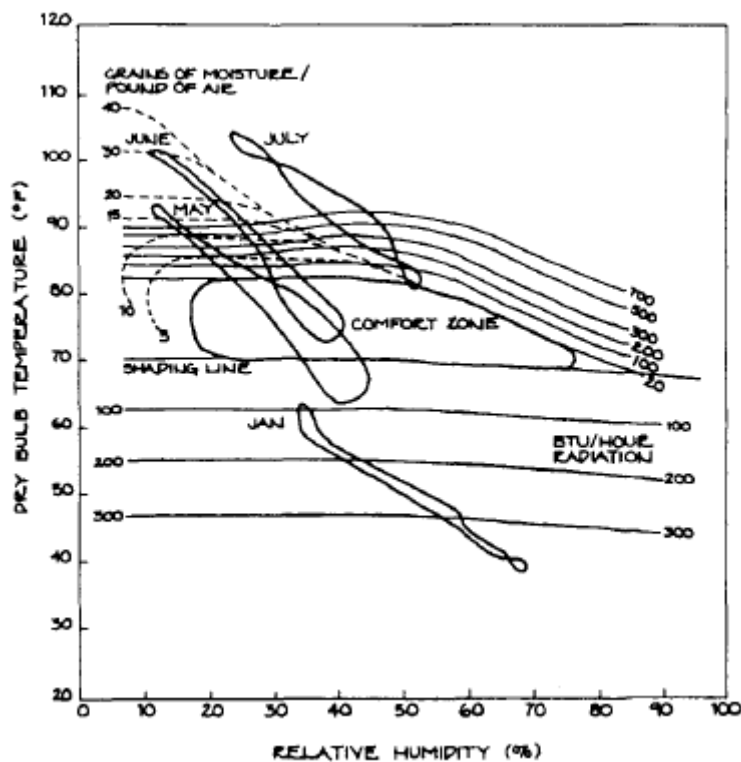


Figura 2.3. Diagrama de Olgay para Phoenix, Arizona [A2-11].

Se puede trazar las condiciones de temperatura y humedad relativa de un lugar en específico, los datos pueden ser considerados a nivel mensual para realizar un mejor diagnóstico. Para esto se consideran valores máximos y mínimos, en promedio mensual

de la temperatura y humedad relativa del lugar de estudio. Para un análisis simplificado, se considera líneas rectas que representan a cada mes del año, siendo los puntos de estas la combinación de los parámetros de la temperatura y humedad: el primer punto es temperatura máxima con la humedad relativa mínima y el segundo punto es la temperatura mínima con la humedad relativa máxima, valores en promedio mensual.

Diagrama bioclimático de Givoni

Con la publicación del libro "Man, Climate and Architecture" en 1969, Givoni [A2-12,13] presentó su diagrama bioclimático para edificaciones "Building Bioclimatic Chart" [A2-12]. Este diagrama se presenta sobre la carta psicrométrica y permite establecer una o varias estrategias bioclimáticas, las cuales están en función de las condiciones de temperatura y humedad de la edificación en una época específica del año. En este diagrama se aprecian varias regiones zonas que están asociadas a recomendaciones de técnicas bioclimáticas para alcanzar la zona de bienestar (figura 2.4).

Los límites de la zona de bienestar y las diferentes estrategias de diseño para asegurar el bienestar interior fueron determinados para edificaciones que no cuenten con sistemas mecánicos de climatización, es decir edificaciones con ventilación natural. Los límites originales de la comodidad en la carta bioclimática se basaron en investigaciones realizadas en los Estados Unidos, Europa e Israel [A2-10].

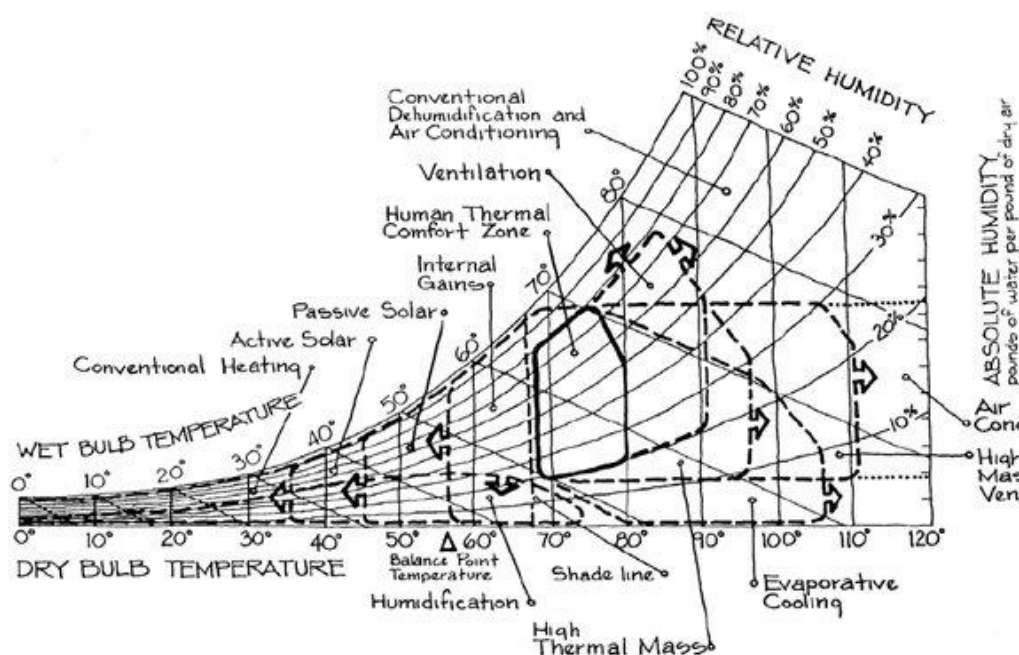


Figura 2.4. Carta bioclimática de Givoni-Milne [A2-10].

Referencias bibliográficas

- A2-1. Winslow, C E A, Herrington, L P & Gagge, A P (1937): Physiological reactions to environmental temperature. *Am J of Physiology*, 120:1-22
- A2-2. Auliciems, A. and Szokolay, S. (2007) Thermal comfort. PLEA: Passive and Low Energy Architecture International. Department of Architecture, University of Queensland. Brisbane, Australia.
- A2-3. ASHRAE. (2013). Thermal Comfort. In ASHRAE Handbook Fundamentals. Virginia.
- A2-4. Coccolo, S., Kämpf, J., Scartezzini, J., & Pearlmutter, D. (2016). Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate*, 18, 33-57.
- A2-5. Lankford, H. V., & Fox, L. R. (2021). The Wind-Chill Index. *Wilderness & Environmental Medicine*, 32(3),
- A2-6. National Weather Service (2019). Tabla de sensación térmica. Disponible en: <https://www.weather.gov/safety/cold-wind-chill-chart>.
- A2-7. Rothfus, L.P., 1990. The Heat Index Equation (Or, More Than You Ever Wanted to Know About Heat Index). Texas Natl. Ocean. Atmos. Adm. Natl. Weather Serv. Off. Meteorol., FortWorth, pp. 23–90.
- A2-8. National Weather Service (2019). What is the heat index? Disponible en: <https://www.weather.gov/ama/heatindex>
- A2-9. Clements, B. W., & Casani, J. A. P. (2016). 13 - Heat Waves. In B. W. Clements & J. A. P. Casani (Eds.), *Disasters and Public Health (Second Edition)* (pp. 309-330): Butterworth-Heinemann.
- A2-10. Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18(1), 11-23.
- A2-11. Olgyay, V. (1963) *Design with Climate*, Princeton University Press.
- A2-12. Givoni, B. (1969) *Man, climate and architecture*. Elsevier Publishing Company Limited, New York.
- A2-13. B. Givoni, *Man, Climate and Architecture*, Applied Science Publishers, London, 2nd ed., 1976.

**ANEXO III. FICHAS TÉCNICAS DE SENSORES UTILIZADOS
ESTACIÓN VANTAGE 2 PLUS CABLEADA**

	Función	Resolución	Límites	Exactitud +/-
Presión barométrica	Límite de altitud: -600 a +4570m	0,1 mm Hg 0,1 mbar	410 a 820 mm Hg 540 a 1100 mbar o hPa	0,8 mm Hg 1,0 mbar o Hpa
Humedad	Humedad al aire libre Punto de rocío	1% 1 °C	0% a 100% -76 °C a + 54 °C	3% 1,5 °C
Precipitación	Precipitación Índice de precipitación	0,2 mm 0,1 mm	0 a 6553 mm 0 a 2438 mm/h	4% 5% ≤ 127 mm/h
Solar y ultravioleta	Radiación solar Energía solar Dosis de radiación Ultravioleta Índice ultravioleta	1 W/m ² 0,1 Ly 0,1 MED 0,1	0 a 1800 W/m ² 1999,9 Ly 0 a 199 MED 0 a 16	5% 5% 5% 5%
Temperatura	Temperatura al aire libre Índice de calor al aire libre Índice de temperatura, humedad, sol y viento Sensación térmica	0,1 °C 1 °C 1 °C 1 °C	-40 °C a +65 °C -40 °C a + 74 °C -68 °C a + 74 °C -79 °C a + 57 °C	0,5 °C 1,5 °C 2 °C 1 °C
Hora y fecha	Hora Fecha Salida y puesta de sol	1 minuto Día/mes 1 minuto	12 / 24 horas Año bisiesto 24 horas	8 s/mes 8 s/mes 1 minuto
Viento	Dirección del viento Rosa de vientos Velocidad del viento Dirección de alta velocidad Recorrido de viento	1° 22,5 0,1 m/s 1 Km/h 22,5 0,01 m/s 0,01 Km/h	0° a 360° 16 puntos cardinales 1 a 80 m/s 3 a 290 Km/h 16 puntos cardinales Ilimitado	3° 5% 5%



DISPOSITIVO DELTA OHM DH.32.3

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Características técnicas del instrumento

Fuente de alimentación	Fuente de alimentación 12 VDC / 1A
Pilas	4 pilas 1.5 V tipo AA
Autonomía	200 horas con baterías alcalinas de 1800 mAh
Entradas para sondas con módulo SICRAM	3 conectores DIN 45326 macho de 8 polos

Interfaz serial

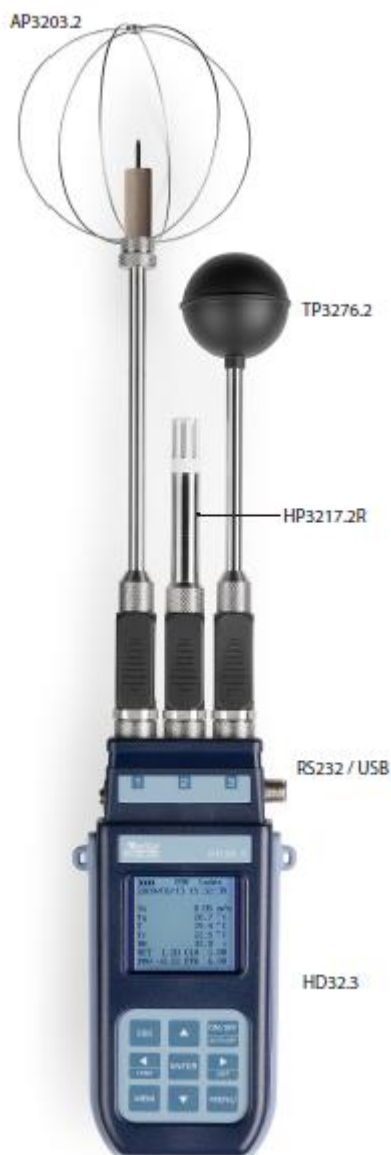
Bit de datos	8
Longitud del cable	máximo 15 m
Memoria	dividido en 64 bloques
Capacidad de memoria	67600 memorizaciones para cada una de las 3 entradas
Intervalo de memorización	seleccionable entre: 15, 30 s; 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30 min y 1 hora
Seguridad de los datos almacenados	ilimitado
Intervalo de registro	Configurable de 1 segundo a 1 hora
Capacidad de almacenamiento	8 GB
Incertidumbre del instrumento	± 1 dígito a 20 °C

Condiciones de operación

Temperatura de trabajo	-5... 50 °C
Temperatura de almacenamiento	-25... 65 °C
Humedad relativa de trabajo	0... 90 % RH sin condensación
Grado de protección	IP64
Dimensiones (largo x ancho x alto)	185 x 90 x 40 mm
Peso	470 g (pilas incluidas)
Materiales	ABS, caucho
Monitor	Luz de fondo, matriz de puntos 160 x 160 puntos, área visible 52 x 42 mm

TP3275 y TP3276.2 - Sondas de temperatura para termómetros de globo.

Sensor	Pt100
Rango de medición	-30 ... 120 °C
Resolución	0,1 °C
Precisión	1/3 DIN
Deriva de temperatura a 20 °C	0,003% / °C
Estabilidad a largo plazo	0,1 °C / año
Conexión	Conector DIN45326 hembra de 8 polos Cable L = 2 m (solo TP3276.2)
Dimensiones del globo	Ø = 150 mm (TP3275), Ø = 50 mm (TP3276.2)
Dimensiones del tallo	Ø = 14 mm, L = 110 mm (TP3275) Ø = 8 mm, L = 170 mm (TP3276.2)
Tiempo de respuesta T ₉₅	15 minutos



HP3201 y HP3201.2 - Sondas de bulbo húmedo de ventilación natural	
Sensor	Pt100
Rango de medición	4... 80 °C
Resolución	0,1 °C
Precisión	Clase A
Deriva de temperatura a 20 °C	0,003% / °C
Estabilidad a largo plazo	0,1 °C / año
Conexión	Conector DIN45326 hembra de 8 polos Cable L = 2 m (solo HP3201)
Dimensiones del tallo	Ø = 14 mm, L = 110 mm (HP3201), L = 170 mm (HP3201.2)
Longitud de la mecha de algodón	10 cm aprox.
Reservorio	Capacidad 15 cc, autonomía 96 horas @ RH = 50% y t = 23 °C
Tiempo de respuesta T₉₅	15 minutos

TP3204S - Sondas de bulbo húmedo de ventilación natural	
Sensor	Pt100
Rango de medición	4... 80 °C
Resolución	0,1 °C
Precisión	Clase A
Deriva de temperatura a 20 °C	0,003% / °C
Estabilidad a largo plazo	0,1 °C / año
Conexión	Conector DIN45326 hembra de 8 polos, cable L = 2 m
Dimensiones	L x A x H = 140 x 65 x 178,5 mm (depósito + botella)
Longitud de la mecha de algodón	10 cm aprox
Reservorio	Capacidad 500 cc, autonomía 15 días @ t = 40 °C
Tiempo de respuesta T₉₅	15 minutos


**ANEXO IV. MODELO DE ENCUESTA
ENCUESTA COMODIDAD TÉRMICA**

Nombre: _____

Encuesta N°











PARTE I. INFORMACIÓN GENERAL

Fecha de encuesta	___ / ___ / ___	Hora de Inicio	___ : ___
-------------------	-----------------	----------------	-----------

Género		Edad	¿En qué Ambiente estas?	<input type="checkbox"/> Vivienda	<input type="checkbox"/> Alberque Municipalidad Exterior
	<input type="checkbox"/> Parroquia			<input type="checkbox"/> Tambo	
	<input type="checkbox"/> Cafarena		<input type="checkbox"/> Aula		

PARTE II. VESTIMENTA, ALIMENTACIÓN, ACTIVIDAD

2.1. Ropa utilizada en este instante: (Escribir el número)

	Polo manga larga		Casaca		Pantalón de tela		Zapatos cerrados
	Polo manga corta		Casaca polar		Jean		Zapatos abiertos
	Cafarena		Casaca drill		Pantalón de buzo		Zapatillas
	Blusa/camisa		Casaca de buzo		Pantalón polar		Botas
	Chompa cerrada		Chalina		Medias largas	OTRAS VESTIMENTAS	
	Chompa abierta		Gorro de lana		Medias cortas	-	-
	Chaleco		Sombrero		Panty	-	-
	Poncho		Gautes de lana				





2.2. Alimentación:

¿Cuándo comió por última vez? Más de 1 hora Menos de 1 hora

¿Qué comió? _____






2.3. Actividad física que estuvo realizando antes de la encuesta

(Marcar con un x)

					Otra actividad
Sentado	Caminando	Corriendo	Cocinando	Durmiendo	_____

PARTE III. COMODIDAD TÉRMICA (Marcar con un x)

¿En este momento sientes frío o calor?

				
Mucho Frío	Frío	Normal (Ni frío, ni calor)	Calor	Mucho Calor

En este momento te gustaría que el ambiente estuviera:

Un poco más frío	Sin cambio	Un poco más caliente

ANEXO V. ANÁLISIS DE ÍNDICE PMV PARA IMATA

El índice PMV se deriva de las ecuaciones de transferencia de calor combinada con una adaptación empírica para la sensación térmica. El PMV establece una tensión térmica basada en la transferencia de calor en estado estacionario entre el cuerpo y el ambiente, y asigna un voto de confort a esa cantidad de tensión. Las ecuaciones para determinar el índice PMV son presentadas en el ANEXO I y este índice es estimado con métodos numéricos por su complejidad.

El índice PMV presenta una escala de 7 puntos (muy frío, frío, ligeramente frío, neutro, ligeramente caliente, caliente y muy caliente). A cada uno se le asigna un valor numérico de -3 a 3. Para nuestro trabajo en campo no consideramos una escala de 7 puntos debido a la dificultad del poblador de Imata para escoger entre ligeramente frío y frío (o ligeramente caliente y caliente), considerando una escala de 5 puntos (MF, F, N, C, MC).

Se utiliza los límites de la zona de bienestar térmico establecidos en el capítulo V, así como las mediciones de parámetros ambientales para estimar el PMV teórico (PMV utilizando las fórmulas propuestas por la norma ISO 7730). Se analiza estos valores con otras estimaciones de PMV simplificadas.

La figura 5.1 presenta el procedimiento desarrollado en esta sección. Se busca linealizar PMV utilizando el coeficiente radiativo de transferencia de calor (h_r) como una constante, además la temperatura de la vestimenta (T_{cl}) determinarla en función de h_r . También establecer la influencia de T_r para las temperaturas medidas en Imata y compararla cuando se asume $T_r = T_a$. Los parámetros de entrada en todos los casos son T_a , HR , M y I_{cl} . Para el análisis se tienen las siguientes consideraciones:

- ❖ En el caso 0, se determina el índice PMV con la norma ISO 7730 (ecuaciones 1.18 – 1.22 del ANEXO I), utilizando T_r y v . De los resultados se obtienen valores promedios de los coeficientes convectivos (h_c) y radiativo (h_r) de transferencia de calor. Para h_c se obtiene, en promedio, 4,2 W/(m²·°C) con valores entre 3,5 W/(m²·°C) y 6,4 W/(m²·°C). Para h_r , los valores varían entre 3,7 W/(m²·°C) y 4,3 W/(m²·°C), con un promedio de 4,0 W/(m²·°C).
- ❖ En el caso 1, se determina PMV₁ con la norma ISO 7730, asumiendo $T_r = T_a$ para estimar si existe alguna relación entre ambos.

- ❖ En el caso 2, se estima PMV_2 considerando el valor constante de $h_c = 3,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, determinado en el caso 1 y para la altitud de Imata. Para evaluar la temperatura de la vestimenta (T_{cl}), se utiliza métodos numéricos y se verifica el valor medio de $h_r = 4,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.
- ❖ En el caso 3, para PMV_3 se asume $T_r = T_a$, $h_c = 3,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ y $h_r = 4,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ como valores constantes. Los valores de T_{cl} se estiman en función de h_r y el intercambio por radiación es estimada con la ecuación 1.14 del ANEXO I.
- ❖ El caso 4, PMV linealizado 1 (PMV_{L1}) considera los parámetros de entrada como T_r y los valores constantes de h_c y h_r . Los intercambios por radiación se linealizan al utilizar el valor de h_r constante.
- ❖ El caso 5, PMV linealizado 2 (PMV_{L2}) es similar al caso 4 y considera $T_r = T_a$.

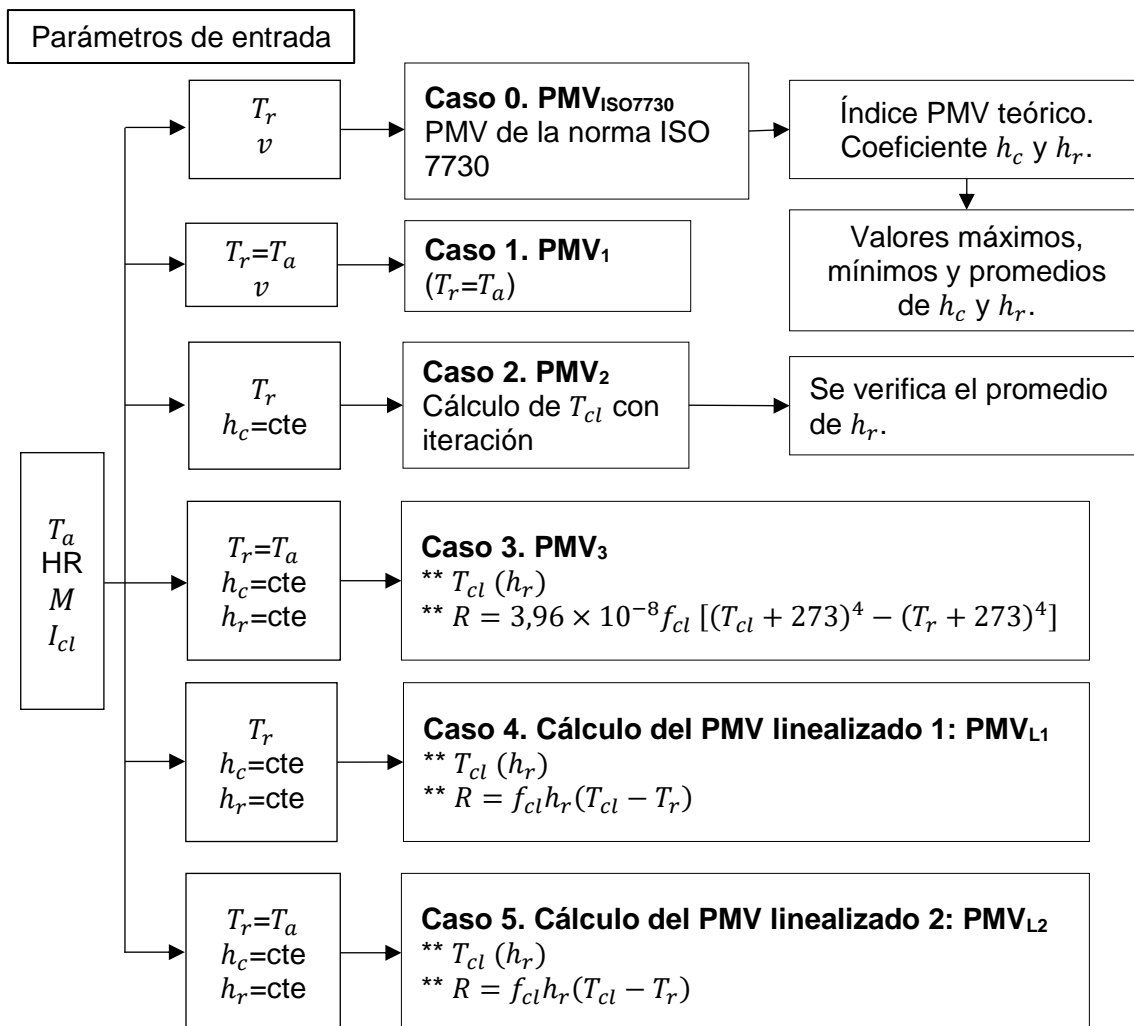


Figura 5.1. Esquema de análisis realizado para comparar el índice PMV con diferentes aproximaciones.

A5.1. Análisis con datos experimentales en Imata

Con mediciones de T_a , T_r , HR , v , M y I_{cl} durante las encuestas en Imata se realizan las estimaciones del índice PMV. La figura 5.2 presenta la relación lineal entre los valores estimados de PMV_1 (en el eje x) y $PMV_{ISO7730}$ (en el eje y), resultando $h_c = 4,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ y $h_r = 4,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Los puntos más alejados a la recta representan valores elevados de temperatura radiante ($T_r = 26,5 \text{ }^\circ\text{C}$). El R^2 del ajuste lineal es igual a 0,93.

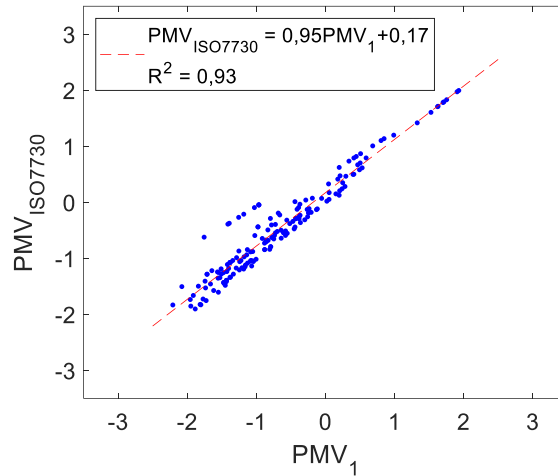


Figura 5.2. Relación entre PMV_1 (asumiendo $T_r = T_a$) y $PMV_{ISO7730}$, logrando (en promedio) $h_c = 4,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ y $h_r = 4,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

La figura 5.3 presenta a PMV_2 y PMV_3 respecto a $PMV_{ISO7730}$, con PMV_2 se obtuvo $h_r = 4,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Para el caso de PMV_3 se utilizó $h_c = 4,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ y $h_r = 4,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

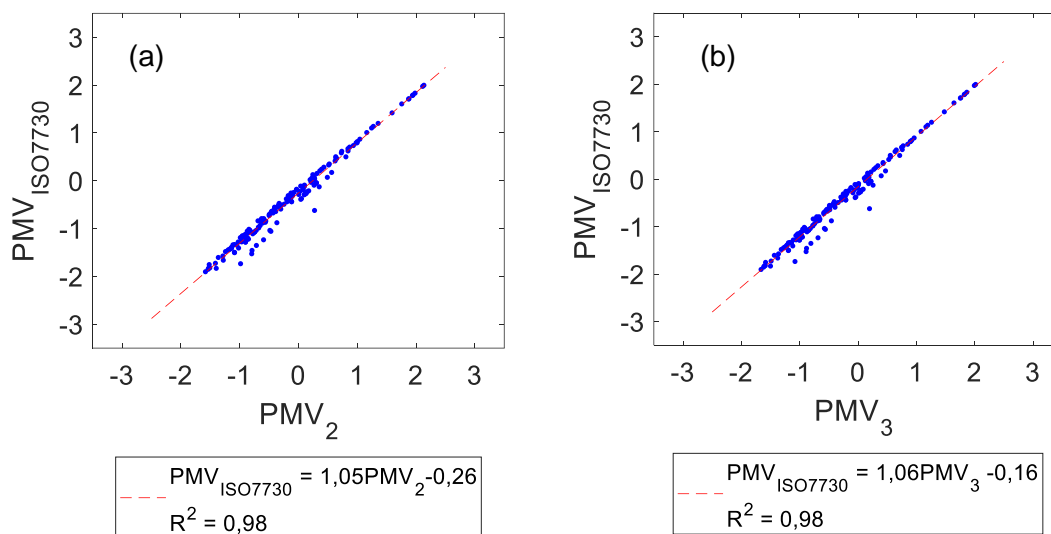


Figura 5.3. Relación entre (a) PMV_2 y $PMV_{ISO7730}$, obteniéndose (en promedio) $h_r = 4,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ y (b). PMV_3 y $PMV_{ISO7730}$.

La figura 5.4a presenta la relación entre el PMV linealizado 1 (PMV_{L1}) y el $PMV_{ISO7730}$, de forma similar, la figura 5.4b presenta a PMV linealizado 2 (PMV_{L2}), que asume $T_r = T_a$, $h_r = 4,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ y $h_c = \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, y el $PMV_{ISO7730}$. Los puntos más alejados a la recta fueron determinados para valores de T_r mucho más grandes que T_a .

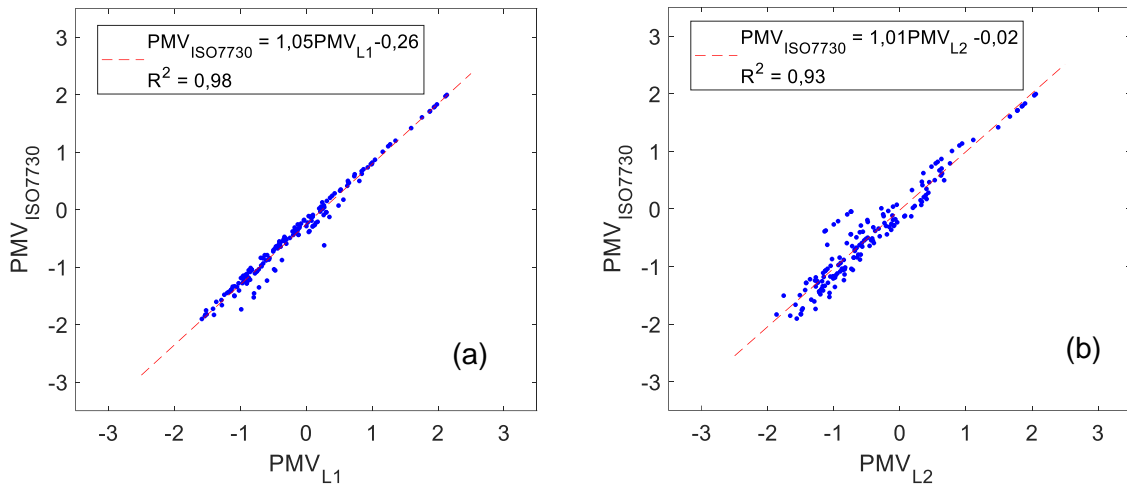


Figura 5.4. Relación entre PMV linealizado 1 y PMV calculado siguiendo los parámetros de la norma ISO 7730.

A5.2. Análisis con datos dentro de los límites de bienestar

Considerando de la zona de bienestar los valores de las temperaturas (de $11,86 \text{ }^\circ\text{C}$ a $17,17 \text{ }^\circ\text{C}$) y los valores de humedad relativa (de $19,80 \%$ a $55,61 \%$) para la actividad pasiva, además $T_r = T_a$, y los valores medios de I_{cl} ($1,28 \text{ clo}$), M (1 met) y v ($0,05 \text{ m/s}$) se calcula el índices PMV. Como se tiene $T_r = T_a$ sólo se analiza PMV_1 , PMV_3 y PMV_{L2} .

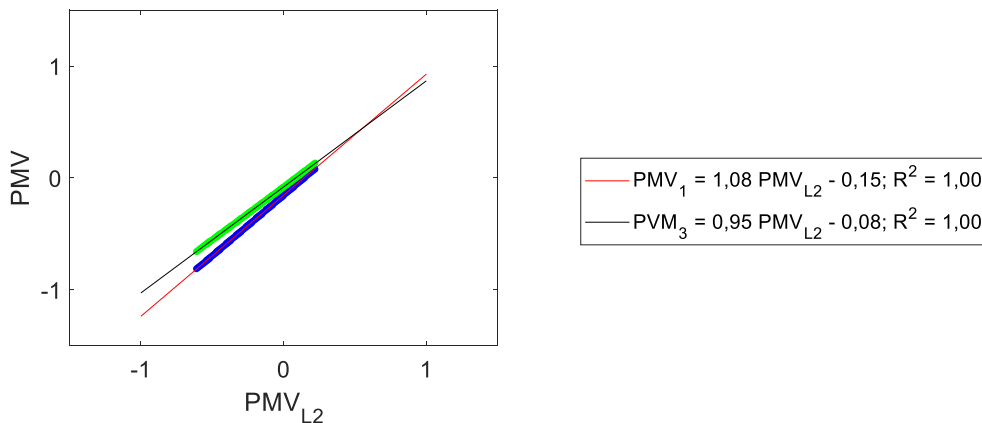


Figura 5.5. Relación entre PMV_{L2} y PMV_1 ($T_r = T_a$) y PMV_3 ($T_r = T_a$; h_c y h_r constantes y T_{cl} en función de h_r), calculados para valores promedios de $I_{cl} = 1,28 \text{ clo}$; $M = 1 \text{ met}$ y $v = 0,05 \text{ m/s}$; $11,86 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_a \leq 17,17^\circ\text{C}$ y $19,8 \% \leq HR \leq 55,61 \%$.

Entonces se utilizan 11 valores entre los límites máximos y mínimos de la ZE para T_a y HR determinados en la sección 4, en total 121 combinaciones. Las relaciones lineales determinadas para PMV_{L2} respecto a PMV_1 (puntos azules) y PMV_{L2} respecto a PMV_3 (puntos verdes) se presentan en la figura 5.5.

La figura 5.6 muestra la relación lineal existente entre los valores de PMV calculados con dos regresiones lineales, la primera con PMV_{L2} (de la figura 5.4b) y la segunda con PMV_1 (de la figura 5.2), en teoría los valores deben ser similares, y la relación entre ambas una recta con pendiente igual a 1. Para el caso de PMV en función de PMV_1 (graficado en el eje y) se utiliza la expresión $PMV = 0,95PMV_1 + 0,17$. De forma similar para PMV en función de PMV_{L2} (graficado en el eje x) se utiliza la expresión $PMV = 1,01PMV_1 - 0,02$. La regresión lineal tiene una pendiente cercana a la unidad (1,02).

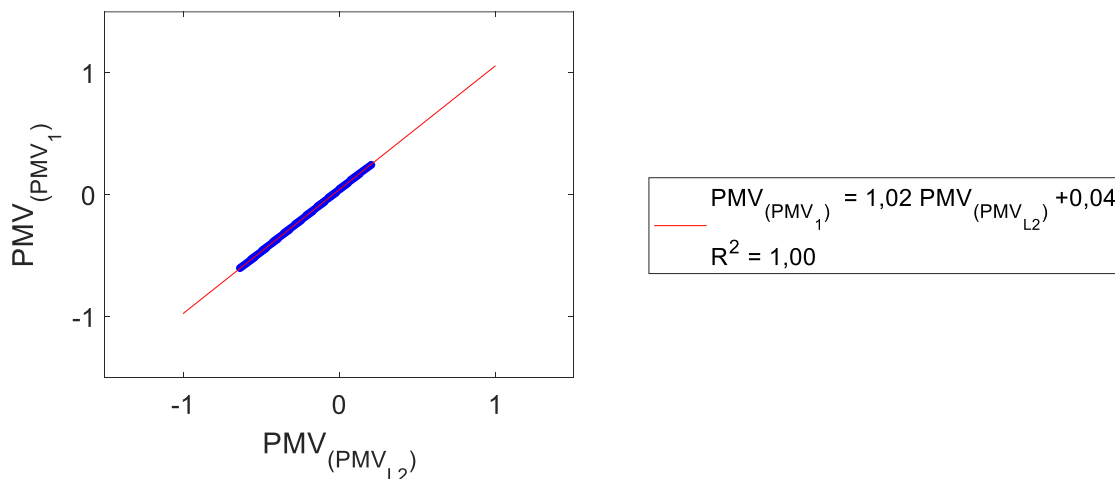


Figura 5.6. Relación entre PMV_{L2} con PMV_1 ($T_r = T_a$) y PMV_3 ($T_r = T_a$; h_c y h_r constantes y $T_{cl}(h_r)$), calculados para valores medios de $I_{cl} = 1,27$ clo; $M = 1,0$ met y $v = 0,05$ m/s; $11,86\text{ °C} \leq T_a \leq 17,17\text{ °C}$ y $19,8\% \leq HR \leq 55,61\%$.

A5.3. Simulación de PMV considerando variación de T_r .

En esta sección se modifica el valor de T_r respecto al valor de T_a , se consideran seis valores para cada variable (T_a , HR y T_r), obteniéndose en total 216 puntos. Se utiliza $T_r = T_a + \Delta T$; donde $\Delta T = -2; -1; 0; +1; +2$ y $+3$. En la figura 5.7, los valores para el nivel de vestimenta, actividad, velocidad del aire, temperatura y humedad relativa son similares al caso de la figura 5.6. Se presentan la relación entre PMV_2 y $PMV_{ISO7730}$ (figura a) y PMV_{L1} y $PMV_{ISO7730}$ en la figura 5.7b.

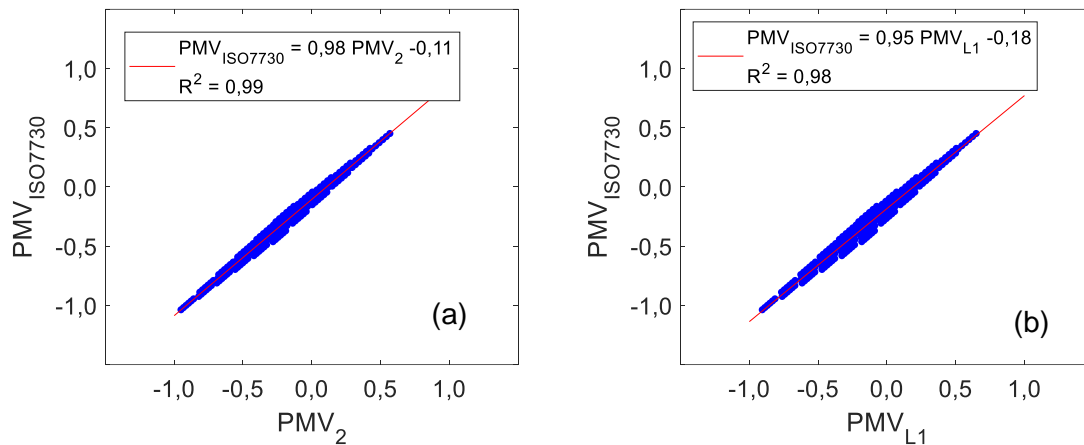


Figura 5.7. Para $I_{cl} = 1,27$ clo; $M = 1,0$ met; $v = 0,05$ m/s; $11,86\text{ °C} \leq T_a \leq 17,17\text{ °C}$; $19,8\% \leq HR \leq 55,61\%$ y T_r alrededor de T_a . Relación entre (a) PMV_2 con $PMV_{ISO7730}$ y (b) PMV_{L1} con $PMV_{ISO7730}$.

En la figura 5.8, se calculó $PMV_{ISO7730}$ y PMV_{L2} ($T_r = T_a$), se aprecia que cuando se considera $T_r > T_a$, los resultados se ven afectados aumentando el valor de PMV (ejemplo líneas cian, magenta y amarillo), cuando $T_r < T_a$ los valores de PMV disminuyen (ejemplo líneas rojo y verde), la línea azul representa resultados para valores $T_r = T_a$. Los coeficientes a y b de las regresiones lineales entre PMV_{L2} y $PMV_{ISO7730}$ ($y = ax+b$) varían en forma lineal respecto a T_r .

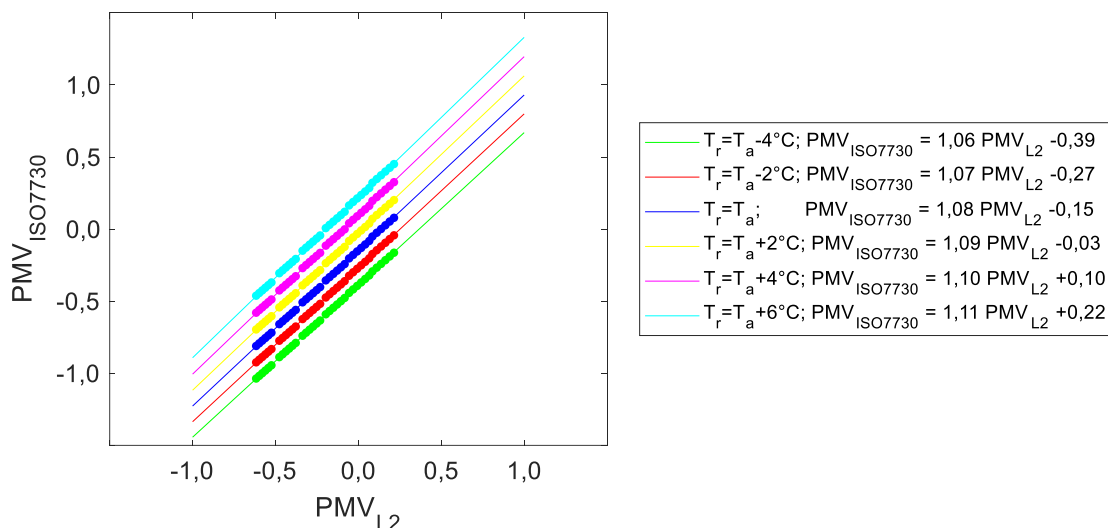


Figura 5.8. Relación entre PMV_{L2} y $PMV_{ISO7730}$ estimados con $I_{cl} = 1,27$ clo; $M = 1,0$ met; $v = 0,05$ m/s; $11,86\text{ °C} \leq T_a \leq 17,17\text{ °C}$ y $19,8\% \leq HR \leq 55,61\%$. Variación de T_r alrededor de T_a .

A5.4. Simulación de PMV variando valores de vestimenta y actividad

Se simula $PMV_{ISO7730}$ y PMV_{L1} , en esta sección se modifican los valores de I_{cl} (entre 1,0 clo a 2,2 clo) y de M (entre 1,0 met a 2,0 met). Asimismo, la temperatura radiante varía de la misma forma al caso anterior $T_r = T_a + \Delta T$; donde $\Delta T = -2; -1; 0; +1; +2; +3$. Los valores de T_a considerados son los límites de mínimo y máximo de la temperatura para la actividad pasiva y moderada, lo mismo se hace con HR . Se consideró 6 valores para cada variable (T_a y HR y T_r), obteniéndose 216 datos para cada conjunto de datos M y I_{cl} .

De la figura 5.9 ($M = 1,0$ met), cuando $I_{cl} \leq 1,2$ clo, ninguna respuesta de $PMV_{ISO7730}$ tiene respuestas de neutralidad (valor entre -0,5 a 0,5). A mayor el nivel de vestimenta I_{cl} , un mayor número de datos se encuentran en el intervalo de neutralidad. Para 1,4 clo se obtiene 3,7% y para 2,2 clo se obtuvo 62%. Estimando $PMV_{ISO7730}$ en función de PMV_{L1} , los porcentajes son 3,2 % y 63 % para 1,4 clo y 2,2 clo, respectivamente. Los coeficientes b de las regresiones lineales ($y=ax+b$), varían en forma cúbica respecto al nivel de vestimenta.

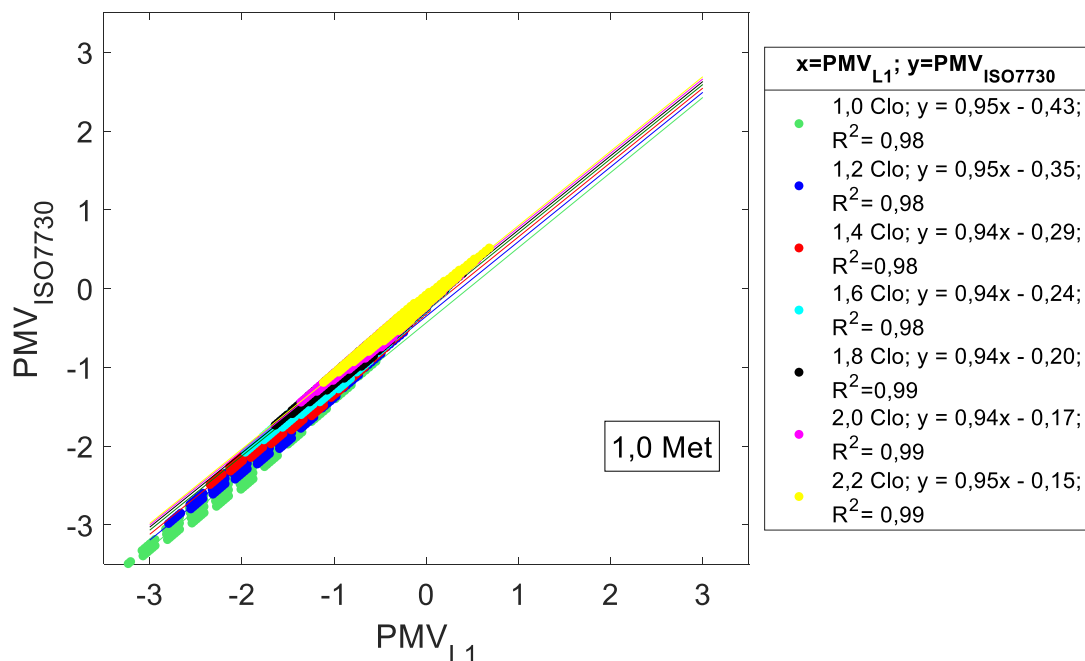


Figura 5.9. PMV_{L2} y PMV estimados con $1,0 \text{ clo} \leq I_{cl} \leq 2,2 \text{ clo}$, $M = 1 \text{ met}$ y los límites pasivos de T_a (de 11,86 °C y 17,17 °C), HR (de 19,8% a 55,61%) y $T_r = T_a + \Delta T$.

De la figura 5.10 ($M = 1,2$ met), para 1,0 clo se obtiene 2,3% y para 2,2 clo se obtiene 88,9 %. Los otros resultados muestran respuestas menores a -0,5, a excepción de $I_{cl} \geq 1,8$ clo donde existen pequeños porcentajes con valores mayores a 0,5 (0,5 %, 2,8 % y 7,9 % para 1,8 clo, 2,0 clo y 2,2 clo; respectivamente). Estimando $PMV_{ISO7730}$ en función de PMV_{L1} , los porcentajes son 1,9 % y 88,4 % para 1,0 clo y 2,2 clo, respectivamente.

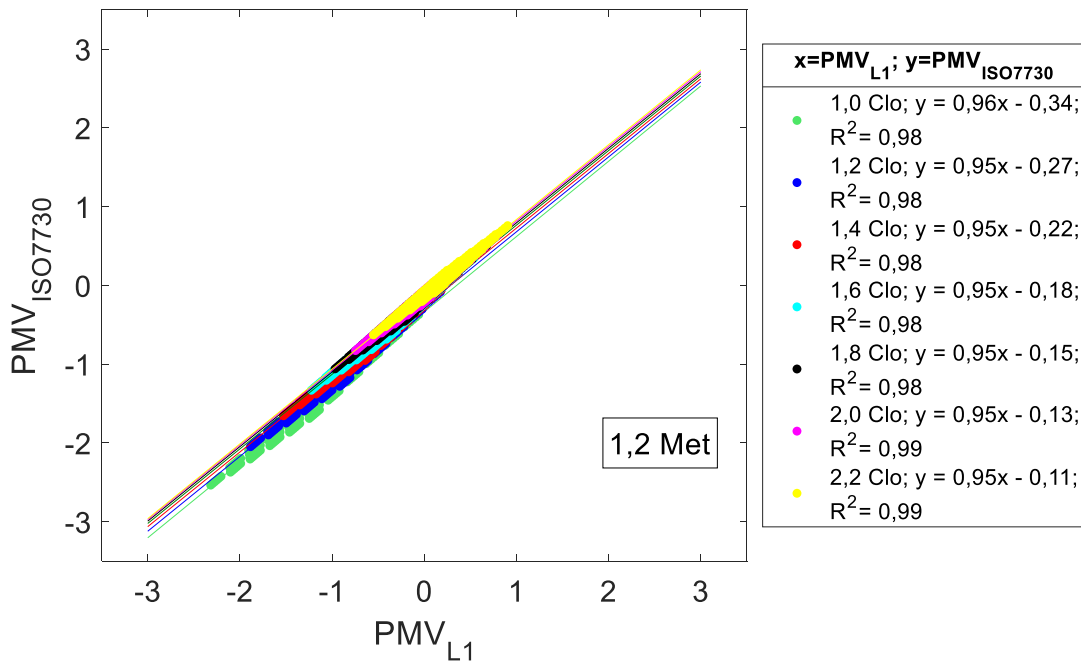


Figura 5.10. PMV_{L2} y PMV estimados con $1,0 \text{ clo} \leq I_{cl} \leq 2,2 \text{ clo}$, $M = 1,2$ met y los límites pasivos de T_a (de 11,86 °C y 17,17 °C), HR (de 19,8 % a 55,61 %) y $T_r = T_a + \Delta T$.

A medida que va aumentando el valor de M , hay un mayor porcentaje dentro del intervalo de neutralidad, si embargo al aumentar el nivel de vestimenta los valores PMV que se obtienen van creciendo de manera que superan el valor de 0,5.

El análisis se realiza de forma análoga a los resultados de la figura 5.10, se presentan en la figura 5.11 ($M = 1,6$ met) y la figura 5.12 ($M = 2,0$ met) para apreciar el desplazamiento de los resultados del PMV . El resumen para los intervalos determinados se presentan en la tabla 5.1. Mientras el nivel de actividad aumenta el valor de PMV aumenta, también al aumentar I_{cl} , aumenta el valor de PMV . Para todos los casos, los porcentajes dentro de la zona de neutralidad de $PMV_{ISO7730}$ encontrados depende en forma cúbica con I_{cl} , asimismo los coeficientes b de las regresiones lineales ($y=ax+b$) también tienen la misma relación con I_{cl} . A medida que aumenta M , las regresiones lineales para

cada conjunto de datos (PMV_{L2} y $PMV_{ISO7730}$) con I_{cl} diferente, se aproximan, aunque sólo se analiza hasta $M = 2,0$ met.

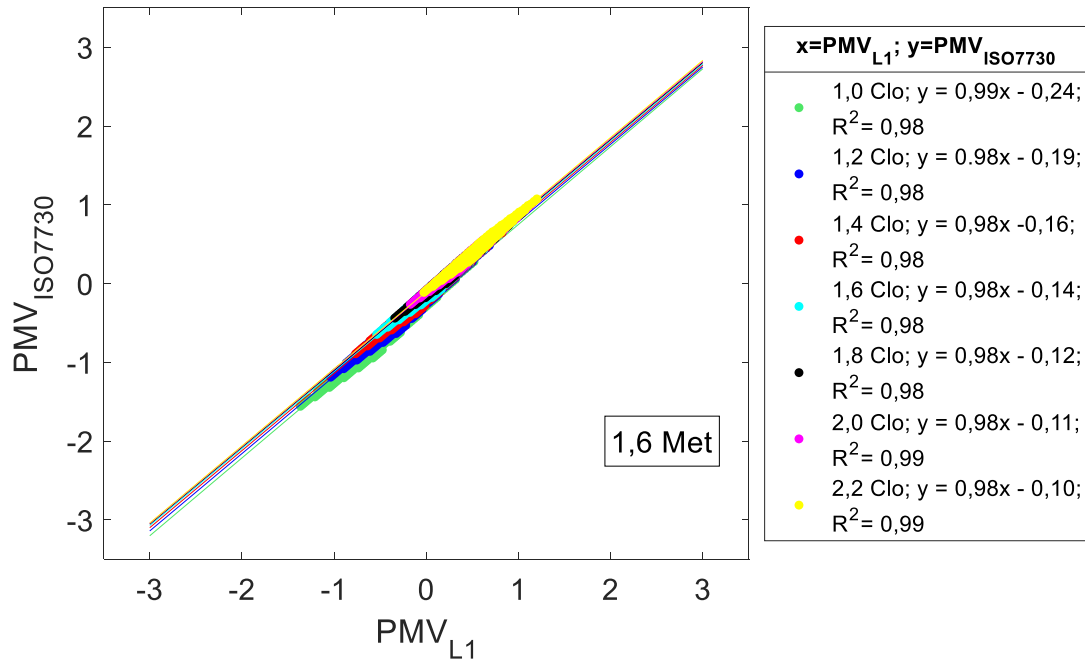


Figura 5.10. PMV_{L2} y PMV estimados con $1,0 \text{ clo} \leq I_{cl} \leq 2,2 \text{ clo}$, $M = 1,6$ met, los límites ligeros de T_a (de $10,44 \text{ }^\circ\text{C}$ y $17,03 \text{ }^\circ\text{C}$), HR (de $18,27 \%$ a $63,57 \%$) y $T_r = T_a + \Delta T$.

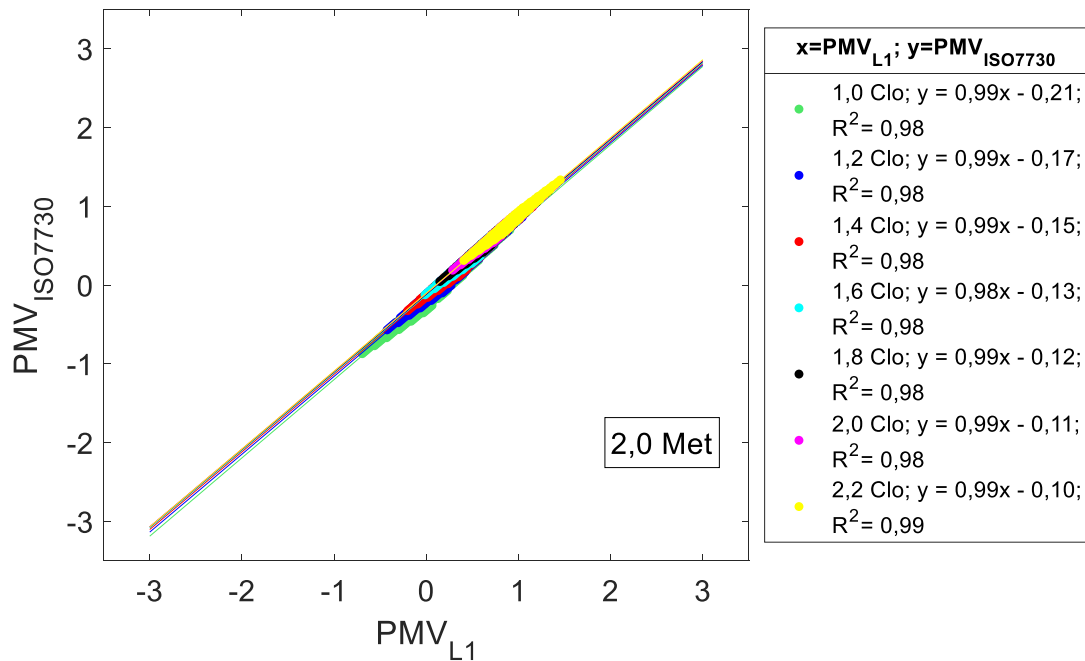


Figura 5.12. PMV_{L2} y PMV estimados con $1,0 \text{ clo} \leq I_{cl} \leq 2,2 \text{ clo}$, $M = 2,0$ met y los límites ligeros de T_a (de $10,44 \text{ }^\circ\text{C}$ a $17,03 \text{ }^\circ\text{C}$), HR (de $18,27 \%$ a $63,57 \%$) y $T_r = T_a + \Delta T$.

Tabla 5.1. Porcentaje de PMV calculados, considerando neutralidad ($-0,5 \leq PMV \leq 0,5$); frío ($PMV < -0,5$) y calor ($PMV > 0,5$), variando I_{cl} , M , T_a , T_r y HR .

M	$PMV_{ISO7730}$	1,0 clo	1,2 clo	1,4 clo	1,6 clo	1,8 clo	2,0 clo	2,2 clo
		Porcentaje [%]						
1,0 met	-0,5 y 0,5	0	0	4	12	26	44	62
	>0,5	0	0	0	0	0	0	0
	< -0,5	100	100	96	88	74	56	48
1,2 met	-0,5 y 0,5	2	11	27	47	69	84	89
	>0,5	0	0	0	0	0	3	8
	< -0,5	98	89	73	53	31	13	3
1,4 met	-0,5 y 0,5	13	31	52	71	83	85	79
	>0,5	0	0	0	1	6	13	21
	< -0,5	87	69	48	28	11	2	0
1,6 met	-0,5 y 0,5	37	59	78	87	82	70	57
	>0,5	0	0	3	9	18	30	43
	< -0,5	63	41	19	4	0	0	0
1,8 met	-0,5 y 0,5	61	81	86	76	62	47	31
	>0,5	0	4	12	24	38	53	69
	< -0,5	39	15	2	0	0	0	0
2,0 met	-0,5 y 0,5	79	84	72	55	38	21	10
	>0,5	5	14	28	45	63	79	90
	< -0,5	16	2	0	0	0	0	0

ANEXO VI. SIMULACIÓN TÉRMICA CON *m2m*

m2m es una herramienta de simulación basadas en la representación modal de la transferencia de calor de sistemas térmicos complejos, como es el caso de las edificaciones. Se compone de un conjunto de módulos ejecutables que hacen varios cálculos para obtener predicciones sobre el comportamiento térmico de una edificación en particular y en una ubicación específica [A6-1]. Esta herramienta de investigación provee información que otras herramientas de simulación más populares no pueden proporcionar (fácilmente), porque son herramientas cerradas que generalmente se encapsulan en una interfaz gráfica de usuario [A6-2].

En este estudio, los cálculos de *m2m* permiten determinar el valor de la temperatura de cada superficie interna y externa del edificio en cada paso de tiempo de la simulación determinista. Esto permite analizar el papel de cada elemento de la envolvente en el comportamiento térmico de una edificación, así como analizar sus zonas interiores.

Asimismo, *m2m* es una herramienta muy fácil de usar y no requiere una memoria muy grande, ya que es un conjunto de herramientas de cálculo por lotes, que no tiene una interface gráfica o bibliotecas preexistentes extensas (el ejecutable ocupa menos de 1 Mb). Esta es una ventaja para ejecutar un análisis físico profundo del comportamiento térmico del edificio [A6-2].

Por último, la metodología durante el proceso de simulación con *m2m* de una edificación es la siguiente: (a) generación de un archivo con las propiedades de los materiales opacos y translúcidos y la composición de los elementos de la envolvente, (b) análisis de los intercambios de calor debido a infiltraciones o ventilación, (c) generación de la descripción de la vivienda, (d) generación del modelo de volumen de control con *m2m.0*, (e) generación de los datos meteorológicos usando *m2m.4* (cálculo previo de los flujos incidentes de energía solar en cada superficie exterior), y (f) generación de la evolución del modelo de salida para realizar la simulación con el módulo *m2m.5*. El método utilizado para construir el modelo se muestra en la figura a3.1. Al ejecutar el módulo *m2m.0*, se genera un archivo (en la figura a3.1 denominado "Vivienda.dif") que contiene todas las matrices que

constituyen el modelo de espacio de estados; este archivo alimenta luego al módulo *m2m.5*, que se encarga de realizar los cálculos de simulación. Los resultados se escriben en un archivo de salida (llamado "Vivienda.out") que contiene la evolución en el tiempo de las variables de salida seleccionadas previamente: temperatura de cada zona térmica, temperatura superficial y flujos de calor de las superficies para todos los componentes de la envolvente [A6-2].

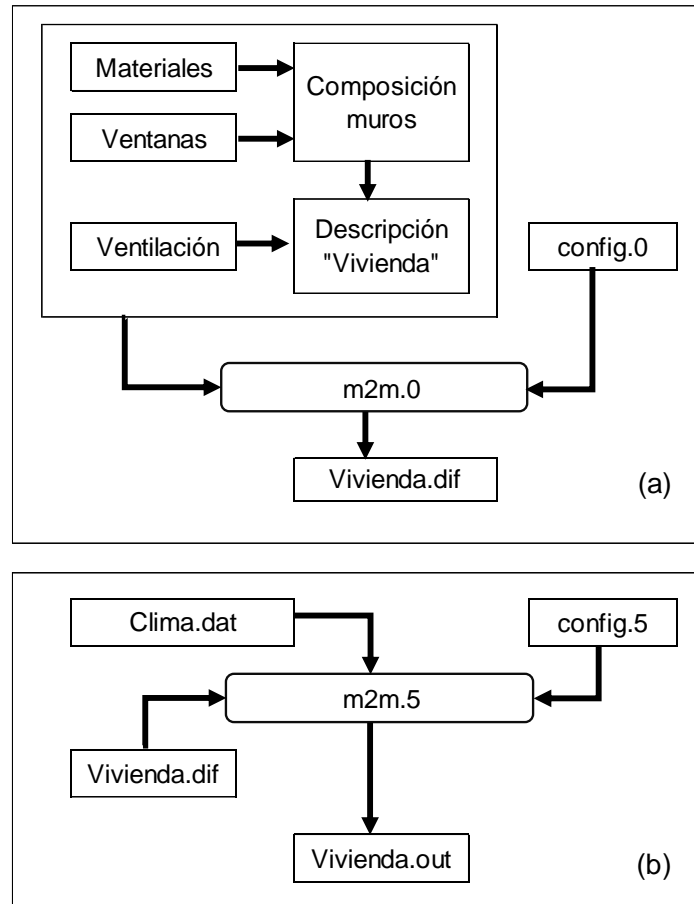


Figura a3.1. a) *m2m.0*, construcción de un modelo dinámico de tipo control de volumen, y (b) *m2m.5*, simulación con un modelo dinámico de tipo control de volumen [A6-2].

Referencias bibliográficas

- A6-1. LEFEBVRE, G., "Modal-based simulation of the thermal behavior of a building: the m2m software", *Energy and Buildings*, 25, 1, p. 19-30, jan.1997.
- A6-2. Molina, J. R., Lefebvre, G., Espinoza, R., Horn, M., & Gómez, M. M. (2021). Bioclimatic approach for rural dwellings in the cold, high Andean region: A case study of a Peruvian house. *Energy and Buildings*, 231, 110605.

ANEXO VII. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA ENERGÍA EN LAS SUPERFICIES DE LA ENVOLVENTE DE M1 Y M2

En esta sección se presenta el proceso de cálculo energético de las superficies de M1 y M2, que es abordado de manera análoga al análisis realizado en una vivienda rural altoandina situada a 3700 msnm [A7-1]. Se analiza la transferencia de calor en las superficies interiores utilizando las temperaturas superficiales estimadas con $m2m$. Los conceptos de transferencia de calor convectivo y radiativo, ganancia solar a través de superficies transparentes y el intercambio de aire entre el interior de la edificación y el ambiente exterior son empleadas en el análisis.

La transferencia de calor desde una superficie hacia un ambiente interior que combina los efectos por convección y radiación (q_c) es estimada con la ecuación 3.1, donde h [$W/(m^2 \cdot K)$] representa al coeficiente combinado de transferencia de calor convectivo y radiativo, A_i [m^2] es el área del elemento que intercambia calor, T_{si} [$^{\circ}C$] es la temperatura superficial interior y T_i [$^{\circ}C$] es la temperatura del ambiente interior. Para la estimación de h , se consideran valores recomendados, los cuales dependen de la inclinación del elemento y su ubicación (interior o exterior). En superficies interiores h es igual a 7,7 $W/(m^2 \cdot K)$ para superficies verticales, 10 $W/(m^2 \cdot K)$ para superficies inclinadas (techo) y 5,9 $W/(m^2 \cdot K)$ para pisos. En superficies exteriores como paredes, techo y piso h toma el valor de 25 $W/(m^2 \cdot K)$ [A7-2]. Se debe tener en cuenta que cuando $q_c > 0$, el calor se transfiere desde las superficies al ambiente interior; en cambio cuando $q_c < 0$, el calor se transfiere desde el ambiente interior hacia las superficies absorbiendo el calor.

El aire que ingresa a una zona térmica puede enfriar o calentar el ambiente y esto depende principalmente de la diferencia de temperaturas de la zona de donde proviene el aire y la de la zona donde se suministra el aire. Este tipo de transferencia de energía sensible (q_v) para calefacción o refrigeración es estimada con la ecuación 3.2 [A7-3], donde Q [m^3/s] es la tasa de flujo de aire, ρ [kg/m^3] es la densidad del aire, c_p [$J/(kg \cdot K)$] es el calor específico del aire y T_e [$^{\circ}C$] es la temperatura exterior.

Las ganancias solares q_s son por la radiación solar que atraviesa las superficies transparentes (ventanas, claraboyas y cubierta del invernadero adosado) y se estiman con la ecuación 3.3, donde a es el factor de absorción solar del ambiente interior, G_i [W/m^2] representa la irradiancia solar incidente sobre la superficie analizada, A_i [m^2] es el área del elemento translúcido y τ_i es la transmitancia del acristalamiento que representa la fracción de radiación solar que el ambiente interior absorbe.

$$q_c = h A_i (T_{si} - T_i) \quad (3.1)$$

$$q_v = Q \rho c_p (T_e - T_i) \quad (3.2)$$

$$q_s = a \cdot G_i \cdot A_i \cdot \tau_i \quad (3.3)$$

El análisis energético se divide en tres partes: el intervalo 1 (de 6:00 a 17:00), el intervalo 2 (de 18:00 a 5:00) y todo el día. En cada intervalo se evalúa las ganancias y pérdidas de calor para cada elemento de la envolvente de M1 y M2. Se simulan con *m2m* en intervalos de 1 hora, obteniéndose las 8760 horas del año 2019. Se estimaron porcentajes de aportes a nivel mensual y anual para todas las superficies. Los resultados diarios son mostrados en la sección 6.4. En esta parte se presentan los resultados para los intervalos 1 y 2.

A5.1. Análisis energético de M1

Durante el intervalo 1 (figura 3.1a), la ganancia diaria en promedio anual dentro de M1 es 16,3 kWh. La claraboya aporta mayor calor representando 79,3 % (12,9 kWh) y la ventana contribuye con 9,1 % (1,5 kWh), en ambos casos principalmente son ganancias solares. Los elementos restantes de M1 contribuyen con el 11,6 %, estos son el techo (0,8 kWh), la puerta (0,5 kWh), la pared de adobe (0,4 kWh) y el piso de madera (0,3 kWh). De la figura 3.1b, la pérdida diaria total, en promedio anual, es 16,2 kWh. Las infiltraciones contribuyen en mayor proporción a las pérdidas de calor con 28,5 % (4,6 kWh) y la pared de adobe (absorbe calor del ambiente interior) pierde 29,9 % (4,9 kWh). La claraboya con 18,3 % (3,0 kWh) y la ventana con 0,7% (0,1 kWh) también pierden energía, pero por efecto convectivo-radiativo. Otras superficies que entregan calor al ambiente son el piso de madera con 16 % (2,6 kWh), el techo con 5,7 % (0,9 kWh) y la puerta con 1 % (0,2 kWh).

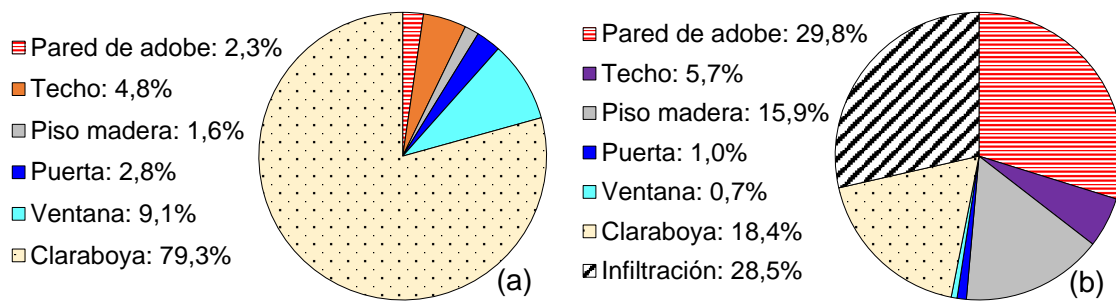


Figura 3.1. Porcentaje de energía por superficie de la envolvente de M1 durante el intervalo 1. (a) Ganancias de energía y (b) pérdidas de energía.

Durante el intervalo 2 (figura 3.2a), la ganancia diaria es 4,9 kWh (en promedio anual). La pared de adobe (3,1 kWh) y el piso de madera (1,8 kWh) aportan más energía al ambiente. El calor absorbido por la pared en el intervalo 1 es devuelto al ambiente interior en este intervalo. En la figura 3.2b, la pérdida diaria total en promedio anual es 5,2 kWh. Las infiltraciones representan 47,5 % (2,5 kWh) del total de las pérdidas y el techo también absorbe el calor del ambiente con el 28,1 % (1,5 kWh). Otros elementos también contribuyen con las pérdidas convectivas y radiativas como la puerta con 16,3 % (0,8 kWh), la claraboya con 5,0 % (0,3 kWh) y la ventana con 3,1 % (0,2 kWh).

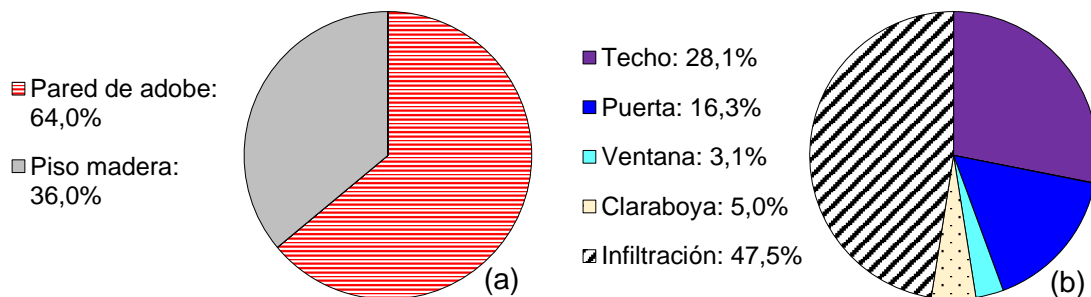


Figura 3.2. Porcentaje de energía por superficie de la envolvente de M1 durante el intervalo 2. (a) Ganancias de energía y (b) pérdidas de energía.

A5.2. Análisis energético de M2

Para el intervalo 1 (figura 3.3a), la ganancia diaria total de todas las envolventes de M2, en promedio anual, es 66,7 kWh. Las ganancias solares aportan un mayor porcentaje a través de las cubiertas transparentes del invernadero adosado (78,8 %) y la claraboya (19,4 %). Otros elementos contribuyen con el 1,8 % restante: el techo (0,6 kWh), la pared de adobe (0,4 kWh), el piso de madera (0,2 kWh) y el piso de concreto (0,1 kWh). La pérdida

diaria total (figura 3.1b) en promedio anual es 68,6 kWh. Las infiltraciones con 19,7 % (13,5 kWh) son la causa de mayores pérdidas de calor, mientras la segunda es debido a la cubierta del invernadero con 29,0 % (19,9 kWh). La claraboya, el piso de madera, el piso de concreto y el techo también absorben calor y representan 4,7 % (3,2 kWh), 4,4 % (3,0 kWh), 20,0 % y 7,7 % (5,3 kWh), respectivamente, del total de las pérdidas de calor del ambiente.

Para el intervalo 2 (figura 3.4a), la ganancia diaria total en promedio anual de todas las envolventes de M2 es 7,4 kWh. Los elementos que aportaron mayor energía al ambiente interior son la pared de adobe (4,7 kWh), el piso de madera (1,6 kWh) y el piso de concreto del invernadero (1,2 kWh). El calor que la pared absorbe en el intervalo 1, es devuelta al ambiente interior en el intervalo 2. Mientras en la figura 3.4b, la pérdida diaria total en promedio anual es 8,0 kWh. Las mayores pérdidas son debido a las infiltraciones representando 39,0 % (5,1 kWh), la cubierta del invernadero con 27,9 % (3,7 kWh) y el techo con el 30,0 % (3,9 kWh). El resto de elementos representan el 3,1 %, estos elementos son el piso de concreto (0,05 kWh) y la superficie de la claraboya con 2,7 % (0,4 kWh).

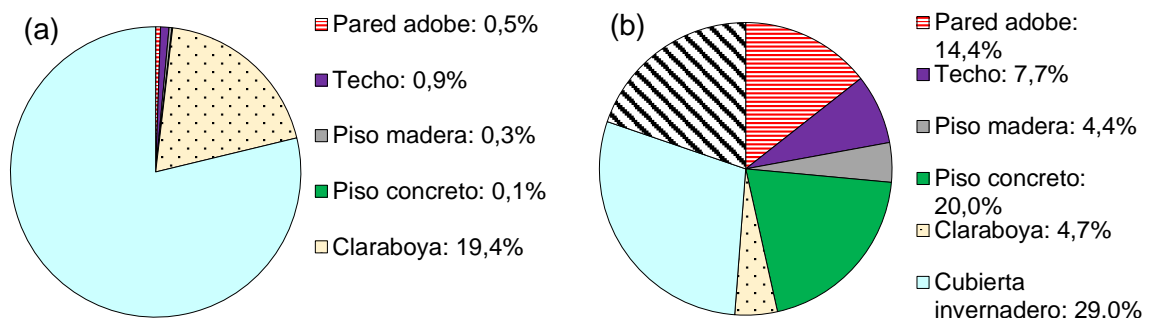


Figura 3.3. Porcentaje de energía por superficie de la envolvente de M2 durante el intervalo 1. (a) Ganancias de energía y (b) pérdidas de energía.

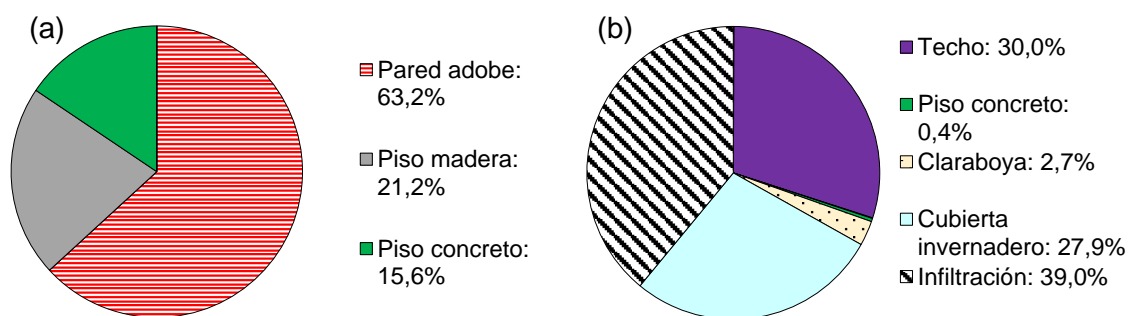


Figura 3.4. Porcentaje de energía por superficie de la envolvente de M2 durante el intervalo 2. (a) Ganancias de energía y (b) pérdidas de energía.

Las superficies que se encuentran en la zona del invernadero adosado absorbieron mayor energía, ya que la temperatura del ambiente del invernadero aumentó más en magnitud que la del ambiente principal. En las noches, las temperaturas del invernadero descendieron más que el ambiente principal ocasionando más pérdidas de calor.

Referencias bibliográficas

- A7-1. Molina, J. R., Lefebvre, G., Espinoza, R., Horn, M., & Gómez, M. M. (2021). Bioclimatic approach for rural dwellings in the cold, high Andean region: A case study of a Peruvian house. *Energy and Buildings*, 231, 110605.
- A7-2. Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana (2020). Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de energía CTE. DA DB-HE / 1 Cálculo de parámetros característicos de la envolvente. España.
- A7-3. ASHRAE, ASHRAE Handbook Fundamentals SI Edition. Atlanta, 2013, pp.4.35, 16.11, 25.1 – 25.29.