



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

FACULTAD DE CIENCIAS SOCIAMBIENTALES

CARRERA DE ARQUITECTURA SOSTENIBLE

**Aplicación de estrategias de enfriamiento pasivo evaporativo Indirecto
en cubiertas de zinc de la comunidad Rukullakta, Archidona**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

ARQUITECTA SOSTENIBLE

AUTORA:

NAYELI ADAMARIS SHIGUANGO SHIGUANGO

Tena - Ecuador

2024



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

FACULTAD DE CIENCIAS SOCIAMBIENTALES

CARRERA DE ARQUITECTURA SOSTENIBLE

**Aplicación de estrategias de enfriamiento pasivo evaporativo Indirecto
en cubiertas de zinc de la comunidad Rukullakta, Archidona**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

ARQUITECTA SOSTENIBLE

AUTORA: NAYELI ADAMARIS SHIGUANGO SHIGUANGO

TUTORA: Arq.MSc. AIMEE DEL ROCIO DELGADO CRUZ

COTUTOR: MSc. GABRIEL VICENTE GAONA GAONA

Tena - Ecuador

2024

Carrera Arquitectura Sostenible

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Tena, 14 de agosto de 2024

Yo, Nayeli Adamaris Shiguango Shiguango, con documento de identidad N° 1550152985, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título de arquitecta sostenible, son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en la presente investigación son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.



Nayeli Adamaris Shiguango Shiguango

C.I: 1550152985

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Tena, 14 de agosto de 2024

Yo, Nayeli Adamaris Shiguango Shiguango, con documento de identidad N° 1550152985, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: Aplicación de estrategias de enfriamiento pasivo evaporativo Indirecto en cubiertas de zinc de la comunidad Rukullakta, Archidona, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo autorizo a la Universidad Regional Amazónica Ikiam para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.



Nayeli Adamaris Shiguango Shiguango

C.I: 1550152985

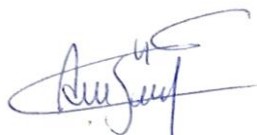
Carrera Arquitectura Sostenible

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Tena, 14 de agosto de 2024

Certifico que el Trabajo de Integración Curricular Titulado: Aplicación de estrategias de enfriamiento pasivo evaporativo Indirecto en cubiertas de zinc de la comunidad Rukullakta, Archidona, en la modalidad: trabajo de titulación, fue realizado por: Nayeli Adamaris Shiguango Shiguango, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.



Aimee del Rocío Delgado Cruz

C.I: 1105632358

Tutora



Gabriel Vicente Gaona Gaona

C.I: 1104176563

Cotutor

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía constante que ilumina mi mente y corazón. Le doy gracias por brindarme fuerzas en los momentos difíciles y por ser la razón de cada logro alcanzado.

A mis padres, pilares fundamentales en mi vida, por ser mi mayor fuente de inspiración y fortaleza. Su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante han sido la luz que me ha guiado a lo largo de este camino académico.

A mi abuelito Matías, que desde el cielo ha sido mi inspiración silenciosa, cada logro es un tributo a tus valores y sabiduría, que perduran en mi corazón.

A Yuyay, por todo su amor y apoyo incondicional. Gracias por entender mis momentos de ausencia, por celebrar mis triunfos y por ser mi compañero de vida. Tu presencia ha enriquecido mi vida de forma inimaginable.

A mis amigos y familiares, con quienes he compartido risas y momentos inolvidables. Sus palabras de aliento hicieron que pudiera enfrentar cada adversidad que se cruzaba en mi camino, haciendo que los momentos difíciles sean más llevaderos.

AGRADECIMIENTO

Agradezco sinceramente a la Universidad Regional Amazónica Ikiam por brindarme la oportunidad de embarcarme en este viaje académico que ha culminado con la realización de esta investigación. Su compromiso con la excelencia académica y el desarrollo integral ha sido fundamental en mi camino hacia el logro de mis metas.

Expreso mi profundo agradecimiento a mis tutores de tesis, Aimee Delgado y Gabriel Gaona por su guía, paciencia y dedicación a lo largo de este proceso. Sus valiosas sugerencias, comentarios constructivos y orientación han sido fundamentales para el desarrollo y éxito de este trabajo.

A mis docentes, quienes han desempeñado un papel fundamental en mi formación durante mi trayecto universitario. A aquellos que continúan guiando mi camino y a aquellos que, aunque se han ido, han dejado un invaluable legado. Gracias a todos ustedes por infundir mi educación con su conocimiento y dedicación.

A mis compañeros, por las inolvidables experiencias compartidas y los desafíos superados durante nuestra vida estudiantil. Que el éxito sea siempre su fiel compañero en cada paso que den.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS	xvii
RESUMEN	xviii
ABSTRACT	xix
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Justificación de la investigación	4
1.4 Objetivos de la investigación	5
1.4.1 General.....	5
1.4.2 Específicos.....	5
CAPITULO II: METODOLOGÍA.....	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1 Criterios, clasificación y escalas climáticas	6
2.1.1 Clima	6
2.1.2 Criterios climáticos	7
2.1.3 Escalas Climáticas	8
2.1.3.1 Elementos del clima	10
2.1.3.2 Factores que inciden en el clima.....	22
2.1.4 Clasificación Climática	24

2.1.4.1	Climática Köppen	25
2.1.4.2	Climática Thornthwaite	30
2.1.4.3	Climática de Miller	32
2.2	Bioclimática en la arquitectura	34
2.2.1	Características de la arquitectura bioclimática	35
2.2.2	Interpretación bioclimática	36
2.2.3	Estrategias de diseño.....	44
2.2.4	Conceptos de diseño bioclimático	45
2.3	Estrategias de aprovechamiento y protección según el clima	46
2.3.1	Estrategias de diseño bioclimático para condiciones de frío	50
2.3.1.1	Sistemas captadores	51
2.3.2	Estrategias de diseño bioclimático para condiciones de calor.....	53
2.3.2.1	Sistema de protección contra la radiación	53
2.3.2.2	Sistemas de ventilación y tratamiento de aire:	56
2.4	Elementos constructivos que componen la envolvente de la vivienda	58
2.4.1	Cubierta	60
2.4.2	Materialidad en cubiertas	60
2.4.3	Cubierta metálica.....	62
2.4.4	Transferencia de calor de la cubierta metálica	63
2.4.5	Intercambios energéticos de la cubierta	66
2.5	Enfriamiento	68
2.5.1	Sistemas pasivos de enfriamiento	68
2.5.2	Factores fundamentales del enfriamiento pasivo.....	69
2.5.3	Principios y conceptos de enfriamiento pasivo	70
2.6	Enfriamiento evaporativo (EE).....	71
2.6.1	Enfriamiento evaporativo indirecto (EEI)	73
2.6.2	Intercambiador de calor de enfriamiento evaporativo indirecto	79
2.6.2.1	Tubos de calor como método de Enfriamiento Evaporativo Indirecto	79
2.6.3	Masa térmica.....	85
2.6.4	Aislamiento térmico	86
2.6.5	Materiales de cambio de fase	87

2.7	Confort térmico	88
2.7.1	Parámetros de confort térmico.....	89
2.7.2	Variables determinantes del confort térmico.....	90
2.7.3	Modelos de confort térmico	92
2.8	Normativa	100
2.9	Simulación en softwares para análisis de estrategias de enfriamiento	101
2.9.1	Utilización de ANSYS CFD como herramientas de simulación y su aplicabilidad.....	102
2.9.2	Investigaciones previas y estudios de casos: Aplicación CFD	103
	MARCO METODOLÓGICO	106
2.10	Método de la investigación	106
2.11	Recopilación de datos meteorológicos	107
2.12	Descripción de los equipos de medición	109
2.13	Selección y análisis de tipologías de vivienda	110
2.13.1	Monitoreo de las cubiertas	111
2.14	Variables del estudio	115
2.15	Descripción de experimentación en el software	116
	CAPITULO III: RESULTADOS.....	118
3.1	Selección del sitio de estudio	118
3.2	Consideración de datos climatológicos	120
3.3	Análisis climático.....	121
3.4	Tabulación de datos de análisis térmico de tipología 1 y 2.....	134
3.4	Resultados de la modelación de viviendas en REVIT.....	141
3.5	Diseño aplicativo de la propuesta	142
3.6	Resultado de simulaciones en Ansys	145
3.7	Cálculo de calor transferido y reducción de temperatura de intercambiador de calor	151
	CAPITULO IV: DISCUSIONES	154
	CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	156
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Escalas del clima según Yoshino (1975)	8
Figura 2. División climática por escalas espaciales: microclimas (m), escala local/ topoclimas (T), mesoclima (M) y Macroclimas.....	10
Figura 3. Ángulos de altitud y azimut solar.....	11
Figura 4. Gráfica solar estereográfica.	12
Figura 5. Grafica solar cilíndrica.....	13
Figura 6. Proyección tridimensional 3D Sun Path de Andrew Marsh	14
Figura 7. Gráfica de temperaturas máximas y mínima promedio	15
Figura 8. Rosa de vientos	19
Figura 9. Zonas climáticas del mundo: fría, templada y cálida	24
Figura 10. Cuadro de características del Grupo A: climas tropicales.....	26
Figura 11. Cuadro de características del Grupo B: Climas secos	27
Figura 12. Cuadro de características del Grupo C: Climas templados	28
Figura 13. Cuadro de características del Grupo D: Climas fríos.....	29
Figura 14. Cuadro de características del Grupo E: Climas polares.....	30
Figura 15. Triángulo de confort de Evans.....	37
Figura 16. Diagrama de estrategias bioclimáticas.	38
Figura 17. Diagrama bioclimático de Olgyay.....	39
Figura 18. Método gráfico de zona de confort: rango aceptable de temperatura operativa y humedad.....	43
Figura 19. Arquitectura según el tipo de clima	47
Figura 20. Casa Grande en Chiapas, Mexico. Arquitectura en clima cálido.	48
Figura 21. Residencia Logan de Jones Studio en clima cálido seco.	48
Figura 22. Matriz de mecanismos de transferencia de calor según estación.....	50
Figura 23. Esquema de captación directa por ventana y lucernarios.....	51
Figura 24. Esquema de captación indirecta con cubierta de agua	52
Figura 25. Esquema de captación semidirecta con invernadero	52
Figura 26. Forma y orientación de un edificio.	54

Figura 27. Influencia de la velocidad del aire según el dimensionamiento de aberturas.....	55
Figura 28. Protecciones externas con elementos móviles. Persianas y toldos.....	55
Figura 29. Sistemas de ventilación natural	56
Figura 30. Vivienda ventilada por chimenea solar	57
Figura 31. Sistema de enfriamiento evaporativo. 1.-Torre evaporativa, 2.-Evaporativo indirecto con colector de derrame, 3.-Evaporativo directo	57
Figura 32. Elementos constructivos de una vivienda	59
Figura 33. Tipologías de cubiertas	60
Figura 34. Transferencia de calor en cubiertas externo al interior.	63
Figura 35. Valores de resistencia térmica superficial según Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79.....	64
Figura 36. Propiedades térmicas de los materiales en cubiertas	66
Figura 37. Pérdidas de calor de la cubierta por transmisión y ventilación expresado en porcentajes	67
Figura 38. Pérdidas de calor por transmisión en vatios por grados Celsius (W°/C).....	68
Figura 39. Factores a considerar en el enfriamiento pasivo.	70
Figura 40. Esquema de la clasificación de los sistemas evaporativos directo, indirecto y combinado.....	73
Figura 41. Flujo de calor de una vivienda refrigerada por un techo tipo estanque.	74
Figura 42. Modelo experimental en cubierta de la universidad de Colima.....	76
Figura 43. Sección de experimento en cubierta	76
Figura 44. Módulos experimentales (ME) combinado entre enfriamiento evaporativo y radiativo en Maracaibo, Venezuela.	77
Figura 45. Celdas experimentales para enfriamiento evaporativo indirecto	78
Figura 46. Operación y funcionamiento de las celdas de experimento	78
Figura 47. Esquema de enfriamiento evaporativo Indirecto	79
Figura 48. Esquema de enfriadores evaporativos de punto de rocío con extracción parcial del aire (a) y con canal de producto (b)	81
Figura 49. El proceso térmico del enfriamiento evaporativo de punto de rocío.....	82

Figura 50. Estructura y principio de funcionamiento de un intercambiador de calor para refrigeración del punto de rocío.	83
Figura 51. Comparación de la masa térmica en dos cerramientos	86
Figura 52. Modelo experimental de techo en vivienda con aislamiento térmico	87
Figura 53. Clasificación de los PCMs	88
Figura 54. Intercambios de calor del cuerpo humano al ambiente.....	89
Figura 55. Grafica de confort térmico en relación de la temperatura del aire y humedad relativa	90
Figura 56. Gráfica de confort térmico en función de la temperatura y velocidad del aire.....	91
Figura 57. Gráfica de confort térmico en función de la temperatura y velocidad del aire.....	92
Figura 58. Variables significativas de modelos matemáticos de confort térmico.	93
Figura 59. Relación de Voto Medio Previsto (PMV) versus el Porcentaje de Personas en Discomfort (PPD)	95
Figura 60. Categorías de ambientes térmicos, en base a la norma ISO 7730.	96
Figura 61. Escala de sensación térmica	97
Figura 62. Visualización y ventajas de interfaz de Ansys	102
Figura 63. Vivienda tradicional de Minahasa en Indonesia.....	103
Figura 64. Condiciones de frontera en el modelo CFD.	104
Figura 65. Simulación de magnitud de velocidad del modelo de prueba 3 – 3 de la vivienda Minhasa.....	104
Figura 66. Construcción de 155 simulación CFD. Las variaciones de diseño se comparan al mediodía de un día típico de verano.....	105
Figura 67. Cuadro de metodología aplicada	107
Figura 68. Instrumento de medición Elitech.....	109
Figura 69. Inicio para configuración de parámetros de la dattalogger Elitech	109
Figura 70. Punto de colocación de instrumento de medición mostrada en planta arquitectónica y sección de tipología de vivienda 1	113
Figura 71. Puntos de colocación de instrumento de medición mostrada en planta arquitectónica y sección de tipología de vivienda 2	114

Figura 72. Esquema de las variables empleadas en el estudio.....	115
Figura 73. Interfaz de Ansys Workbench a) Panel de propiedades b) Caja de herramientas	116
Figura 74. Esquema de funcionamiento de la simulación de tipologías sin aplicación de estrategias	117
Figura 75. Mapa de división territorial de Archidona	118
Figura 76. Mapa de temperatura superficial del suelo (LST)	119
Figura 77. Mapa de calor por total de viviendas en comunidades de Archidona	120
Figura 78. Gráfica de temperatura máxima, extrema, media, mínima y mínima extrema	122
Figura 79. Recorrido diario de la temperatura, índices de sobrecalentamiento, bajo calentamiento y confort térmico.....	125
Figura 80. Gráfica de radiación solar total, directa y difusa	125
Figura 81. Radiación solar directa de enero a diciembre	126
Figura 82. Humedad relativa máxima, media y mínima	127
Figura 83. Rosa de vientos de enero a diciembre 1) entre 6:00 y 13:00 horas, 2) entre 14:00 y 21:00 horas y 3) Febrero-marzo entre 6:00 y 18:00 horas	128
Figura 84. Triángulo de confort de Evans para sitio de estudio.....	130
Figura 85. Diagrama de estrategias bioclimáticas recomendadas para sitio de estudio.....	130
Figura 86. Diagrama bioclimático mensual de Olgyay para sitio de estudio	132
Figura 87. Carta Psicrométrica de Givoni con estrategias.	133
Figura 88. Gráfico de temperatura de tipología 1 en el mes de febrero	134
Figura 89. Gráfico de temperatura de tipología 2 en el mes de febrero	135
Figura 90. Gráfico de temperatura de tipología 1 en el mes de marzo	136
Figura 91. Gráfico de temperatura de tipología 2 en el mes de marzo	136
Figura 92. Gráfico de humedad relativa de tipología 1 en el mes de febrero	138
Figura 93. Gráfico de humedad relativa de tipología 2 en el mes de febrero.	138
Figura 94. Gráfico de humedad relativa de tipología 1 en el mes de marzo.	139
Figura 95. Gráfico de humedad relativa de tipología 1 en el mes de marzo.	139
Figura 96. Modelado en Revit de la tipología 1 y 2 de vivienda.....	141

Figura 97. Modelo volumétrico de intercambiador de calor por punto de rocío.....	143
Figura 98. Sección esquemática de intercambiador de calor de placas con flujo contracorriente.....	144
Figura 99. Ubicación de intercambiador de calor en tipología de vivienda de un piso.	144
Figura 100. Ubicación de intercambiador de calor en tipología de vivienda de dos pisos.	145
Figura 101. Simulación en perfil de tipología 1 actual	146
Figura 102. Simulación 3D de tipología 1 actual.....	146
Figura 103. Simulación en perfil de tipología 2 actual.	147
Figura 104. Simulación 3D de tipología 2 actual.....	147
Figura 105. Simulación de intercambiador de calor por punto de rocío 1) flujo del aire y 2) temperatura y 3) Presión total	149
Figura 106. Simulación de temperatura interna con intercambiador en tipología 1. .	150
Figura 107. Simulación con intercambiador en tipología 2 de temperatura.....	151
Figura 108. Simulación con intercambiador en tipología 2 de flujo del aire	151

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales parámetros climáticos.....	7
Tabla 2. Escala de Beaufort para estimar la velocidad del viento.	19
Tabla 3. Efecto sensible del viento.....	21
Tabla 4. Cuadro de la clasificación climática según Köppen.....	25
Tabla 5. Clasificación de Thornwaite según humedad	31
Tabla 6. Clasificación del clima según Precipitación	32
Tabla 7. Clasificación climática según Miller.....	33
Tabla 8. Límites de confort según Mahoney.....	41
Tabla 9. Índices de tabla del método de Mahoney	42
Tabla 10. Estrategias de diseño bioclimático	44
Tabla 11. Conductividades térmicas de materiales según NEC-HS-EE	64
Tabla 12. Resultados de película de agua en fibra para clima cálido seco y húmedo. ...	75
Tabla 13. Condiciones de funcionamiento para simulación	83
Tabla 14. Datos climatológicos de estación meteorológica Ikiam.....	121
Tabla 15. Escala de temperatura en grados celcius	123
Tabla 16. Tabla de temperaturas horarias	123
Tabla 17. Índices de tabla del método de Mahoney	131
Tabla 18. Tabulación de datos de monitoreo de las cubiertas	140
Tabla 19. Características termofísicas de la envolvente de las viviendas.....	142

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Recopilación fotográfica de viviendas de la comunidad Rukullacta para análisis térmico de cubiertas.	110
Fotografía 2. Tipologías de viviendas seleccionadas de 1 y 2 pisos.	111
Fotografía 3. Monitoreo de temperatura y humedad de cubiertas de las dos tipologías de vivienda.	112

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Ficha de registro de datos de clima interior en viviendas

Anexo B. Gráfica de monitoreo de cubierta de tipología 2 en software Elitech

Anexo C. Gráfica de monitoreo de cubierta de tipología 1 en software Elitech

Anexo D. Proceso de crear geometría de intercambiador en Ansys

Anexo E.. Proceso de insertar tubos de calor en intercambiador en Ansys

Anexo F. Proceso de mallado de intercambiador

RESUMEN

El presente estudio evalúa la viabilidad y eficacia del sistema de enfriamiento evaporativo indirecto (EEI) con intercambiador de calor por punto de rocío para mejorar el confort térmico de viviendas con cubiertas de zinc en la comunidad Rukullakta, Ecuador. La región Amazónica ecuatoriana se caracteriza por un clima cálido y húmedo, lo que genera discomfort térmico en las viviendas. El zinc, material predominante en las cubiertas, aumenta el calor interior. Se evaluará el potencial del EEI mediante el diseño y simulación de dos tipologías de cubiertas con intercambiador de calor por punto de rocío en software especializado como ANSYS CFD. Se analizará el comportamiento térmico de las viviendas y el potencial del EEI, considerando el clima local y los principios de la arquitectura bioclimática. Se levantarán datos de clima interior de temperatura y humedad para comprender el asoleamiento, flujo de calor interno y humedad relativa. Los resultados experimentales y de modelado muestran que el aire suministrado se enfriaría por debajo de la temperatura del bulbo húmedo, logrando una capacidad de enfriamiento y una efectividad considerables. Esta información será útil para mejorar el confort térmico de las viviendas y la calidad de vida de sus habitantes, promoviendo el uso de soluciones sostenibles para la climatización.

Palabras clave: Enfriamiento evaporativo indirecto, intercambiador de calor por punto de rocío, cubiertas de zinc, confort térmico, viviendas, clima cálido y húmedo, comunidad Rukullakta, Ecuador, arquitectura bioclimática, software ANSYS CFD.

.

ABSTRACT

This study evaluates the feasibility and effectiveness of an indirect evaporative cooling (IEC) system with a dew point heat exchanger to improve thermal comfort in zinc-roofed houses in the Rukullakta community, Ecuador. The Amazon region of Ecuador is characterized by a hot and humid climate, which generates thermal discomfort in homes. Zinc, the predominant roofing material in the community, increases indoor heat. The potential of IEC will be evaluated through the design and simulation of two roof typologies with a dew point heat exchanger using specialized software such as ANSYS CFD. The thermal behavior of the houses and the potential of IEC will be analyzed, considering the local climate and the principles of bioclimatic architecture. Indoor climate data of temperature and humidity will be collected to understand the degree of insolation, internal heat flow, and relative humidity. Experimental and modeling results show that the supplied air would be cooled below the wet bulb temperature, achieving considerable cooling capacity and effectiveness. This information will be useful to improve the thermal comfort of homes and the quality of life of their inhabitants, promoting the use of sustainable solutions for air conditioning.

Keywords: Indirect evaporative cooling, dew point heat exchanger, zinc roofs, thermal comfort, housing, hot and humid climate, Rukullakta community, Ecuador, bioclimatic architecture, ANSYS CFD software

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Desde tiempos antiguos, el ser humano ha buscado refugio en moradas temporales como grutas y cavernas, evolucionando luego a técnicas de construcción adaptadas al clima local (Carrillo, 2020). A partir de este criterio, en la década de los setenta, surge como disciplina la arquitectura bioclimática, que considera al ser humano como parte integral de la arquitectura frente al ambiente y el clima (Serra, 1989), citado en (González Couret, 2018). Su objetivo es diseñar edificaciones que se adapten a las condiciones locales y utilicen eficientemente los recursos disponibles, minimizando el impacto ambiental (Conforme & Castro, 2020). Del mismo modo, prioriza el confort humano y la eficiencia energética (Guerra, 2013). En este sentido, la bioclimática busca armonizar el entorno climático, desarrollando estrategias que mejoren el confort térmico y la calidad del aire en las viviendas para el desarrollo óptimo del ser humano.

Las estrategias incluyen la selección de materiales constructivos, orientación y ventilación de las edificaciones, así como mecanismos para regular la ganancia y pérdida de calor, etc (Conforme & Castro, 2020). Dentro de las estrategias para disminuir calor, se encuentra el sistema de ventilación y tratamiento de aire, que previene el sobrecalentamiento al renovar el aire interior con aire fresco del exterior (Sánchez, 2014). Siendo el enfriamiento evaporativo, particularmente el indirecto (EEI), el que ofrece una alternativa a la climatización convencional. Este método utiliza agua para reducir la temperatura sin entrar en contacto directo con el aire, lo que minimiza el impacto ambiental (Cárdenas et al., 2023; Herrera, 2014). El sistema emplea un intercambiador de calor para aprovechar al máximo los recursos ambientales y disminuir la dependencia de combustibles fósiles (Carrillo, 2020). Por ello, se adapta a elementos constructivos de una edificación, pero en especial en las cubiertas.

En la adaptación bioclimática de una edificación, la cubierta actúa como primera barrera ante la radiación solar y las precipitaciones (Hernández et al., 2017). Sin embargo, las cubiertas de zinc, comunes en entornos con recursos limitados, pueden afectar el confort térmico y aumentar el consumo energético (Ortiz et al., 2021). Según la ARC en 2023, el consumo residencial de energía en Ecuador alcanzó un promedio del 32,90%, con una variación del 2% respecto a 2022 (ARC, 2023). La diversidad climática del país, con cuatro regiones diferenciadas, presenta un reto para el diseño de cubiertas bioclimáticas eficientes: la región Insular tiene temporadas de calor (23-30°C) y frío (19-26°C); la región Costa se caracteriza por temperaturas cálidas (25-31°C) y lluvias frecuentes; la región Sierra muestra temperaturas que descienden con la altitud (14-19°C en los valles); y la región Amazónica es caliente y húmeda (25-31°C) con lluvias abundantes, generando discomfort por el calor y la humedad constante.

En la región amazónica ecuatoriana, las temperaturas superan los 37 °C durante el verano, lo cual genera un notable discomfort térmico en las viviendas (COCUPO, 2020). El zinc es el material predominante en las cubiertas de esta zona, representando un 46,8% del total, según datos de la ENED (2020). Por ello, en el estudio de las islas de calor realizado por IKIAM en 2023, se analizaron diversas variables relacionadas con el calor urbano, como la temperatura superficial del suelo (LST), el NDVI¹, el albedo y el uso del suelo. Estas variables resultaron fundamentales para identificar y seleccionar el área de estudio afectada por las islas de calor urbanas, lo que llevó a la elección de la comunidad de Rukullakta como sitio de estudio. Esta comunidad, ubicada en Archidona, Napo, se encuentra a 2 km de la zona urbana y cuenta con más de 200 casas y una población de aproximadamente 1200 personas (Segarra & Betancourt, 2018).

Para alcanzar condiciones óptimas de confort en las viviendas de esta comunidad, el trabajo de titulación se enfoca en evaluar la eficiencia del sistema de enfriamiento pasivo Evaporativo Indirecto (EEI). Se busca también un modelo digital de adaptación en la cubierta de zinc, específicamente diseñadas para climas cálidos y húmedos. La aplicación de intercambiadores de calor será clave en la evaluación de factores como el potencial

¹ Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

de enfriamiento, la disminución del consumo energético y flujo de calor en el interior de una edificación.

1.2 Planteamiento del problema

La comunidad de Rukullakta, ubicada en Archidona, Napo, se enfrenta a una situación compleja en cuanto a las condiciones de las viviendas por la calidad de aire interior, uso de materiales inadecuados para su clima y su impacto en el bienestar de los habitantes. La limitación de recursos económicos impide el uso de materiales de construcción de calidad para las viviendas. Esto ha llevado a la predominancia del zinc (cuya conductividad térmica es 110-116 W/m·K, (NEC, 2018) para las cubiertas, lo que representa un 96,7% de las viviendas de la comunidad. La selección de esta materialidad, probablemente por consideraciones económicas, tiene consecuencias significativas para el confort térmico en el interior de las viviendas y otros espacios comunitarios (Vidal & Barona, 2022).

El diseño arquitectónico y constructivo de las viviendas que impide la ventilación en espacios internos genera un confort insostenible para los usuarios. Lo cual puede afectar negativamente la productividad y el bienestar general de los ocupantes como lo establece el estándar 62.2 de la ASHRAE². Diversas actividades cotidianas dentro de las edificaciones como el descanso, el estudio y el trabajo pueden verse perjudicadas (ASHRAE, 2017). Esto ha llevado a la búsqueda de adaptaciones para contrarrestar las altas temperaturas, recurriendo al uso de prendas ligeras de vestir, duchas frías o la incorporación de dispositivos electrónicos como ventiladores.

Como solución a esta situación, la presente investigación propone la aplicación de estrategias de enfriamiento pasivo evaporativo indirecto en viviendas con cubiertas de zinc de la comunidad Rukullakta. La solución se basa en un análisis de las condiciones climáticas de la zona y del clima interior de las viviendas. Estas estrategias incluyen el uso de intercambiadores de calor que aprovechan la evaporación del agua para reducir la temperatura interna de las edificaciones sin aumentar su humedad relativa. De la

² Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado

misma forma, al implementar este método se puede mejorar significativamente el confort térmico de los usuarios, reduciendo así la necesidad de utilizar sistemas mecánicos de climatización y minimizando el impacto ambiental. Este procedimiento ofrece un enfoque sostenible y eficiente para abordar desafíos planteados y mejorar la calidad de vida en las viviendas.

1.3 Justificación de la investigación

La evaluación del confort térmico en viviendas con cubiertas de zinc es crucial debido a su prevalencia en regiones como la Amazonía. Las altas temperaturas durante el verano pueden crear condiciones de habitabilidad desfavorables en el interior de las viviendas. Por lo tanto, evaluar estas cubiertas permite comprender mejor cómo afectan el confort térmico de los ocupantes y, en consecuencia, su calidad de vida. Si bien la modificación de las cubiertas podría considerarse una solución directa al problema, esta investigación explora una estrategia complementaria y potencialmente más eficiente: el enfriamiento evaporativo indirecto (EEI). Esta tecnología no solo aborda la problemática del sobrecalentamiento, sino que también ofrece ventajas como la eficiencia energética y la adaptabilidad a climas cálidos y húmedos. Además, los resultados de este estudio contribuirán a ampliar el conocimiento sobre la aplicación del EEI en edificaciones con cubiertas de zinc, especialmente en regiones tropicales.

En climas específicos, como el cálido y húmedo, se requiere la consideración de otras estrategias bioclimáticas adicional a la ventilación y protección solar en el diseño de edificaciones, con el fin de garantizar niveles eficientes de confort para los usuarios. Es por eso que surge la necesidad de combinar estrategias bioclimáticas con los sistemas de enfriamiento pasivos de climatización, como una estrategia para condiciones de calor. Logrando así alcanzar mejores porcentajes de satisfacción que se encuentren dentro de los requerimientos de confort.

Esta investigación se propone evaluar, mediante simulaciones computacionales, la viabilidad y eficacia del Enfriamiento Evaporativo Indirecto (EEI) en viviendas con

cubiertas de zinc en la comunidad Rukullakta. Se analizará el comportamiento térmico de las viviendas y el potencial del EEI para mejorar su confort, teniendo en cuenta tanto el clima local como los principios de la arquitectura bioclimática. Asimismo, se analizan los principios teóricos para los procesos de transferencia de calor y masa, modelamiento y estudio de viabilidad del sistema mencionado, apoyándonos en softwares ingenieriles de resolución de ecuaciones. Las simulaciones detalladas permitirán anticipar el comportamiento del EEI, identificando configuraciones óptimas para mejorar la habitabilidad. Este estudio podría beneficiar a los aproximadamente 1000 habitantes de la comunidad y abrir nuevas posibilidades para la implementación de sistemas de enfriamiento pasivo en áreas con climas similares.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 General

Evaluar a través de simulaciones la viabilidad y eficacia de la aplicación de estrategias de enfriamiento evaporativo indirecto (EEI) en la climatización de viviendas con cubiertas de zinc de la comunidad Rukullakta, Archidona.

1.4.2 Específicos

Levantar datos de clima interior de temperatura y humedad de viviendas con cubiertas de zinc por medio de sensores de medición para interpretar el grado de asoleamiento, flujo de calor interno y humedad relativa.

Evaluar el potencial de enfriamiento evaporativo indirecto con el diseño y simulación de dos tipologías de cubiertas a nivel de software en el programa Revit y ANSYS CFD.

CAPITULO II: METODOLOGÍA

MARCO TEÓRICO

2.1. Criterios, clasificación y escalas climáticas

2.1.1 Clima

El vocablo "clima" proviene del griego "klíma" que significa "pendiente o inclinación" (Leiva, 2017, p.34). Esta palabra se refiere al ángulo con el que los rayos solares inciden sobre la superficie terrestre en un momento del año (Linés, 2010). Es por ello que el astrónomo Ptolomeo asoció el clima con la latitud, utilizando esta idea para crear la primera clasificación climática (Linés, 1998, p.205).

Las primeras interpretaciones del clima a menudo lo concebían como un estado medio de la atmósfera. Algunos pioneros en la meteorología, como Hann, lo consideraban el conjunto de fenómenos meteorológicos que describen este estado en un lugar específico de la Tierra. En la misma línea, Monn lo definía como el estado promedio de los elementos meteorológicos, incluyendo las variaciones diarias y anuales (Linés, 1998, p.208). Sin embargo, con el avance científico y la comprensión de la atmósfera, la definición del clima ha ido evolucionado.

La Organización Meteorológica Mundial, por su parte, lo define como “el conjunto fluctuante de condiciones atmosféricas caracterizado por los estados y la evolución del tiempo, en el curso de un periodo suficientemente largo y en un dominio espacial determinado” (Linés, 2010, p.1) Esto implica que, mientras el tiempo varía cada día, el clima se mide durante al menos 10 años (García & Islas, 2022, p.123). El geógrafo Thornthwaite definió al clima como "la integración de los factores meteorológicos y climáticos que concurren para dar a una región su carácter y su individualidad" (Linés, 2010, p.2).

2.1.2 Criterios climáticos

En base a las definiciones anteriores, se resalta la complejidad del clima, donde la interacción de parámetros o criterios como la radiación solar, temperatura, precipitación, humedad y vientos crea características únicas en cada región (Leiva, 2017, p. 35). La interconexión de estas variables da lugar a una variedad de climas, desde los tropicales hasta los polares, cada uno con sus propias particularidades. Para el estudio de la bioclimatología es fundamental disponer de datos climáticos, los cuales suelen obtenerse de estaciones meteorológicas (Díaz, 2019).

En este contexto, el uso de climodiagramas para analizar diferentes tipos de clima implica considerar los parámetros meteorológicos mencionados en la tabla 1. Estos climodiagramas son representaciones gráficas que muestran las características climáticas de una región específica a lo largo del año. Además, permiten identificar patrones estacionales, comparar climas y evaluar su influencia en ecosistemas y actividades humanas (Díaz, 2019).

Tabla 1. Principales parámetros climáticos

Parámetro	Aparato de medida	Unidad de medida
Posición geográfica	GPS, mapas...	Coordenadas geográficas (grados, minutos, segundos) Coordenadas UTM (x, y, z)
Luz	Luxómetro, fotómetro	Lux (lx)
Temperatura	Termómetro	Grados Celsius (°C) Grado Fahrenheit (°F) Grados Kelvin (K)
Heladas	Termómetro Cálculo basado en las temperaturas mínimas	Número de heladas Probabilidad de heladas (%)
Precipitación	Pluviómetro o pluviómetro	Milímetros (mm) Litros/metro cuadrado (l/m ²) Volumen/tiempo (l/hora)
Humedad	Higrómetro o higrógrafo	Humedad que contiene el aire Humedad de saturación (%)

Viento	Anemómetro	Dirección (°) Velocidad kilómetros o millas por hora (Km/h o mph) Intensidad (escala de Beaufortd)
Presión atmosférica	Barómetro	Milímetro de mercurio (mmHg) Atmósferas (atm) Pascales (Pa)

Fuente: (Diaz, 2019)

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

El análisis detallado de los parámetros climáticos presentados en el cuadro revela la influencia significativa de cada factor en la configuración del clima regional. Se señala cada instrumento y unidad de medida, cruciales para obtener datos precisos. Estos factores climáticos interactúan entre sí con factores geográficos que dan lugar a la diversidad de climas en la Tierra.

2.1.3 Escalas Climáticas

Son sistemas de medidas que se utilizan para describir y entender los diferentes tipos de climas en la Tierra. Estas escalas varían en complejidad y factores considerados para clasificar los climas, como la temperatura, la precipitación, la humedad, la presión atmosférica y la vegetación (Olcina, 1996). La importancia de los diferentes niveles de comprensión de la información climática está vinculada a una determinada escala espacio-temporal (Ferrer, 2004). En la Figura 1 se pueden observar las distintas escalas generales interconectadas: macro, meso, clima local y micro.

CLIMA	EXTENSIÓN HORIZONTAL	EXTENSIÓN VERTICAL	CLIMA REPRESENTATIVO	DURACIÓN DE LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS
Microclima	10^{-2} - 10^2 m	10^{-2} -10 m	Clima de un invernadero	hasta 10 segundos
Clima Local	10^2 - 10^4 m	10 - 10^3 m	Clima de una ladera	10 seg-2,5 horas
Mesoclima	10^3 -($2 \cdot 10^5$) m	10 -($6 \cdot 10^3$) m	Clima de una cuenca	2,5 horas-1 día
Macroclima	($2 \cdot 10^5$)-(5- 10^7) m	10 - 10^5 m	Zona o dominio climática	1 día-11 días

Figura 1. Escalas del clima según Yoshino (1975)

Fuente: (Olcina, 1996)

Macroclima: Se refiere a los patrones climáticos a gran escala que abarcan áreas extensas, como regiones continentales o incluso globales a 2.000 km de altura. Son medidos por satélites meteorológicos o sondeos. A su vez, tienen la influencia de factores como la latitud, la altitud, la distribución de masas de aire y la presencia de océanos y cadenas montañosas (Lacomba, 1991). Los macroclimas suelen definir el clima general de una región y pueden ser clasificados utilizando sistemas como el de Köppen o Thornthwaite.

Mesoclima: Se centra en las condiciones climáticas de áreas más pequeñas entre los 200 km dentro de un macroclima, ya sea valles, cuencas hidrográficas o áreas urbanas (Leiva, 2017). Estas regiones pueden tener características climáticas únicas debido a factores como la topografía local, la vegetación, la exposición al sol y la influencia de cuerpos de agua cercanos. Los elementos de estudio del mesoclima incluyen el tipo de suelo y la ubicación geográfica, que influyen en aspectos como la agricultura, la planificación urbana y la conservación ambiental (Ferrer, 2004).

Clima local: Hacen referencia a las condiciones climáticas de la localidad menores a 200 km. Se encuentra diferenciado de las zonas que lo rodean y definido por cambios en la superficie a gran escala como una ciudad, una cuenca hidrográfica o un ecosistema particular. Estos climas están influenciados por una combinación de factores geográficos, topográficos y humanos (latitud, orientación, cubierta vegetal y proximidad al mar), que dan lugar a variaciones significativas incluso dentro de una misma área (Peña et al., 2020).

Microclima: Se refiere a las condiciones climáticas a escala pequeña y específica, como un parque urbano, un jardín o incluso una sola planta. Los microclimas están influenciados por factores locales como la cobertura vegetal, la orientación del terreno, la presencia de estructuras urbanas y la exposición al viento y al sol (Lacomba, 1991). Estas condiciones pueden variar significativamente dentro de un área geográfica pequeña y pueden tener un impacto directo en fenómenos como la temperatura, la humedad y la precipitación en un entorno localizado.

El espacio climático es complejo, puesto que se debe considerar el tiempo además de las cuatro escalas. El clima en los diferentes niveles de detalle, es cambiante no solo vertical u horizontal, sino que va variando conforme pasa el tiempo. Además, proporciona las pautas para las secuencias climáticas, entendiendo su variabilidad que va desde patrones climáticos generales hasta condiciones específicas en áreas locales. La división climática entre escalas se puede apreciar en la figura 2.

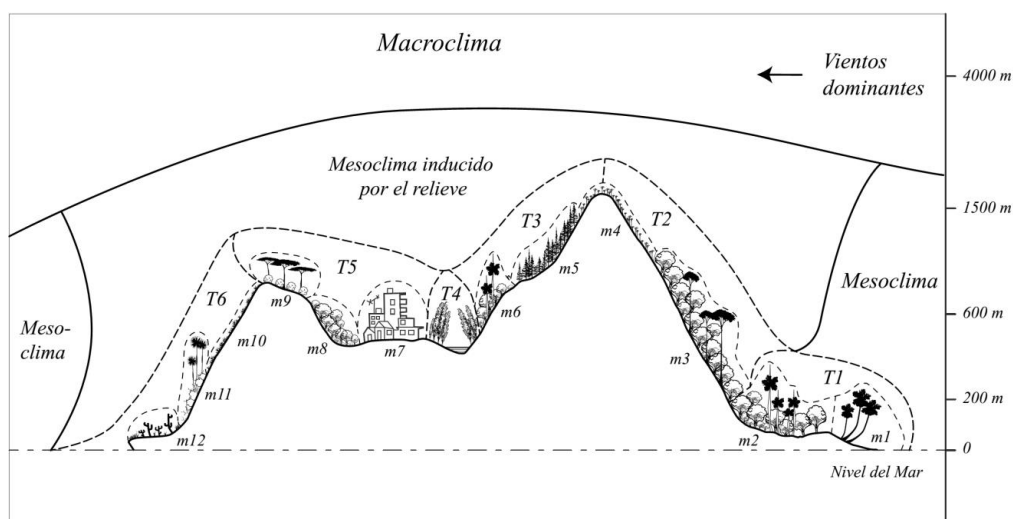


Figura 2. División climática por escalas espaciales: microclimas (m), escala local/topoclimas (T), mesoclima (M) y Macroclimas
Fuente: (Peña et al., 2020)

2.1.3.1 Elementos del clima

Melendez (2016) define los elementos del clima como "factores que integran el clima de determinado lugar, parcialmente dependientes entre sí" (citando a Mata y Quevedo, 2005, p. 178). Entre estos elementos se encuentran la radiación solar, temperatura, humedad, vientos, presión atmosférica, precipitación, evapotranspiración y nubosidad.

Radiación solar

Es la energía emitida por el sol en forma de radiación electromagnética, que se propaga a través del espacio y llega a la Tierra. Esta radiación es esencial para sustentar la vida en

nuestro planeta y para impulsar una serie de procesos naturales. La radiación solar está compuesta por diferentes tipos de radiación electromagnética, que varían en longitud de onda y energía (Navarra, 2019).

Los métodos para determinar el recorrido solar pueden variar y abarcan enfoques analíticos, científicos o tradicionales, como el uso de cartas solares. Estas cartas ofrecen representaciones gráficas del movimiento solar utilizando diferentes tipos de proyecciones: a) cartas de proyección estereográfica, b) de proyección cilíndrica y c) tridimensionales. Utilizan ángulos solares, como el azimut, para trazar el recorrido del sol, teniendo en cuenta la latitud, el día del año y la hora del día en relación con el plano horizontal (ver figura 3).

- Azimut: Se refiere al ángulo de dirección del Sol en relación con el horizonte.
- Altura: Corresponde al ángulo de elevación que forma el Sol con respecto al plano horizontal en el que se sitúa el observador.

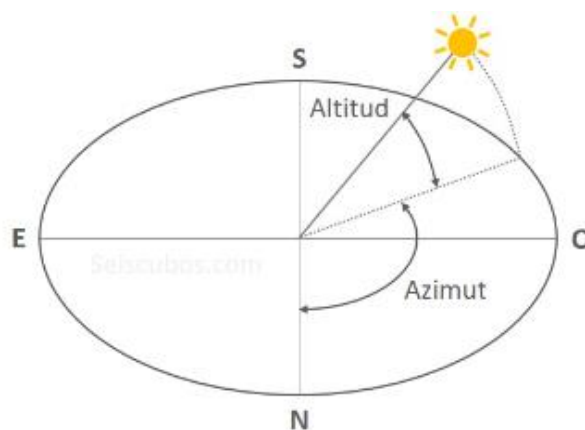


Figura 3. Ángulos de altitud y azimut solar
Fuente: (Ordoñez, 2021)

a) Proyección estereográfica

Es el sistema de una esfera en el cual las líneas de azimut primero se proyectan sobre un punto de referencia, generalmente localizado a una distancia equivalente a un radio desde el centro del círculo. El punto en donde cada una de estas líneas se interseca con el plano del horizonte nos da la distancia radial. La principal ventaja de este método es

que incrementa la resolución del diagrama en la zona de altitudes solares bajas, facilitando la evaluación de las sombras generadas por elementos del entorno que tienen poca altura. El diagrama estereográfico (figura 4) es uno de los más empleados en la actualidad (Ordoñez, 2021).

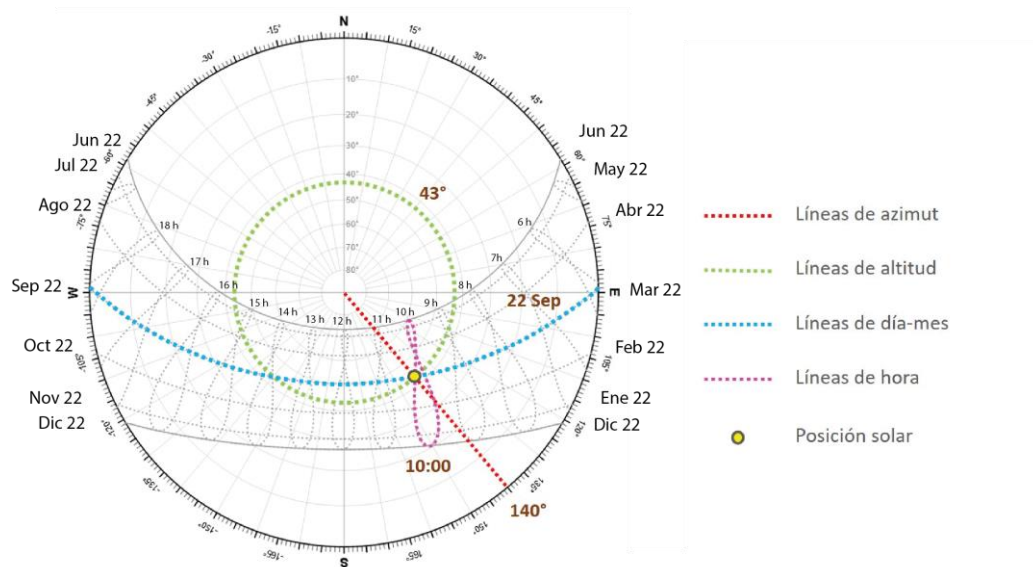


Figura 4. Gráfica solar estereográfica.

Fuente: (Ordoñez, 2021)

Las curvas presentes en el diagrama ilustran el trayecto del sol de la siguiente manera:

Líneas de día mes: Se encuentran espaciadas de manera uniforme a lo largo del eje horizontal, representando diferentes fechas del año. Cada línea corresponde a una fecha específica del año, generalmente con intervalos regulares de 15 o 30 días.

Líneas de hora: Para las horas del día, las cartas estereográficas suelen tener líneas radiales que parten del centro hacia el borde exterior de la carta. Estas líneas están marcadas con las horas del día, comenzando desde el punto del horizonte donde sale el sol (generalmente el este) y avanzando en sentido horario alrededor del círculo hasta el punto del horizonte donde se pone el sol (generalmente el oeste). Por lo tanto, cada línea radial representará una hora específica del día.

La curva superior corresponde al solsticio de verano.

La curva inferior corresponde al solsticio de invierno.

b) Proyección cilíndrica

Se trata de gráficas de coordenadas cartesianas que se basan en la proyección de las posiciones solares sobre una superficie cilíndrica como se ve en la figura 5, la cual se despliega posteriormente para generar un diagrama rectangular (Ordoñez, 2021). En este tipo de representación, las posiciones solares se indican mediante dos valores, comúnmente conocidos como coordenada X y coordenada Y. En el eje horizontal se registran los ángulos azimut, comenzando desde 0° en la orientación norte y con valores positivos hacia la derecha (este) y negativos hacia la izquierda (oeste). Por otro lado, los ángulos de altitud se miden sobre el eje vertical, variando desde 0° en el plano del horizonte hasta 90° en el extremo superior.

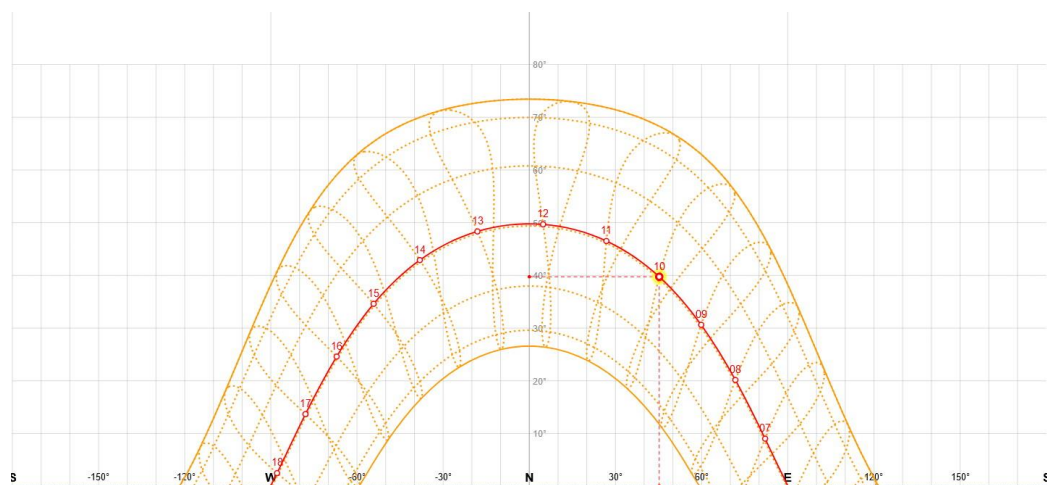


Figura 5. Grafica solar cilíndrica

Fuente: (Ordoñez, 2021)

c) Proyecciones tridimensionales de recorridos solares

Existen otras herramientas para comprender el recorrido del sol en un lugar determinado, como son las gráficas tridimensionales. Estas están disponibles en programas de diseño y análisis de edificios como la aplicación web 3D Sun Path de Andrew Marsh (ver figura 6). Esta aplicación ofrece una representación más completa y detallada del movimiento solar. Estas gráficas permiten visualizar las posiciones del sol

en tres dimensiones sobre una semiesfera, incluyendo las líneas de mes, día y hora. Además, facilitan el cálculo y la visualización de los ángulos de azimut y altitud (Ordoñez, 2021).

Su ventaja radica en la interactiva visualización de las variaciones de la posición solar según la ubicación geográfica. Adicionalmente, algunos programas incorporan formas geométricas que representan edificios u objetos, lo que permite al usuario interactuar dinámicamente con la gráfica para simular efectos de soleamiento y sombreado en diferentes momentos del día o del año.

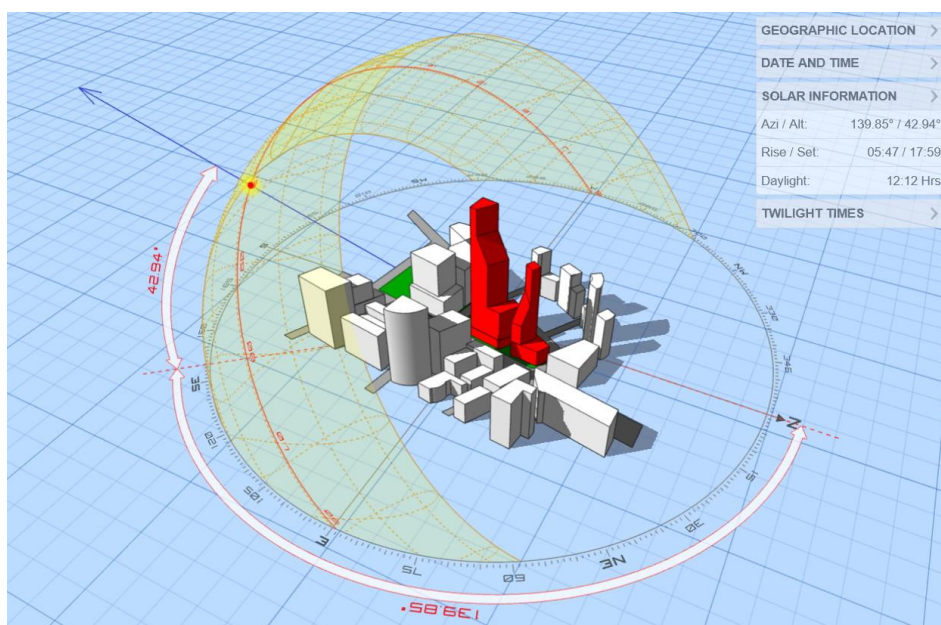


Figura 6. Proyección tridimensional 3D Sun Path de Andrew Marsh

Fuente: (Andrew Marsh, s/f)

La trayectoria solar permite representar diversos aspectos relacionados con la radiación solar, incluyendo la radiación directa, la radiación difusa y el total de radiación, mediante el cálculo de la energía solar incidente en superficies opacas y acristaladas. En este sentido, se utilizarán herramientas como las cartas solares, los cuales se basan en el patrón de sombras. Éstas pueden utilizarse para el análisis de asombramiento de un proyecto.

Temperatura

Es la medida de la cantidad de energía calorífica presente en el aire en un momento específico. Se cuantifica típicamente en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) mediante termómetros y es fundamental para determinar las sensaciones de calor y frío (García & Islas, 2022). En algunos lugares, como en Estados Unidos, se utiliza la unidad de medida de grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) para expresar la temperatura.

Una gráfica típica de temperatura mostrará la temperatura en el eje vertical y el tiempo en el eje horizontal. Por ejemplo, en una gráfica de temperatura diaria, como se ilustra en la figura 7, se observa cómo cambia la temperatura a lo largo del día, con picos durante las horas más cálidas y valles durante las horas más frías.

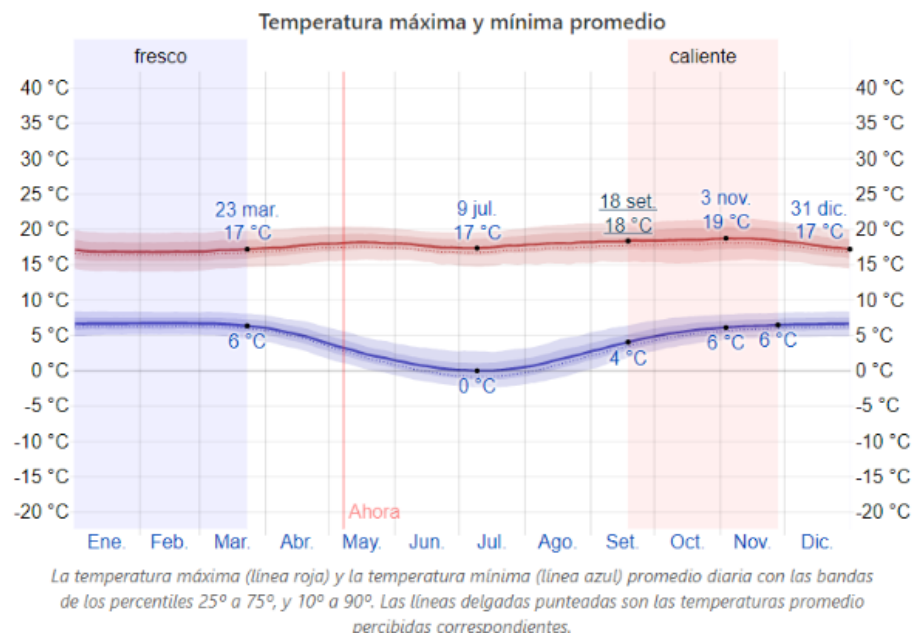


Figura 7. Gráfica de temperaturas máximas y mínima promedio

Fuente: (Weather Spark, 2021)

“Ordoñez (2021) menciona que existen diferentes tipos de temperatura que se utilizan en el estudio del confort térmico. Las más importantes son:

Temperatura de bulbo seco: Mide la temperatura del aire sin considerar factores ambientales como la radiación, la humedad o el movimiento del aire, los cuales pueden afectar significativamente la sensación térmica.

Temperatura de bulbo húmedo: Representa una medida del calor en un sistema donde interactúan un gas y un vapor, generalmente aire y vapor de agua. Esta temperatura proporciona una indicación indirecta del nivel de humedad ambiental y su posible efecto en los procesos de enfriamiento evaporativo, siendo relevante en meteorología.

Temperatura de rocío: Indica la temperatura más baja en la que una masa de aire con una humedad absoluta específica alcanza una humedad relativa del 100% (saturación). Si la humedad relativa es inferior al 100%, la temperatura de rocío será menor que la temperatura del aire.

Temperatura radiante media: Es la cantidad de calor emitido en forma de radiación por los elementos del entorno. Cuando se aplica a espacios interiores, se define como la temperatura radiante uniforme de un recinto negro ideal que generaría las mismas pérdidas o ganancias de calor que el recinto real. Este parámetro se calcula como el promedio de calor radiante emitido por todas las superficies que conforman el recinto.

Temperatura operativa: Es el valor medio de la temperatura seca del aire y la temperatura radiante media dentro de un recinto. Este criterio es válido, especialmente si la velocidad relativa del aire es baja o si la diferencia entre la temperatura seca del aire y la temperatura radiante media es reducida. Para un cálculo más detallado, se puede emplear la siguiente fórmula:

$$T_o = (A \times T_a) + [(1 - A) \times TRM]$$

Ecuación 1. Fórmula para calcular la temperatura operativa
Fuente: (Ordoñez, 2021)

Dónde:

To = Temperatura operativa.

A = Valor que está en función de la velocidad relativa del aire:

Cuando la velocidad relativa del aire < 0.2 m/s, $A = 0.5$

Cuando la velocidad relativa del aire > 0.2 m/s y < 0.6 m/s, $A = 0.6$

Cuando la velocidad relativa del aire > 0.6 m/s y < 1.0 m/s, $A = 0.7$

Ta = Temperatura del aire.

TRM = Temperatura radiante media.” (p.1)

La temperatura es uno de los factores más importantes que influyen en el confort térmico de las personas. Un ambiente con una temperatura adecuada es esencial para la salud y el bienestar. Si la temperatura es demasiado alta o demasiado baja, puede provocar molestias e incluso problemas de salud (Leiva, 2017).

Humedad

Contenido de agua presente en la atmosfera. Aunque generalmente se percibe la atmósfera como una masa de aire, el vapor de agua desempeña un papel crucial en su composición, incluso en áreas áridas. Aunque la temperatura del aire suele ser el primer factor asociado con el confort humano, la humedad ambiental también desempeña un papel significativo en la sensación de comodidad de las personas (Ordoñez, 2021)

Moreno (2009) menciona que existen dos tipos de humedad:

“Humedad absoluta: Representa la cantidad total de vapor de agua contenida en un volumen determinado de aire, sin importar su temperatura. Se mide en gramos por metro cúbico (g/m^3). La humedad absoluta varía en función de la temperatura del aire, ya que el aire caliente tiene mayor capacidad para contener vapor de agua que el aire frío.

Humedad Relativa: Indica la proporción entre la cantidad de vapor de agua presente en el aire y la máxima cantidad que puede contener a una temperatura específica. A medida que la temperatura del aire aumenta, su capacidad para retener vapor de agua también crece. La humedad relativa se cuantifica en porcentaje, donde un valor del 100 % indica que el aire está completamente saturado de vapor de agua y no puede retener más, lo que puede dar lugar a la formación de nubes, niebla, rocío o, si la temperatura desciende lo suficiente, escarcha (Navarra, 2019)."

Las mediciones de humedad relativa se realizan con diversos instrumentos, siendo los más comunes el psicrómetro y el higrómetro de cabellos. El psicrómetro combina dos termómetros, uno seco y otro húmedo, para determinar la tensión del vapor, el punto de rocío y la humedad relativa a partir de la diferencia de temperatura entre ellos. Por otro lado, el higrómetro de cabellos mide la humedad relativa basándose en el cambio de longitud de los cabellos, que se expanden o contraen en función del contenido de vapor de agua en el aire. Estos instrumentos, tanto en su versión manual como con registrador (higrógrafo), permiten evaluar de manera precisa la humedad relativa y su impacto en el confort térmico, la calidad del aire y otros aspectos ambientales (Gonzalo, 2019).

Vientos

Es el movimiento del aire a gran escala. Se produce por las diferencias de presión atmosférica entre dos puntos. El aire se mueve desde las zonas de alta presión hacia las zonas de baja presión (Mourelo, 2020). Es crucial tener en cuenta que el viento, al igual que la radiación solar, juega un papel fundamental en el análisis de un sitio específico. Su comportamiento está directamente influenciado por las diferencias de temperatura y la interacción entre la tierra y el agua.

Para comprender el comportamiento del viento, se utiliza la herramienta conocida como rosa de los vientos (figura 8). Esta información, generalmente proporcionada por las

estaciones meteorológicas, permite conocer la frecuencia, la velocidad (m/s) y la dirección de los vientos predominantes en un lugar determinado. La rosa de los vientos utiliza un esquema basado en los puntos cardinales para visualizar esta información de manera clara y precisa.

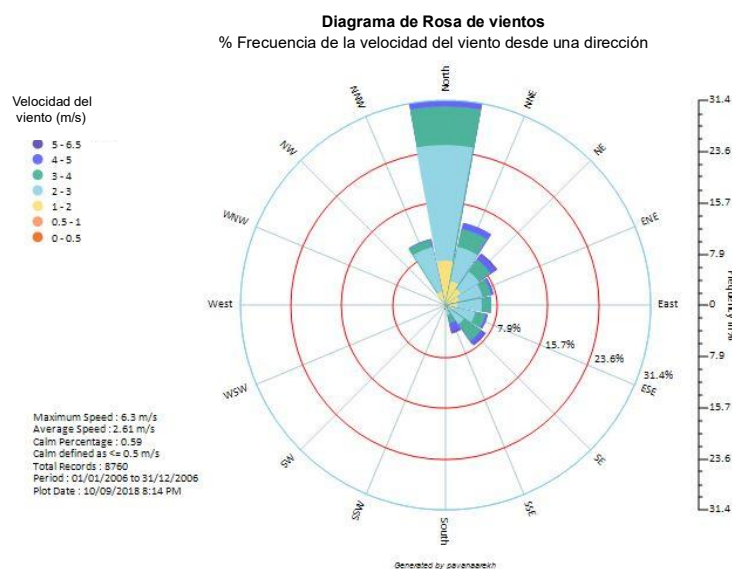


Figura 8. Rosa de vientos
Fuente: (Ordoñez, 2021)

Para medir el viento existen diversas unidades y escalas. El más utilizado es la escala de Beaufort (tabla 2), una medida empírica internacionalmente aceptada para clasificar la fuerza del viento en función de sus efectos observables, primeramente, en navíos de guerra y posteriormente en tierra firme (Ordoñez, 2021).

Tabla 2. Escala de Beaufort para estimar la velocidad del viento.

Fuerza	Descripción	Velocidad del viento (km/h)	Efecto en el mar	Efecto en tierra
0	Calma	Menos de 1	Mar como un espejo	Humo sube verticalmente
1	Ventolina	1-3	Olas rizadas	Hojas se mueven
2	Flojito	4-6	Crestas blancas de vez en cuando	Se siente en la cara
3	Flojo	7-10	Olas cortas	Se mueve la bandera
4	Brisa moderada	11-16	Olas alargadas	Ramas pequeñas se mueven

5	Frescachón	17-21	Olas medianas con crestas blancas	Árboles se mecen
6	Fuerte	22-27	Olas grandes rompen	Se dificulta caminar contra el viento
7	Temporal	28-33	Espuma blanca arrastrada por el viento	Troncos delgados se rompen
8	vendaval	34-40	Olas muy altas con crestas blancas que rompen	Se rompen ramas gruesas
9	Temporal fuerte	41-47	Espuma arrastrada en grandes láminas	Se daña ligeramente las edificaciones
10	Tempestad	48-55	Mar embravecida con olas enormes	Árboles desarraigados
11	Borrasca	56-63	Mar agitadaísima, olas excepcionalmente altas	Daños considerables en edificaciones
12	Huracán	64-72	Aire casi completamente lleno de espuma blanca, visibilidad reducida	Daños devastadores

Fuente: Ordoñez, 2021

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

En el campo de la meteorología, es más frecuente expresar la velocidad del viento en kilómetros por hora (km/h), ya que esta unidad de medida es más comprensible para la mayoría de las personas. Por otro lado, al referirse al movimiento del aire dentro de los edificios, es habitual utilizar metros por segundo (m/s), lo que permite discernir velocidades relativamente bajas con mayor precisión (Ordoñez, 2021). Un ejemplo ilustrativo se muestra en la tabla 3.

Velocidad del Aire: Es la rapidez con que se mueve una masa de aire, su medida se efectúa a través de km/h y en m/s. La frecuencia de vientos se mide por la cantidad de horas que tiene una velocidad del viento en un tiempo determinado, generalmente la refrigeración resultante del movimiento del aire es ocasionada por dos fenómenos (Navarra, 2022).

Tabla 3. Efecto sensible del viento

Velocidad (m/s)	Efecto
Hasta 0.25	Imperceptible
0.25 a 0.5	Comienza apenas a sentirse
0.5 a 1.0	Movimiento de aire suave, efectivo y agradable en condiciones cálido húmedas
1.0 a 1.65	Movimiento de aire moderado, sin llegar a causar efectos desagradables en lugares de trabajo de oficina
1.65 a 3.3	Puede ser desagradable (los papeles empiezan a volar); 3.3 m/s se considera limite deseable en espacios interiores
3.3 a 5.0	Brisa; agradable en espacios exteriores con condiciones cálidas
5.0 a 10.0	Viento moderado
10.0 a 15.0	Viento muy fuerte
Más de 15.0	Vendaval; a partir de 25.0 m/s se puede presentar daños a edificios comunes

Fuente: (Ordoñez, 2021)

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

Precipitaciones

Según Mourelo (2020), la precipitación se refiere a la cantidad de agua que cae sobre la superficie terrestre como resultado de la condensación del vapor de agua en el aire, manifestándose en forma de lluvia, nieve, granizo, entre otros. Este fenómeno meteorológico muestra una distribución variada, siendo más frecuente en regiones cercanas al ecuador y disminuyendo hacia los polos, aunque también aumenta con la altitud y la proximidad a cuerpos de agua como mares y océanos. Las precipitaciones pueden originarse por varias causas, como la evaporación del suelo, el relieve y la formación de frentes (Melendez, 2016).

Presión atmosférica

Es la fuerza ejercida por la masa de aire sobre una unidad de superficie terrestre. Este fenómeno se origina debido al peso de la columna de aire que se encuentra sobre una determinada área. La presión atmosférica varía en función de la altitud, la temperatura y la actividad meteorológica, entre otros factores. (Mourelo, 2020).

A medida que ascendemos, el aire se vuelve más tenue y la presión disminuye. En los primeros 100 metros de altura, la presión desciende aproximadamente 1 mm Hg por cada 11 metros. A mayor altitud, esta tasa de disminución se vuelve más lenta hasta volverse casi imperceptible por encima de los 50 kilómetros. Esta relación entre presión atmosférica y altitud es crucial para comprender fenómenos meteorológicos y tiene aplicaciones en aeronáutica y meteorología (Gonzalo, 2019).

2.1.3.2 Factores que inciden en el clima

La presencia de distintas zonas climáticas se debe a la influencia y la interacción de diversos elementos, entre los que se detallan a continuación:

Altitud

Se refiere a la elevación sobre el nivel del mar. A medida que aumenta la altitud, la presión atmosférica disminuye, lo que afecta la temperatura y otros aspectos climáticos (Barros & Troncoso, 2010). Generalmente, a mayor altitud, las temperaturas tienden a ser más bajas debido a la menor presión atmosférica y la menor capacidad de retención del calor. Esto significa que, en las regiones montañosas, como las montañas o las mesetas, las temperaturas suelen ser más frescas, incluso en regiones ecuatoriales.

Latitud

Hace referencia a la distancia al ecuador medida en grados hacia el norte o hacia el sur (Mourelo, 2020). La latitud tiene un gran impacto en la cantidad de energía solar que una región recibe. Las áreas cercanas al ecuador experimentan un clima tropical, con altas temperaturas y una marcada estacionalidad en la precipitación. A medida que nos movemos hacia los polos, las temperaturas disminuyen y los climas se vuelven más templados, con estaciones más marcadas y variaciones en la cantidad de luz solar a lo largo del año.

Relieve o topografía

Ejerce una influencia significativa en el comportamiento de diversos elementos climáticos, como las corrientes de aire, la radiación solar, la distribución de la vegetación y la humedad del suelo, entre otros aspectos. La forma y la disposición de las montañas, valles, mesetas y llanuras juegan un papel crucial en la modulación de los patrones climáticos locales (Barros & Troncoso, 2010)

Relación agua- tierra

Desempeña un papel crucial en la regulación del clima. El agua tiene la capacidad única de almacenar y transferir energía térmica, actuando como un regulador natural de la temperatura en su entorno. La presencia de cuerpos de agua, como océanos, ríos, lagos y humedales, puede influir en la estabilidad climática de una región al mitigar los extremos de temperatura y regular la humedad atmosférica (Gonzalo, 2019).

Relación con la vegetación

Ejerce una influencia multifacética en el entorno construido. Más allá de su función estética, la vegetación desempeña un papel crucial en la regulación del microclima urbano (Pérez & De la Barrera, 2021). Proporciona sombra, reduce la temperatura ambiente a través de la evaporación, mejora la calidad del aire al filtrar contaminantes y puede reducir la contaminación acústica al absorber el sonido.

Corrientes marinas

Son flujos de agua que atraviesan los océanos, recorriendo largas distancias y ejerciendo una notable influencia en los climas terrestres al redistribuir el calor desde las regiones tropicales hacia otras partes del planeta. Estas corrientes pueden ser tanto frías como cálidas, y su efecto se traduce en cambios en las condiciones de presión atmosférica y humedad (Navarra, 2019).

2.1.4 Clasificación Climática

A lo largo de la historia, se han desarrollado diversas clasificaciones climáticas, cada una con diferentes enfoques y criterios. En sus inicios, la climatología causal propuso un esquema simple de tres zonas: fría, caliente y templada (Miglietti, 2016, p. 49). En el siglo XIX, el geógrafo Alexander Supan dividió el mundo en tres categorías: cinturón caliente, cinturones templados y cinturones fríos (Santillán & Garduño, 2008). Esta clasificación se basaba en la latitud y subdividía aún más los cinturones templados y fríos según su proximidad a los trópicos de Cáncer y Capricornio. (ver Figura 9). A partir de la propuesta de Supan (1901), surgieron dos grandes corrientes de clasificación climática: las genéticas y las empíricas (Santillán & Garduño, 2008, p. 5).

- Genéticas: Se basan en los procesos físicos que determinan el clima, buscando identificar los factores que dan lugar a los diferentes tipos climáticos. Un ejemplo notable es la clasificación de Köppen y Thornthwaite.
- Empíricas: Se basan en el análisis de datos climáticos, buscando identificar patrones y agrupaciones de climas similares, como la de Miller y Trewartha. (García & Islas, 2022)

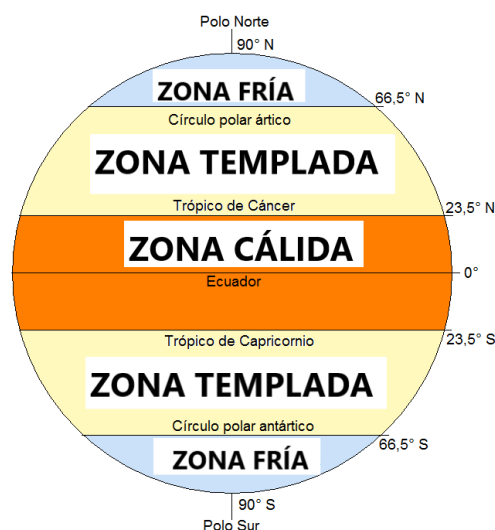


Figura 9. Zonas climáticas del mundo: fría, templada y cálida

Fuente: (Santillán & Garduño, 2008)

2.1.4.1 Climática Köppen

Creada por el climatólogo alemán Wladimir Köppen a principios del siglo XX, destaca como una de las más conocidas y utilizadas en el mundo (Díaz, 2020). La cual se basa principalmente en la temperatura y la precipitación para clasificar los climas en cinco principales categorías:

A: Clima tropical

B: Clima seco

C: Clima templado

D: Clima continental

E: Clima polar (Díaz, 2019).

Estas categorías se subdividen en subtipos, teniendo en cuenta otros factores como la estacionalidad de la lluvia, la temperatura media del mes más frío y otros patrones climáticos regionales (Navarra, 2019). La letra principal indica el grupo climático, y las letras secundarias y números describen características adicionales. A continuación, se detalla la subdivisión de esta clasificación en la tabla 4:

Tabla 4. Cuadro de la clasificación climática según Köppen

Climas fundamentales	Climas Tipo	Símbolo
Tropical lluvioso	Selvas tropicales, lluvias todo el año	Af
	Bosques: Lluvias monzónicas	Am
	Seco en invierno	Aw
Seco	Estepario	Bs
	Desértico	Bw
Templado	Con invierno seco	Cw
	Con verano seco	Cs
	Sin estación seca	Cf
Subártico frío o continental	Con invierno húmedo	Df
	Con invierno seco	Dw

Polar	Tundra Hielo perpetuo Alta montaña	Et Ef Eb
-------	--	----------------

Fuente: (Barros & Troncoso, 2010)

- **Grupo A: Climas tropicales**

Este grupo abarca los climas tropicales, caracterizado por su abundante humedad, vegetación y constantes precipitaciones. Se encuentran en las regiones ecuatoriales y subtropicales del planeta, donde la influencia del sol es más intensa (García, 2004). Además, que ningún mes presenta una temperatura media inferior a 18°C (Navarra, 2019). La precipitación anual supera la evaporación, lo que los distingue del grupo B. Se detallan a continuación los subtipos en la figura 10, que incluyen climas de selva tropical o ecuatorial (Af), los climas de sabana (Aw), y los climas monzónicos (Am).

GRUPO A		
CLIMAS TROPICALES		
Húmedos, ningún mes con temperaturas medias inferiores a 18°C		
Af: Ecuatorial	Cálido y lluvioso todo el año, sin estaciones. Es el clima de la selva lluviosa.	Se da en el ecuador hasta los 10° de latitud, hasta los 25° en algunas costas orientales. Es el clima de la cuenca Amazónica, cuenca del Congo o parte de la zona Indo-Malaya en Asia.
Am: Monzónico	Cálido todo el año, con una estación seca corta seguida por una húmeda con fuertes lluvias. Es el clima de los bosques monzónicos.	En el oeste de África y sobre todo en el sudeste asiático es donde mejor está representado este clima: Tailandia, Indonesia.
Aw: Sabana	Cálido todo el año, con estación seca. Es el clima propio de la sabana.	Este clima aparece conforme nos alejamos del ecuador, a continuación de la zona Af: Es el clima de Cuba, de amplias zonas de Brasil, del África tropical y de gran parte de la India.

Figura 10. Cuadro de características del Grupo A: climas tropicales

Fuente: (Navarra, 2019)

- **Grupo B: Climas secos**

Estos climas se caracterizan por tener precipitaciones anuales inferiores a la evapotranspiración potencial anual (Navarra, 2019). En términos más simples, la cantidad de lluvia que cae es menor que la cantidad de agua que se evapora y se transpira de la tierra. Este tipo de clima es típico de regiones de estepas y desiertos, donde la escasez de precipitación es una característica dominante (Moreno, 2009). Los

subtipos incluyen climas desérticos (BWh, BWk) y climas de estepa (BSk, BSh) (ver figura 11).

GRUPO B		
CLIMAS SECOS		
Precipitaciones anuales inferiores a la evapotranspiración potencial anual		
Bsh: Estepario cálido	Los inviernos son suaves y los veranos cálidos o muy cálidos. Las precipitaciones son escasas. La vegetación natural es la estepa.	Se da en los trópicos y subtrópicos, en el límite de los desiertos subtropicales: Extremo sudeste de la península ibérica, Marruecos, costa del sur de California, Kalahari, zonas del interior de Australia.
Bsk: Estepario frío	Los inviernos son fríos o muy fríos, y los veranos pueden ser templados o cálidos. Las precipitaciones son escasas. La vegetación natural es la estepa.	Tiende a localizarse en latitudes templadas y lejos del mar. Zonas del interior de Norteamérica, interior del valle del Ebro, interior de Irán, estepas del centro de Asia.
Bwh: Desértico cálido	Los inviernos son suaves aunque en zonas del interior las temperaturas pueden acercarse por la noche a los cero grados. Los veranos son cálidos o muy cálidos. En algunas zonas con este clima las temperaturas en verano son extremadamente altas, y se han registrado las máximas del planeta. Las precipitaciones son muy escasas. Plantas del desierto, o sin vegetación.	Se da en las franjas subtropicales de ambos hemisferios: Desiertos del suroeste de Estados Unidos, Sahara, desierto de la península arábiga, costa del Perú y norte de Chile, desierto del Namib, desiertos de Australia.
Bwk: Desértico frío	Los inviernos son muy fríos y los veranos templados o cálidos. Las precipitaciones son muy escasas. La vegetación es la propia del desierto, o inexistente.	Se encuentra en latitudes templadas: la Patagonia Argentina, desiertos del oeste de Estados Unidos o del interior de Asia.

Figura 11. Cuadro de características del Grupo B: Climas secos

Fuente: (Navarra, 2019)

- **Grupo C: Climas templados**

Son climas con estaciones bien definidas y una amplia variación en la temperatura a lo largo del año. Estos climas suelen tener veranos cálidos e inviernos frescos, con una variación significativa en las temperaturas a lo largo del año. Se caracterizan por tener temperaturas medias del mes más frío que oscilan entre -3°C y 18°C, mientras que la temperatura del mes más cálido supera los 10°C (Navarra, 2019). Se encuentran en regiones alejadas del ecuador, tanto en hemisferios norte como sur. Como se muestra en la Figura 12, incluyen climas oceánicos (Cfb, Cfc), climas tropicales de sabana con invierno seco y verano seco (Cwa, Cwb), y climas mediterráneos (Cs, Csa, Csb) (Navarra, 2019).

GRUPO C		CLIMAS TEMPLADOS
		Húmedos con temperatura media del mes más frío entre -3°C (o 0°C) y 18°C, y temperatura media del mes más cálido superior a 10°C
Cfb: Marítimo de costa occidental (oceánico)	Inviernos fríos o templados y veranos frescos. Las precipitaciones están bien distribuidas a lo largo del año. La vegetación natural son los bosques de frondosas.	Se da en la costa occidental de los continentes, entre los 45° y 55° de latitud, normalmente a continuación del clima mediterráneo. Es el clima de la fachada atlántica europea desde el sur de Noruega hasta el norte de la península ibérica, de la costa noroeste de Estados Unidos, sur de Chile, Nueva Zelanda.
Cfc: Marítimo subártico (oceánico frío)	Inviernos fríos y sin un verdadero verano. Con lluvias todo el año. En algunos lugares los fuertes vientos hacen que la vegetación sea escasa.	Se da a continuación del clima Cfb, conforme nos acercamos a los polos. Es el clima de la costa de Islandia, de la costa noroccidental de Noruega o del extremo sur de Chile y Argentina.
Csa: Mediterráneo	Inviernos templados y veranos secos y cálidos. La mayor parte de las lluvias caen en invierno o en las estaciones intermedias. La vegetación natural es el bosque mediterráneo.	Se da en la costa occidental de los continentes, entre las latitudes 30° y 40°, hasta 45° en Europa: cuenca mediterránea, zonas del interior de California y zonas del sur de Australia.
Csb: Mediterráneo de veranos frescos	Inviernos fríos o templados y veranos secos y frescos. La mayor parte de las lluvias caen en invierno o en las estaciones intermedias. La vegetación natural es el bosque mediterráneo.	Se da en las mismas latitudes que el Csa. Es el clima del centro de Chile, de la costa central de California, de la región del Cabo en Sudáfrica, y de las tierras altas del interior de la península ibérica, a partir de los 900 o 1.000 metros.
Cfa: Subtropical húmedo	Inviernos fríos o templados y veranos húmedos y cálidos. Precipitaciones bien repartidas a lo largo del año. Se da el bosque siempre verde, o el bosque templado.	Este clima se da en el interior y costa este de los continentes, entre los 20° y 30° de latitud y hasta los 48° en Europa. En Europa el clima Cfa aparece en el límite del clima oceánico, cuando la distancia al mar hace que los veranos comiencen a ser calurosos. Es el clima del sudeste de China, sur de Japón, sudeste de Estados Unidos, costa norte de Argentina, este de Australia, sudeste de la República de Sudáfrica.
Cwa: Subtropical con invierno seco	Inviernos fríos o templados y veranos cálidos. La estación seca es el invierno. Es clima de bosques templados.	Este clima se da en el interior y costa este de los continentes, entre los 20° y 30° de latitud. Aparece principalmente en el este de Asia (interior de China), interior de África (Zambia, zonas de Angola) y de Sudamérica.
Cwb: Templado con inviernos secos	Inviernos fríos o templados y veranos frescos. Los veranos son lluviosos y los inviernos secos.	Este clima se da en los trópicos en zonas altas: Andes peruanos, altiplanos de México, Angola y Etiopía. También en el interior de Argentina.

Figura 12. Cuadro de características del Grupo C: Climas templados

Fuente: (Navarra, 2019)

- **Grupo D: Climas fríos**

Este grupo se caracteriza por tener temperaturas extremadamente frías, con la temperatura media del mes más frío siendo inferior a -3°C (o 0°C) y la del mes más cálido superando los 10°C (Navarra, 2019). Estos climas presentan una gran amplitud térmica, lo que significa que hay una marcada diferencia entre las temperaturas mínimas y máximas (Moreno, 2009). Las estaciones intermedias, como el otoño y la primavera, son muy cortas en estos climas. Las precipitaciones superan la evaporación, lo que contribuye a un entorno más húmedo. Dentro de su subdivisión, como se aprecia en la

figura 13, incluyen los climas continentales húmedo frío (Dfa, Dfb), los climas continentales subártico (Dfc, Dwc) y subpolar o boreal (Dfd, Dwd).

GRUPO D		
CLIMAS CONTINENTALES O DE INVIERNOS MUY FRÍOS		
Húmedos con temperatura media del mes más frío inferior a -3°C (o 0°C), y temperatura media del mes más cálido superior a 10°C.		
Dfa, Dwa, Dsa: Climas continentales de verano cálido	Inviernos muy fríos y con nieve, veranos cálidos. La vegetación natural son los bosques caducifolios.	Se dan en el interior y costa este de los continentes, Dfa y Dwa entre las latitudes 30° y 40° (Dwa se da en el este de Asia y se extiende más al sur). Dsa se da en el interior, a latitudes más bajas, en zonas altas. Estos climas se dan en el nordeste de Estados Unidos, nordeste de China, península de Corea, norte de Japón.
Dfb, Dwb, Dsb: Climas continentales de verano fresco	Inviernos muy fríos y con nieve, y veranos frescos. La vegetación es el bosque mixto de coníferas y planifolias.	Dfb y Dwb se dan al norte de los anteriores, entre las latitudes 40° y 50°, como el este de Canadá y el extremo norte de Japón. También se dan en el centro y este de Europa y en Rusia entre el clima marítimo y el continental subártico. Dsb se da en zonas parecidas a Dsa pero a mayor altitud o a mayor latitud.
Dfc, Dwc: Continental subártico o boreal	Inviernos muy fríos y largos, con nieve, veranos fríos y muy cortos. Es el clima de la taiga, o bosque frío de coníferas.	Se dan entre los 50° y 60° de latitud norte, en algunos lugares hasta los 70°. Es el clima del interior de Canadá, Alaska y de gran parte de Siberia, en una franja entre el clima estepario frío y la tundra.
Dfd, Dwd: Climas continentales subárticos con inviernos extremadamente fríos	Con inviernos extremadamente fríos, los más fríos del hemisferio norte, que duran hasta nueve meses. En mayo y en septiembre se da una transición muy rápida al verano, que es muy corto aunque relativamente cálido.	Estos climas sólo se dan en el nordeste de Siberia.

Figura 13. Cuadro de características del Grupo D: Climas fríos

Fuente: (Navarra, 2019)

Grupo E: Clima Polar

Se destaca la ausencia de veranos, lo que ocasiona una escasa vegetación debido al congelamiento y la falta de fertilidad en los suelos, ocasionados por temperaturas frías que permanecen por debajo de los 0°C (García, 2004). El mes más cálido de este clima no alcanza los 10°C. Predominan los paisajes de la tundra, donde se encuentran principalmente musgos, líquenes y hierbas, que solo prosperan cuando la temperatura media supera el umbral de los 0°C (Navarra, 2019). Dentro del grupo E de la clasificación climática de Köppen, se encuentran los tipos de climas de la figura 14.

GRUPO E		CLIMAS POLARES
		Ningún mes con temperatura media superior a 10°C.
Et: Tundra	La temperatura media del mes más cálido está entre 0°C y 10°C. Sólo hay musgos y hierbas cuando la temperatura media supera los 0°C.	Se da en el extremo norte de Norteamérica y Eurasia, así como en las islas cercanas, y comienza a partir del límite norte de la taiga.
Ef: Hielos perpetuos	La temperatura media del mes más cálido es inferior a 0°C. No existe ningún tipo de vegetación. Es el clima de los hielos permanentes.	Es el clima de la Antártida, del interior de Groenlandia y de las mayores alturas del Himalaya.

Figura 14. Cuadro de características del Grupo E: Climas polares

Fuente: (Navarra, 2019)

2.1.4.2 Climática Thornthwaite

En la década de 1930, el climatólogo Charles Warren Thornthwaite presentó una alternativa al sistema de Köppen. Su propuesta, publicada en dos artículos de la revista *Geographical Review* (1931 y 1933), se centraba en los climas forestales (Santillán & Garduño, 2008). Thornthwaite argumentó que la precipitación y la temperatura por sí solas no son suficientes para controlar la vegetación, por lo que desarrolló un sistema que incluye estimaciones de la pérdida de agua por evapotranspiración potencial (Gómez, 2008).

Para ello dividió los climas en cinco tipos principales (ver tabla 5), basando su método de clasificación en cuatro elementos esenciales: el índice pluvial, la variación estacional de la lluvia efectiva, el índice de eficiencia térmica y la concentración de eficiencia térmica en el verano (Gonzales et al., 2022).

Según Gómez (2008), los cinco tipos principales de climas de Thornthwaite son:

- Climas húmedos: Aquellos en los que la cantidad de precipitación supera la evaporación potencial.
- Climas subhúmedos: Donde la precipitación es ligeramente menor que la evaporación potencial.
- Climas semisecos: Con una evaporación potencial significativamente mayor que la precipitación.

- Climas secos: Donde la evaporación potencial supera en gran medida a la precipitación.
- Climas áridos: Caracterizados por una gran brecha entre la evaporación potencial y la precipitación.

Esta clasificación considera no solo la cantidad de precipitación, sino también la eficiencia con la que se utiliza el agua en un determinado clima, lo que la hace útil para comprender las condiciones de aridez y humedad en diferentes regiones del mundo (Gonzales et al., 2022). El sistema clasifica los climas en función de la disponibilidad de agua y la relación entre la evaporación y la precipitación (ver tabla 6), proporcionando una comprensión de las condiciones climáticas en diferentes áreas geográficas.

Tabla 5. Clasificación de Thornwaite según humedad

Tipo de Clima	Índice de Humedad (Im)	Subtipos por Eficacia Térmica	Descripción General
Húmedo	$Im > 100$	A: Perhúmedo, B: Húmedo	Precipitación abundante, mayor a la evapotranspiración potencial.
Subhúmedo	$100 > Im > 20$	C1: Subhúmedo seco, C2: Subhúmedo húmedo	Precipitación cercana a la evapotranspiración potencial, con déficit o exceso en algunos meses.
Semiseco	$-67 < Im < -33$	D1: Semiseco seco, D2: Semiseco húmedo	Precipitación intermedia entre seco y subhúmedo, con aridez estacional.
Seco	$20 > Im > 0$	D: Seco	Precipitación menor a la evapotranspiración potencial, con aridez moderada.
Árido	$Im < 0$	E: Árido	Precipitación muy baja, con aridez extrema.

Fuente: (Barros & Troncoso, 2010)

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

Tabla 6. Clasificación del clima según Precipitación

Tipo de clima	Índice de precipitación (mm/año)
Árido	<250 mm/año
Semiárido	250-500 mm/año
Semihúmedo	500-1000 mm/año
Húmedo	1000-2000 mm/año
Muy húmedo	>2000 mm/año

Fuente: (Barros & Troncoso, 2010)

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

2.1.4.3 Climática de Miller

En 1951, el climatólogo estadounidense Austin Miller propuso una nueva clasificación climática de la Tierra que se distingue del enfoque de Köppen por ser puramente bioclimática (Díaz, 2019). Esta clasificación considera a la vegetación como el factor principal para determinar los distintos tipos de clima. Junto con la temperatura y las precipitaciones, la vegetación establece una caracterización precisa de varios tipos de climas: cálidos, templados cálidos, desérticos, oceánicos, continentales y polares (Vaz, 2021). Además, se enmarca dentro del nivel de macroclima, ya que abarca escalas espaciales amplias, generalmente a nivel regional o continental.

Según Miller, la vegetación está mayormente influenciada por el régimen de lluvias, excepto en áreas montañosas y polares, donde la temperatura, y ocasionalmente el suelo, son factores determinantes. Además, según Díaz (2019) se establecen varios principios clave: a) la isoterma³ de 10°C del mes más cálido define el límite térmico de la formación boscosa, b) la isoyeta⁴ de 250 mm anuales marca el límite entre el desierto y la estepa ocasional, c) la isoterma de 6°C del mes más frío separa el bosque perennifolio del caducifolio, en ausencia de sequía prolongada y d) la isolínea⁵ de seis meses de temperatura media inferior a 6°C determina el límite de las frondosas

³ Líneas que conectan puntos con la misma temperatura media en un período determinado.

⁴ Líneas que conectan puntos con la misma precipitación media en un período determinado

⁵ Es una línea que se utiliza en un mapa para conectar puntos con el mismo valor de una variable particular.

caducifolias. También se considera la isoterma anual de 21 °C, que coincide aproximadamente con los 30° de latitud, y se da especial importancia a los vientos predominantes en cada zona.

Para identificar estos diferentes macroclimas, como se observa en la tabla 7, Miller utiliza letras desde la A hasta la G. En esta clasificación, los macroclimas designados con letras (A, B, C, D, E, F o G) varían según la temperatura (excepto el grupo F, que depende de la sequía, y el grupo G, determinado por la orografía⁶) (Díaz, 2019). Los bioclimas se identifican con la letra del macroclima seguida de un número.

Tabla 7. Clasificación climática según Miller

Tipo de clima	Descripción	Bioclimas
A: Climas cálidos.	Temperatura media anual igual o superior a 21 °C.	A1. Clima ecuatorial. selva. A2. Clima tropical marítimo. A3. Clima tropical continental.
B: Climas templado-cálidos	Carentes de estación fría, en todos los meses la temperatura media iguala o supera los 6°C.	B1. Clima mediterráneo B2. Clima subtropical. C: Climas templado-fríos.
C: Climas templado-fríos	Uno a cinco meses con temperatura media inferior a 6°C.	C1. Clima marítimo. C2. Clima continental.
D: Climas fríos	Más de seis meses con temperatura media inferior a 6°C.	D1. Clima marítimo. D2. Clima continental.
E: Climas polares	La temperatura media del mes más cálido no alcanza los 10°C y se localizan a latitudes superiores a unos 65°. En estas, en donde puede desarrollarse la vegetación, aparece la tundra.	
F: Climas desérticos.	Precipitación anual inferior a 250 mm.	F1. Desiertos cálidos. F2. Desiertos fríos.
G: Climas de montaña	Se refiere a los climas de montaña, que se encuentran en áreas altitudinales de cualquier región geográfica.	

Fuente: (Díaz, 2019)

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

⁶ Rama de la geología que se ocupa de la descripción y el análisis de las características del relieve terrestre, como montañas, valles, llanuras, etc.

Los sistemas de clasificación climática de Köppen, Thornthwaite y Miller son herramientas esenciales para entender la distribución de los climas en el planeta. Cada una se enfoca en variables como temperatura, precipitación, balance hídrico y vegetación. La elección del sistema depende del propósito, las características del área y las limitaciones del método. El clima se define tanto por sus características generales como por su variabilidad espacial y temporal. Las escalas climáticas permiten analizar la diversidad climática en distintos niveles, desde lo regional hasta lo local.

2.2 Bioclimática en la arquitectura

El conocimiento del clima es un punto de importancia dentro del proceso de la arquitectura bioclimática. La arquitectura bioclimática tuvo su origen en estudios pioneros de los hermanos Víctor y Aladar Olgyay en la década de 1950. Ellos lo denominaron "interpretación bioclimática de la arquitectura" (García & Islas, 2022). En respuesta a las crisis ambientales y energéticas de la década de los setenta, este enfoque fue reconocido como una disciplina emergente (Sánchez, 2014). Su principal objetivo era comprender cómo el clima influye en el entorno vivo, destacando la importancia de trabajar en armonía con la naturaleza para crear espacios habitables.

La arquitectura bioclimática no se centra solamente en la maximización del confort y la eficiencia energética, sino que también abarca aspectos como la conservación de recursos naturales, la reducción de emisiones de carbono y la promoción de la salud y el bienestar de los ocupantes (García & Islas, 2022). Al comprender el clima local, se pueden implementar estrategias pasivas de diseño, como la orientación adecuada de los edificios, la selección de materiales térmicamente eficientes y la optimización de la ventilación natural (Sánchez, 2014).

2.2.1 Características de la arquitectura bioclimática

Comodidad térmica

Las construcciones siguen principios que garantizan un ambiente interior agradable durante todas las estaciones del año, sin depender en gran medida de costosos sistemas de calefacción o refrigeración. Se utilizan techos altos con ventilación estratégica, materiales aislantes para mantener la temperatura interior estable y accesorios como pérgolas y toldos que regulan la incidencia de la luz solar y protegen de las inclemencias climáticas (Conforme & Castro, 2020).

Materiales con múltiples ventajas

Se emplean materiales inteligentes que ofrecen durabilidad, aislamiento térmico y acústico, control de la humedad y resistencia a alérgenos. Estos materiales, además de brindar confort, contribuyen a la salud y el bienestar de los ocupantes al proporcionar un entorno interior saludable y libre de ruidos molestos.

Diseño estético y funcional

Los materiales utilizados en las edificaciones no solo cumplen con criterios de eficiencia energética, sino que también son estéticamente atractivos y versátiles en términos de diseño. En este sentido, según (Conforme & Castro, 2020), “se consideran los siguientes criterios básicos para la construcción de una vivienda bioclimática:

- Sistemas de captación solar pasiva.
- Uso de energías renovables.
- Masa térmica.
- Sistemas de aislamiento y ventilación
- Aprovechamiento climático del suelo.
- Creación de un equipo multidisciplinario.

- Determinación de la ubicación adecuada.
- Destacar la importancia del tratamiento exterior del edificio.
- Diseñar cuidadosamente la forma del edificio.
- Orientar el edificio en relación al movimiento aparente del sol.
- Utilización de sistemas para el ahorro energético.
- Sistemas evaporativos de refrigeración.
- Ahorro de agua potable y aprovechamiento de aguas de lluvia
- Galerías de ventilación controlada.
- Sistemas vegetales hídricos reguladores de temperatura y humedad.” (p.8)

2.2.2 Interpretación bioclimática

El análisis para el diseño bioclimático implica una comprensión de los factores climáticos y sus elementos. Destaca la importancia del análisis solar y la ventilación en la determinación de la forma y la ubicación óptimas de los edificios (González, 2018). Además, se considera el análisis de confort, que examina cómo la envolvente del edificio afecta el bienestar térmico de sus ocupantes, teniendo en cuenta el metabolismo humano. Estos análisis orientan las estrategias de diseño hacia la creación de espacios habitables que sean energéticamente eficientes y cómodos para sus usuarios.

Para analizar el confort térmico, se utilizan diversas herramientas de interpretación que consideran variables climáticas y culturales importantes. Estas herramientas permiten una evaluación visual de variables como temperatura, humedad, radiación solar y movimiento del aire. Algunas de las herramientas más utilizadas incluyen los triángulos de confort, los diagramas bioclimáticos de Olgyay, las tablas de Mahoney y el diagrama bioclimático de Givoni.

- Triángulos de confort

Son una herramienta gráfica desarrollada por el arquitecto John Martin Evans en la década de 1970 para el análisis bioclimático (Del Toro, 2018). Se basan en la relación

entre la temperatura media mensual y la oscilación térmica (diferencia entre la temperatura máxima y mínima) de un lugar determinado (Evans, 1970). Estos representan una técnica de diseño que simplifica la elección de estrategias adecuadas para el diseño bioclimático, considerando las condiciones meteorológicas típicas de cada mes. La herramienta facilita la comparación entre las condiciones climáticas y los niveles deseados de confort térmico para diversas actividades.

Los elementos mencionados se representan en el diagrama de la figura 15, con la variable de temperatura en el eje de las abscisas y la oscilación térmica en las coordenadas, mientras que en su interior se presentarán por zonas en letras que indicarán el tipo de actividad, como A para Actividad sedentaria, B para Confort para dormir, C para Circulación interior, y D para Circulación exterior.

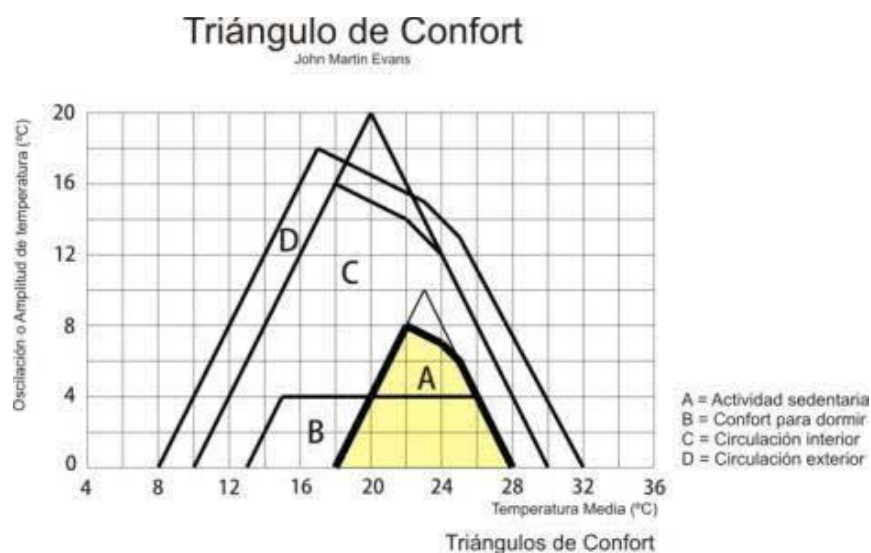


Figura 15. Triángulo de confort de Evans

Fuente: (Del Toro, 2018).

Las estrategias bioclimáticas que se aplicarían se basan en los números del 1 al 5, como se observan en la figura 16. Las combinaciones se expresan de la siguiente manera:

- 3 + 5 = Inercia térmica y ganancias solares.
- 3 + 2 = Inercia térmica y ventilación selectiva.
- 3 + 4 = Inercia térmica y ganancias internas.

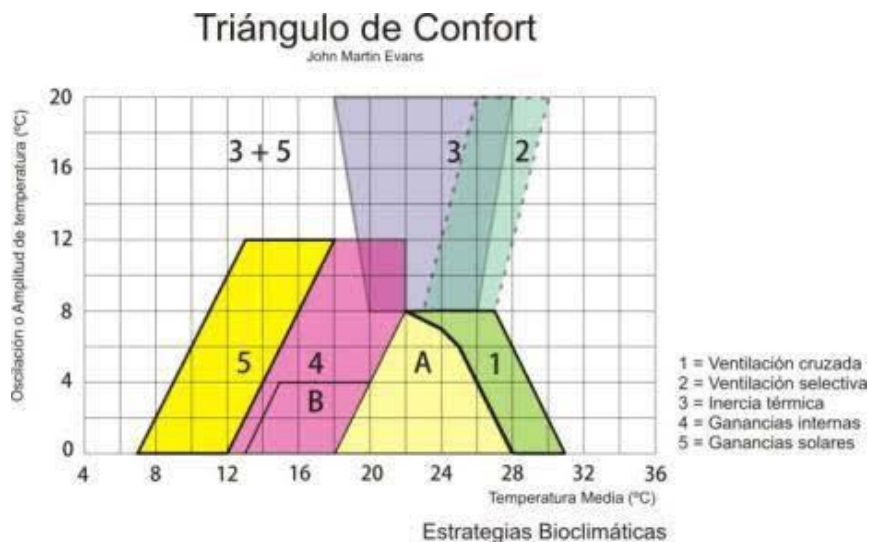


Figura 16. Diagrama de estrategias bioclimáticas.

Fuente: (Del Toro, 2018).

Según Martin Evans (2012) “algunas de las estrategias de diseño bioclimático propuestas requieren cambios significativos de temperatura para operar de manera efectiva:

1. **Ventilación Cruzada:** Utiliza diferencias de presión para generar corrientes de aire natural que refrescan y ventilan el interior del edificio, creando un ambiente confortable.
2. **Ventilación Selectiva:** Controla la ventilación según las necesidades térmicas, reduciéndola en épocas frías y aumentándola cuando las temperaturas son más confortables.
3. **Inercia Térmica:** Emplea materiales densos para minimizar las variaciones de temperatura interna, manteniendo un ambiente estable
4. **Ganancias Internas:** Aprovecha el calor generado por personas, equipos y luces para contribuir al confort térmico.
5. **Ganancias solares:** Diseña el edificio para captar energía solar, calentando espacios interiores, especialmente en climas fríos.” (p.7)

- Diagrama bioclimático de Olgyay

Fue desarrollado por los hermanos Victor y Aladar Olgyay en su libro de 1963 "Diseño bioclimático: la base científica del diseño arquitectónico". Se destaca como una

herramienta gráfica ampliamente reconocida y utilizada en el análisis bioclimático. Su funcionalidad reside en la capacidad para definir una "zona de confort", considerando variables como temperatura, humedad relativa del aire, radiación solar y velocidad del viento. Se puede observar la gráfica en la figura 17.

El diagrama bioclimático de Olgyay se basa en dos variables principales:

1. **Temperatura:** Se representa en el eje vertical (eje de las ordenadas, y). Corresponde a la temperatura seca del aire en grados Celsius (°C).
2. **Humedad:** Representada en el eje horizontal (eje de las abscisas, x) del diagrama. Se expresa en porcentaje (%).

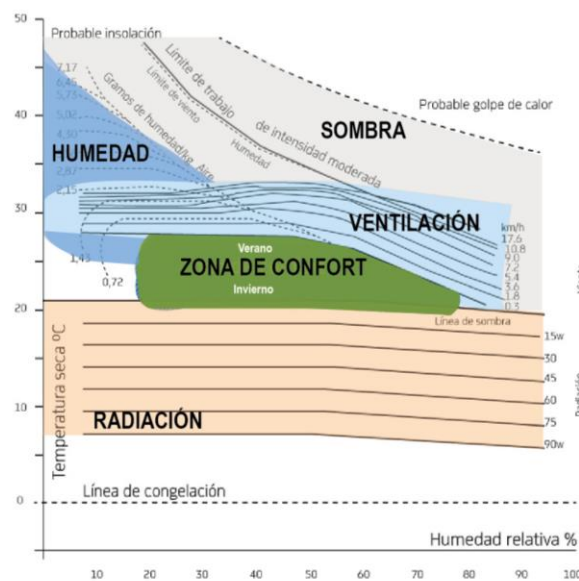


Figura 17. Diagrama bioclimático de Olgyay
Fuente: Hernández, 2014

Dentro de este diagrama se pueden distinguir:

Una zona de bienestar o confort de referencia para una persona en reposo con una temperatura ambiente entre 22°C y 27°C, y una humedad relativa entre el 20% y el 80%. Estos límites corresponden a una sensación térmica aceptable para la mayoría de las personas.

Los puntos situados por debajo de la zona de confort indican periodos de frío, por lo que es necesaria la radiación solar para alcanzar la confortabilidad. Los puntos situados por encima indican periodos de sobrecalentamiento y el bienestar requiere de la ventilación o enfriamiento evaporativo para regresar a la zona de confort.

También aparecen una serie de líneas, que representan las medidas correctoras que es preciso realizar en el caso de que las condiciones de temperatura y humedad salgan fuera de la zona de confort. Estas son:

- Radiación: Expresada en w/m^2 se sitúa en el límite inferior de la zona de confort y con ella se dibuja la línea de sombra o límite a partir del cual el confort se pierde como consecuencia del frío
- Humedad: Indica con líneas decrecientes la cantidad de humedad que se puede incluir para alcanzar el confort.
- Ventilación: Indica la necesidad de ventilación para mantener una temperatura adecuada, con líneas crecientes con la temperatura.
- Sombra: Representa la necesidad de sombreado para evitar el sobrecalentamiento.

Tablas de Mahoney

Fueron desarrolladas en 1969 y publicadas en 1971 por Mahoney y Evans. Estas tablas de diseño bioclimático ofrecen una serie de pautas para mejorar el confort térmico según las características meteorológicas de un lugar específico. Briceño (2018) destaca el proceso de análisis propuesto por Evans que comprende en cuatro etapas fundamentales:

- 1) evaluación de datos meteorológicos mensuales;
- 2) comparación de estos datos con límites o zonas de confort;
- 3) identificación de indicadores pertinentes; y
- 4) formulación de recomendaciones específicas para el diseño arquitectónico.

En la evaluación de datos climáticos se consideran parámetros como la temperatura y la humedad (máxima, media y mínima), la oscilación térmica y las precipitaciones durante todos los meses del año. Con esta información, se determina el grupo de confort, utilizando los criterios de la tabla 8, que clasifica los resultados del 1 al 4.

Tabla 8. Límites de confort según Mahoney

Humedad Media (%)	Grupo de Confort	Confort Día	Confort Noche	Confort Día	Confort Noche	Confort Día	Confort Noche
		TMA < 15°C		TMA = 15-20°C		TMA > 20°C	
0-30	1	21-30	12-21	23-32	14-23	26-34	23-32
30-50	2	20-27	12-20	22-30	14-22	25-31	22-30
50-70	3	19-26	12-19	21-28	14-21	23-29	21-28
70-100	4	18-24	12-18	20-25	14-20	22-27	20-25

*TMA = Temperatura media anual

Fuente: (Martin Evans, 2012)

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

Una vez identificado el grupo de confort, se determinan los requerimientos térmicos para el día y la noche, basándose en los límites de confort diurno y nocturno. Los valores se clasifican de la siguiente manera: C = caliente, F = frío, O = confort.

Luego, se establecen los indicadores para cada mes según las necesidades térmicas.

Estos indicadores son:

H1: Ventilación esencial

H2: Ventilación deseable

H3: Protección contra la lluvia

A1: Inercia térmica

A2: Espacios exteriores nocturnos

A3: Protección contra el frío

La sumatoria de estos parámetros se refleja en el número de indicadores, que varían del 1 al 6 en el orden de H1 a A3, según la tabla de índices que se muestra en la tabla 9. Con

base en esta información, se obtienen las recomendaciones: si la indicación está dentro del rango del recuadro, es recomendable; si no, no lo es.

Tabla 9. Índices de tabla del método de Mahoney

INDICADORES DE MAHONEY							no.	Recomendación
número de indicadores	1	2	3	4	5	6		
Distribución				0-10			1	Orientación Norte-Sur (eje largo E-O)
				11-12		5-12	2	Concepto de patio compacto
						0-4		
Espaciamiento	11-12						3	Configuración extendida para ventilar
	2-10						4	igual a 3, pero con protección de vientos
	0-1						5	Configuración compacta
Ventilación	3-12						6	Habitaciones de una galería -Ventilación constante -
	1-2			0-5			7	Habitaciones en doble galería - Ventilación Temporal -
				6-12			8	Ventilación NO requerida
	0	2-12						
Tamaño de las Aberturas					0		9	Grandes 50 - 80 %
					1-12		10	Medianas 30 - 50 %
				0-1				
				2-5			11	Pequeñas 20 - 30 %
				6-10			12	Muy Pequeñas 10 - 20 %
				11-12		0-3	13	Medianas 30 - 50 %
Posición de las Aberturas	3-12						14	En muros N y S. a la altura de los ocupantes en barlovento
	1-2			0-5			15	(N y S), a la altura de los ocupantes en barlovento, con aberturas también en los muros interiores
				6-12				
Protección de las Aberturas					0-2		16	Sombreado total y permanente
			2-12				17	Protección contra la lluvia
Muros y Pisos				0-2			18	Ligeros -Baja Capacidad-
				3-12			19	Masivos -Arriba de 8 h de retardo térmico
Techumbre	10-12			0-2			20	Ligeros, reflejantes, con cavidad
				3-12			21	Ligeros, bien aislados
				0-5				
	0-9			6-12			22	Masivos -Arriba de 8 h de retardo térmico
Espacios nocturnos				2-12			23	Espacios de uso nocturno al exterior
			3-12				24	Grandes drenajes pluviales

Fuente: (Martin Evans, 2012)

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

- Carta bioclimática de Givoni

En 1969, Givoni introduce una carta bioclimática que se enfoca en comprender y aprovechar las condiciones climáticas locales para mejorar el confort humano en espacios construidos. Estas cartas ofrecen una representación visual de las condiciones climáticas mediante dos ejes principales: en el eje de abscisas se muestran las temperaturas de bulbo seco, mientras que en el eje de ordenadas se representa la tensión parcial de vapor de agua en el aire (Givoni, 1994). Las líneas curvas en la carta,

denominadas psicométricas, ilustran la relación entre la temperatura y la humedad relativa del ambiente. Además, ofrecen directrices valiosas para el diseño de edificaciones, especialmente en la mejora del confort interior en entornos no climatizados mecánicamente, al definir con claridad la "zona de confort", como se ilustra en la gráfica 18.

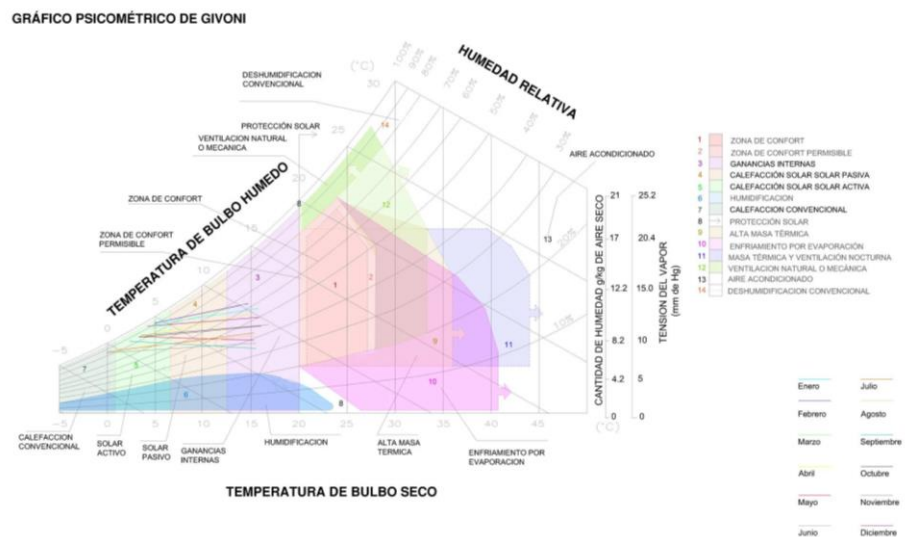


Figura 18. Método gráfico de zona de confort: rango aceptable de temperatura operativa y humedad.

Fuente: (ASHRAE, 2017)

El diagrama psicrométrico de Givoni muestra cómo las condiciones de confort térmico varían según la temperatura del bulbo seco y la humedad relativa, ayudando a seleccionar estrategias bioclimáticas adecuadas. Los ejes representan la temperatura y la humedad relativa, con áreas sombreadas indicando zonas de confort y confort permisible. Diferentes estrategias, como ganancias internas, calefacción solar, humidificación, protección solar, alta masa térmica, enfriamiento por evaporación, ventilación y aire acondicionado, están identificadas para diferentes combinaciones de temperatura y humedad (Givoni, 1992). Las líneas de colores corresponden a los meses del año, mostrando cómo las condiciones climáticas cambian a lo largo del tiempo y qué medidas son más efectivas en cada periodo para mantener el confort en los edificios.

2.2.3 Estrategias de diseño

La arquitectura bioclimática se basa en una serie de estrategias que aborden las necesidades específicas en diferentes aspectos de un proyecto. Según Gonzalo (2019), el diseño arquitectónico no solo se centra en la estética y la funcionalidad, sino que también considera el bienestar humano y la sostenibilidad ambiental. Estrategias como la climatización eficiente, la iluminación adecuada, el control del ruido y la minimización de contaminantes son elementos fundamentales para crear espacios habitables y respetuosos con el entorno, como señalan Conforme & Castro (2020) . Estas prácticas buscan mejorar la calidad de vida de los ocupantes y reducir el impacto ambiental de las construcciones. Se resume en la siguiente tabla:

Tabla 10. Estrategias de diseño bioclimático

Aspecto	Definición	Elementos o acciones
Climatización	Estudio y selección de técnicas para lograr condiciones térmicas agradables en un espacio.	- Inercia o masividad: Aprovechar la capacidad de materiales para almacenar y liberar calor lentamente.
		- Ventilación: Renovación del aire interior mediante aberturas naturales o sistemas mecánicos.
		- Calentamiento o enfriamiento: estrategias de diseño arquitectónico y prácticas de construcción que aprovechan las condiciones naturales del entorno para regular la temperatura interior de un edificio.
		- Humidificación o deshumidificación: Control de la humedad ambiental para lograr el confort térmico.

Iluminación	Diseño de espacios con luz natural y artificial adecuada para el uso previsto.	- Luz natural: Aprovechamiento al máximo de la luz natural mediante aberturas y diseño espacial. - Luz artificial: Complemento a la luz natural, utilizada de manera eficiente para crear ambientes funcionales.
Acústica	Creación de espacios con un nivel de ruido adecuado para el uso previsto.	- Control de ruidos: Reducción del ruido mediante materiales absorbentes, diseño espacial y aislamiento acústico.
Control de contaminantes	Minimización de la presencia de contaminantes en el aire, suelo, agua y ambiente electromagnético.	- Aire: Ventilación adecuada, selección de materiales no tóxicos y prácticas para reducir la generación de residuos. - Suelo: Selección de materiales y prácticas para evitar la contaminación del suelo. - Agua: Uso eficiente del agua, tratamiento de aguas residuales y prevención de la contaminación hídrica. - Electromagnética: Reducción de la exposición a campos electromagnéticos mediante diseño y selección de materiales.

Fuente: (Conforme & Castro, 2020)
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

2.2.4 Conceptos de diseño bioclimático

Son representaciones verbales o visuales de ideas o pensamientos, que pueden abordar aspectos arquitectónicos, espaciales o de detalle para resolver problemas identificados previamente. La formulación de conceptos arquitectónicos es una parte esencial de la

metodología de diseño, y en este contexto se presentan específicamente los relacionados con el enfoque bioclimático:

Sistemas activos

Se enfatiza la necesidad de utilizar de manera eficiente una variedad de sistemas que combinan energía natural con dispositivos mecánicos o eléctricos complementarios (Gonzalo, 2019). Estos sistemas activos son esenciales cuando los métodos pasivos no son suficientes para controlar el ambiente de manera óptima, especialmente cuando se busca maximizar el uso de energía y recursos.

Sistemas pasivos

“Son los sistemas utilizados dentro del diseño arquitectónico de una edificación con el fin de conseguir el confort climático de los usuarios sin tener que recurrir a la energía eléctrica sino al otro tipo de energías, las conocidas como energías limpias y renovables: energía solar, eólica, y sistemas de ventilación natural y dispositivos de protección solar” (Barranco, 2015, p. 34).

2.3 Estrategias de aprovechamiento y protección según el clima

La elaboración de diagramas climáticos brinda una base para comprender las condiciones climáticas que se debe considerar al momento de diseñar un proyecto. A partir de esta comprensión, podemos avanzar en la definición de estrategias de diseño específicas, tomando en cuenta las características climáticas del sitio. Para ello, se establecen criterios básicos acorde al tipo de clima que guíen la selección de estas estrategias: Clima cálido húmedo, cálido seco, templado y frío, como se muestra en la figura 19.

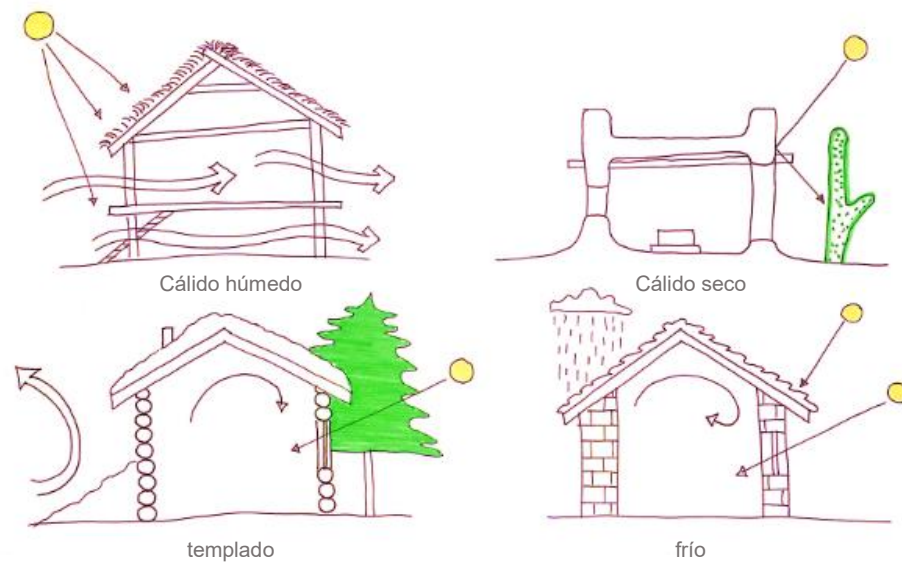


Figura 19. Arquitectura según el tipo de clima.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

Para ello, es necesario establecer criterios básicos acorde al tipo de clima que guíen la selección de estas estrategias:

Climas cálido-húmedos: Se emplean estrategias específicas para mitigar los efectos de alta humedad y precipitaciones. Esto incluye el uso de envolventes permeables para ventilación y evitar la acumulación de humedad, techos inclinados para el drenaje del agua de lluvia y la separación de edificaciones para promover el flujo de aire. Es crucial proteger las estructuras del suelo de la humedad con barreras adecuadas y sistemas de drenaje. Un ejemplo de esto se observa en la Finca Casa Grande en Chiapas, México, como se muestra en la figura 20.



Figura 20. Casa Grande en Chiapas, Mexico. Arquitectura en clima cálido.
Fuente: (Gómez,2022)

Climas cálido-secos: Aquí es importante protegerse del sol radiante y aislarse del calor. Un proyecto que ejemplifica este enfoque es la Residencia Logan de Jones Studio en Arizona (figura 23), donde se utiliza la inercia térmica del adobe y el hormigón para reducir la ganancia de calor, además de implementar protecciones solares contra la radiación.

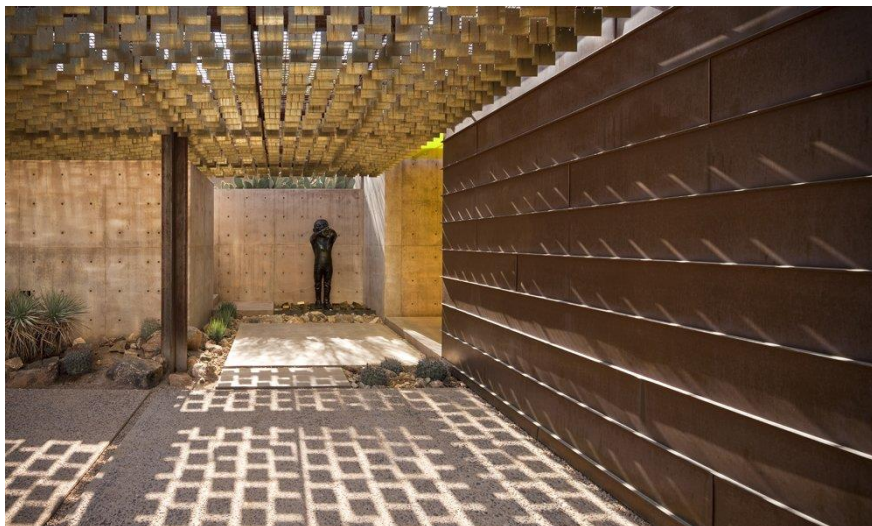


Figura 21. Residencia Logan de Jones Studio en clima cálido seco.
Fuente: (Archdaily,2010)

Climas templados: Se aprovecha la radiación solar y se mantienen temperaturas estables en edificaciones. Estrategias incluyen orientación adecuada de ventanas para

luz solar, muros gruesos para inercia térmica, techos inclinados para drenaje y sistemas de aislamiento para evitar el frío del suelo. Estas medidas crean espacios confortables y energéticamente eficientes.

Climas fríos: En estos climas, el enfoque principal será en el aislamiento y el cierre para retener el calor. Un ejemplo son los cerramientos herméticos utilizados en la arquitectura vernácula de los Himalayas o los iglús, típicos de climas de tundra.

Es importante destacar la relevancia del diseño bioclimático según lo establecido en la regla 27 del libro “101 reglas básicas para edificios y ciudades sostenibles”, que subraya la premisa de "pensar primero en la envolvente". Esto implica considerar tanto la envolvente térmica opaca como la transparente, junto con otros sistemas pasivos destinados al control climático.

Estos sistemas pasivos pueden ser categorizados según Gonzalo (2019) de la siguiente manera:

1. **Sistemas captadores:** Estos sistemas se encargan de absorber la radiación solar y transferirla al interior en forma de calor, pudiendo ser directos, semidirectos, indirectos e independientes.
2. **Sistemas de inercia:** Estos sistemas se refieren a la capacidad de ciertos materiales para absorber calor en un extremo y liberarlo gradualmente en otro. Pueden ser subterráneos, de alta inercia térmica al interior o al exterior mediante muros.
3. **Sistemas de ventilación y tratamiento de aire:** Estos sistemas pueden ser generadores de aire o sistemas de tratamiento para mejorar la calidad del aire interior.

4. Sistemas de protección de la radiación: Estos sistemas se dividen en dos tipos: umbráculos, que proporcionan sombra, y protectores de la piel, que protegen la envolvente del edificio.

A pesar de la diversidad de climas en el mundo, es crucial desarrollar estrategias adaptativas específicas para cada zona climática, considerando las variaciones estacionales extremas (González, 2018). Estas estrategias se centran en gestionar los flujos térmicos dentro de las edificaciones, requiriendo comprensión y aplicación de los mecanismos de transferencia de calor. Dichas estrategias se clasifican según las condiciones de frío (invierno) o calor (verano), como se muestra en la figura 22.

			Conducción	Convección	Radiación	Evaporación
Estrategias de diseño	Invierno	Promover ganancias	Promover ganancias con la tierra		Promover ganancia solar	
		Evitar pérdidas	Minimizar pérdidas por conducción	Minimizar flujo de aire exterior		
				Minimizar infiltración		
	Verano	Evitar ganancias	Minimizar ganancias por conducción	Minimizar infiltración	Minimizar ganancias solar	
		Promover pérdidas	Promover enfriamiento hacia la tierra	Promover enfriamiento convectivo	Promover enfriamiento radiativo	Promover enfriamiento evaporativo
		Fuentes de calor		Aire	Sol	
		Pozos térmicos	Tierra	Aire	cielo	Aire

Figura 22. Matriz de mecanismos de transferencia de calor según estación.

Fuente: (González, 2018)

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

2.3.1 Estrategias de diseño bioclimático para condiciones de frío

En condiciones frías o de invierno, cuando las temperaturas alrededor de la edificación son más bajas, las estrategias pasivas a implementar deben aprovechar la energía solar como la principal fuente gratuita para calentar el espacio. Esto implica el uso de sistemas de captación, acumulación y distribución de calor solar (Conforme & Castro, 2020).

2.3.1.1 Sistemas captadores

Los sistemas de captación pasivos aprovechan los mecanismos naturales de radiación y convección para regular la temperatura y la iluminación dentro de un edificio. La efectividad de estos sistemas depende en gran medida de la orientación de la edificación y de sus aberturas para aprovechar al máximo la energía solar y la circulación del aire (González, 2018). Estos sistemas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Captación directa**

La captación de calor se produce a través de aberturas acristaladas como ventanas o lucernarios, aprovechando directamente la radiación solar para calentar el interior de la edificación (ver figura 23).

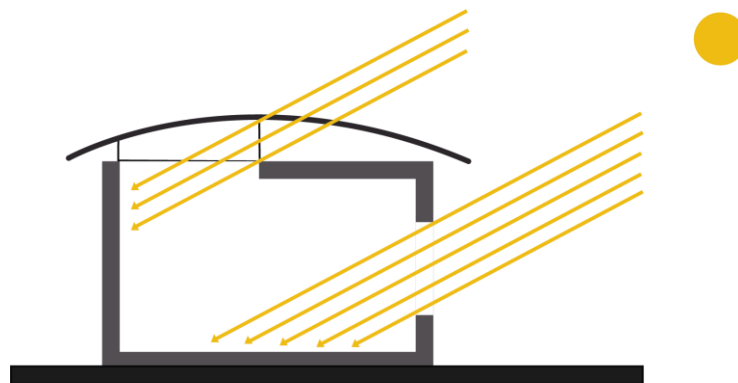


Figura 23. Esquema de captación directa por ventana y lucernarios

Fuente: (González, 2018)

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

- **Captación indirecta**

Se produce principalmente a través de la conducción, utilizando la envolvente opaca del edificio. En este proceso, los elementos arquitectónicos como paredes o cubiertas (ver figura 27) absorben el calor solar y lo transfieren gradualmente al interior.

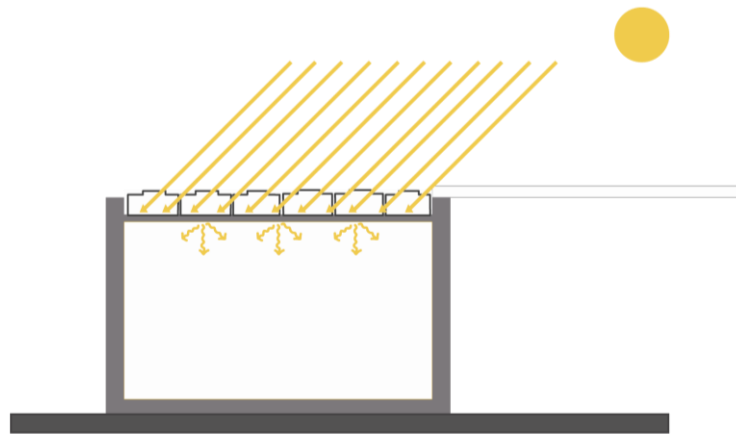


Figura 24. Esquema de captación indirecta con cubierta de agua
Fuente: (González, 2018)
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

- **Captación semidirecta**

Combina la radiación y la conducción para introducir calor en la edificación. Incluye un elemento intermedio entre el captador y la estructura principal, que captura el calor solar. Este elemento puede aislarse de la estructura mediante aberturas en la parte superior

e inferior, como se aprecia en la figura 25. Esto permite regular la cantidad de energía captada según la temporada o las condiciones diarias.

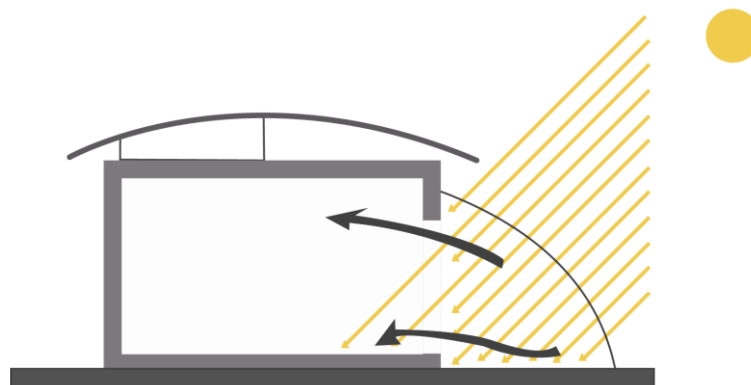


Figura 25. Esquema de captación semidirecta con invernadero
Fuente: (González, 2018)
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

2.3.2 Estrategias de diseño bioclimático para condiciones de calor

Las estrategias de diseño bioclimático para condiciones de calor se centran en minimizar la ganancia de calor en el interior de los edificios y mantener un ambiente fresco y confortable utilizando principalmente recursos naturales (Conforme & Castro, 2020). Algunas de estas estrategias incluyen:

2.3.2.1 Sistema de protección contra la radiación

En regiones con condiciones climáticas cálidas, los sistemas de protección contra la radiación solar son esenciales para garantizar el confort y la habitabilidad de los espacios interiores. La radiación solar directa puede provocar un aumento significativo de la temperatura en el interior de los edificios, lo que puede resultar en ambientes sofocantes e incómodos para los ocupantes (Conforme & Castro, 2020). Los sistemas de protección contra la radiación, aunque previamente categorizados como umbráculos o protectores de la piel, se abordan de manera más detallada para una mejor comprensión:

1. Diseño de aberturas:

La ubicación estratégica de las aberturas, como ventanas y puertas, es fundamental para controlar la entrada de luz y calor en los espacios interiores. Una adecuada orientación y dimensionamiento de las aberturas permite aprovechar la luz natural durante el día y minimizar la ganancia de calor durante las horas de mayor insolación (Fuentes, 2022). Tomando en cuenta algunas consideraciones para el diseño de aberturas:

Orientación: Es recomendable situar el edificio con su eje mayor en dirección Este-Oeste para maximizar la exposición al sol y permitir la entrada de radiación solar en invierno (ver figura 26). Además, esto facilita la exclusión de dicha energía mediante parasoles de diseño y construcción simples. “En climas cálidos, se recomienda plantear protecciones

solares en las orientaciones Este y Oeste, tales como galerías, pérgolas, árboles, toldos, etc” (Gonzalo et al., 2000 citado en Gonzalo, 2015).

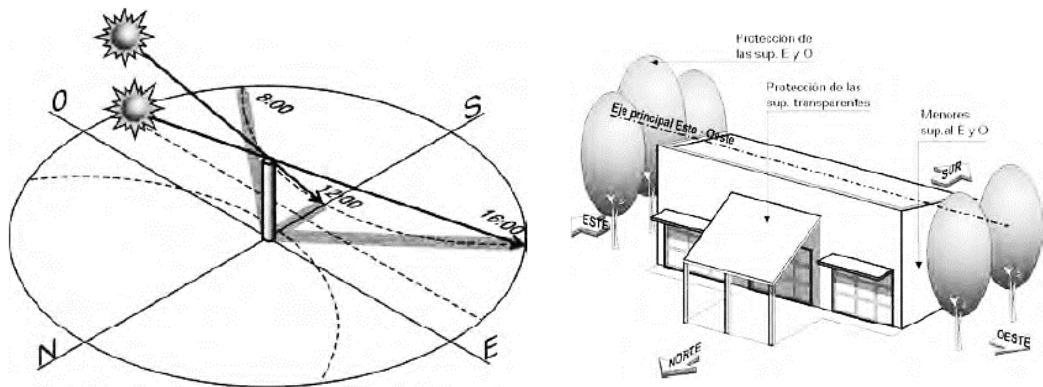


Figura 26. Forma y orientación de un edificio.
Fuente: (Gonzalo, 2015)

Dimensionamiento: El tamaño de las aberturas debe ser proporcional al volumen del espacio interior y a las necesidades de iluminación natural. Aberturas excesivamente grandes pueden aumentar la ganancia de calor, mientras que aberturas demasiado pequeñas pueden limitar la iluminación natural. Además, el dimensionamiento de las aberturas influye en la velocidad del aire interior; como se observa en la figura 27, aberturas bien dimensionadas pueden mejorar la ventilación natural y mantener un flujo de aire adecuado, contribuyendo al confort térmico y a la calidad del aire interior (Gonzalo, 2015).

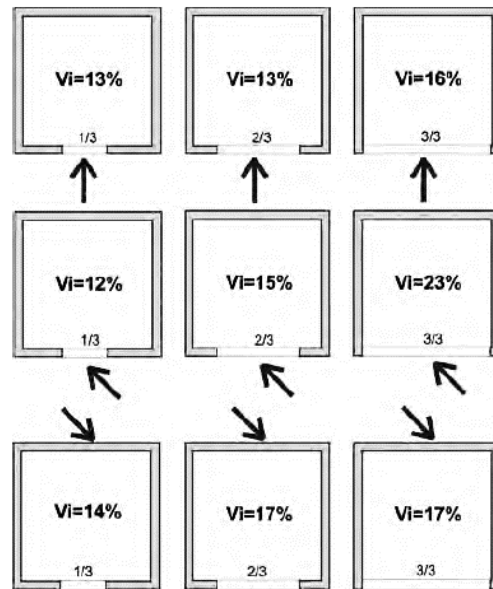


Figura 27. Influencia de la velocidad del aire según el dimensionamiento de aberturas.
Fuente: (Gonzalo, 2015)

Protección solar: La incorporación de elementos de protección solar, como toldos, persianas o aleros, como se muestra en la figura 28, es crucial para reducir la entrada de radiación solar directa. Estos elementos deben diseñarse estratégicamente para permitir la entrada de luz natural difusa y proteger las aberturas durante las horas de mayor insolación (Gonzalo, 2015).

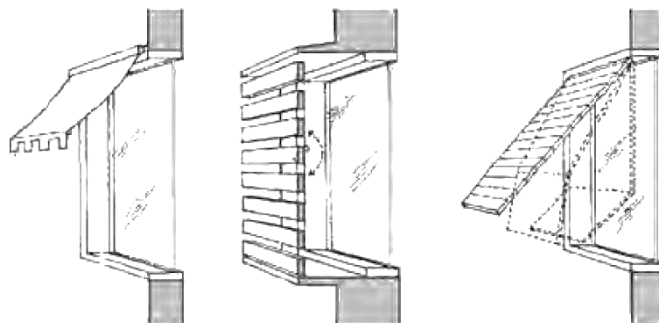


Figura 28. Protecciones externas con elementos móviles.
 Persianas y toldos
Fuente: (Gonzalo, 2015)

1.3.2.2 Sistemas de ventilación y tratamiento de aire:

La ventilación natural y el tratamiento adecuado del aire son aspectos clave para mantener un ambiente fresco y saludable en climas cálidos (Fuentes, 2022). La ventilación natural permite renovar el aire interior y eliminar el calor acumulado, mientras que el tratamiento del aire puede incluir humidificación, refrigeración o deshumidificación según las condiciones climáticas específicas.

Sistemas generadores de movimiento de aire:

Ventilación natural: Aprovechar las corrientes de aire naturales para renovar el aire interior mediante la disposición estratégica de aberturas en diferentes fachadas del edificio. El sistema de ventilación cruzada es el mecanismo termorregulador más recomendado en climas cálido-húmedo (González, 2018).

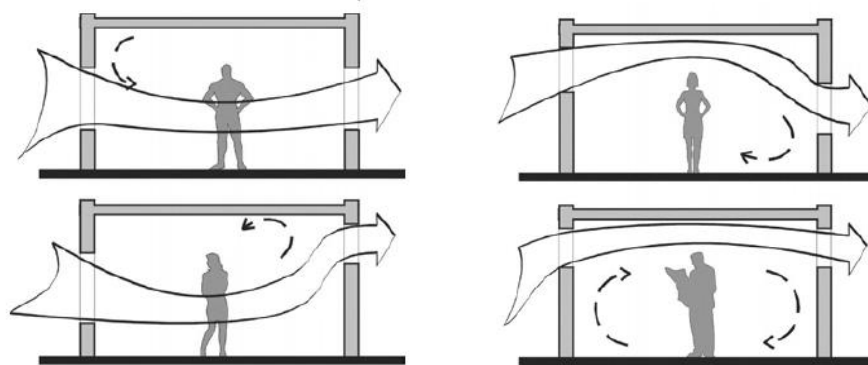


Figura 29. Sistemas de ventilación natural
Fuente: (Gonzalo, 2015)

Ventilación mecánica: Utilizar sistemas de ventilación mecánica, como ventiladores o extractores de aire, para forzar la circulación del aire y renovar el aire interior (González, 2018).

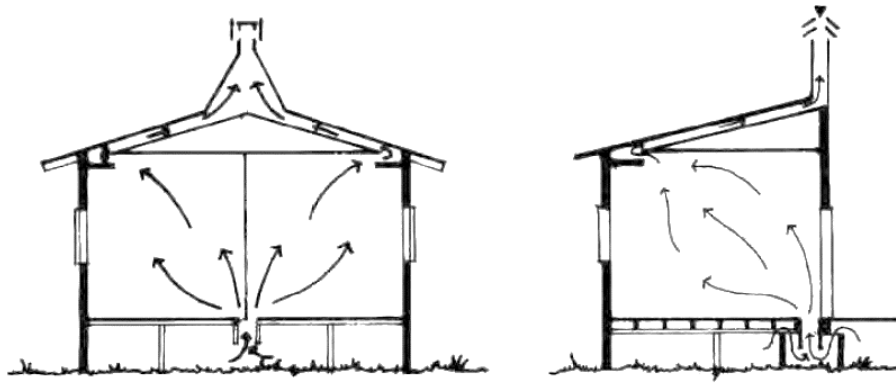


Figura 30. Vivienda ventilada por chimenea solar
Fuente: (Gonzalo, 2015)

Sistemas con tratamiento de aire:

Humidificación: En climas secos, la humidificación del aire interior puede mejorar la sensación de confort térmico, ya que el aire húmedo absorbe más calor del cuerpo humano (Gonzalo, 2019).

Deshumidificación: En climas húmedos, la deshumidificación del aire interior puede mejorar la sensación de confort térmico y reducir la sensación de agobio (Gonzalo, 2019).

Refrigeración: Implementar sistemas de refrigeración, como aire acondicionado o enfriadores evaporativos, para reducir la temperatura del aire interior durante las horas más calurosas del día como se observa en la figura 31 (González, 2018).

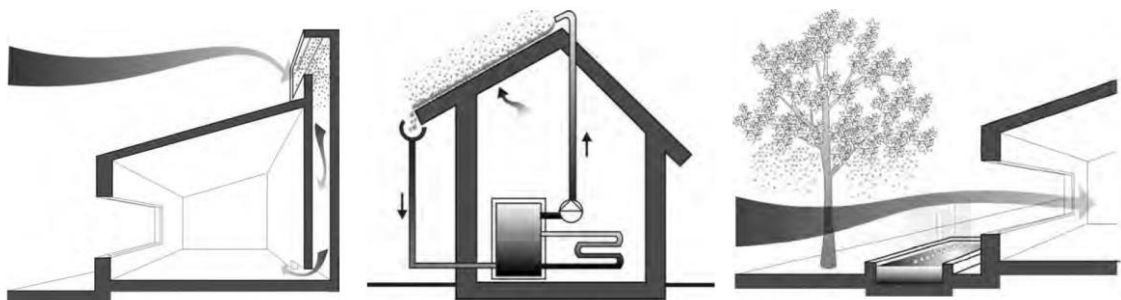


Figura 31. Sistema de enfriamiento evaporativo. 1.-Torre evaporativa, 2.-Evaporativo indirecto con colector de derrame, 3.-Evaporativo directo
Fuente: (Gonzalo, 2015)

Las estrategias de enfriamiento también pueden incluir el uso de aislamiento térmico para minimizar las ganancias de calor y la pérdida de frío, así como el monitoreo y control de las condiciones ambientales para optimizar el rendimiento. Estas estrategias de enfriamiento pasivo ayudan a evitar que las edificaciones se sobrecalienten a través de un sistema de bloqueo de las ganancias de la energía solar y eliminar las ganancias de calor interno. Para ello, de acuerdo con Saravia (2018) se puede emplear aire más frío para ventilación o el almacenamiento de exceso de calor en masa térmica, por otro lado, señala que los elementos que aportan como estrategias del enfriamiento pasivo son:

- Sombra externa fija / operable
- Masa térmica
- Relación de área de ventana a pared baja (S / W)
- Ventilación pasiva
- Enfriamiento nocturno
- Ventanas apiladas
- Enfriamiento por evaporación pasiva.
- Conductos de templado de la tierra (Frigerio et al., 2018)

2.4 Elementos constructivos que componen la envolvente de la vivienda

Son los componentes básicos que conforman un edificio, tanto en su estructura como en su estética (Cruz, 2017). Estos elementos incluyen paredes, techos, pisos y otros componentes del edificio que interactúan con el ambiente exterior como se ilustra en la figura 32. López (2003) menciona que cada uno proporciona un aislamiento frente al ambiente exterior. Dependiendo del clima deberá dar una u otras prestaciones.

❖ Ventanas y puertas

Elementos más vulnerables en la relación con el exterior. Sin embargo, su transparencia o traslucidez energética los convierte en puntos importantes. Por ello, es fundamental seleccionarlos y tratarlos cuidadosamente en cada caso.

❖ Cubiertas

Son el siguiente elemento de mayor importancia en la jerarquía de la envolvente de la edificación, ya que están directamente expuestas a la radiación solar.

❖ Pisos, entrepisos, muros, galerías, y accesorios

Funcionan como reguladores del clima en los diferentes espacios del edificio. Permiten matizar el comportamiento de muros, cubiertas y otros elementos, posibilitando un mayor control del confort.

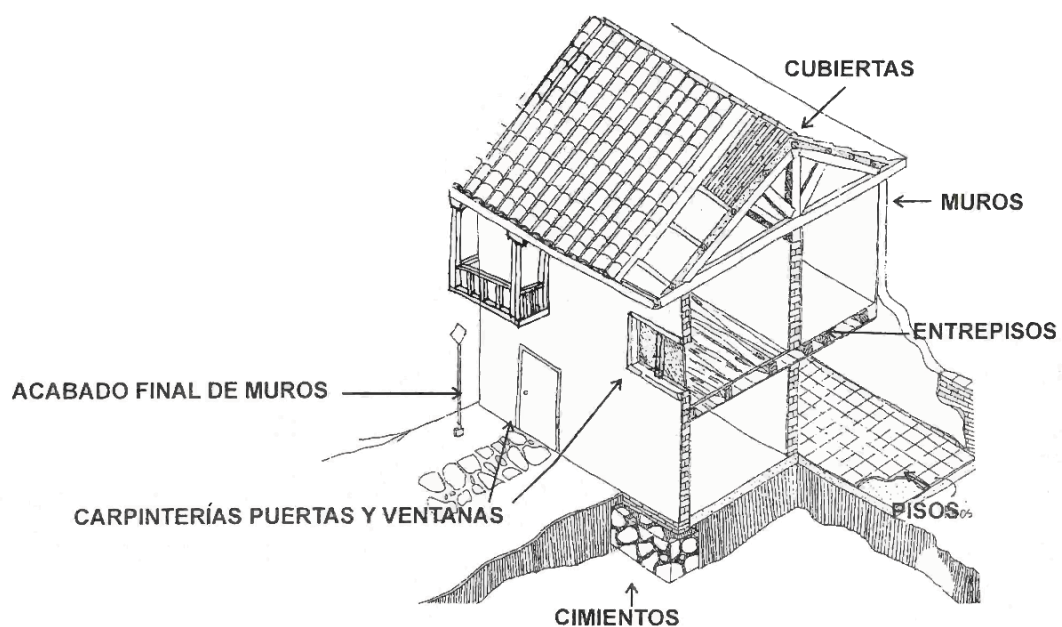


Figura 32. Elementos constructivos de una vivienda
Nota. Isometría de Elementos constructivos de una vivienda.
Fuente: (SENA, 2012)

Al considerar estrategias de diseño bioclimático para condiciones de calor, se debe prestar especial atención a la cubierta, que cumple la función de protección del edificio y transferencia de calor. Por ende, el estudio de los demás elementos constructivos, se vuelve crucial para comprender su comportamiento. La inclusión de materiales aislantes térmicos en estas estructuras, según señala Cruz (2017), puede contribuir de manera significativa a mantener una temperatura interna adecuada. Este enfoque no solo busca identificar posibles mejoras en su diseño y composición, sino también aspira a contribuir significativamente a la eficiencia energética y al confort térmico de los espacios interiores.

2.4.1 Cubierta

Se coloca sobre un objeto o estructura que cumple diversas funciones como la protección ante inclemencias climáticas, impermeabilización y aislamiento térmico. La Real Academia Española (2023) la define como la "parte exterior de la techumbre de un edificio" que tiene su origen del latín "coopertus". Esta definición se refiere a la estructura o capa superior de un edificio que cubre y protege la parte superior de la construcción, proporcionando resguardo contra la lluvia, el viento, la radiación solar y otros elementos externos. Las cubiertas, como se ilustra en la figura 33, son componentes fundamentales en la construcción de edificios, y existen diversos tipos adaptados a distintas necesidades y estilos arquitectónicos.



Figura 33. Tipologías de cubiertas

Fuente: (Souza, 2020)

2.4.2 Materialidad en cubiertas

La elección de la materialidad en las cubiertas desempeña un papel fundamental en el diseño arquitectónico y la funcionalidad de los edificios. Los diversos materiales utilizados, como tejas, chapa metálica, membranas impermeabilizantes, vidrio, entre otros, ofrecen diferentes características y beneficios (Carrillo, 2020).

En América Latina, los materiales más utilizados en cubiertas varían según la disponibilidad local, el clima y las preferencias regionales. Según Souza (2020), algunos de los materiales más comunes son:

Tejas de arcilla: Son populares debido a su durabilidad, resistencia a la intemperie y estética tradicional. Se utilizan en cubiertas inclinadas y están disponibles en una variedad de colores y estilos.

Tejas de cemento: Similar a las tejas de arcilla, las tejas de cemento son una opción duradera y resistente. Son más económicas que las tejas de arcilla y vienen en una variedad de acabados que imitan la apariencia de otros materiales, como la madera o el metal.

Chapa metálica: Los materiales como el acero galvanizado o el aluminio, son comunes en áreas urbanas y rurales debido a su resistencia, bajo costo y facilidad de instalación. Se utilizan en cubiertas inclinadas y planas, y están disponibles en una variedad de colores y acabados.

Concreto: Es un material duradero y resistente que se utiliza en cubiertas planas y ligeramente inclinadas. Puede ser prefabricado o construido in situ y se puede dejar expuesto o cubierto con otros materiales para mejorar su estética.

Membranas impermeabilizantes: Son utilizadas en cubiertas planas para crear una barrera contra la humedad. Son flexibles, fáciles de instalar y ofrecen una protección duradera contra las filtraciones de agua.

Las pendientes más comunes en nuestro entorno son: entre 20 y 27% para cubiertas de zinc y tejas de fibrocemento, entre 30 y 60% para varios tipos de tejas de barro, y entre 50 y 80% para techos de paja o palma (Escobar, 2018). Una pendiente del 20% indica que, por cada metro lineal de techo, la elevación es de 20 centímetros; por lo tanto, si la longitud es de 2 metros, la elevación será de 40 centímetros.

2.4.3 Cubierta metálica

Los orígenes de las cubiertas metálicas se remontan a la década de 1860, época de gran auge industrial. A principios del siglo XX, estas chapas ya eran populares en el continente europeo, especialmente en las colonias de las Antillas, donde dieron lugar al estilo arquitectónico anglo-antillano (Díaz, 2012). Este contexto histórico marcó su presencia en la construcción de la época.

En la actualidad, las cubiertas metálicas se han convertido en elementos fundamentales de la construcción moderna. Compuestas principalmente por láminas onduladas de metal con recubrimiento de zinc o aluminio (Ortiz et al., 2021), cumplen con las normas NTC 4011 y ASTM A653 (Galvanizado). Su uso se ha expandido rápidamente, encontrando cabida en una amplia gama de edificaciones, desde instalaciones industriales y comerciales hasta viviendas residenciales. Su versatilidad y adaptabilidad a diversos entornos constructivos las convierten en una opción cada vez más popular.

Por otro lado, la introducción del techo de zinc en la vivienda ecuatoriana ha sido un hecho significativo que ha dejado una marca distintiva en el paisaje arquitectónico. Originándose su uso décadas atrás como una alternativa accesible y resistente para reemplazar techos tradicionales de paja o caña, esta elección se ha consolidado con el tiempo como una opción confiable y versátil (Cruz, 2017). La adaptabilidad del techo de zinc a diferentes estilos y necesidades constructivas ha contribuido a su perdurabilidad y aceptación en la arquitectura vernácula ecuatoriana.

Se han realizado numerosos estudios sobre las cubiertas metálicas, abordando aspectos como su rendimiento térmico, resistencia a la corrosión, comportamiento acústico y sostenibilidad. Por ejemplo, investigaciones realizadas por Behzadi et al. (2016) analizan el efecto del espesor y el tipo de revestimiento de las láminas metálicas en el comportamiento térmico de las cubiertas, encontrando que ciertos revestimientos pueden mejorar la eficiencia energética al reducir la transferencia de calor.

2.4.4 Transferencia de calor de la cubierta metálica

Es un fenómeno importante a considerar sobre las cubiertas, ya que puede afectar significativamente el confort térmico interior y el consumo energético de las viviendas. El calor se transfiere a través de las cubiertas principalmente por tres mecanismos: conducción, convección y radiación (Labastid et al., 2018). La magnitud de los flujos de calor depende de los factores climáticos de cada región y de las características morfológicas y materiales de la cubierta. Torres (2018) divide los flujos de calor que afectan el comportamiento térmico de la cubierta en tres capas: en la superficie exterior, la radiación solar, la radiación de onda larga y la convección; en la capa intermedia, la conducción; y en la capa interior, la radiación de onda larga y la convección (ver Figura 34).

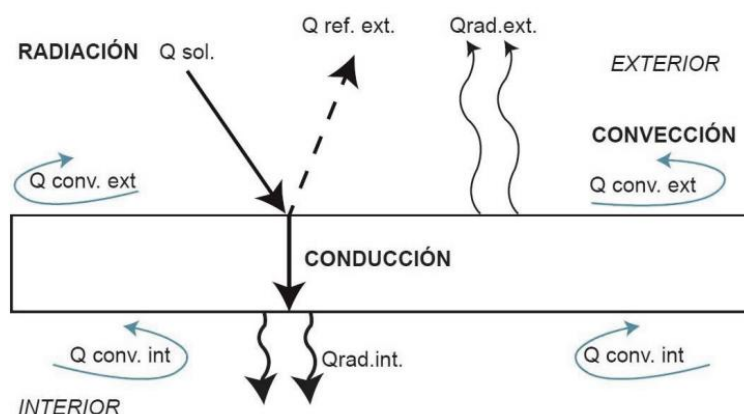


Figura 34. Transferencia de calor en cubiertas externo al interior.

Fuente: (Cruz, 2017)

- **Por convección**

Es el movimiento del calor a través de un fluido, como el aire o el agua (Castillo, 2022). Se clasifica en: natural y forzada, esta última cuando causada por agentes externos. La convección depende de la velocidad y la temperatura del aire; a mayor velocidad del aire, mayor será el intercambio de calor. El aire caliente tiende a ascender y ser reemplazado por aire más fresco, creando corrientes convectivas (Cruz, 2017).

En un cerramiento expuesto al aire, el calor se transfiere principalmente por conducción a través del material. Cuando el calor llega a la superficie del material y se encuentra con

cambios de temperatura, puede generar movimientos ascendentes o descendentes en el flujo de calor. Estos movimientos se representan mediante resistencias térmicas superficiales exteriores e interiores (R_{se} y R_{si}). La unidad de estas resistencias es $W/m^2 \cdot ^\circ C$ y sus valores varían según la configuración del cerramiento y la dirección del flujo de calor (Castillo, 2022). Se detalla en la figura 35.

Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor		Situación del cerramiento			
		Separa con el exterior		Separa con espacio no habitable	
		R_{se}	R_{si}	R_{se}	R_{si}
Cerramientos verticales con pendiente con la horizontal $> 60^\circ$ y flujo horizontal		0,06	0,13	0,13	0,13
Cerramientos horizontales o con pendiente $\leq 60^\circ$ con la horizontal y flujo ascendente		0,05	0,10	0,10	0,10
Cerramientos horizontales y flujo descendente		0,05	0,17	0,17	0,17

Figura 35. Valores de resistencia térmica superficial según Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79.

Fuente: (Díaz, 2012)

- **Por conducción**

En el caso de las cubiertas, la conducción es el proceso que influye en el comportamiento térmico dentro del espacio interior. La conductividad térmica (λ) y la resistencia térmica (R) del material de la cubierta son características clave que establecerán las temperaturas tanto de las superficies de la cubierta como del aire en el interior (Castillo, 2022). Según Díaz (2012), la conductividad térmica puede variar significativamente, desde $0,03 W/m^\circ C$ en materiales aislantes hasta $400 W/m^\circ C$ en metales, los cuales son excelentes conductores de calor (tabla 11).

Tabla 11. Conductividades térmicas de materiales según NEC-HS-EE

Material	Conductividad térmica [$W/(m \cdot k)$]
zinc	110
Hormigón	1,63-2,74
Agua	0,60 (líquida) - 2.50 (hielo)
Mortero de cemento	0,35 - 1,40
Ladrillo macizo	0,72-0,90

Bloques de hormigón	0,35- 0,79
Ladrillo hueco	0,49 - 0,76
Enlucidos de yeso	0,26 - 0,30
maderas, tableros	0,10 - 0,21
Aislamientos	0,026 - 0,050
vidrio simple (3mm)	0,9
Aires (sin convección)	0,026

Fuente: (NEC, 2018)

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

La resistencia térmica (m^2K/W), inversa de la conductividad térmica, es la medida de la capacidad de un material para resistir el paso del calor (Castillo, 2022). Esta resistencia es determinada por las resistencias térmicas superficiales exterior e interior, así como por las resistencias térmicas de las capas del material. Cuanto mayor sea la resistencia térmica, mejor será el aislamiento térmico del material.

$$Rt = \frac{1}{h_{ext}} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_{int}}$$

Ecuación 2. Formula de resistencia térmica

Fuente: (Castillo, 2022)

Rt es la resistencia térmica total del material (en K/W)

h_ext es el coeficiente de transferencia de calor externo (en $W/m^2 K$)

e es el espesor del material (en metros)

λ es la conductividad térmica del material (en W/mK)

h_int es el coeficiente de transferencia de calor interno (en $W/m^2 K$)

Por otro lado, la transmitancia térmica (U), medida en $W/m^2 \cdot ^\circ C$, es el inverso de la resistencia térmica. Se cuantifica la cantidad de calor que atraviesa una unidad de superficie de un material por unidad de tiempo y diferencia de temperatura entre sus caras interior y exterior ($U = 1 / Rt$). Una menor transmitancia térmica indica una estructura mejor aislada, con una menor transmisión de calor por conducción (Díaz, 2012).

- **Por radiación**

La energía se transporta entre superficies mediante ondas electromagnéticas, independientemente de la temperatura del aire. Las ganancias de calor por radiación provienen de la absorción de ondas cortas (del sol o alumbrado) y largas (de superficies circundantes). La cubierta recibe más radiación que los cerramientos laterales, destacando su importancia en la transferencia de calor. Las propiedades térmicas de esta superficie establecerán la cantidad de radiación que emita (emisividad) y la fracción de radiación incidente que absorba el material (absortancia). Esta última dependerá del color y acabado del material (Cruz, 2017).

La emisividad es la capacidad de un material para liberar calor en forma de energía infrarroja (Díaz, 2012). Cuanto más caliente es un objeto, más energía infrarroja emite. La emisividad varía de 0 (reflección perfecta) a 1 (emisión perfecta). Superficies orgánicas y pintadas tienen emisividad cercana a 0.90, mientras que los metales, con menor capacidad de liberar calor, tienen valores entre 0 y 0.30, siendo aún menores en superficies metálicas pulidas (O. Díaz, 2012). En la figura 36 se puede observar los materiales en cubiertas más comunes en la construcción.

MATERIAL	PROPIEDADES TÉRMICAS	
	Emisividad (ε)	Absortancia (α)
Hormigón	0,88 - 0,93	0,6
Fibrocemento	0,93 - 0,96	0,83
Acero galvanizado	0,13	0,65

Figura 36. Propiedades térmicas de los materiales en cubiertas

Fuente: (Cruz, 2017)

2.4.5 Intercambios energéticos de la cubierta

El desempeño energético de un edificio está estrechamente ligado a dos factores: la transmisión de calor y la ventilación. La transmisión de calor, como su nombre lo indica, se refiere al paso de calor a través de los materiales de construcción, como paredes,

ventanas y techos (Cruz, 2017). Este flujo de calor puede generar pérdidas significativas si existe una diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del edificio. En la figura 37 se ilustra estas pérdidas de calor en porcentajes, ocurren principalmente en dirección hacia el exterior.

Por otro lado, la ventilación, proceso que implica el intercambio de aire entre el interior y el exterior del edificio, también puede ocasionar pérdidas de calor. Para mitigar estas pérdidas, se requiere implementar sistemas de ventilación eficientes que permitan un control preciso del flujo de aire. Además, las técnicas de recuperación de calor ofrecen una solución viable para reutilizar la energía térmica del aire saliente, precalentando así el aire de entrada y reduciendo el consumo energético (Tabares & Arango-Díaz, 2024).

	PÉRDIDAS	
	TRANSMISIÓN	VENTILACIÓN
MUROS	25%	
PISOS	10%	
VENTANAS	20%	
INFILTRACIÓN		15%
TECHOS	30%	

Figura 37. Pérdidas de calor de la cubierta por transmisión y ventilación expresado en porcentajes
Fuente: (Cruz, 2017).

En este sentido, estudios como el de (Cruz, 2017) (figura 38) han demostrado que las mayores pérdidas de calor se producen a través de la cubierta y las ventanas, con flujos de calor de 455 W/°C y 268 W/°C, respectivamente. Para minimizar estas pérdidas y optimizar la eficiencia energética, es fundamental contar con un buen aislamiento térmico y emplear materiales de baja conductividad térmica.

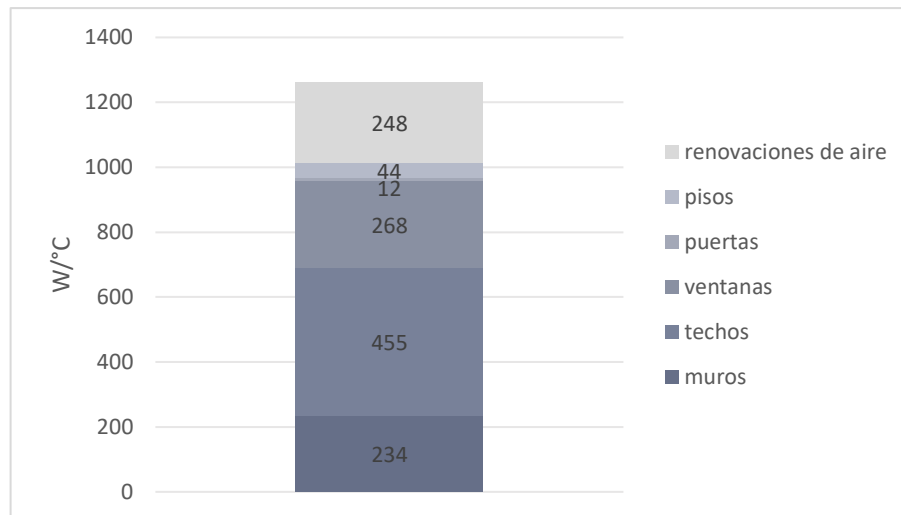


Figura 38. Pérdidas de calor por transmisión en vatios por grados Celsius ($W/^{\circ}C$)

Fuente: (Cruz, 2017)

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

2.5 Enfriamiento

Es un proceso que implica la reducción de la temperatura de un objeto, sustancia o ambiente, disipando calor hacia el exterior. Según Herrera (2014) “es un proceso de eliminación de calor de un cuerpo o un espacio, el cual puede ocurrir por medio de la reducción de su temperatura sin que el cuerpo sufra un cambio de estado físico a temperatura constante” (p. 4). La refrigeración de objetos o espacios se efectúa mediante distintos métodos como la conducción, la convección y la radiación.

2.5.1 Sistemas pasivos de enfriamiento

El enfriamiento dentro de las edificaciones puede lograrse con la aplicación de diversas técnicas o estrategias de enfriamiento, tal y como lo menciona (González, 2011), “haciendo uso de los fenómenos de transferencia de calor y de los pozos térmicos que la naturaleza ofrece” (p. 22). Estos sistemas pasivos de enfriamiento utilizan principios físicos y/o técnicas constructivas para reducir la temperatura de un objeto o sistema sin la necesidad de utilizar energía activa, como la electricidad o combustibles fósiles y se aplican sobre todo en la construcción de edificios y viviendas, especialmente en zonas cálidas o tropicales, donde el clima puede ser extremadamente caluroso.

El sistema pasivo aprovecha los flujos naturales de la energía para emplear solo un recurso energético que en ese momento y lugar se encuentra disponibles en el sitio y generalmente son: la radiación solar, el viento, la geotermia y la biomasa (vegetación), su aprovechamiento de forma eficiente tiende a desarrollar procesos de diseño conscientes e integrales. Por otro lado, Tovar & Castillo (2017) señalan que “las estrategias de diseño pasivo responden a dos requerimientos fundamentales de climatización: el enfriamiento y el calentamiento” (p, 1).

En los sistemas de enfriamiento funcionan y se producen los principios de captación, almacenamiento y distribución de “frío” sin aportación de energía exterior (González, 2011). Estos sistemas pueden ser muy útiles en regiones con altas temperaturas, donde el costo energético de los sistemas de refrigeración convencionales es elevado. Su implementación requiere de un diseño adecuado de los edificios, la selección de materiales apropiados y la integración de los sistemas de enfriamiento en la estrategia de diseño global. Además, es importante considerar factores como la orientación del edificio, la ubicación geográfica, el clima y la calidad del aire exterior.

El diseño de estos sistemas pasivos de enfriamiento pretende, de forma efectiva y económica, mantener una temperatura confortable en el interior y reducir la demanda energética de los edificios y viviendas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos sistemas pueden no ser adecuados para todas las zonas climáticas, y que pueden requerir cierto nivel de mantenimiento y ajustes para garantizar su eficacia (González & González, 2013).

2.5.2 Factores fundamentales del enfriamiento pasivo

El enfriamiento pasivo de un cuerpo se logra a través de un sistema que involucra varios componentes que deben ser alterados. Para ello, Sáiz (1986) señala que se deben tomar en cuenta los siguientes factores para efectos de estudio de este proceso:



Figura 39. Factores a considerar en el enfriamiento pasivo.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

La interacción entre estos factores en el diseño arquitectónico se manifiesta cuando la velocidad del aire se combina con la temperatura y la humedad relativa, generando un nivel de confort. En este contexto, todos estos procesos de acondicionamiento, ya sean pasivos o activos, deben trabajar en conjunto para garantizar el confort, regulando estos tres factores. De acuerdo con Martín (2018), el tipo de edificación se establece condiciones interiores de diseño, ya que, el espacio interior ocupado debe no ser menor a 21°, sino, los ocupantes sentirán incomodidad térmica por el ambiente pues ocasiona modificaciones del metabolismo, el cual, tiene la función de mantener la temperatura corporal dentro de los límites normales, así como en la percepción de la temperatura.

2.5.3 Principios y conceptos de enfriamiento pasivo

El enfriamiento pasivo se basa en una serie de principios y conceptos clave que buscan aprovechar los recursos naturales para mantener un ambiente interior confortable en los edificios. Según Inusa & Zafer, (2017), algunos de estos principios incluyen la orientación y diseño del edificio, el uso de aislamiento térmico, ventilación natural, protección solar, utilización de masa térmica y el enfriamiento evaporativo. Estos principios se basan en la comprensión de los ciclos naturales y el diseño inteligente del entorno construido para optimizar el confort térmico.

La orientación y diseño del edificio juegan un papel crucial en el enfriamiento pasivo, ya que afectan la captación de energía solar y la circulación del aire. Según el informe "Passive Cooling" de la Agencia Internacional de Energía (IEA), se recomienda que los

edificios estén orientados de manera que minimicen la exposición solar durante las horas más calurosas del día y maximicen la ventilación natural. Además, de utilizar elementos arquitectónicos como aleros y ventanas ubicadas de forma estratégica para el control de la entrada de luz solar directa y crear circulación de aire fresco.

El uso de aislamiento térmico es esencial para reducir la transferencia de calor a través de las paredes, techos y suelos del edificio. Según el estudio de Geetha & Velraj (2012), el aislamiento adecuado ayuda a mantener una temperatura interior estable al evitar la entrada de calor no deseado desde el exterior y de esa manera, evitar la pérdida de enfriamiento interior. La recomendación que realiza es el uso de materiales con propiedades aislantes, como espuma de poliuretano o lana de vidrio, en las áreas expuestas al calor solar directo.

El enfriamiento evaporativo es otro principio fundamental del enfriamiento pasivo. Según el libro "Passive Cooling of Buildings" de Santamouris (2016), el enfriamiento evaporativo se basa en la utilización de la evaporación del agua para reducir la temperatura del aire. Se pueden utilizar sistemas como enfriadores evaporativos o simplemente aprovechar la presencia de agua en fuentes o vegetación para facilitar la evaporación. Este proceso permite enfriar el aire sin utilizar energía eléctrica, lo que resulta en un enfoque sostenible y eficiente para el enfriamiento.

2.6 Enfriamiento evaporativo (EE)

Es un proceso que se basa en la transferencia de calor a través de la evaporación del agua. El calor sensible necesario se extrae del aire o del agua misma y se utiliza como calor latente de evaporación (Amer et al., 2015).

El calor se transfiere principalmente a través de la conducción en la envolvente opaca del edificio. Elementos arquitectónicos como paredes o cubiertas absorben el calor solar y lo transfieren gradualmente al interior. Herrera (2014) describe este sistema de la siguiente manera:

Se trata de un proceso que utiliza la evaporación como pozo térmico natural, aun cuando es el aire ambiente el recipiente último de la transferencia de calor. En este proceso, el calor sensible necesario para la evaporación del agua es tomado del aire y del agua misma, para ser usado como calor latente de vaporización. La cantidad de calor sensible absorbido depende de la cantidad de agua evaporada (p.88).

En el ámbito de la climatización de edificios, el enfriamiento evaporativo se ha convertido en una alternativa eficiente y sostenible a los sistemas de aire acondicionado convencionales. Según el informe de la Agencia Internacional de Energía (IEA) (2019), se han desarrollado y probado diferentes sistemas de enfriamiento evaporativo, como los enfriadores evaporativos directos e indirectos. Estos sistemas utilizan la evaporación del agua para enfriar el aire y pueden ser aplicados tanto en viviendas como en edificios comerciales, logrando reducir significativamente el consumo energético en comparación con los sistemas de compresión mecánica de refrigeración.

En el ámbito industrial, el enfriamiento evaporativo también ha demostrado ser una solución efectiva para la refrigeración de grandes espacios y equipos. Según (Montesano & Dipietro, 2018), en su estudio mencionan que han desarrollado sistemas de enfriamiento evaporativo de alta capacidad que son utilizados en sectores como la generación de energía, la producción de alimentos y la industria química. Estos sistemas ofrecen beneficios económicos y ambientales al reducir la demanda energética y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con los sistemas de refrigeración convencionales.

Dentro de la figura 46 se contempla una clasificación de los tres sistemas de enfriamiento evaporativo: directo, indirecto y combinado, con categorías de activos y pasivos. A partir de cada sistema, se presentan diversas opciones con el objetivo de lograr el confort térmico en el interior de los espacios. Estas alternativas varían según las condiciones

climáticas específicas en las que se implementen, ya que éstas determinan los aspectos funcionales que deben tenerse en cuenta para cada sistema.

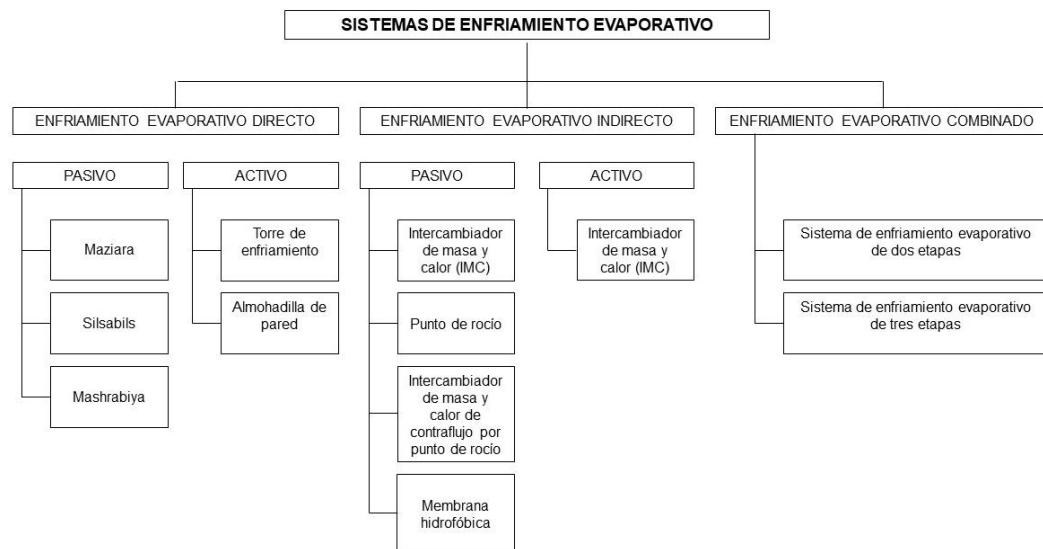


Figura 40. Esquema de la clasificación de los sistemas evaporativos directo, indirecto y combinado.

Fuente: (Cárdenas et al., 2023)

Se puede mencionar que estas técnicas de los sistemas pasivos de enfriamiento han posibilitado la mejora de las condiciones ambientales y el ahorro energético en distintos ámbitos. Sin embargo, se alude que este campo más bien sigue siendo opcional, no como un requisito obligatorio de estrategia de diseño (González, 2011). Por lo tanto, se hace necesaria continuar con la investigación en el ámbito de la Arquitectura Bioclimática para consolidar y fortalecer la adopción de estos sistemas, promoviendo así prácticas sostenibles y eficientes en el sector de la construcción.

2.6.1 Enfriamiento evaporativo indirecto (EEI)

En la antigüedad la utilización de receptáculos ambientales (agua, aire, tierra) aplicados como pozos térmicos para disminuir la cantidad de energía en forma de calor acumulada al interior ha sido una técnica efectiva como sistema de enfriamiento (Carrillo, 2020). Dentro de este sistema se han desarrollado las estrategias de enfriamiento evaporativo indirecto, el cual consiste en utilizar un intercambiador de calor para separar el aire de enfriamiento del aire de suministro, evitando así la entrada de humedad en el espacio interior.

El concepto de enfriamiento evaporativo indirecto es estudiado inicialmente a mediados del siglo XIX en “Sebastopol House”, una vivienda diseñada por el coronel Joshua Young en Texas. Se expone que el primer estudio sobre la reducción de temperatura interior fue a través de la configuración del techo tipo estanque, como se muestra en la figura 41 (Carrillo, 2020).

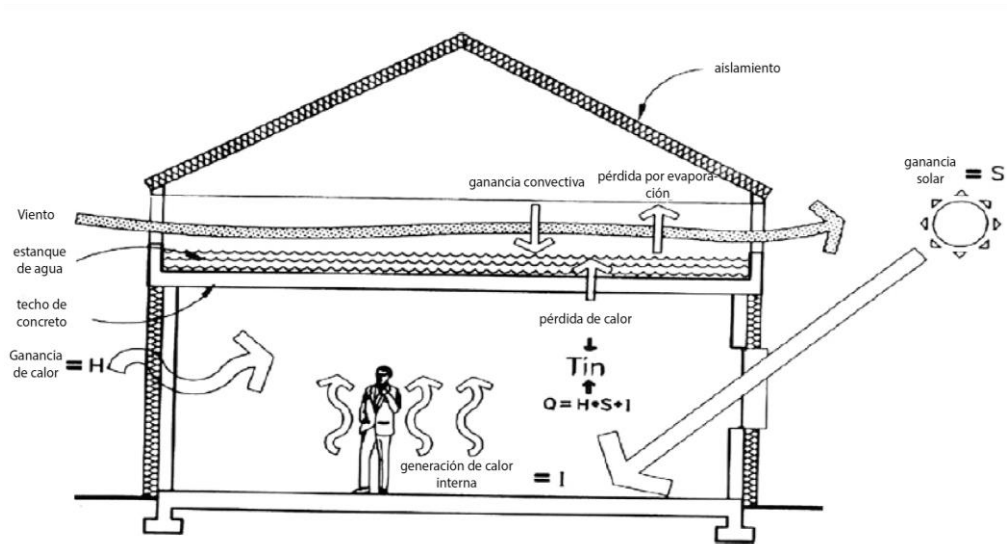


Figura 41. Flujo de calor de una vivienda refrigerada por un techo tipo estanque.

Fuente: (Gonzales S. , 2011)

A diferencia de los sistemas de enfriamiento evaporativo directo que aumentan la humedad ambiental, el enfriamiento evaporativo indirecto permite reducir la temperatura del aire sin modificar el nivel de humedad interior. Esta característica lo convierte en una solución idónea para regiones áridas y subhúmedas, donde la temperatura de bulbo húmedo (TBH) no supera los 25 °C y la temperatura máxima de bulbo seco (TBS) se mantiene por debajo de 46 °C (Givoni, 1994).

En un inicio, el enfriamiento evaporativo indirecto fue objeto de varios estudios en regiones de clima árido. En Israel, Givoni (1982) llevó a cabo una investigación experimental centrada en el enfriamiento evaporativo y radiativo de cubiertas, incluyendo el concepto de "techo estanque sombreado" (Gonzales S. , 2011). A partir de estas investigaciones realizadas por Givoni, se realizaron propuestas de modelos matemáticos con una nueva configuración de cubierta utilizando agua sobre una losa de hormigón (González, 2011).

Tiwari et al. (1982) desarrollaron un modelo matemático para evaluar tres sistemas de enfriamiento evaporativo en un clima cálido y seco de India: techo estanque, película de agua y agua en movimiento. Validaron sus modelos con un dispositivo de película de agua en dos módulos simulados, demostrando que este sistema reduce las temperaturas máximas en 5K y las mínimas en 2K en comparación con el exterior, lo que lo convierte en una solución efectiva para combatir el calor.

(Kishore, 1988) propone un modelo matemático para un dispositivo de enfriamiento evaporativo que funciona en dos climas cálidos de India, uno seco y otro húmedo. El dispositivo simula una película de agua sobre una fibra. El estudio no presenta validación del modelo, pero sí incluye el consumo de agua para cada condición. Las simulaciones se realizaron con temperaturas entre 26 y 38°C y humedades relativas de 20 a 50% para el clima cálido seco (Nueva Delhi) y temperaturas de 28 a 36°C y humedades de 45 a 80% para el clima cálido húmedo (Madrás) (Esparza, 2015). Los resultados muestran la temperatura de la película de agua, la temperatura interior de la habitación y el consumo de agua por metro cuadrado por día para ambos climas (Tabla 11).

Tabla 12. Resultados de película de agua en fibra para clima cálido seco y húmedo.

Parámetros	Nueva Delhi	Madrás
Temperatura de la película de agua (°C)	22.7	27.8
Temperatura de la habitación (°C)	30.3	32.8
Consumo del agua (l/m2/día)	8.5	5.2

Fuente: (Esparza, 2015)

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

Por otro lado, Sánchez (1993) menciona que, en la Universidad de Colima, México, se estudió un modelo experimental de 1.60 x 1.60 x 0.95m construido con bloques de adobe y la cubierta en concreto de 8cm de espesor (ver figura 42). Dicho modelo sirvió para evaluar el Sistema Pasivo de Enfriamiento Evaporativo Indirecto (SPEEI) utilizando una estructura de cubierta con estanque, y los resultados obtenidos demostraron ser adecuados para regiones con clima cálido húmedo y sub-húmedo (González, 2011).



Figura 42. Modelo experimental en cubierta de la universidad de Colima.
Fuente: (González, 2011)

Tang & Etzion (2003) y (2005) llevaron a cabo investigaciones en Israel sobre la eficacia de un estanque con sacos de yute pintados de blanco flotando en la superficie del agua para enfriar y controlar la ganancia solar en edificaciones. Los resultados de esta investigación demostraron la eficacia de esta técnica tanto en el enfriamiento como en el control de la ganancia solar (Tang & Etzion, 2005). La Figura 43 proporciona una representación visual de una sección del experimento.

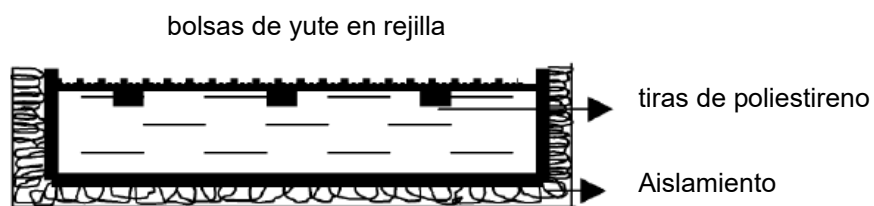


Figura 43. Sección de experimento en cubierta de la sección de RPWGB.
Fuente: (Tang & Etzion, 2005)

En otra instancia, Kharrufa & Adil (2008) realizaron un estudio en Irak que aplicaba este sistema sobre una losa de concreto. Entre los cuales se evalúan en tres condiciones distintas: una habitación normal, una habitación con el uso de estanque y una habitación con ventilación mecánica. Como resultado se obtuvo que hubo un porcentaje de mejoramiento en comparación con la temperatura exterior. Se menciona que la masa

térmica actuante fue la losa de concreto, evitando la ganancia térmica inmediata en el interior.

Li et al. (2021), también investigaron el enfriamiento evaporativo indirecto, demostrando su eficacia en la reducción de la temperatura interior en edificios residenciales, comerciales e industriales. Evaluaron la influencia de diferentes parámetros, como la velocidad del aire, la temperatura del agua y la eficiencia del intercambiador de calor, en el rendimiento del sistema. Los resultados mostraron que este enfoque puede proporcionar una reducción significativa de la temperatura interior y mejorar el confort térmico en climas cálidos y secos.

No obstante, González & González (2013), han investigado el comportamiento térmico de un innovador sistema de cubierta con estanque diseñado para el enfriamiento pasivo en regiones de clima húmedo (ver figura 44). Evaluaron el potencial de enfriamiento a través de cinco sistemas diferentes que combinan el enfriamiento radiativo y evaporativo, tanto directo como indirecto, con y sin aislamiento térmico.

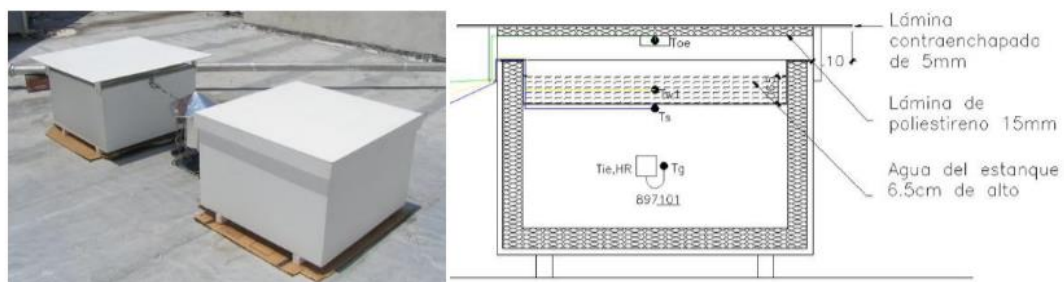


Figura 44. Módulos experimentales (ME) combinado entre enfriamiento evaporativo y radiativo en Maracaibo, Venezuela.

Fuente: (E. González & González, 2013)

Estudios recientes, como el de Esparza et al. (2020) han combinado estrategias pasivas como la ventilación natural y la protección solar para el confort térmico en espacios habitables. Este estudio presenta un dispositivo de sombreado para ventanas con enfriamiento evaporativo, evaluado en Coquimatlán, Colima (clima cálido sub-húmedo). Se construyeron dos celdas experimentales con dispositivos: uno con agua para enfriamiento evaporativo y otro sin agua como referencia. Los resultados muestran que

el enfriamiento evaporativo redujo la temperatura del aire en 0.8 K en promedio (Esparza et al., 2020).

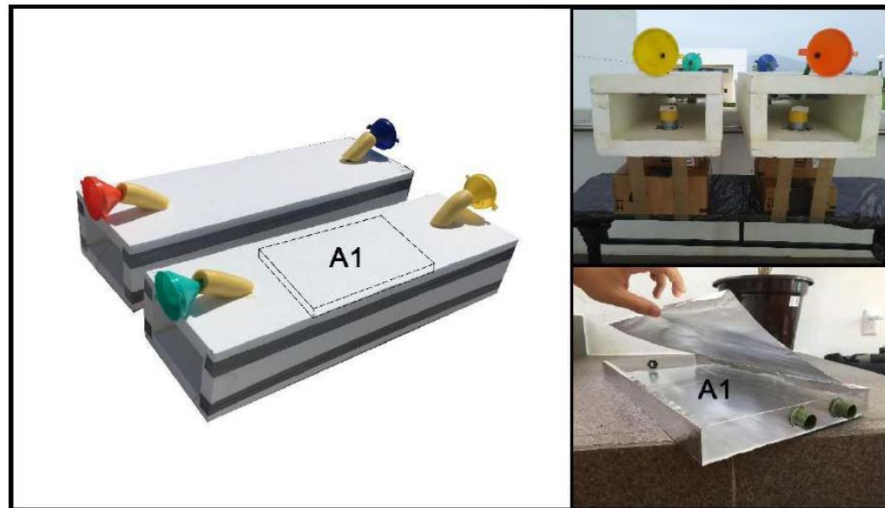


Figura 45. Celdas experimentales para enfriamiento evaporativo indirecto
Fuente:(Esparza et al., 2020)

Los dispositivos se colocaron dentro de dos celdas de poliestireno, posicionadas hacia el sur para aprovechar los vientos dominantes durante el día. La salida de aire en la cara norte se cubrió con una lámina de celulosa móvil, permitiendo controlar la ventilación en la dirección deseada y evitar el flujo no deseado de aire.

Las celdas funcionaron como túneles de viento, facilitando la circulación de aire en su interior. Sus dimensiones son de 0,24 metros de altura, 1,22 metros de largo y 0,38 metros de ancho. Se utilizaron placas de poliestireno de 0,05 metros de grosor como material de construcción, actuando como aislante para evitar la incidencia directa de la radiación solar (ver Figura 46).

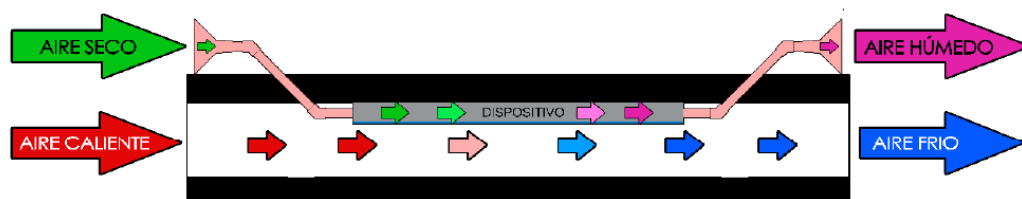


Figura 46. Operación y funcionamiento de las celdas de experimento
Fuente:(Esparza et al., 2020)

2.6.2 Intercambiador de calor de enfriamiento evaporativo indirecto

Este es un sistema que logra el cambio de temperatura al dividir canales de flujo de viento, evitando así la humidificación del aire entrante. La transferencia de calor ocurre convectivamente a través de la superficie que separa los flujos de aire, reduciendo la temperatura del aire que ingresa (Pérez, 2022). El enfriamiento del aire se logra mediante un intercambiador de calor sensible, donde el aire acondicionado (canal seco) y el aire de trabajo exterior (canal húmedo) no entran en contacto directo, como se muestra en la Figura 19. Esto se debe a la presencia de una superficie intermedia que puede tener la forma de placas, tubos u otras configuraciones. Similar al enfriamiento directo, estos sistemas están limitados por la temperatura de bulbo húmedo del entorno.

En muchos casos, estos sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto (EEI) reutilizan una pequeña cantidad del aire expulsado del espacio refrigerado, reintroduciéndolo para formar un ciclo. Aunque el sistema principal opera mediante intercambio de calor indirecto, también se emplea el método directo para complementar y alcanzar temperaturas de aire más bajas (Rajski et al., 2020).

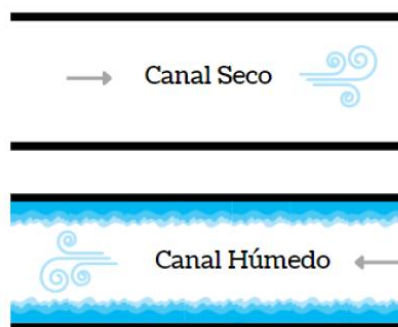


Figura 47. Esquema de enfriamiento evaporativo Indirecto
Fuente:(Rajski et al., 2020)

2.6.2.1 Tubos de calor como método de Enfriamiento Evaporativo Indirecto

Es un dispositivo de transferencia de calor que utiliza un fluido de trabajo encerrado en un recipiente sellado. Este fluido se evapora en un extremo del tubo (la zona caliente) y

se condensa en el otro extremo (la zona fría), transportando así el calor de un lugar a otro (Cárdenas et al., 2023).

- **Sistema de punto de rocío**

En Rusia, el Dr. Valeriy Maisotsenko desarrolló un innovador método para mejorar los sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto. Este enfoque se conoce como el “ciclo de Maisotsenko” (IMC) (Glanville et al., 2011). De igual forma, este método implica la reducción de temperatura sin añadir humedad al aire mediante el uso de enfriamiento regenerativo.

En la figura 48 se exhiben dos configuraciones del enfriamiento evaporativo del punto de rocío. En la primera, se produce una desviación de parte del flujo hacia el canal húmedo, mientras que, en la segunda, la transferencia de calor ocurre exclusivamente a través del calor sensible.

Ambas configuraciones son psicrométricamente equivalentes, pero la disposición (b) con canal de producto tiene ventajas significativas sobre la disposición (a). En la disposición (b), cualquier gas o sustancia líquida, como residuos calientes, puede utilizarse como flujo de producto, a diferencia de la disposición (a), que se limita al mismo gas para ambos canales. Además, el uso del canal de producto permite reducir la caída de presión del sistema (Pérez, 2022).

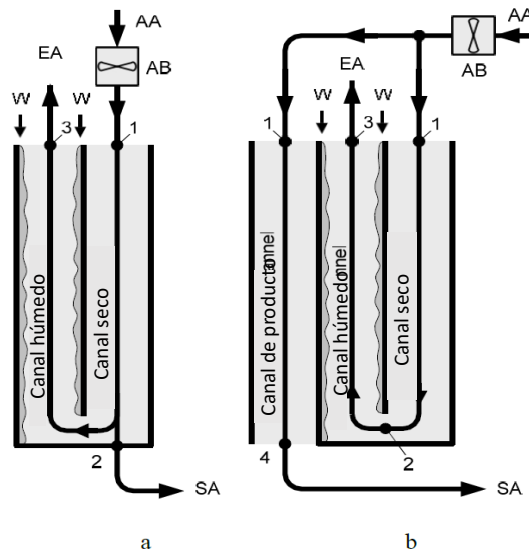


Figura 48. Esquema de enfriadores por punto de rocío con extracción parcial del aire (a) y con canal de producto (b) AA = aire ambiente, AB = soplador, EA = aire de escape, SA = suministro de aire y W = agua
Fuente: (Glanville et al., 2011)

Se puede apreciar en la figura 49 como ingresa el aire a temperatura ambiente y se divide en dos canales que son paralelos: el canal seco (CS) y el canal producto (CP), que luego se alterna con un canal húmedo (CH). Durante todo este proceso de transferencia de calor en el CP, se realiza principalmente a través de calor sensible, mientras que en los otros dos canales se combina calor sensible con calor latente (M. Perez & Porras, 2022) . Esto posibilita que la temperatura del aire de trabajo disminuya progresivamente, obteniendo así una temperatura menor en el aire producto.

Calor sensible: Calor que provoca un cambio de temperatura en una sustancia sin modificar su estado.

Calor latente: Calor que se absorbe o libera durante un cambio de estado de una sustancia, sin que varíe su temperatura.

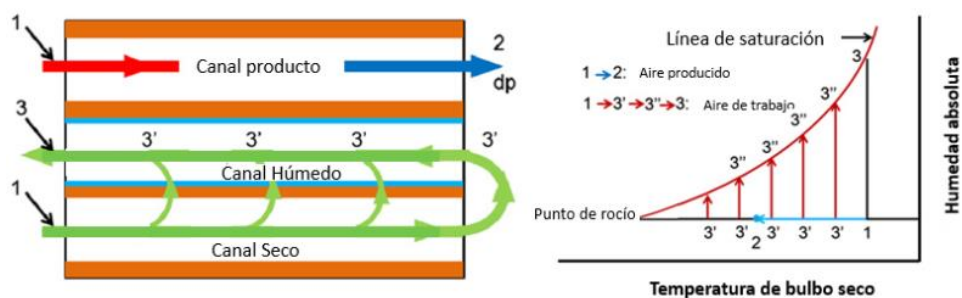


Figura 49. El proceso térmico del enfriamiento evaporativo de punto de rocío.
Fuente: (M. Perez & Porras, 2022)

La placa cuenta con una superficie perforada de forma estratégica, facilitando el intercambio para efectuar el proceso de enfriamiento a través del lado húmedo. Se busca que el aire que penetra el sistema acceda al canal húmedo, propiciando así un flujo de aire que, mediante la evaporación, contribuya al enfriamiento (Xuan et al., 2012).

La determinación del flujo de aire mínimo necesario para un intercambiador de calor evaporativo indirecto es un aspecto crucial en el diseño y operación de sistemas de climatización. Este valor depende de múltiples factores, incluyendo las dimensiones del intercambiador, el material de construcción, las condiciones ambientales (temperatura y humedad), la capacidad de enfriamiento requerida y la geometría interna del dispositivo (Rajski et al., 2020)

Rajski et al. (2020) realizaron una serie de simulaciones numéricas para evaluar cómo la velocidad del aire que ingresa a un intercambiador de calor afecta su desempeño (figura 51). A través de simulaciones numéricas, modificaron sistemáticamente esta velocidad mientras mantenían constantes otros factores. El intercambiador diseñado constaba de un conducto seco por donde circulaba el aire a enfriar y un conducto húmedo que facilitaba la evaporación del agua para eliminar el calor. Los resultados indicaron que, bajo condiciones específicas como un clima seco y ventoso, una velocidad de entrada de aire de aproximadamente 0,6 m/s permitía alcanzar una alta eficiencia de enfriamiento.

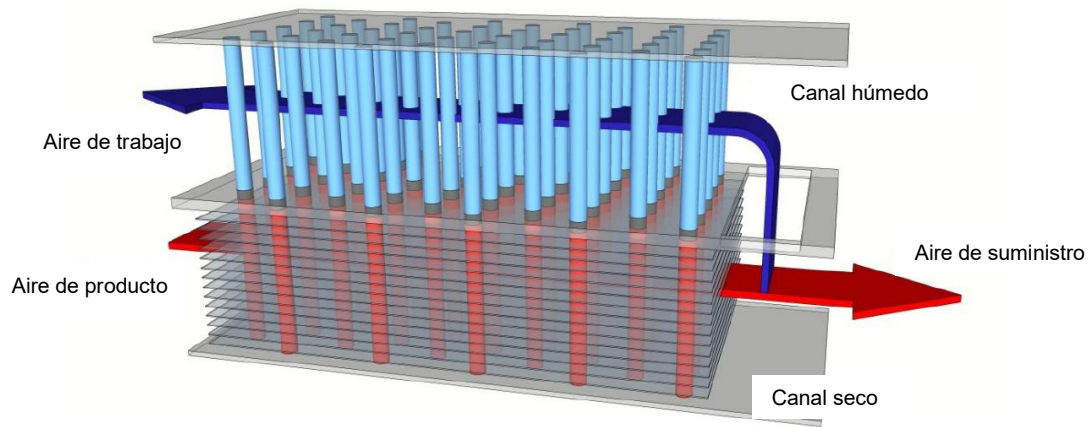


Figura 50. Estructura y principio de funcionamiento de un intercambiador de calor para refrigeración del punto de rocío.
Fuente:(Rajski et al., 2020)

Este estudio destaca la importancia de la velocidad del aire como parámetro clave en el diseño y optimización de este tipo de intercambiadores de calor. El estudio validó con éxito un modelo matemático diseñado para predecir el comportamiento de un sistema de enfriamiento evaporativo indirecto específico. Este modelo, al ser preciso, se puede utilizar como herramienta para diseñar y optimizar sistemas similares.

Los investigadores realizaron una serie de simulaciones numéricas para explorar cómo diferentes variables afectan el rendimiento de enfriamiento del sistema. Al variar factores como la velocidad del aire, las dimensiones del humidificador adiabático y la relación entre los flujos de aire, lograron identificar las mejores condiciones para maximizar la capacidad de enfriamiento y la eficiencia energética del sistema. Las simulaciones numéricas se realizaron en función de las condiciones operativas preestablecidas que se enumeran en la tabla 13.

Tabla 13. Condiciones de funcionamiento para simulación

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Altura del canal seco/húmedo	250 mm	milímetros	Distancia entre las placas superior e inferior de los canales donde circula el aire.
Diámetro externo de GAHP ⁷	12 mm	milímetros	Diámetro de los tubos de calor que forman parte del intercambiador.

⁷ Gravity Assisted Heat Pipe: Tubo de calor asistido por gravedad.

Número de filas de GAHP	15	-	Cantidad de filas de tubos que componen el intercambiador.
Fluido de trabajo de GAHP	Agua desionizada	-	Líquido que circula dentro de los tubos para transferir calor.
Material de GAHP	Cobre	-	Material de los tubos, conocido por su alta conductividad térmica.
Arreglo de GAHP	Escalonado	-	Disposición de los tubos, no alineados directamente uno encima del otro.
Paso longitudinal/transversal	14 mm	milímetros	Distancia entre los centros de los tubos en las direcciones longitudinal y transversal.
Relación de flujo de aire de trabajo a producto	0.5	-	Relación entre el caudal de aire en el canal húmedo y el canal seco.
Velocidad de entrada del flujo de aire del producto	1.5 m/s	metros por segundo	Velocidad a la que el aire entra al intercambiador por el canal seco.
Espaciamiento de las aletas	1.6 mm	milímetros	Distancia entre las aletas, que aumentan el área de superficie para la transferencia de calor.
Material de las aletas	Aluminio	-	Material de las aletas, también con buena conductividad térmica.

Fuente:(Rajski et al., 2020)

Para calcular el caudal de aire necesario para ventilar un espacio determinado y analizar el comportamiento del flujo de aire en diferentes situaciones se emplea la siguiente ecuación:

$$m_{aire} = \rho_{aire} \cdot A \cdot h \cdot v$$

Ecuación 3. Ecuación para calcular caudal de aire.

En donde:

m_{aire}: Representa el caudal másico de aire, es decir, la masa de aire que fluye a través de una sección determinada en la unidad de tiempo. Se expresa comúnmente en kg/s.

p_{aire} : Es la densidad del aire, o sea, la masa de aire contenida en un volumen unitario. Depende de la temperatura, presión y humedad del aire. Se expresa en kg/m^3 .

A: Representa el área de la sección transversal por donde fluye el aire. Se expresa en m^2 .

h: Es la altura del conducto por donde fluye el aire. Se expresa en metros (m).

v: Representa la velocidad del aire a lo largo del conducto. Se expresa en m/s .

2.6.3 Masa térmica

Garantizar una temperatura confortable dentro de las edificaciones es crucial para el bienestar de sus ocupantes. La cantidad de "masa térmica" presente en un edificio influye significativamente en la variación de la temperatura interna (González & González, 2013). Las construcciones ligeras suelen tener temperaturas internas más altas, mientras que las construcciones masivas con materiales pesados y paredes gruesas presentan oscilaciones internas pequeñas y menores que la temperatura exterior.

La masa térmica se refiere a materiales de construcción capaces de absorber y almacenar calor, utilizados en paredes, techos y pisos. Los materiales ideales tienen alto calor específico, alta densidad y alta conductividad térmica, como ladrillos de adobe, bloques de arcilla, tierra, rocas, concreto y agua (González, 1997). Según (Carrillo, 2020), la masa térmica es esencial en climas tropicales húmedos y semihúmedos para regular la temperatura y proporcionar confort. En el enfriamiento evaporativo indirecto, la masa térmica mejora la eficiencia del sistema al mantener la estructura fresca por más tiempo y estabilizar la temperatura interior.

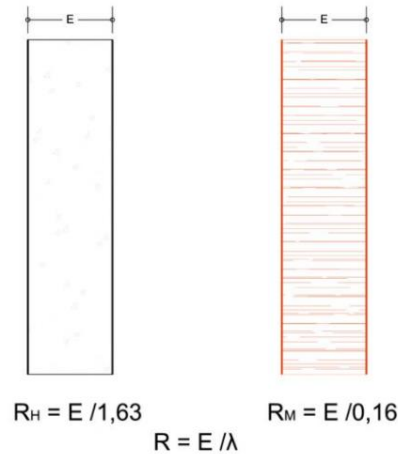


Figura 51. Comparación de la masa térmica en dos cerramientos.
Fuente: (Serrano, 2018)

2.6.4 Aislamiento térmico

En eficiencia energética, el concepto de aislamiento y la masa térmica son importantes en el diseño de edificios. Ambos están relacionados con la forma en que el calor se transfiere a través de las paredes y techos de un edificio.

El aislamiento se refiere a la capacidad de un material para resistir la transferencia de calor. Un buen aislamiento reduce la cantidad de calor que se transfiere desde el interior del edificio hacia el exterior en invierno, y viceversa en verano. Los materiales comúnmente utilizados para el aislamiento incluyen la fibra de vidrio, la celulosa, la espuma de poliestireno y el aislamiento de lana de roca.

El aislamiento térmico es una propiedad de los materiales que se emplea para bloquear el paso por conducción de energía y se evalúan por medio de la resistencia térmica. La resistencia térmica se define como el producto del valor de la conductividad del material y el espesor del mismo. Dependiendo de las condiciones ambientales y necesidades de confort, el aislamiento térmico resulta en una estrategia eficaz de diseño (Carrillo, 2020).

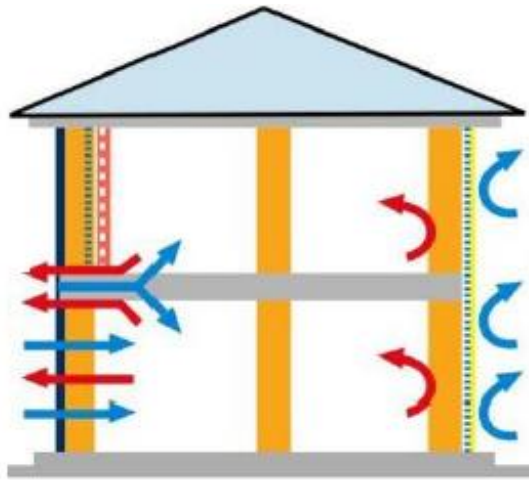


Figura 52. Modelo experimental de techo en vivienda con aislamiento térmico.

Fuente: (Carrillo, 2020)

2.6.5 Materiales de cambio de fase

La implementación de Materiales de Cambio de Fase (PCMs) en la estructura de edificaciones conlleva a una mejora significativa en su masa térmica. Estos materiales son aplicados en sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto con el objetivo de optimizar tanto la eficiencia como la capacidad de almacenamiento térmico del sistema.

Según lo señalado por Oropeza y Ostergaard, el material de cambio de fase o phase change materials (PCM) se define como “una tecnología en crecimiento que consiste en microcápsulas hechas de una combinación de parafina, cera u otros materiales de punto de fusión bajo, que tienen el objetivo principal de almacenar el calor para actuar como sistemas de enfriamiento gratuito”. (citado en Soto Barrionuevo, 2018, p.10)

En el ámbito del enfriamiento evaporativo indirecto, los PCMs se incorporan en forma de cápsulas o encapsulados dentro de paneles o paredes del sistema. Durante el día, cuando la temperatura es alta, el PCM absorbe el exceso de calor del entorno y se funde, almacenando la energía térmica. Durante la noche, cuando la temperatura desciende, el PCM se solidifica, liberando la energía almacenada y contribuyendo al enfriamiento del ambiente (Bhamare et al., 2019).

Los materiales de cambio de fase tienen la capacidad de almacenar y liberar calor de manera constante durante su proceso de cambio, manteniendo una temperatura constante. Los cambios más eficaces son considerados de estado sólido a líquido con una energía mínima almacenada que sucede entre sólido a gas. Las fases de cambio de líquido a sólido más habituales en el intervalo de temperaturas, que va desde 20 °C a 80 °C incluyen sales hidratadas, mezclas eutécticas, ceras de parafina y ácidos grasos (Oliver et al., 2012). Su clasificación, según su transición de estado sólido a líquido se ilustra en la figura 11.

Material	Calor específico Kj/(Kg°C)	Entalpía de fusión Kj/Kg
Sales hidratadas	-	250,00
Parafinas	-	130,00
Agua	4,19	334,24
Ladrillo cerámico	0,84	-
Yeso	1,09	-

Figura 53. Clasificación de los PCMs

Fuente: (Oliver et al., 2012)

2.7 Confort térmico

La American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) define el confort térmico como una condición mental en la que una persona se siente satisfecha con el ambiente térmico, logrando un equilibrio entre las sensaciones psicológicas y fisiológicas del individuo y su entorno inmediato, involucrando tanto variables objetivas como subjetivas. Según la norma ISO 7730, el confort térmico es “aquella condición de la mente que proporciona satisfacción con el ambiente térmico” (Norma ISO 7730).

La percepción del confort térmico depende tanto del comportamiento ambiental como de diversos factores relacionados con el usuario. Estos factores incluyen aspectos sociales (como el tipo de actividad y la vestimenta), factores fisiotemporales (como la aclimatación a corto o largo plazo), y factores fisiológicos y psicológicos (como el

carácter, la educación y las sensaciones) (Carrillo, 2020). Todos estos elementos influyen en la percepción de los ambientes térmico, acústico y visual.

2.7.1 Parámetros de confort térmico

En el confort térmico de un espacio, se consideran parámetros específicos como la temperatura del aire, la temperatura radiante, la humedad relativa y el movimiento del aire. Estos factores intercambian calor con el cuerpo humano mediante cuatro procesos: radiación, convección, conducción y evaporación, influyendo en la percepción de calor (Escobar, 2018).

“Se estima que el cuerpo (ver Figura 5) pierde parte de su calor en las siguientes proporciones: $\frac{2}{5}$ por radiación, $\frac{2}{5}$ por conducción y $\frac{1}{5}$ por evaporación. Aunque pueden variar dependiendo de las variaciones en las condiciones térmicas” (Cruz, 2017, p. 7). La temperatura del aire intercambia calor con la piel por convección. La humedad relativa puede intensificar la sensación de calor; por ejemplo, cuando es baja, permite una mayor evaporación del sudor, funcionando como un sistema de refrigeración corporal. Además, el movimiento del aire acelera la transferencia de calor y humedad de la piel al ambiente (Escobar, 2018).

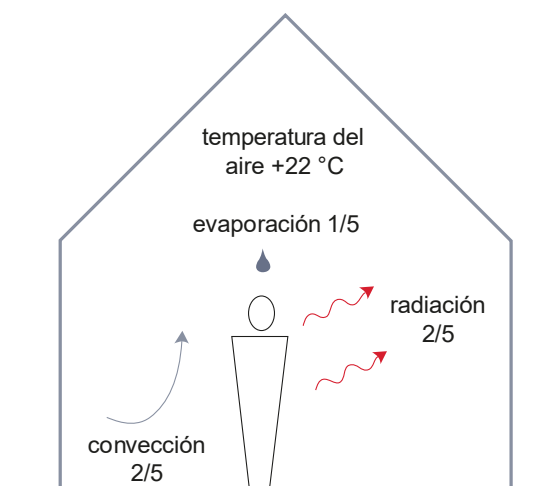


Figura 54. Intercambios de calor del cuerpo humano al ambiente.

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

2.7.2 Variables determinantes del confort térmico

Este confort definido como la condición de satisfacción con el ambiente térmico, se encuentra influenciada por la temperatura y la humedad relativa. De acuerdo con la norma ASHRAE 55, las temperaturas más altas requieren una humedad relativa más baja para lograr el confort térmico en comparación con las temperaturas más bajas, manteniendo todos los demás factores constantes (ASHRAE, 2013). En términos generales, existen rangos de temperatura y humedad relativa que se consideran más confortables para la mayoría de las personas.

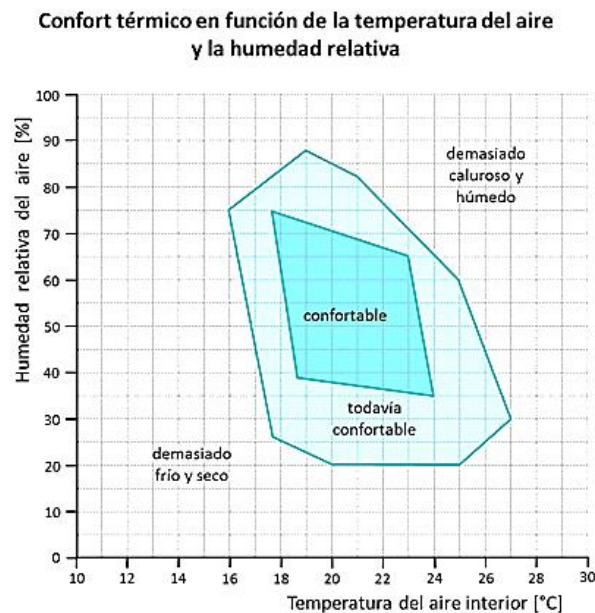


Figura 55. Grafica de confort térmico en relación de la temperatura del aire y humedad relativa
Fuente: (Blender, 2015)

La sensación térmica se cuantifica por medio de índices, en función de la temperatura y la humedad relativa. Se considera que, a medida que la humedad aumenta, la capacidad del cuerpo para enfriarse mediante la evaporación del sudor disminuye. De acuerdo con González (2023) el confort térmico depende de seis factores o principios como son:

- La actividad física, esto es, la tasa metabólica del trabajo que se realiza.
- El tipo de ropa que lleva la persona (aislamiento de la vestimenta).
- La temperatura del aire.
- La velocidad del aire.

- La temperatura radiante media del entorno.
- La humedad relativa.
- Favorecer la productividad.

La velocidad del aire se convierte en un factor crucial para el confort térmico, ya que influye en la pérdida de calor del cuerpo por convección y evaporación. Según Carrillo (2020), cuando la temperatura corporal supera los 37 °C, la ventilación calienta la piel por convección y al mismo tiempo la refrigeración por evaporación. Por lo tanto, obtener un flujo de aire adecuado puede aliviar la sensación de calor, especialmente en climas donde las temperaturas son elevadas. Se considera un confort agradable cuando los movimientos varían de 0,1 a 0,2 m/s, mientras que los movimientos que enfrían el cuerpo humano se denominan “corrientes” (Blender, 2015).

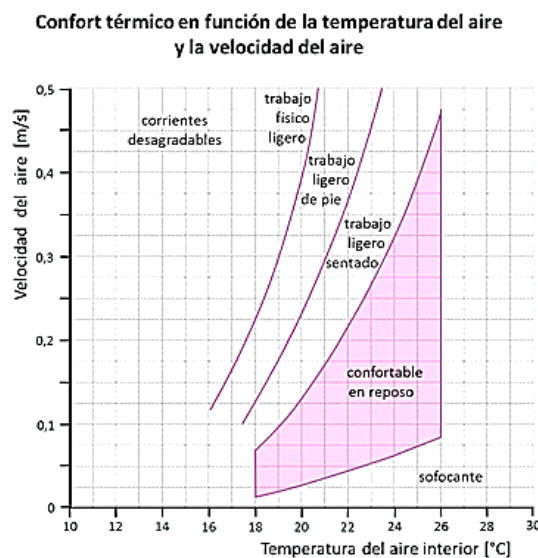


Figura 56. Gráfica de confort térmico en función de la temperatura y velocidad del aire.

Fuente: (Blender, 2015)

En cuanto a la temperatura radiante media, ésta expresa la radiación de calor proveniente de diversos elementos del entorno, y es preferible que no se distancie significativamente de la temperatura ambiente.

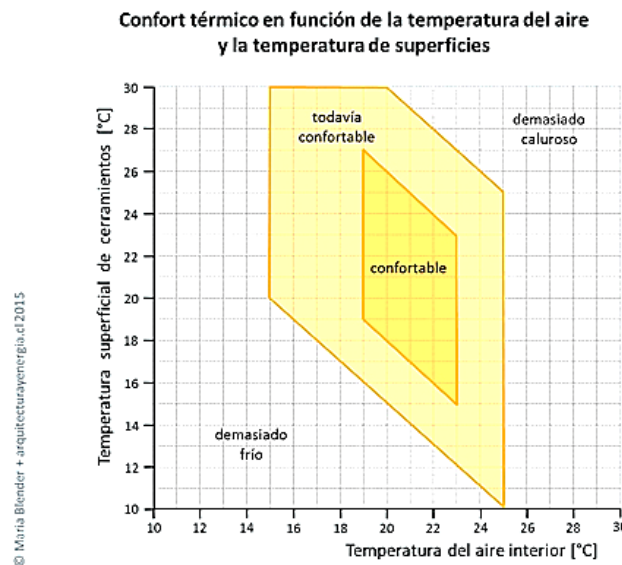


Figura 57. Gráfica de confort térmico en función de la temperatura y velocidad del aire.

Fuente: (Blender, 2015)

2.7.3 Modelos de confort térmico

Existen varios modelos de confort térmico que buscan cuantificar y evaluar la satisfacción y bienestar térmico de las personas en un determinado entorno. Estos modelos utilizan diferentes enfoques y variables para evaluar el confort térmico, considerando aspectos como la temperatura del aire, la humedad, la velocidad del viento, la radiación térmica y las actividades humanas. Algunos de estos incorporan adaptabilidad y factores matemáticos para evaluar de manera más precisa la satisfacción térmica de las personas en entornos diversos. Entre ellas se presentan modelos adaptativos y matemáticos:

a) Modelos matemáticos

Comúnmente, los modelos matemáticos diseñados para anticipar el confort térmico se originan a partir de experimentos realizados en cámaras con condiciones ambientales rigurosamente controladas por investigadores. En estos experimentos, se formula de manera sistemática preguntas a los participantes para obtener información sobre sus sensaciones térmicas. A través de los resultados obtenidos, los investigadores se esfuerzan por establecer relaciones entre las respuestas térmicas y diversas variables que influyen significativamente en el confort humano. Entre estas variables se incluyen:



Figura 58. Variables significativas de modelos matemáticos de confort térmico.

Fuente: (seiscubos, 2020)

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

Entre los modelos matemáticos más destacados se encuentra el modelo desarrollado por P.O Fanger, el modelo de doble nodo de J.B Pierce y el modelo de doble nodo KSU por parte de investigadores de la universidad de Kansas (Djongyang et al., 2010). La relación entre estos tres modelos radica en su aplicación de un balance energético al cuerpo humano, utilizando los mecanismos de intercambio de energía y parámetros fisiológicos derivados de experimentos para prever la sensación térmica y la respuesta fisiológica de las personas frente a las condiciones ambientales.

1. Modelo de confort de fanger / PMV y PPD.

Reconocido como el pionero entre los modelos de confort, fue publicado en 1967 y su actualización en 1972. Fanger desarrolló este modelo a partir de sus investigaciones en la Universidad Estatal de Kansas y la Universidad Técnica de Dinamarca, donde trabajó con individuos expuestos a diversas condiciones climáticas en cámaras climatizadas (Djongyang et al., 2010). Dentro de estas cámaras se podía calibrar la fisiología térmica humana según las sensaciones térmicas expresadas por las personas a través de dos indicadores clave de confort: el Voto Medio Previsto (PMV) y el Porcentaje de Personas en Disconfort (PPD).

El Voto Medio Previsto (PMV), en la escala de sensación térmica, refleja la evaluación anticipada del bienestar térmico de individuos expuestos a determinadas condiciones ambientales (Marchante & González, 2020). La escala contemplada en siete puntos estima que si se obtiene un valor de 0.0 al calcular el PMV significa que en promedio las personas sentirán confort al interior del edificio. Por el contrario, si el valor obtenido es 2.0, las personas sentirán un ambiente más cálido. En base a los estudios de Fanger y a la norma ISO 7730 se establecen las siguientes ecuaciones para calcular parámetros individuales del PMV. Se muestra la ecuación de balance de calor del cuerpo humano de acuerdo con seiscubos (2020):

$$M - W = H + E + C_{res} + E_{res}$$

Ecuación 4. Balance de calor del cuerpo humano

Donde:

M = Tasa metabólica, cantidad de energía química transformada en calor y trabajo (W/m²).

W = Potencia mecánica efectiva (W/m²).

H = Pérdida de calor por convección, radiación y conducción (W/m²).

E = Pérdida de calor por evaporación en la piel (W/m²).

C_{res} = Intercambio de calor por convección a través de la respiración (W/m²).

E_{res} = Intercambio de calor por evaporación a través de la respiración (W/m²).

Ecuación de comodidad:

$$M - W = H + E_c + C_{res} + E_{res}$$

Ecuación 5. Balance de energía del cuerpo humano

Donde:

E_c = Pérdida de calor por evaporación en la piel con sensación térmica neutra (W/m²).

Ecuación para el cálculo del PMV:

$$PMV = (0.303 \times \exp^{-0.036 \times M} + 0.028) \times [(M - W) - H - E_c + C_{res} + E_{res}]$$

Ecuación 6. Cálculo de Valor Medio Predicho (PMV)

Mientras que el PMV proporciona una estimación de la percepción térmica promedio de un grupo, el PPD ofrece información sobre la proporción de personas que podrían sentirse incómodas en esas condiciones. La fórmula para calcular el PPD según la Norma ISO 7730 es:

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

Ecuación 7. Cálculo de Porcentaje Predicho de Insatisfechos (PPD)

Como se observa en la figura 59, niveles de insatisfacción, medidos por el Porcentaje de Personas en Discomfort (PPD) que no superen el 10%, indicarán un escenario generalmente satisfactorio para la mayoría (con un 90% de satisfacción). Por otro lado, valores más altos señalarán una situación de incomodidad térmica. Este límite del 10% en el PPD se asocia con los rangos de -0.5 a 0.5 establecidos para el Voto Medio Previsto (PMV) (Marchante & González, 2020).

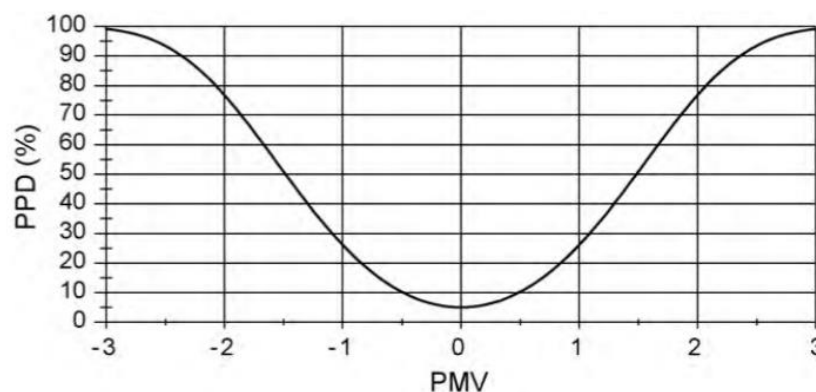


Figura 59. Relación de Voto Medio Previsto (PMV) versus el Porcentaje de Personas en Discomfort (PPD)

Fuente: (Djongyang et al., 2010)

Dentro de la Norma ISO 7730 se establece tres categorías de ambientes térmicos para evaluar el confort térmico en entornos cerrados e interpretarlas como niveles de calidad ambiental.

Categoría	Estado térmico del cuerpo		Disconfort local (% de personas en disconfort)			
	PPD (%)	PMV	Corrientes de aire	Diferencia vertical de temperatura	Suelo caliente o frío	Radiación asimétrica
A	< 6	Entre -0.2 y +0.2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	Entre -0.5 y +0.5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	Entre -0.7 y +0.7	< 30	< 10	< 15	< 10

Figura 60. Categorías de ambientes térmicos, en base a la norma ISO 7730.
Fuente: (seiscubos, 2020)

2. Modelo de doble nodo de Pierce

El modelo de Pierce desarrollado en 1970 en la Universidad de Yale, considera el cuerpo humano térmicamente desde una perspectiva de dos compartimentos concéntricos e isotérmicos: el núcleo y la envoltura (piel) (Djongyang et al., 2010).

La última versión del modelo introduce conceptos como la Temperatura Efectiva Estándar (SET) y la Temperatura Efectiva (ET), que se utilizan para representar condiciones ambientales reales y ajustar el clásico Índice de Sensación Térmica (PMV) de Fanger. Además, el modelo emplea índices TSENS y DISC para predecir el confort térmico en ambientes cálidos y fríos respectivamente.

En resumen, el Modelo de Doble Nodo de Pierce utiliza cuatro índices de confort térmico: PMVET (PMV en función de ET), PMVSET (PMV en función de SET), TSENS (temperatura media del cuerpo humano) y DISC (esfuerzo relativo de termorregulación) (Carrillo, 2020).

3. modelo de doble nodo KSU

Publicado en 1977, el modelo de doble nodo de la universidad de Kansas (KSU) aborda la predicción de la sensación térmica (TSV) de manera diferente en entornos cálidos y fríos. Sus ecuaciones tienen similitud con las de Pierce. En climas fríos, el modelo se fundamenta en las variaciones de la conductancia térmica entre el núcleo y la piel, mientras que en climas cálidos se basa en las alteraciones en la humectación de la piel. Para evaluar el nivel de confort, la

mayoría de las escalas utilizan de 7 a 9 valores de sensación térmica (figura 20), con el 0 representando la temperatura neutra (Carrillo, 2020).

+3	Caliente	+4	Muy caliente
+2	Cálido	+3	Caliente
+1	Ligeramente cálido	+2	Cálido
0	Neutral	+1	Ligeramente cálido
-1	Ligeramente fresco	0	Neutral
-2	Fresco	-1	Ligeramente fresco
-3	Frío	-2	Fresco
		-3	Frío
		-4	Muy frío

Figura 61. Escala de sensación térmica
Fuente: (seiscubos, 2020)

b) Modelos adaptativos

El concepto de confort adaptativo se origina en estudios de campo que utilizan principalmente métodos estadísticos para desarrollar modelos de confort basados en las sensaciones y comportamientos de ocupantes regulares en entornos reales (seiscubos, 2020). Estas investigaciones encontraron que modelos matemáticos tradicionales, como el de Fanger, eran limitados para prever la sensación de confort en edificios no controlados estrictamente, donde los ocupantes podían tomar acciones para mejorar su comodidad. Además, se observaron discrepancias significativas debido a las características Dear & Brager (1998).

Los investigadores Dear & Brager (1998) describen la adaptación como la reducción gradual de la respuesta a estímulos ambientales repetitivos, distinguiendo tres formas:

- adaptación comportamental (acciones para modificar el balance térmico)
- fisiológica (cambios en respuestas por exposición prolongada)
- psicológica (cambios en percepción basados en experiencias pasadas y expectativas).

Estos modelos adaptativos tienen gran relevancia debido a que consideran la capacidad de adaptarse del ser humano. Los diferentes modelos se detallan a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 20. Modelos adaptativos de confort más utilizados

MODELO	TEORÍA	ECUACIÓN
Humphreys	En 1975 encontró una dependencia hacia neutralidades térmicas. Sus resultados fueron valores entre 17 °C Y 30 °C .	$T_n = 2.56 + 0.83 \times T_i$ Donde Ti es temperatura interior $T_n = 11.9 + 0.534 \times T_m$ Donde: Tm = temperatura media exterior
Auliciems	Uso de datos de edificios con sistemas pasivos y activos. En su fórmula para temperatura neutra comprende valores de 18°C Y 28 °C.	$T_n = 17.6 + 0.31 \times T_m$ Donde: Tm = temperatura media exterior
Nicol	En 1996 Nicol y Roaf realizan estudios de Pakistán para sistemas pasivos.	$T_n = 17 + 0.38 \times T_m$ Donde: Tm = temperatura media exterior.

Fuente: (Carrillo, 2020)

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

ASHRAE Standard 55-2013 define los ambientes térmicos aceptables para espacios ventilados de forma natural de acuerdo con las siguientes condiciones:

No hay ningún sistema de refrigeración mecánico instalado, y ningún sistema de calefacción está en funcionamiento.

- Los ocupantes tienen tasas metabólicas entre 1,0 y 1,3 met.
- Los ocupantes pueden adaptar su ropa a las condiciones térmicas interiores y/o exteriores entre 0,5 y 1,0 clo.
- La temperatura media exterior es mayor que 10°C y menor que 33,5°C.

En este método, el rango de la temperatura de confort interior se determina usando los límites del 80% de aceptabilidad, o aplicando las siguientes fórmulas:

Límite superior de la zona de confort de aceptabilidad del 80% = $0,31 * (T_{me}) + 21,3$

Límite inferior de la zona de confort de aceptabilidad del 80% = $0,31 * (T_{me}) + 14,3$

La temperatura media exterior (T_{me}), utilizada en las fórmulas anteriores, está basada en una medición cuya duración no debe ser menos de 7 días ni más de 30 días consecutivos, y debe ser una media aritmética de todas las temperaturas exteriores medias diarias de los días consecutivos que dure el periodo de medición. Cuando la temperatura media exterior prevaleciente (T_{me}) supera o desciende por debajo de este umbral, es necesario implementar estrategias de enfriamiento o calefacción dentro del edificio para garantizar el confort de los ocupantes.

El segundo modelo de confort térmico adaptativo (CTA) evaluado es el desarrollado por (Oropeza et al., 2017). Este modelo es notable por ser el primer modelo regional de CTA diseñado específicamente para México y divide al país en cuatro tipos de climas: árido, templado, cálido seco y cálido húmedo. El modelo se desarrolló a partir de 74 encuestas distribuidas proporcionalmente entre estas cuatro zonas climáticas. Para el clima cálido húmedo, según este modelo, el confort térmico adaptativo (CTA) se define mediante la siguiente ecuación:

$$T_c = 0.38 * (T_{me}) + 15.7^{\circ}C$$

Ecuación 8. Temperatura de confort (T_c)

Para alinear la descripción de este modelo con lo estipulado por la normativa ASHRAE 55-2020, se definieron los límites superior e inferior de confort, añadiendo $\pm 3.5^{\circ}C$:

Límite superior (aceptabilidad 80% = $0.38 * (T_{me}) + 18.2^{\circ}C$ ($10 \leq T_{me} \leq 33.5$)

Límite inferior (aceptabilidad 80%) = $0.38 * (T_{me}) + 13.2^{\circ}C$ ($10 \leq T_{me} \leq 33.5$)

2.8 Normativa

Normativa ecuatoriana

Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC- NEC-HS-EE- Eficiencia energética en Edificaciones Residenciales: La norma establece las pautas y condiciones mínimas que deben cumplirse al diseñar y construir viviendas. Su objetivo es reducir el consumo de energía y garantizar el confort térmico de los habitantes, tomando en cuenta las características climáticas del lugar donde se construirá la vivienda.

Norma Ecuatoriana INEN 1146:2018 - Edificaciones - Condiciones higrotérmicas - Requisitos: Esta norma establece los requisitos de confort térmico y calidad del aire interior en las edificaciones. Es fundamental considerarla para evaluar el desempeño de propuestas de enfriamiento pasivo, así como al tomar datos de temperatura y humedad en ambientes interiores.

Ley orgánica de Eficiencia Energética: Esta ley establece los principios y lineamientos para la promoción y el uso eficiente de la energía en el país. Brinda un marco legal para la implementación de estrategias de enfriamiento pasivo.

Normativa internacional

ASHRAE Standard 55-2020 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy: Esta norma establece los criterios para el confort térmico en espacios interiores. Es una referencia importante para evaluar el desempeño del enfriamiento pasivo.

“Reglamento de Instalaciones térmicas en edificios” (RITE). Este reglamento establece las exigencias y requisitos que deben cumplir las instalaciones térmicas en los edificios para garantizar la eficiencia energética y la seguridad, así como el confort. Se aplica en

muchos países, particularmente en España, para regular la instalación, mantenimiento y revisión de sistemas de calefacción, refrigeración, y ventilación en edificaciones.

ISO 7730:2005 - Ergonomics - Indoor thermal climate - Determination of thermal comfort by direct assessment: Esta norma internacional proporciona un método para determinar el confort térmico en espacios interiores mediante la evaluación directa de los ocupantes. Es una herramienta útil para validar los resultados del estudio.

2.9 Simulación en softwares para análisis de estrategias de enfriamiento

La simulación mediante software se ha convertido en una herramienta esencial para entender y optimizar el comportamiento térmico de diversos sistemas. Desde la simulación fluidodinámica computacional (CFD) hasta software especializados en eficiencia energética, estas plataformas ofrecen la capacidad de modelar y prever con precisión el comportamiento térmico de sistemas complejos.

Los programas especializados como EnergyPlus, Design Builder y ANSYS fluent se permiten modelar con precisión flujos de aire, transferencia de calor y fenómenos fluidodinámicos complejos. Investigaciones como las de Montesano & Dipietro (2018) destacan la utilidad de estos simuladores para evaluar intercambiadores de calor, destacando la capacidad de estas herramientas para proporcionar resultados valiosos y optimizar el diseño de sistemas de enfriamiento.

En el ámbito arquitectónico, el uso de estos simuladores ha logrado evaluar factores como la orientación de los edificios, la distribución de sombra, la selección de materiales y la eficacia de sistemas de enfriamiento pasivos o activos (Montazeri et al., 2015). Además, contribuye a la eficiencia energética y al confort térmico en una variedad de aplicaciones, desde edificaciones residenciales hasta complejas instalaciones industriales (Asadbeigi et al., 2023).

2.9.1 Utilización de ANSYS CFD como herramientas de simulación y su aplicabilidad

ANSYS CFD (Computational Fluid Dynamics) es una herramienta de simulación utilizada para analizar y predecir el comportamiento de fluidos y gases en entornos físicos. Es un software ampliamente utilizado en el campo de la ingeniería y se utiliza para modelar y simular una amplia gama de fenómenos relacionados con el flujo de fluidos, como la transferencia de calor, la aerodinámica, la mezcla de fluidos, la combustión y la interacción fluido-estructura (Asadbeigi et al., 2023)

El software ANSYS CFD utiliza una aproximación numérica basada en ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento del flujo de fluidos. Estas ecuaciones se realizan en un dominio espacial y se resuelven utilizando métodos numéricos avanzados. Además, ofrece un conjunto completo de herramientas y funcionalidades para preprocesamiento, simulación y posprocesamiento, lo que permite modelar y analizar problemas de flujo complejos de manera precisa (Montazeri et al., 2015).



Figura 62. Visualización y ventajas de interfaz de ANSYS
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

2.9.2 Investigaciones previas y estudios de casos: Aplicación CFD

En esta sección se revisan estudios relacionados al análisis de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Se consideran casos en climas cálido húmedo y subhúmedo, además que son modelos de experimentación mediante simulaciones.

Dentro del análisis de esta investigación se examinan el estudio de Kristianto et al. (2014). Este análisis se centró en las condiciones de confort térmico y velocidad del viento en una vivienda tradicional de Minahasa en Indonesia, con clima tropical. El objetivo principal fue identificar elementos de diseño bioclimático en la arquitectura vernácula que pudieran ser integrados en la arquitectura contemporánea.

Durante la investigación, se evaluaron 12 variantes de viviendas según aberturas y altura, las cuales fueron modeladas en Autodesk Revit y posteriormente exportadas a al software CFD para su simulación correspondiente. En el proceso de simulación, se estableció un volumen circundante para representar el entorno exterior, y se aplicaron tres condiciones de frontera distintas: velocidad del viento, presión y deslizamiento del viento.



Figura 63. Vivienda tradicional de Minahasa en Indonesia.
Fuente: (Kristianto et al., 2014)

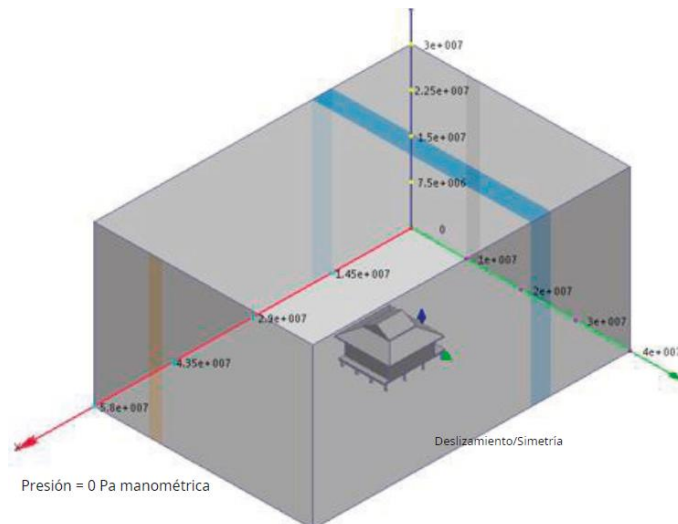


Figura 64. Condiciones de frontera en el modelo CFD.
Fuente: (Kristianto et al., 2014)

Como conclusión, sugieren que la simulación CFD tiene el potencial de anticipar al diseñador información crucial sobre el confort térmico en construcciones. Al analizar una vivienda tradicional en Minahasa, se observó que la elevación de la vivienda sobre pilotes y la altura de los vanos desempeñan un papel significativo en la mejora del confort térmico, facilitando una mayor velocidad interna del viento. La incorporación de una chimenea solar en una vivienda elevada ofrece mejoras sustanciales en la velocidad del viento en el interior. Además, la presencia de áreas sombreadas debajo de la casa durante el día contribuye a reducir la temperatura del aire en dicha zona, creando condiciones más frescas y propicias para la entrada de aire, entre otros hallazgos relevantes.



Figura 65. Simulación de magnitud de velocidad del modelo de prueba 3 – 3 de la vivienda Minahasa.
Fuente: (Kristianto et al., 2014)

Otra investigación que empleó la simulación CFD fue llevada a cabo por Naboni et al. (2017). En este estudio, se examina la viabilidad de utilizar software de CFD para generar mapas visualizables que representen el confort térmico espacial en edificaciones. El propósito es proporcionar una comprensión detallada del flujo de calor a través de diversas partes del edificio y sus espacios, permitiéndoles tomar decisiones de diseño cualitativas en las etapas conceptuales. La investigación aplicó mapas de temperatura radiante promedio en la remodelación de un pequeño edificio educativo en Copenhague como ejemplo concreto de aplicación de esta metodología.

El edificio, diseñado para un uso flexible, incorporó particiones móviles que permiten varias configuraciones interiores adaptadas a distintos propósitos, lo que a su vez influye en las condiciones térmicas. El proceso de simulación comenzó con la modelación de las configuraciones del edificio utilizando el software Rhino, y posteriormente, estas configuraciones fueron importadas al CFD. Las simulaciones se llevaron a cabo considerando un día representativo de verano y otro de invierno, ambos al mediodía.

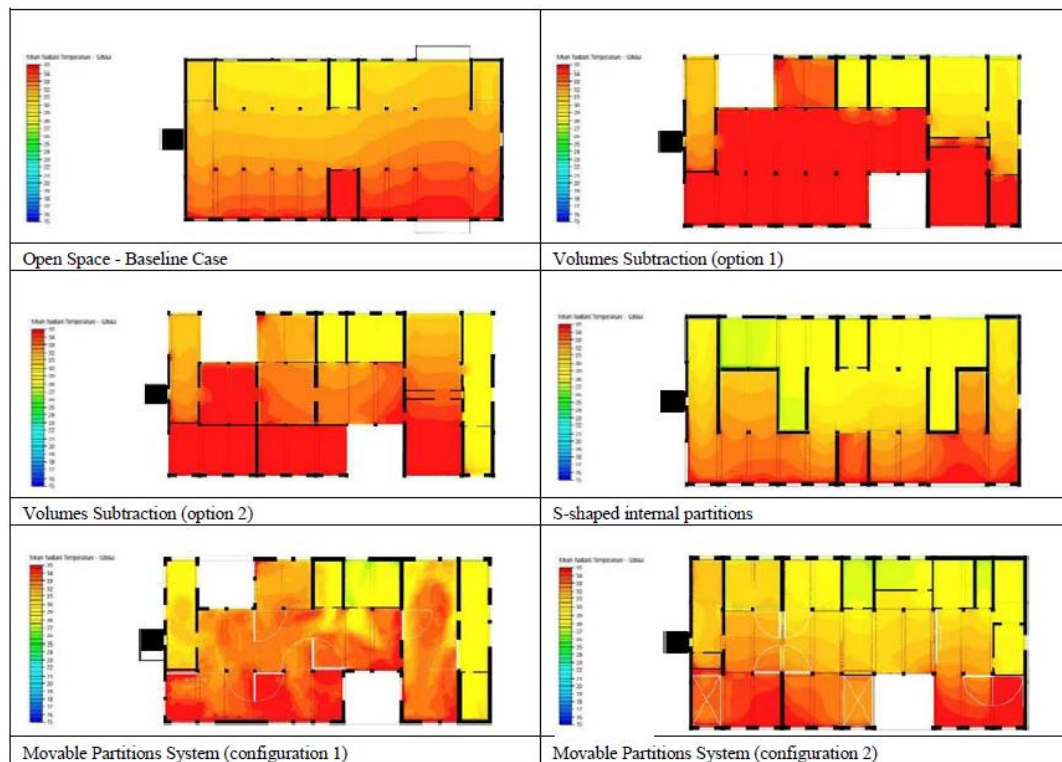


Figura 66. Construcción de 155 simulación CFD. Las variaciones de diseño se comparan al mediodía de un día típico de verano.

Fuente: (Naboni et al., 2017)

MARCO METODOLÓGICO

2.10 Método de la investigación

Para la presente investigación se utilizó un método hipotético-deductivo e inductivo, de carácter investigativo experimental. En primer lugar, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura sobre climas, bioclimática, implementación de estrategias de enfriamiento pasivo y los efectos asociados al uso de cubiertas de zinc en climas cálidos húmedos. Esta revisión proporcionó un conocimiento profundo sobre los conceptos, principios y aplicaciones relevantes para el estudio. A partir de esta comprensión, se formuló una hipótesis para establecer la relación entre el uso de estrategias de enfriamiento pasivo evaporativo indirecto en las cubiertas de zinc y la mejora del confort térmico en las viviendas de la comunidad Rukullakta.

Luego de recopilar datos climatológicos (temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento), complementada con el monitoreo in situ de viviendas con cubiertas de zinc de dos tipologías, se procedió a la fase de experimentación utilizando software como Autodesk Revit y ANSYS CFD. Estas herramientas permitieron modelar y simular las tipologías para reproducir condiciones climáticas actuales y proyectadas, aplicando intercambiador de tubos de calor por punto de rocío como estrategia de enfriamiento evaporativo debido a su eficiencia en la transferencia de calor y su capacidad para reducir las temperaturas interiores sin el uso de energía adicional. Los resultados de las simulaciones no solo determinaron su impacto en el consumo energético de cada vivienda, sino que también influyeron en el confort térmico general.

Luego, se procedió a realizar un análisis estadístico y una comparación de los datos para evaluar la efectividad de las estrategias de enfriamiento pasivo aplicadas a las viviendas con cubiertas de zinc. El objetivo fue identificar patrones y tendencias que respaldaran la hipótesis inicial planteada. Este proceso culminó en la presentación de los hallazgos de la investigación, incluyendo la discusión de resultados y conclusiones basadas en la

recopilación de datos de la investigación documentada y las simulaciones realizadas en software. Además, se brindaron recomendaciones para la aplicación práctica del intercambiador de calor.

En resumen, la metodología empleada se caracterizó por ser consecutiva y dinámica, combinando una secuencialidad estructurada para adaptarse a cambios y nuevos descubrimientos. Esta estrategia se dividió en tres fases interrelacionadas: análisis, experimentación y resultados, como se muestra en la Figura 68. La secuencialidad demostró una progresión lógica, mientras que la dinámica permitió ajustes conforme avanzaba el proceso de experimentación. Cada fase contribuyó de manera integral a la comprensión de los objetivos de la investigación, facilitando el análisis de datos y la obtención de conclusiones significativas.

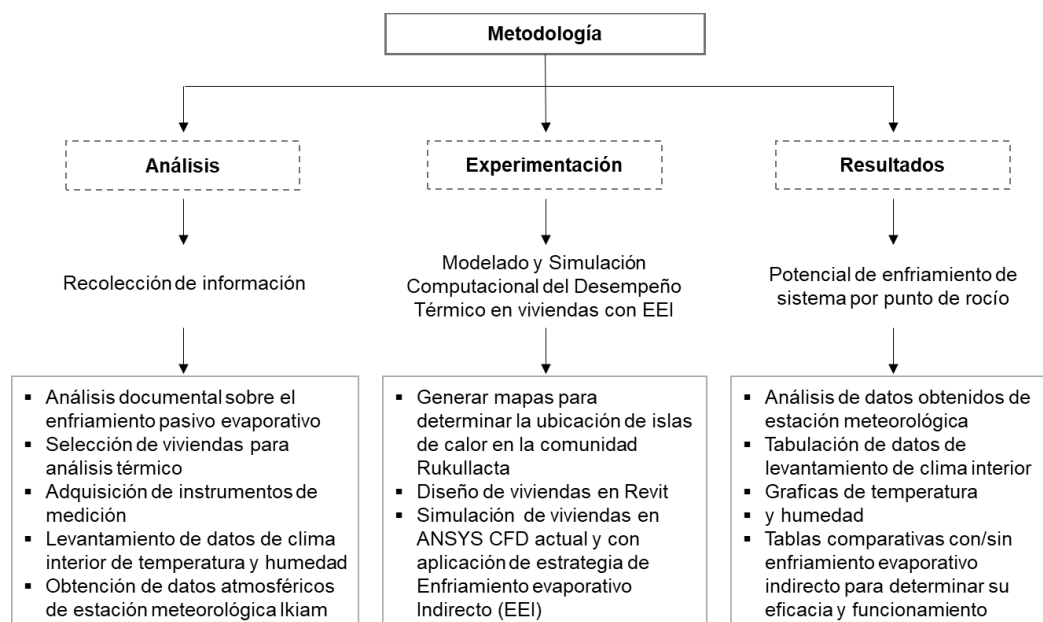


Figura 67. Cuadro de metodología aplicada
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

2.11 Recopilación de datos meteorológicos

En el marco de esta investigación, se recopilaron datos esenciales correspondientes a los años 2022 y 2023, incluyendo la temperatura atmosférica, humedad relativa, registros de precipitación acumulada, así como la radiación directa, global y difusa. Además, se

evaluaron elementos vitales para comprender el clima de la localidad, incluyendo la velocidad y dirección del viento. Esta información, proporcionada por la estación meteorológica de la Universidad Regional Amazónica Ikiam, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, y archivos de One Building, sirvió como base sólida para este estudio. Los datos recopilados sirvieron como insumo para las simulaciones numéricas y permitieron calibrar los modelos, asegurando así resultados más precisos y confiables.

- **Análisis bioclimático**

En base a la información climatológica recopilada, se utilizó el software Climate consultant y CBE Thermal Comfort Tool para realiza el análisis bioclimático estableciendo tácticas y requisitos para aplicación de estrategias de enfriamiento evaporativo. A través de la carta de Givoni y el método adaptativo, se evaluaron las necesidades térmicas de la región y se identificaron las zonas climáticas más adecuadas para la aplicación de esta tecnología. Los resultados de este análisis permitieron dimensionar y optimizar el sistema, garantizando su máxima eficiencia.

- **Datos de medición de cubiertas**

Se emplearon termómetros ambientales para el seguimiento preciso de la temperatura y humedad de las cubiertas, los cuales fueron adquiridos del laboratorio de Geociencias de la Universidad Regional Amazónica Ikiam. Esta elección se llevó a cabo con el fin de analizar detalladamente su desempeño durante el proceso de sobrecalentamiento de dichas cubiertas en un periodo determinado. Respecto a la velocidad del viento, se optó por utilizar los datos de la estación meteorológica local para garantizar una mayor precisión y representatividad de las condiciones climáticas generales del área de estudio. Al considerar los datos de una estación meteorológica calibrada, se minimiza el error asociado a mediciones puntuales en las viviendas y se obtiene una visión más completa de la influencia del viento en el comportamiento térmico de las cubiertas.

2.12 Descripción de los equipos de medición

Los termómetros ambientales utilizados son de la marca Elitech, modelos Precise. Cada uno de estos termómetros están equipados con un sensor para medir la temperatura y humedad interna y de las cubiertas. Dichos sensores están formados por termopares con protección de PVC montados a dos centímetros del fondo de cada material, ideales para medir temperaturas exteriores entre -50 °C y 70 °C. Cuenta con un datalogger del software de ElitechlogWin que se observa en la figura 42. en donde se pueden establecer parámetros como los máximos y mínimos tanto de temperatura como humedad relativa. El intervalo para la grabación de datos es ajustable, variando desde los 10 segundos hasta las 24 horas. La descarga de la información se realiza mediante un puerto USB que conecta el dispositivo a la PC y ofrece la posibilidad de exportar los datos a diferentes formatos como Excel o PDF.



Figura 68. Instrumento de medición Elitech
Fuente: Prodemaq, 2020

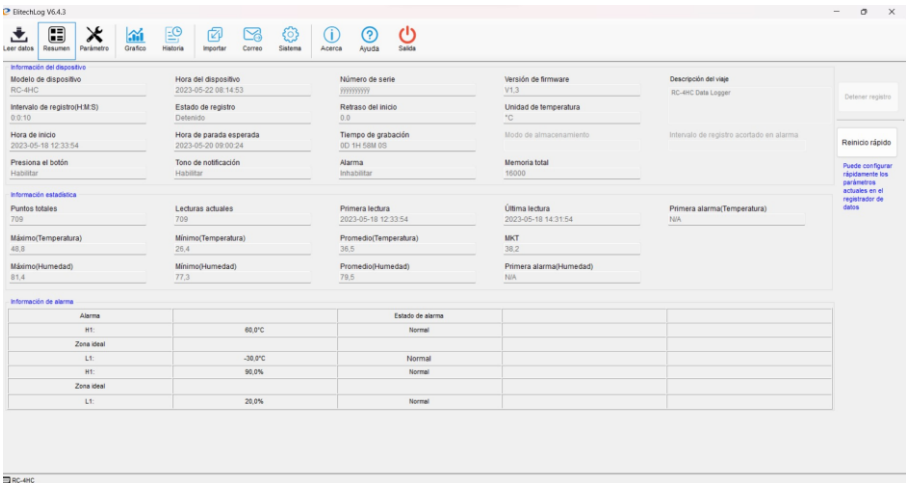


Figura 69. Inicio para configuración de parámetros de la datalogger Elitech
Fuente: Software Elitech, 2024

2.13 Selección y análisis de tipologías de vivienda

La comunidad de Rukullakta fue seleccionada como sitio de experimentación para la implementación de estrategias de enfriamiento evaporativo indirecto (EEI) en viviendas mediante un análisis utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se emplearon capas de información espacial como temperatura superficial del suelo, uso del suelo y densidad poblacional para identificar áreas con mayor potencial para la aplicación de EEI. Dentro de la comunidad, se seleccionaron dos modelos de vivienda representativos: de un nivel y de dos niveles (fotografía 1). basándose en su frecuencia en la comunidad, su variabilidad en cuanto a diseño, materiales de construcción y su potencial de escalabilidad a otras comunidades con características habitacionales similares. La utilización de SIG y la selección de tipologías representativas han permitido identificar el sitio de experimentación más adecuado y sentar las bases para una implementación más amplia de SEI en contextos rurales, con el potencial de mejorar el confort térmico y la calidad de vida de las poblaciones rurales.



Fotografía 1. Recopilación fotográfica de viviendas de la comunidad Rukullakta para análisis térmico de cubiertas.

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

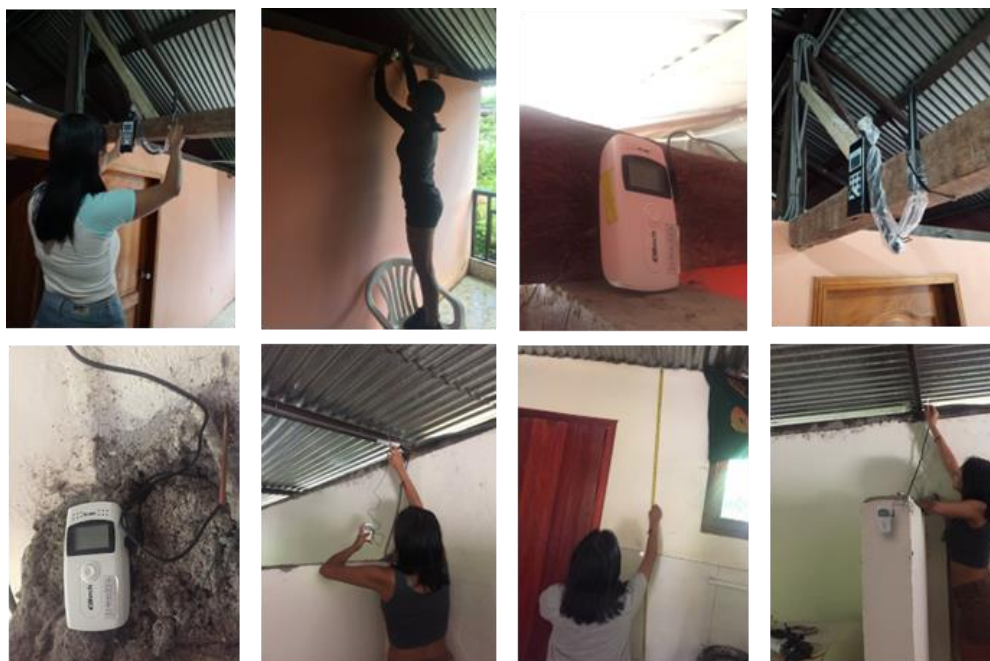


Fotografía 2. Tipologías de viviendas seleccionadas de 1 y 2 pisos.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

2.13.1 Monitoreo de las cubiertas

El monitoreo se llevó a cabo durante febrero y marzo del 2024, siguiendo el cronograma del proyecto y considerando la disponibilidad de los instrumentos de medición. Los registros se realizaron diariamente durante ambos meses para cada tipología de vivienda, sin importar el estado del cielo (nublado o despejado), con el objetivo de comprender la dinámica climática interior y exterior durante los procesos de enfriamiento y calentamiento de las cubiertas. Se prestó especial atención a las horas entre las 12:00 p.m. y las 3:00 p.m., ya que según Torres (2018), es el periodo de mayor influencia de radiación solar sobre la cubierta, dato fundamental para el análisis del proyecto.

El sensor se colocó en el interior de las viviendas siguiendo las normas del "Reglamento de Instalaciones térmicas en edificios" (RITE), que recomienda ubicar los sensores a una altura de 1,70 a 2 metros y en un punto central (ver fotografía 3). Se fijó en una posición estable con abrazaderas de cable y cintas doble faz para asegurar la consistencia en la recolección de datos.



Fotografía 3. Monitoreo de temperatura y humedad de cubiertas de las dos tipologías de vivienda.

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

Con el objetivo de capturar cambios rápidos en las condiciones ambientales y detectar fluctuaciones significativas, se registraron datos de temperatura simultáneamente en ambas tipologías de viviendas cada 10 minutos durante 12 horas al día (de 6 a.m. a 6 p.m.). Esta elección se basó en estudios previos (Ortiz et al., 2021) y se consideró adecuada para simulaciones. Los picos de temperatura más altos alcanzados cada día se registraron en fichas de registro detalladas (ver tabla 3 en anexos)., recopilados del software Elitechlogwin. Posteriormente, la información se organizó en tablas y se realizó la tabulación de datos para facilitar su análisis y comparación. De esta manera, se obtuvo un conjunto de datos preciso y estructurado para analizar las condiciones ambientales y evaluar el comportamiento térmico de las cubiertas.

La ubicación de los instrumentos de medición se detalla en los levantamientos arquitectónicos en planta y sección (figuras 71 y 72). En la tipología 1, el instrumento se ubicó estratégicamente en el punto medio de la vivienda habitada, excluyendo el área en construcción y el pórtico frontal. En la tipología 2, no se excluyó ningún espacio para establecer el punto medio de colocación del sensor. Este enfoque se diseñó para

optimizar la estabilidad y facilitar la manipulación del instrumento, manteniendo su ubicación consistente a lo largo del estudio para evitar alteraciones en los resultados.

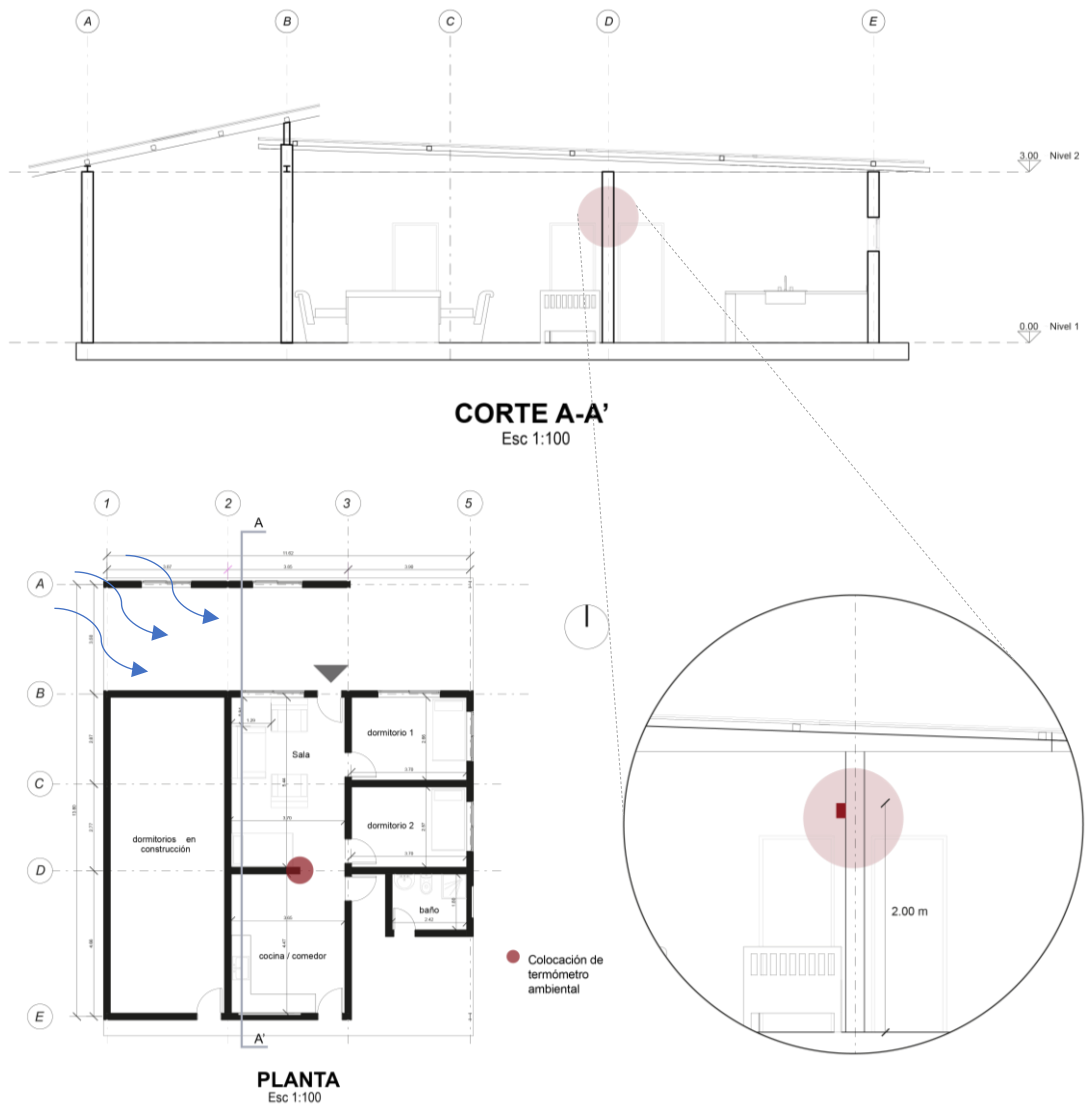


Figura 70. Punto de colocación de instrumento de medición mostrada en planta arquitectónica y sección de tipología de vivienda 1

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

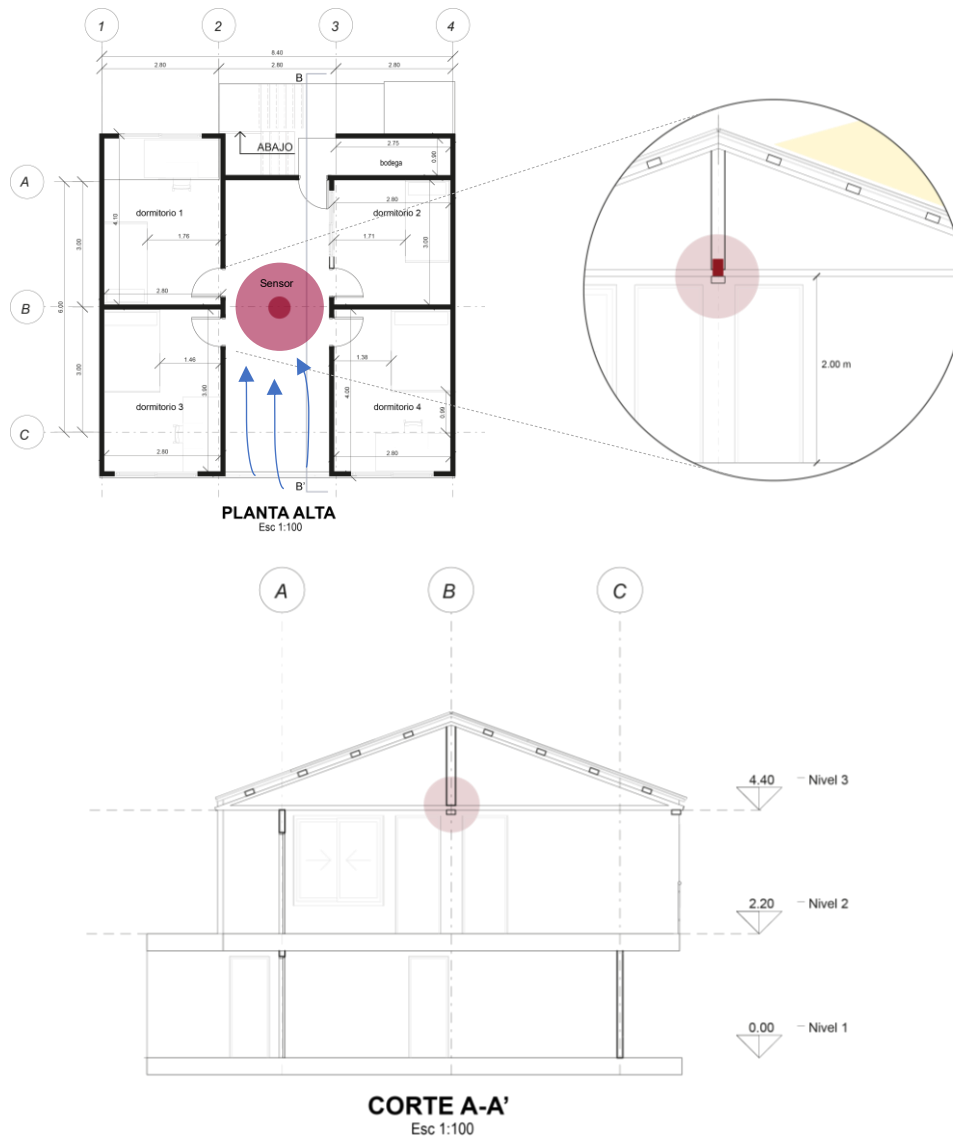


Figura 71. Puntos de colocación de instrumento de medición mostrada en planta arquitectónica y sección de tipología de vivienda 2
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024

La ubicación de los puntos de entrada de viento se determinó en función de la posición de los intercambiadores de calor y de las características arquitectónicas de cada tipología de vivienda. Se priorizaron aquellos puntos donde el flujo de aire pudiera incidir directamente sobre el intercambiador, maximizando así la eficiencia del proceso de enfriamiento evaporativo. Esta decisión, junto con la ubicación estratégica de los instrumentos de medición (tal como se muestra en las figuras 71 y 72), permitió evaluar de manera precisa la influencia del sistema de enfriamiento en la temperatura y humedad interior.

2.14 Variables del estudio

Se define como cualquier entidad que puede tomar diversos valores, ya sea cualitativa o cuantitativamente, según lo señala Carrillo (2020). De acuerdo con su investigación, se identificó que estas variables son de naturaleza cuantitativa y se clasificaron mediante un esquema en tres categorías:

1. Variables de control

Se utilizan para contrarrestar sus efectos en la variable dependiente y no son susceptibles de manipulación, únicamente de medición.

2. Variables independientes

Las variables independientes son aquellas que el investigador manipula para establecer su relación con el fenómeno.

3. Variables dependientes

Las variables dependientes son aquellas que se miden u observan para determinar el efecto de las variables independientes.

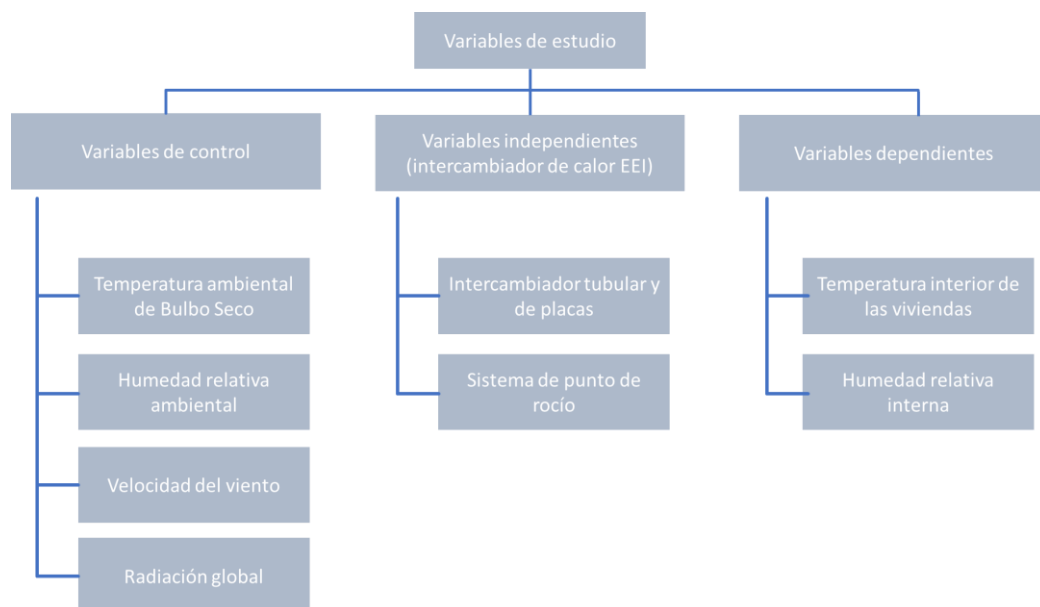


Figura 72. Esquema de las variables empleadas en el estudio

Fuente: (Carrillo, 2020)

2.15 Descripción de experimentación en el software

Se empleó la versión estudiantil de Ansys CFD para llevar a cabo las simulaciones, aprovechando distintos componentes del software, tales como Ansys Fluent, Workbench y Discovery. Se utilizaron funciones específicas de la barra de herramientas, como "Fluid Flow (Fluent)" para el análisis del flujo de fluidos y "Steady State Thermal" para la evaluación de condiciones térmicas. En la siguiente figura, se muestra la caja de herramientas que contiene diversas funciones y módulos.

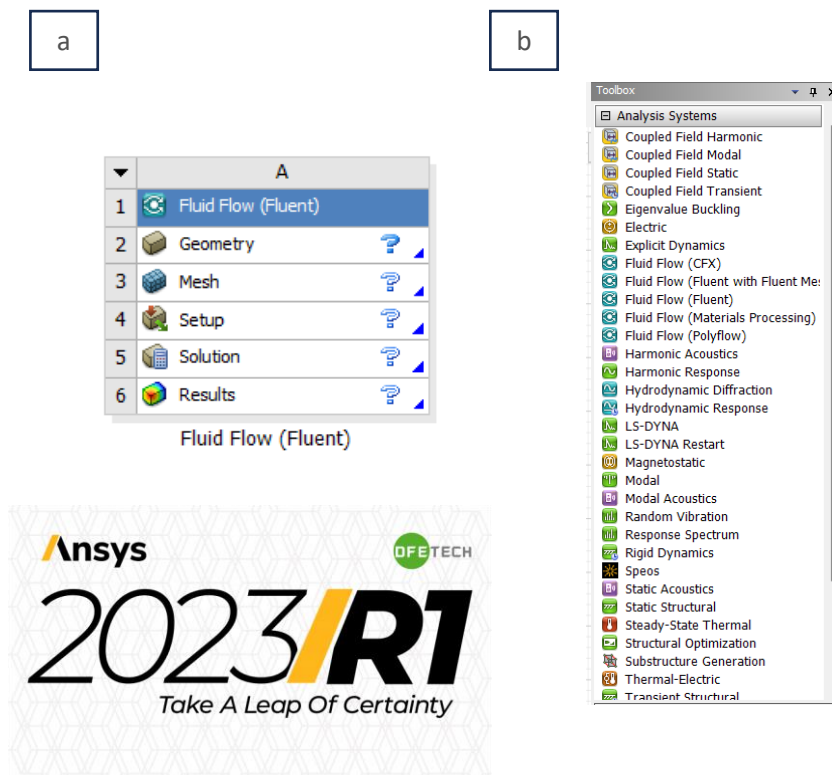


Figura 73. Interfaz de Ansys Workbench a) Panel de propiedades b) Caja de herramientas

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

Las simulaciones se llevaron a cabo en dos etapas: 1) se simuló el estado actual de las dos viviendas y 2) se realizó la simulación del intercambiador de calor como parte de la estrategia de enfriamiento evaporativo indirecto implementando el intercambiador de calor. A continuación, se presenta un esquema del proceso de simulaciones en el programa.

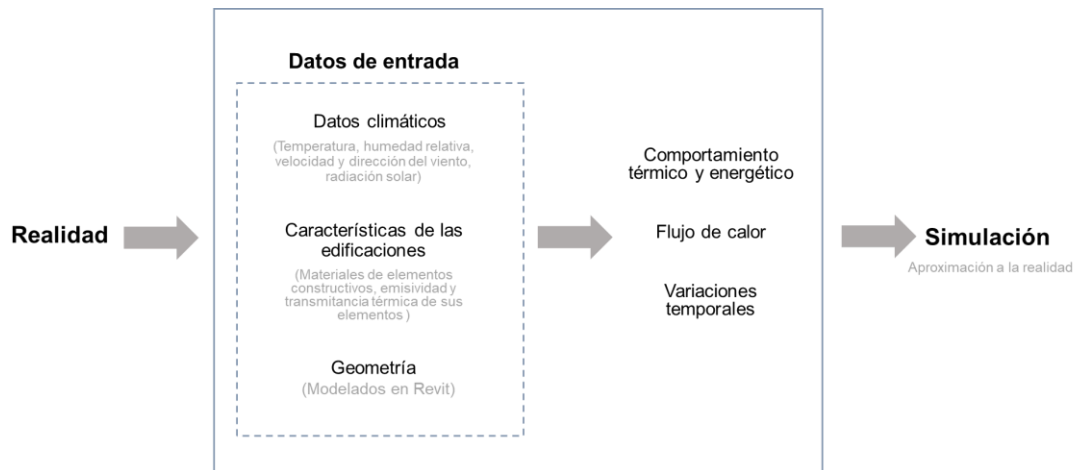


Figura 74. Esquema de funcionamiento de la simulación de tipologías sin aplicación de estrategias

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

CAPITULO III: RESULTADOS

3.1 Selección del sitio de estudio

Este estudio presenta un análisis geoespacial detallado de Archidona, una ciudad ecuatoriana ubicada en la provincia de Napo, utilizando el Sistema de Información Geográfica (SIG) QGIS. El mapa, elaborado a escala 1:24:000 (figura 76), ofrece una representación precisa de la ciudad y sus alrededores, incluyendo su ubicación (coordenadas 0°33'S, 77°42'W) y altitud (577 msnm) en el piedemonte amazónico. La división política del cantón Archidona se visualiza, destacando las parroquias Archidona (cabecera cantonal), Cotundo, Hatun Sumaco y San Pablo de Ushpayacu.

El enfoque principal del estudio se centra en la parroquia Archidona, donde se ha empleado la capa de temperatura superficial del suelo para identificar los sitios con mayor efecto de islas de calor.

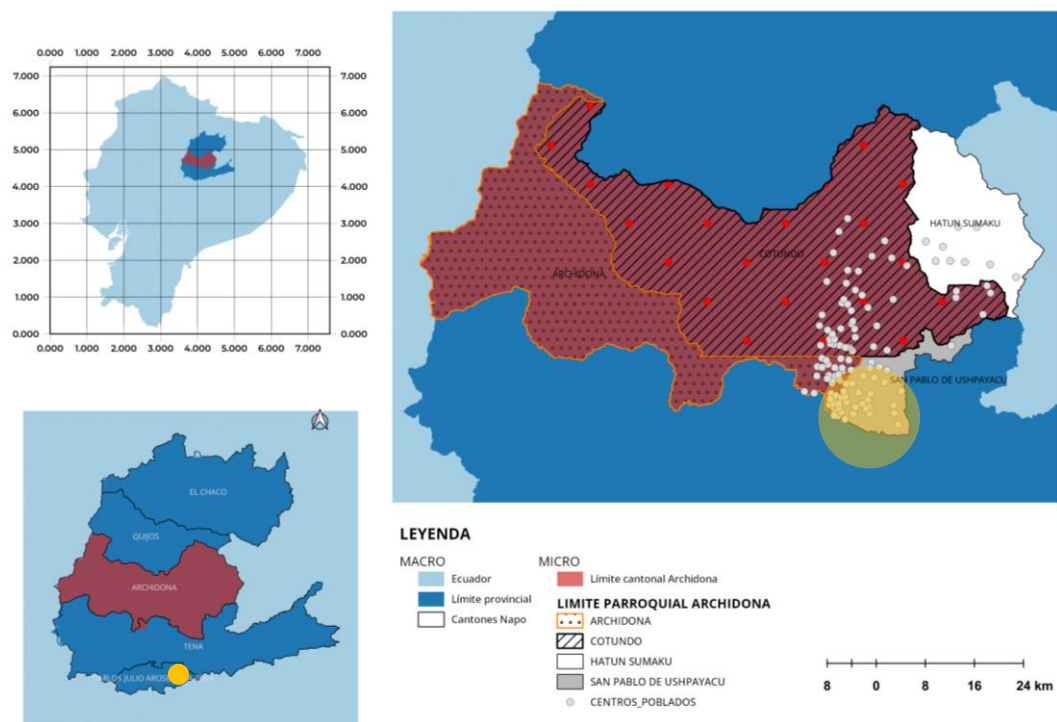


Figura 75. Mapa de división territorial de Archidona
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

El mapa de temperatura superficial del suelo (LST) (figura 77) muestra una distribución desigual de la temperatura superficial terrestre en la zona urbana del cantón Archidona. Las áreas con mayor temperatura, representadas en tonos rojos y anaranjados, se concentran en el centro de la ciudad, donde se observa una alta densidad de construcciones y poca cobertura vegetal. En contraste, las áreas con menor temperatura, representadas en tonos verdes y azules, se encuentran en las periferias de la ciudad, donde hay mayor presencia de vegetación y menor densidad de edificios.

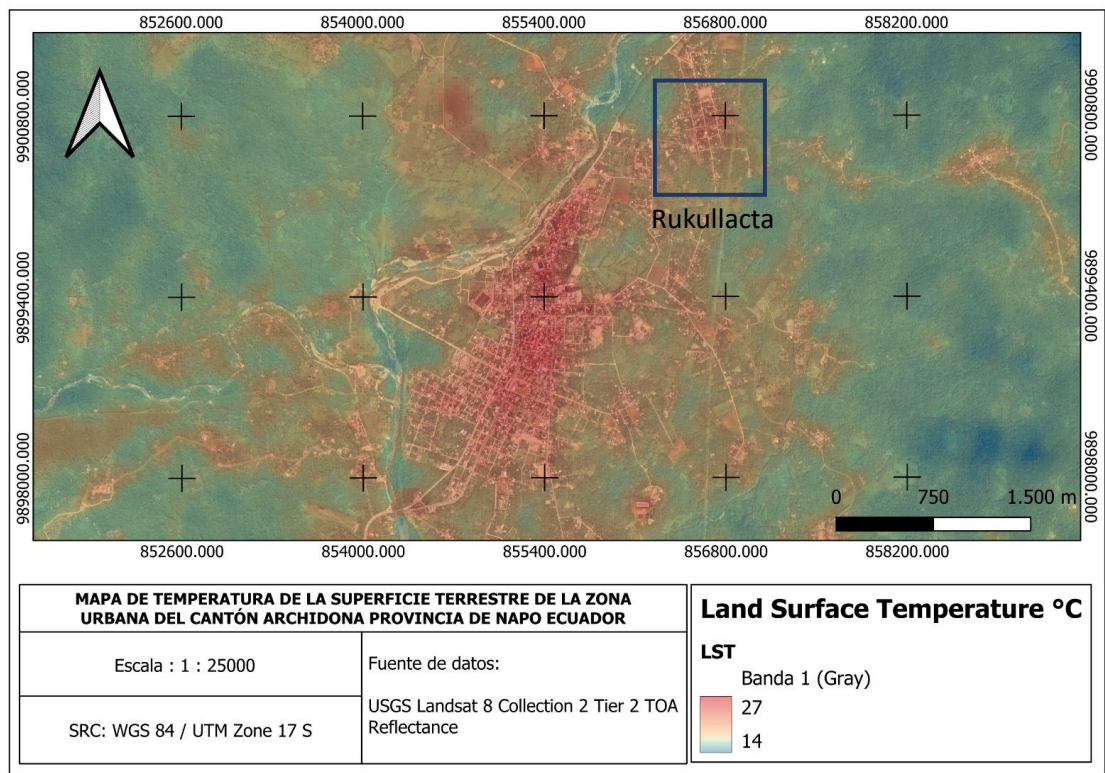


Figura 76. Mapa de temperatura superficial del suelo (LST)

Fuente: Proyecto "Islas de calor" Ikiam

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

El mapa de calor por total de viviendas de la figura 78, evidencia que Rukullacta se encuentra dentro de un área de color rojo intenso, lo que indica una alta concentración de viviendas en esa zona. Esto sugiere que es una comunidad poblada. Al comparar Rukullacta con otras áreas del mapa, se observa que la concentración de viviendas es significativamente mayor en esta comunidad. Lo cual la convierte en un área de especial interés para el análisis de diversos aspectos sociales, económicos y ambientales.

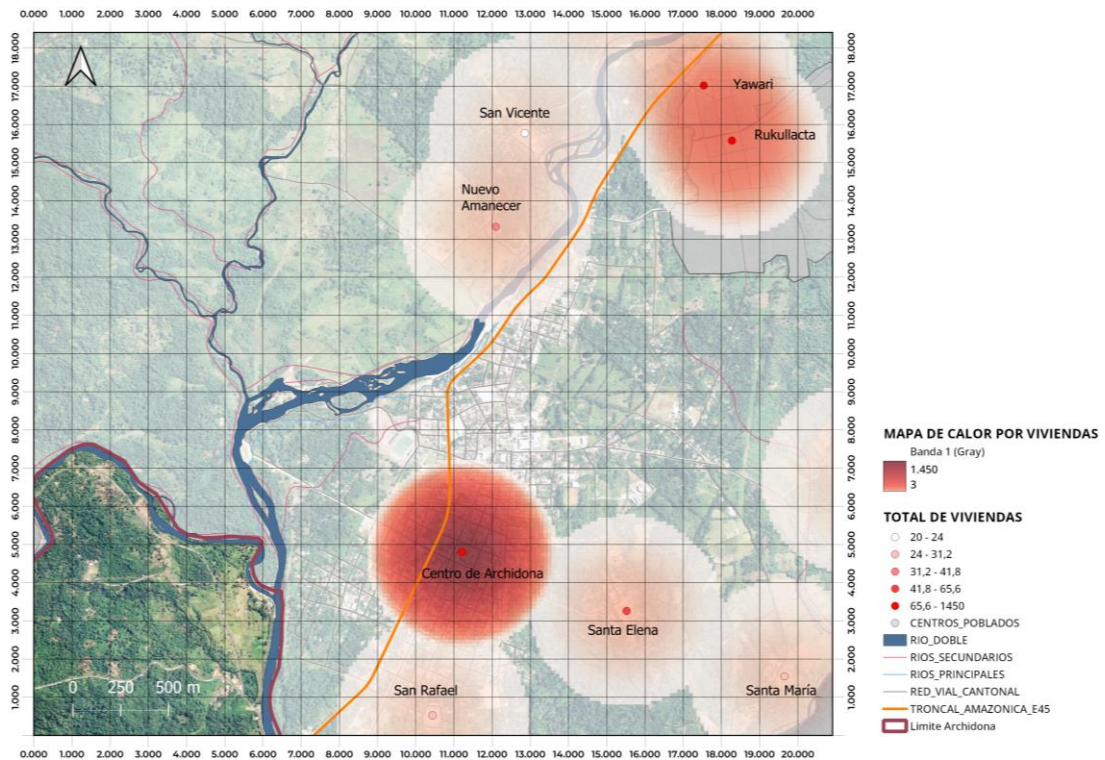


Figura 77. Mapa de calor por total de viviendas en comunidades de Archidona.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

3.2 Consideración de datos climatológicos

Los datos meteorológicos recopilados en la estación de la Universidad Ikiam, dada su cercanía al área de investigación, han sido integrados a nuestro estudio. Esta información detallada y actualizada sobre las condiciones climáticas locales nos permitirá realizar un análisis preciso y tomar decisiones fundamentadas en relación con el diseño y la implementación del proyecto

Tabla 14. Datos climatológicos de estación meteorológica Ikiam

VARIABLES CLIMATOLÓGICAS		UNIDAD	MESES												ANUAL
TEMPERATURA	MAXIMA EXTREMA	°C	38.9	32.3	31.8	36.0	28.7	29.3	31.1	30.0	33.7	31.5	30.0	32.0	38.9
	PROMEDIO MÁXIMA	°C	32.3	31.2	30.4	31.5	30.6	31.3	31.1	31.9	32.5	29.2	32.0	31.0	31.4
	MEDIA	°C	23.3	22.9	22.7	23.2	23.3	22.8	22.9	21.7	23.2	21.0	25.1	26.7	26.7
	PROMEDIO MÍNIMA	°C	17.0	18.2	17.2	18.1	17.8	18.3	16.8	14.8	17.1	16.3	20.7	21.3	18.2
	MINIMA EXTREMA	°C	16.7	18.0	16.0	17.0	17.0	16.0	15.0	14.0	16.0	16.3	16.0	16.0	9.7
	OSCILACIÓN	°C	15.3	13.1	13.1	13.4	12.8	13.1	14.2	17.0	15.4	12.9	11.3	9.7	13.4
RADIACIÓN SOLAR	INSOLACIÓN TOTAL	h	3972.0	4125.0	3213.0	3707.0	3744.0	3659.0	3624.0	4584.0	5376.0	5340.0	4785.0	5001.0	51 130.0
	TOTAL (Global)	W/m ²	945.4	875.7	1099.2	1019.3	901.4	895.4	938.3	957.2	1030.4	934.0	817.5	820.0	936.1
	DIRECTA	W/m ²	328.0	342.0	267.0	309.0	313.0	307.0	303.0	383.0	448.0	395.0	356.0	408.0	346.6
	DIFUSA	W/m ²	75.0	93.9	108.5	111.4	121.9	122.1	105.7	122.6	167.3	150.0	270.4	136.0	132.0
PRESIÓN	MEDIA	hPa	804.7	803.5	803.1	803.4	803.2	795.7	780.9	700.4	700.6	700.2	780.9	780.6	771.4
HUMEDAD	RELATIVA MAXIMA	%	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.1	99.6	99.8	100.0	99.5	99.5	100.0	96.7
	RELATIVA MEDIA	%	91.2	93.2	94.6	92.1	91.3	90.7	90.2	89.3	86.9	89.0	90.0	89.0	85.9
	RELATIVA MINIMA	%	47.5	59.3	62.4	56.1	58.8	50.5	46.2	47.6	50.4	54.0	58.4	46.0	68.5
	EVAPORACIÓN TOTAL	mm	145.9	145.2	146.5	145.1	145.9	145.9	145.1	145.8	144.0	145.7	145.7	145.2	1 907.0
	TEMP. DE BULBO HÚMEDO	°C	22.2	22.1	22.0	22.2	22.2	21.7	21.7	20.4	21.5	19.7	23.8	25.2	11.1
PRECIPITACIÓN	TOTAL	mm	104.7	125.2	146.2	173.0	148.9	124.4	89.0	74.9	96.7	131.9	130.6	120.3	1 465.8
	MAXIMA	mm	134.0	202.0	217.0	231.0	151.0	139.0	138.0	94.0	66.0	200.0	202.0	192.0	231.0
	MAXIMA EN 24 h	mm	19.1	15.1	32.4	29.8	21.5	48.6	52.0	52.6	59.3	31.1	12.1	14.0	59.3
	MAXIMA EN 1 h	mm	4.7	12.0	4.9	18.5	11.7	23.8	32.3	21.3	42.2	18.2	8.8	10.5	42.2
	MINIMA	mm	4.0	4.0	7.0	18.0	13.0	40.0	38.0	26.0	32.0	12.0	4.0	3.0	3.0

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024. Apoyado del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

La tabla de datos climatológicos proporciona un resumen de las condiciones climáticas en la región durante el período analizado. Se incluyen valores mensuales de temperatura máximas, mínimas y promedias, lo que permite una visión detallada de la variabilidad térmica a lo largo del año. De igual forma, se registran las cifras máximas y mínimas de humedad relativa, junto con el promedio y evaporación total. Los datos de presión atmosférica en hectopascales (hPa), la radiación solar que constan de radiación solar global, directa y difusa, en vatios por metro cuadrado (W/m²). Por último, las precipitaciones mensuales, expresadas en milímetros, se presentan para comprender los patrones de lluvia a lo largo del tiempo.

3.3 Análisis climático

- Temperatura

En la siguiente gráfica se observa que las temperaturas máximas extremas muestran las condiciones más cálidas registradas, con valores que alcanzan los 38.9°C en enero. El

promedio máximo mensual osciló entre 29.2°C y 32.5°C. En cuanto a las temperaturas medias, se observó una variación de 21.0°C a 26.7°C a lo largo del año. Las temperaturas mínimas extremas registraron su punto más bajo en 14.0°C el 30 de enero de 2021. La oscilación térmica, medida como la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas, varió significativamente, alcanzando valores entre 9.7°C y 17.0°C. Estos resultados proporcionan información valiosa para comprender la amplitud térmica y la variabilidad climática en la región, aspectos cruciales para la planificación y diseño de proyectos en el área. El modelo utilizado para establecer la zona de confort (ZC) fue el modelo adaptativo aplicando las fórmulas de la norma ASHRAE Standard 55-2013:

Límite superior (aceptabilidad 80%) = $0.38 * (T_{me}) + 18.2^{\circ}\text{C} = 0,38 * 23,3 + 18,2 = 27.05^{\circ}\text{C}$

Límite inferior (aceptabilidad 80%) = $0.38 * (T_{me}) + 13.2^{\circ}\text{C} = 0.38 * (T_{me}) + 13.2^{\circ}\text{C}$
22.05 °C

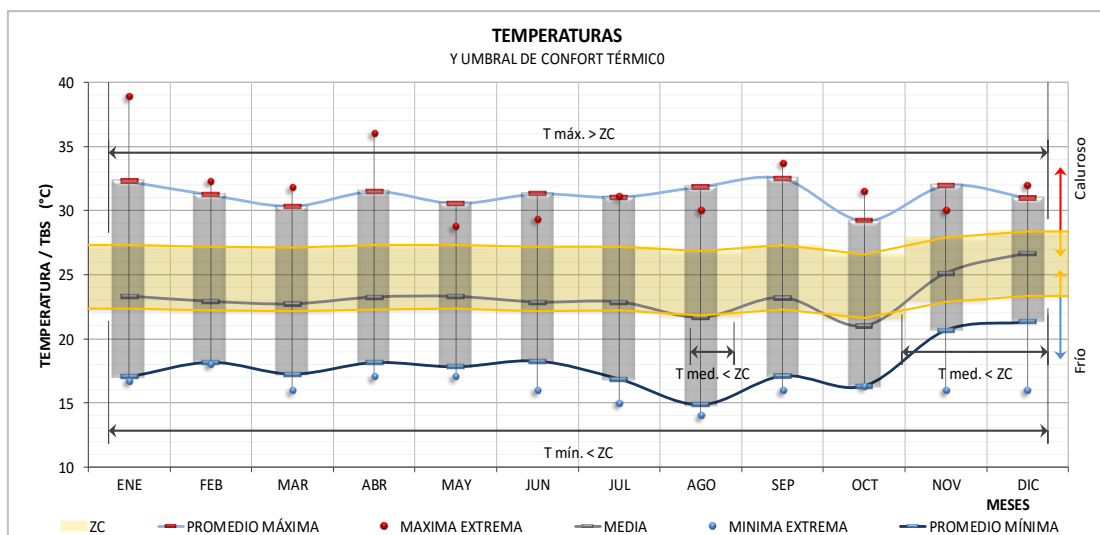


Figura 78. Grafica de temperatura máxima, extrema, media, mínima y mínima extrema
Fuente: Estación meteorológica de la Universidad Ikiam y software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

Para identificar la temperatura característica en distintos momentos del día, se toma en cuenta una tabla de temperaturas horarias (ver tabla 15). Las lecturas de datos son tomadas cada hora y se utiliza una escala cromática para representar las temperaturas

de manera visual. Los colores han sido asignados de manera que las temperaturas más frías se asocian con colores fríos, como el azul, y las temperaturas más cálidas a colores apacibles, como el naranja y el amarillo. Esto facilita la rápida comprensión de las variaciones de temperatura a lo largo del día.

Tabla 15. Escala de temperatura en grados celcius

Sobrecalentamiento (SC)	31,3	<	
	29,3	31,3	
	27,3	29,3	
Confort (CF)	22,3	27,3	
Bajocalentamiento (BC)	20,3	22,3	
	18,3	20,3	
	<	18,3	

Fuente: Bioclimatic Analysis Tool (BAT), 2024.

Para analizar los resultados de la tabla de temperaturas horarias, primero observamos las temperaturas mínimas y máximas promedio a lo largo del año. Las temperaturas más bajas se registran en enero, con una mínima promedio de 17,0°C y una máxima promedio de 32,3°C. Las temperaturas más altas se alcanzan en octubre, con una mínima promedio de 22,0°C y una máxima promedio de 31,5°C.

Las horas más calurosas suelen ser alrededor de las 15:00 (3:00 PM) en la mayoría de los meses, con temperaturas que superan los 30°C. Por otro lado, las temperaturas más frescas se registran usualmente en las primeras horas de la mañana, alrededor de las 06:00 (6:00 AM) y 07:00 (7:00 AM), con valores cercanos a 18°C en la mayoría de los meses.

Tabla 16. Tabla de temperaturas horarias

PROM. TEMP.		HORA		TEMPERATURAS HORARIAS																								BC		CF			SC		
				05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00								
17.0	32.3	ENE	17.2	17.6	17.5	18.8	20.8	23.3	26.0	28.5	30.5	31.8	32.3	32.1	31.6	30.8	29.8	28.5	27.0	25.4	23.8	22.3	20.8	19.5	18.5	17.7	41.7	20.8	37.5						
18.2	31.2	FEB	18.3	18.2	18.5	19.7	21.4	23.6	25.8	28.0	29.7	30.8	31.2	31.1	30.7	30.0	29.1	28.0	26.7	25.0	23.7	22.4	20.3	19.4	18.7	37.5	25.0	37.5							
17.2	30.4	MAR	17.4	17.2	17.6	18.8	20.5	22.7	24.9	27.1	28.8	30.0	30.4	30.2	29.8	29.1	28.2	27.1	25.8	24.5	23.1	21.8	20.5	19.4	18.5	17.8	41.7	29.2	29.2						
18.1	31.5	ABR	18.3	18.1	18.5	19.7	21.5	23.7	26.0	28.2	29.9	31.1	31.5	31.4	30.9	30.2	29.3	28.2	26.9	25.5	24.1	22.7	21.5	20.3	19.4	18.7	37.5	25.0	37.5						
17.8	30.6	MAY	17.9	17.8	18.2	19.3	21.0	23.1	25.3	27.4	29.1	30.2	30.6	30.4	30.0	29.3	28.4	27.4	26.2	24.8	23.5	22.2	21.0	19.9	19.0	18.4	41.7	20.8	37.5						
18.3	31.3	JUN	18.4	18.3	18.6	19.8	21.5	23.6	25.9	28.0	29.8	30.9	31.3	31.2	30.7	30.1	29.1	28.0	26.8	25.5	24.1	22.8	21.5	20.4	19.5	18.8	37.5	25.0	37.5						
16.8	31.1	JUL	17.0	16.8	17.3	18.5	20.4	22.7	25.2	27.5	29.4	30.6	31.1	30.9	30.4	29.7	28.7	27.5	26.1	24.7	23.2	21.7	20.4	19.2	18.2	17.5	41.7	20.8	37.5						
14.8	31.9	AGO	15.0	14.8	15.3	16.8	19.1	21.9	24.8	27.6	29.9	31.4	31.9	31.7	31.1	30.2	29.1	27.6	26.0	24.2	22.5	20.7	19.1	17.6	16.5	15.6	41.7	20.8	37.5						
17.1	32.5	SEP	17.2	17.1	17.5	18.9	20.9	23.5	26.1	28.7	30.7	32.0	32.5	32.3	31.8	31.0	30.0	28.7	27.2	25.6	24.0	22.4	20.9	19.6	18.6	17.7	37.5	25.0	37.5						
16.3	32.9	OCT	16.4	16.3	16.7	17.8	19.5	21.6	23.9	26.0	27.7	28.8	29.2	29.1	28.6	28.0	27.1	26.0	24.7	23.4	22.1	20.8	19.5	18.4	17.5	16.9	41.7	29.2	29.2						
20.7	32.0	NOV	20.8	20.7	21.0	22.0	23.5	25.3	27.3	29.1	30.6	31.6	32.0	31.8	31.5	30.9	30.1	29.1	28.1	26.9	25.7	24.6	23.5	22.5	21.7	21.1	29.2	29.2	41.7						
21.3	31.0	DIC	21.4	21.3	21.6	22.4	23.7	25.0	26.6	29.9	30.7	31.0	30.9	30.6	30.1	29.4	28.6	27.6	26.7	25.6	24.7	23.7	22.9	22.2	21.7	29.2	33.3	37.5	37.5						
17.8	31.2	ANUAL	17.9	17.8	18.2	19.4	21.2	23.3	25.7	27.9	29.7	30.8	31.2	31.1	30.7	30.0	29.0	27.9	26.6	25.2	23.8	22.4	21.2	20.0	19.1	18.4	38.2	25.3	36.3						

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

Para describir los puntos altos de temperatura en función de los datos proporcionados, podemos categorizar los valores en tres grupos:

Valores de Bajo Calentamiento (BC): Estos son los momentos en los que las temperaturas son menores a 22,4 grados Celsius. En la tabla obtenida, estos valores se encuentran generalmente en las primeras horas de la mañana, alrededor de las 06:00 (6:00 AM) y 07:00 (7:00 AM). También se observan algunos valores de BC en la medianoche y las primeras horas de la madrugada (entre las 00:00 y las 04:00). Estas son las horas más frescas del día.

Valores de Sobre calentamiento: Estas son las circunstancias en que las temperaturas superan los 27,4 grados Celsius. En la tabla, los valores de sobre calentamiento son más comunes alrededor de las 15:00 (3:00 PM). En la mayoría de los meses esta es la hora más cálida del día.

Valores en el Rango de Confort (CF): Estos son los valores de temperatura que se encuentran dentro del rango de confort, que van de 22 a 27 grados Celsius. A lo largo del día, los valores de CF varían, pero generalmente se encuentran en ese rango durante las horas de la mañana y la tarde.

La gráfica del recorrido diario de temperatura muestra una variación típica a lo largo de un día. Comienza con temperaturas entre 14.8°C y 21.3°C en las primeras horas de la mañana, alcanzando su punto máximo alrededor de las 14:00 (2:00 p.m.) y las 15:00 (3:00 p.m.) con valores que oscilan entre 28.7°C y 32.5°C, dependiendo del mes. Durante la noche, la temperatura disminuye gradualmente, llegando a alrededor de 15°C en la madrugada. Este patrón revela la influencia de la radiación solar y la luz del día, con un claro contraste entre temperaturas cálidas durante el día y más frescas durante la noche.

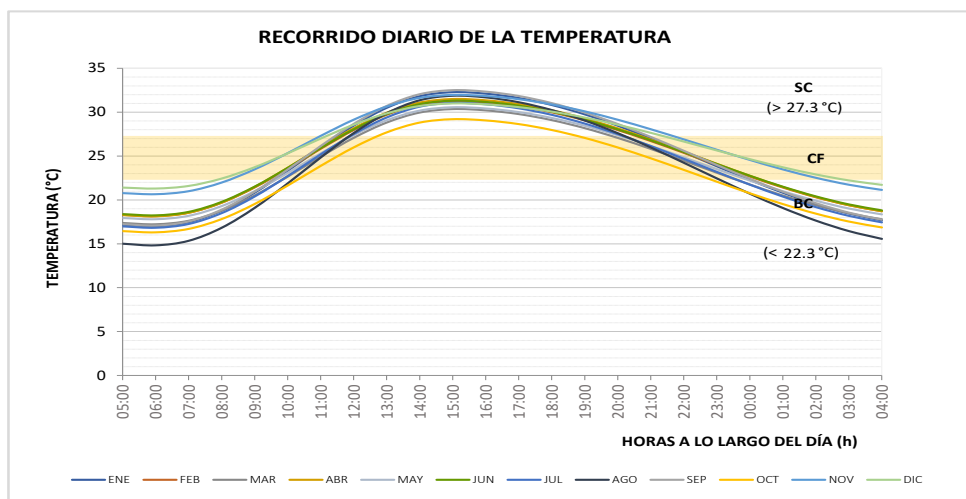


Figura 79. Recorrido diario de la temperatura, índices de sobrecalentamiento, bajo calentamiento y confort térmico
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

- Radiación solar

En cuanto a la radiación solar, los valores de insolación total varían significativamente, con picos de 5376,0 horas en septiembre y un mínimo de 3213,0 horas en marzo. La radiación solar global y directa fluctúa a lo largo del año, siendo agosto el mes con la radiación solar global más alta de 1030,4 W/m², y enero con la radiación solar directa más elevada con 448,0 W/m². Estos datos ofrecen ayuda a comprender las condiciones climáticas y la disponibilidad de energía solar en la región a lo largo del año.

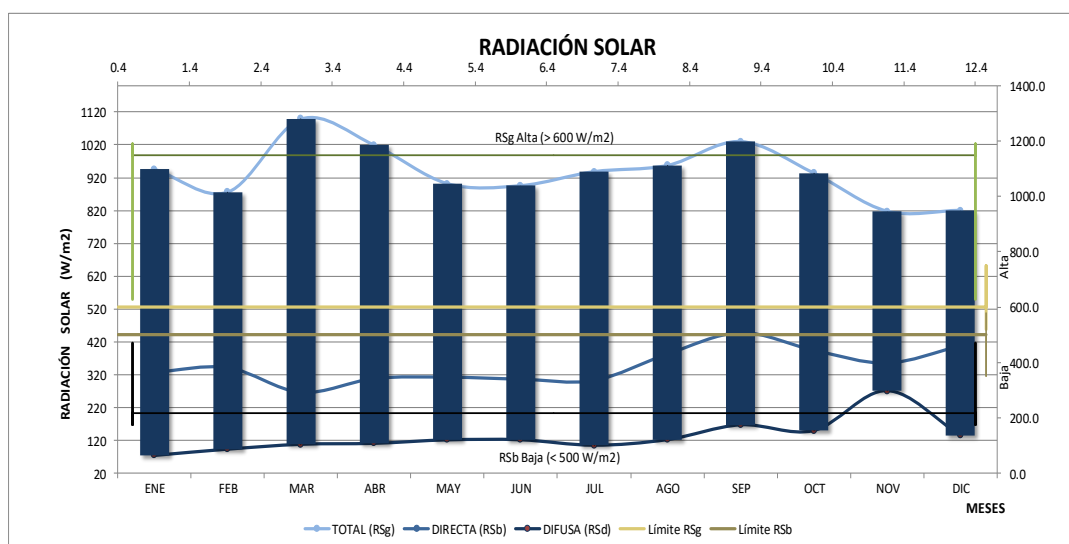


Figura 80. Gráfica de radiación solar total, directa y difusa
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

Los datos de radiación solar directa son fundamentales para evaluar la viabilidad y eficacia de estrategias de enfriamiento evaporativo en cubiertas de zinc. Es evidente un patrón estacional muy marcado (figura 81). Los valores más altos de radiación se registran durante los meses de verano (junio, julio, agosto), mientras que los valores más bajos se encuentran en los meses de invierno (diciembre, enero, febrero). Esto se debe a la inclinación del eje terrestre y a la duración del día. En cada mes, se aprecia un pico de radiación solar alrededor del mediodía solar, momento en el que los rayos solares inciden más perpendicularmente sobre la superficie.

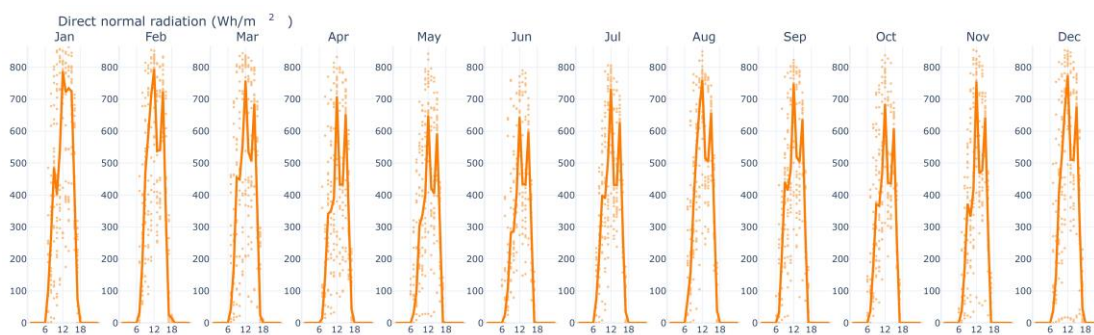


Figura 81. Radiación solar directa de enero a diciembre.

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

Humedad relativa

Dentro de la gráfica de la figura 82 se observa una variación en la humedad relativa a lo largo del tiempo, con valores constantes al 100%, indicando saturación atmosférica máxima, mientras que la humedad relativa media fluctuó moderadamente entre el 86.9% y el 94.6%. La humedad relativa mínima mostró mayor variabilidad, oscilando entre el 46.0% y el 62.4%. La evaporación total, un parámetro relevante, varió entre 144.0 mm y 146.5 mm, indicando la cantidad de agua evaporada en el área.

En cuanto a la temperatura de bulbo húmedo, experimentó variaciones entre 19.7°C y 25.2°C, reflejando las condiciones de humedad en el aire. Estos datos ofrecen una visión detallada de las condiciones climáticas en el sitio de estudio durante el periodo correspondiente. Sin embargo, es importante señalar que la humedad relativa media se sitúa un 20% por encima del rango de la zona de confort.

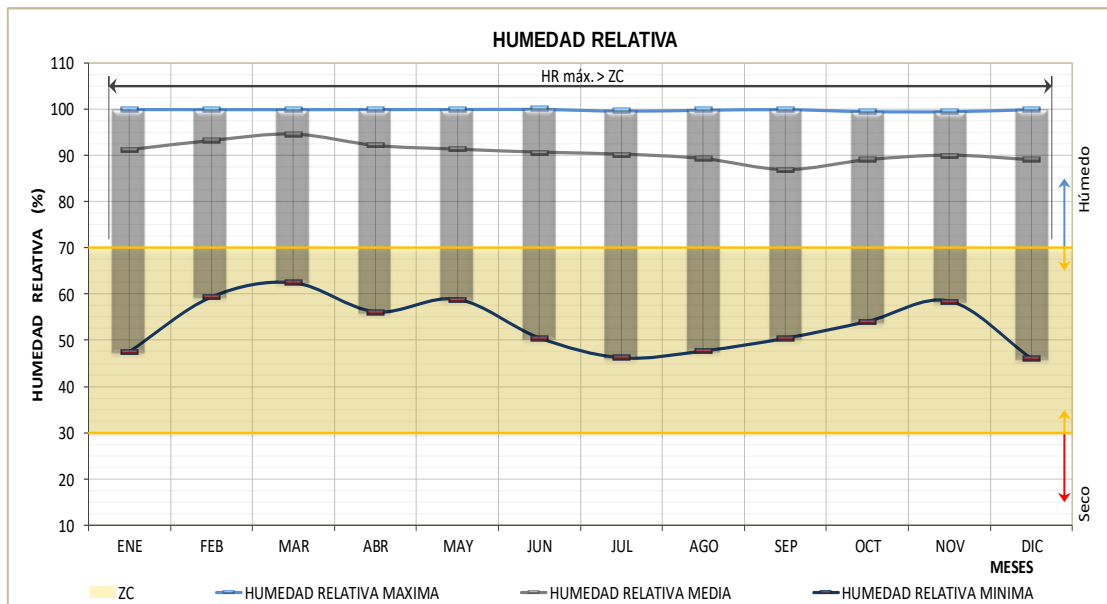


Figura 82. Humedad relativa máxima, media y mínima.

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

Viento

La relevancia de evaluar los patrones estacionales del viento forma parte del diseño del intercambiador de calor en la evaporación del agua para su funcionamiento, por lo cual los vientos predominantes fueron clave para maximizar los beneficios del enfriamiento evaporativo indirecto en las cubiertas de zinc de las viviendas de estudio.

En la figura 83 las representaciones gráficas muestran la variación del viento en relación a un periodo de cada hora durante un año, según los registros de la estación meteorológica de Ikiam. En donde cada segmento del círculo presenta el porcentaje de los datos registrados y los vientos según la dirección cardinal desde la que soplan. En el análisis de estas gráficas, se utilizó la velocidad media del viento por mes, dado que no se dispone de información detallada sobre la velocidad de los vientos predominantes y dominantes.

Rosa de vientos 1: De enero a diciembre, entre las 6:00 horas y las 13:00 horas, los vientos soplan desde el oeste y noroeste. El 12,05% presenta vientos calmados con

velocidades de 0,5 a 1,5 m/s, el 3,25% varía de 1,5 a 3,3 m/s, y un 0,10% se registra en el rango de 3,3 a 5,5 m/s.

Rosa de vientos 2: De enero a diciembre, entre las 14:00 horas y las 21:00 horas, se observan vientos calmados. El 10% de los datos registra velocidades de 0,5 a 1,5 m/s, el 4,79% varía de 1,5 a 3,3 m/s, y un 0,21% pertenece al rango de 3,3 a 5,5 m/s. Su dirección proviene del noreste.

Rosa de vientos 3: De febrero a marzo, los vientos soplan desde el oeste y noroeste entre las 6:00 horas y las 18:00 horas. El 32,7% presenta velocidades de 0,5 a 1,5 m/s, mientras que el 2,43% varía de 1,5 a 3,3 m/s.



Figura 83. Rosa de vientos de enero a diciembre 1) entre 6:00 y 13:00 horas, 2) entre 14:00 y 21:00 horas y 3) Febrero-marzo entre 6:00 y 18:00 horas.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

Los vientos son un factor crítico en el diseño de estrategias de enfriamiento evaporativo. Considerar cuidadosamente la dirección, velocidad y variabilidad de los vientos permitió optimizar la ubicación del intercambiador de calor para lograr el máximo rendimiento y eficiencia.

Análisis bioclimático

Para este análisis existen diversas herramientas visuales destinadas a analizar las variables climáticas y culturales que desempeñan un papel crucial en la consecución del confort térmico. Estas herramientas permiten una evaluación visual de las variables y sus interacciones, siendo las más comúnmente representadas la temperatura, la humedad, la radiación solar y los movimientos del aire.

A continuación, se presentan algunas gráficas que respaldan el análisis bioclimático en como los triángulos de confort, las estrategias bioclimáticas, las tablas de Mahoney y el diagrama bioclimático de Olgyay.

- Triángulos de confort

Los Triángulos de Confort representan una técnica de diseño que simplifica la elección de estrategias adecuadas para el diseño bioclimático, considerando las condiciones meteorológicas típicas de cada mes. Esta herramienta facilita la comparación entre las condiciones climáticas y los niveles deseados de confort térmico para diversas actividades, como la actividad sedentaria, el confort para dormir, la circulación interior y la circulación exterior. A continuación, se presentan los Triángulos de Confort específicos para la comunidad de Rukullacta.

La gráfica de la figura 84 evidencia que, durante los meses de noviembre y diciembre, se pueden lograr niveles apropiados de confort térmico para la circulación exterior. Además, desde febrero hasta julio, se alcanza el confort térmico necesario para la circulación interior de una persona dentro de una edificación. No obstante, es importante señalar que los meses de enero, agosto y septiembre se encuentran fuera de estos rangos de confort.

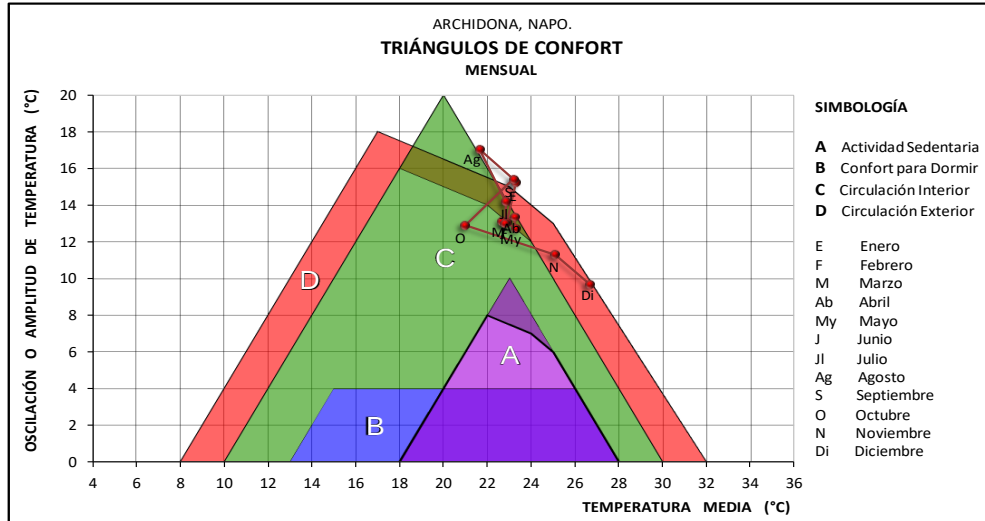


Figura 84. Triángulo de confort de Evans para sitio de estudio.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

- Estrategias bioclimáticas

En el diagrama de estrategias bioclimáticas de Evans de la figura 85, se destacan diferentes enfoques según el mes. Se sugiere la implementación de estrategias de ventilación selectiva durante diciembre. Para los meses de enero a octubre, se sugiere la adopción de estrategias basadas en la inercia térmica. Además, se observa que en el mes de noviembre es propicio combinar ambas estrategias para optimizar el confort térmico.

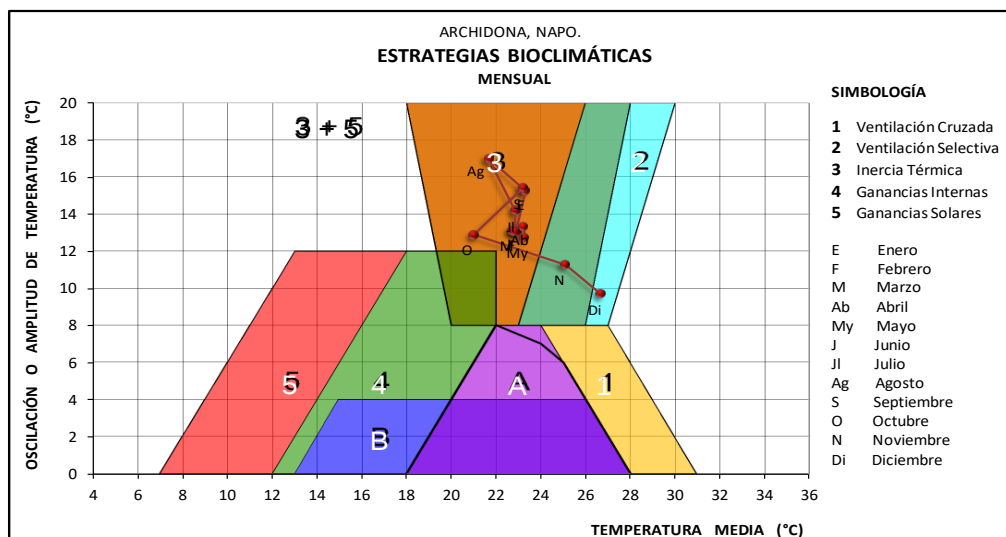


Figura 85. Diagrama de estrategias bioclimáticas recomendadas para sitio de estudio.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

Tablas de Mahoney

Para la ciudad de Archidona, según las tablas de Mahoney (tabla 17), se recomienda una orientación Norte-Sur con el eje largo en dirección Este-Oeste, junto con una configuración extendida para optimizar la ventilación. Se aconseja utilizar locales de una galería con ventilación constante y aberturas grandes que cubran entre el 50% y el 80% de la superficie de las paredes. Las aberturas deben estar ubicadas en los muros Norte y Sur, a la altura de los ocupantes y en la dirección del viento predominante, y deben contar con sombreado total y permanente. Los muros y pisos deben ser ligeros y de baja capacidad térmica, mientras que la techumbre debe ser ligera, reflectante y con cavidad para mejorar el confort térmico interior.

Tabla 17. Índices de tabla del método de Mahoney

ARCHIDONA, NAPO. TABLAS DE MAHONEY							No.	RECOMENDACIONES
INDICADORES	1	2	3	4	5	6		
NÚM. INDICADORES	12	0	1	0	0	0		
DISTRIBUCIÓN							X	1 Orientación Norte-Sur, eje largo Este-Oeste
								2
ESPACIAMIENTO							X	3 Configuración extendida para ventilar
								4
								5
VENTILACIÓN							X	6 Locales de una galería. Ventilación constante
								7
								8
TAMAÑO DE ABERTURAS							X	9 Grandes (50% - 80%)
								10
								11
								12
								13
POSICIÓN DE ABERTURAS							X	14 En muros N y S, a la altura de los ocupantes en barlovento
								15
PROTECCIÓN DE ABERTURAS							X	16 Sombreado total y permanente
								17
MUROS Y PISOS							X	18 Ligeros (baja capacidad térmica)
								19
TECHUMBRE							X	20 Ligera, reflejante y con cavidad
								21
								22
ESPACIOS NOCTURNOS EXT.								23
								24

NOTA: Para cada aspecto se da una sola recomendación o ninguna, excepto en "Protección de las aberturas" y "Espacios nocturnos exteriores", donde varias recomendaciones son posibles.

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024. Apoyado del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

Diagrama bioclimático

El Diagrama Bioclimático de Olgyay destaca como una herramienta gráfica ampliamente reconocida y utilizada en el análisis bioclimático. Se presenta en la figura 86, en el cual se observó que ninguno de los meses se encuentra dentro de esta zona de confort; en cambio, se caracterizan por la presencia de radiación solar y vientos elevados, lo que, combinado, genera incomodidad al afectar la percepción térmica. Sin embargo, se destaca en amarillo el potencial de los vientos, indicando su posible aprovechamiento para la ventilación natural en momentos en que no se alcancen niveles de confort térmico.

Asimismo, se consideró la temperatura neutra (T_n) mediante la ecuación de Aulicems, parte integral de los modelos de confort. La fórmula, $T_n = 17,6 + 0,31 * T_m$, donde T_n representa la temperatura neutra y T_m la temperatura media, arrojó un resultado de $T_n = 24,8$ °C al sustituir la temperatura media de 23,2 °C obtenida del análisis climatológico. Este dato proporciona información relevante para comprender las condiciones térmicas en la región.

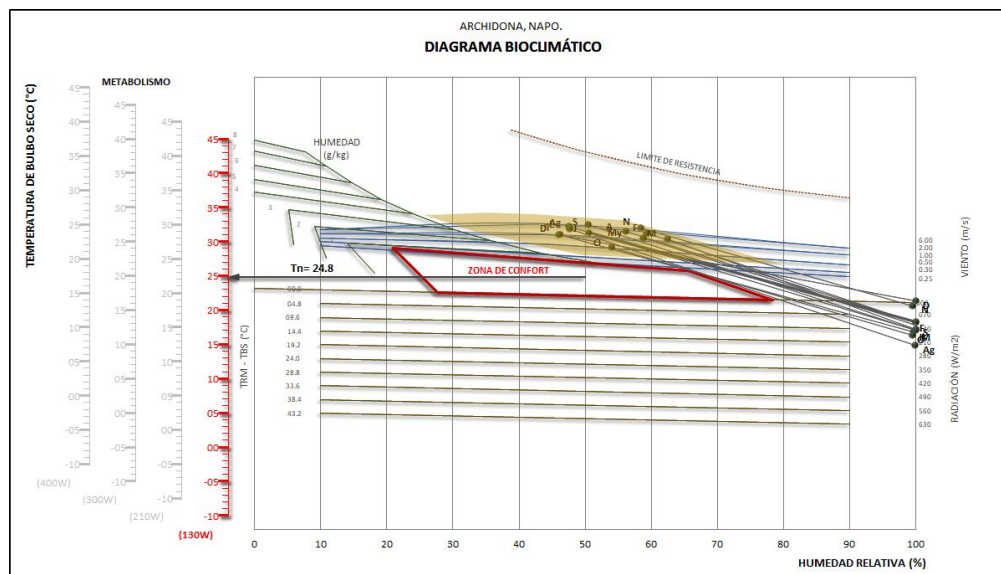


Figura 86. Diagrama bioclimático mensual de Olgyay para sitio de estudio
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024. Apoyado del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

En cuanto a la carta psicrométrica de Givoni (figura 87), las estrategias de diseño recomendadas son la protección solar de ventanas con un 90,6%, el enfriamiento por ventilación forzada con un 63,5% y el enfriamiento por ventilación natural con un 57,9 %. Pese a esto se encuentra el enfriamiento evaporativo directo e indirecto con un 25,8 y 28,8% respectivamente.

Analizando la efectividad de la aplicación de estas estrategias de enfriamiento evaporativo indirecto en clima cálido húmedo se ve que no se consiguen porcentajes significativos de confort. Es una estrategia que, examinada de manera individual, no proporciona resultados satisfactorios según este análisis. De manera similar, ocurre con la utilización de masa térmica.

A pesar de estas limitaciones, existe un interés creciente en la investigación sobre la aplicación de sistemas basados en el enfriamiento evaporativo indirecto. Este interés se justifica por los logros experimentales obtenidos, destacándose por su potencial en la reducción de la temperatura interior en comparación con el exterior, según el estudio de González & González (2013). Por tal motivo se da continuidad a la investigación.

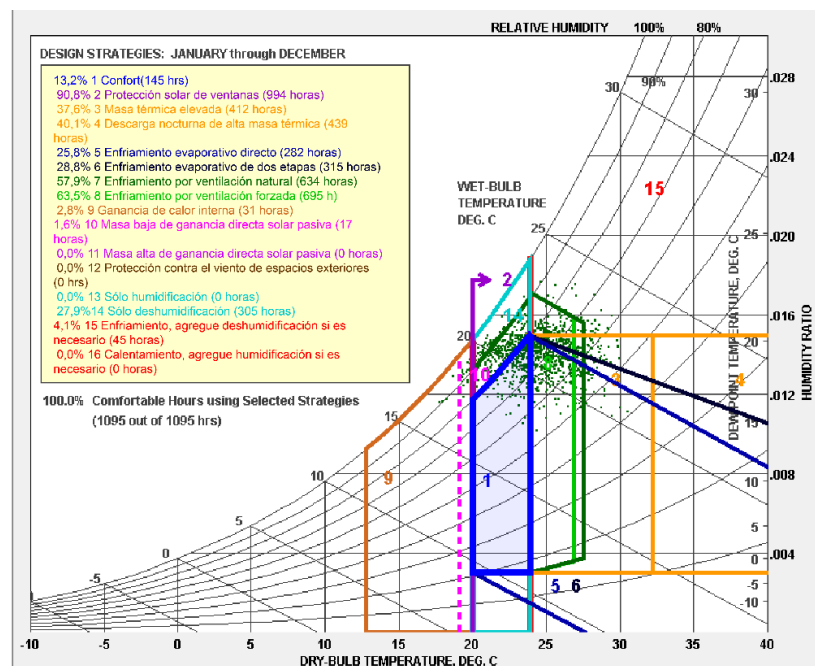


Figura 87. Carta Psicrométrica de Givoni con estrategias.

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024. Apoyado del software software Climate Consultant (BAT).

3.4 Tabulación de datos de análisis térmico de tipología 1 y 2

Después de llevar a cabo el monitoreo de las dos viviendas durante el mes de febrero y marzo, se obtuvieron los resultados de temperatura y humedad relativa, incluyendo valores mínimos, máximos y promedios. Estos datos fueron recopilados a través del dattalogger de los instrumentos de medición utilizados, posteriormente se registraron en fichas de Excel y se procedió a la tabulación de los datos en la presente gráfica de caja y bigotes. El eje X representa los días del mes, mientras que el eje Y muestra la temperatura en grados Celsius (°C).

Temperatura

La gráfica de temperatura de la tipología 1 durante el mes de febrero de 2024, muestra una variación significativa de la temperatura a lo largo del día y del mes, con valores más bajos en la mañana y más altos en la tarde. La mediana de la temperatura fluctúa entre 24°C y 34°C. Días como el 5, 8 y 11 presentan mayor dispersión, con cajas más grandes y líneas de extensión largas, indicando una amplia variabilidad en las temperaturas diarias. La temperatura promedio durante el mes fue de aproximadamente 26°C y la variación mensual muestra valores más altos en la segunda mitad del mes con valores mayores a 30 °C. Los datos son consistentes con el clima tropical de la región y no se registraron eventos meteorológicos significativos durante el período de tiempo analizado.

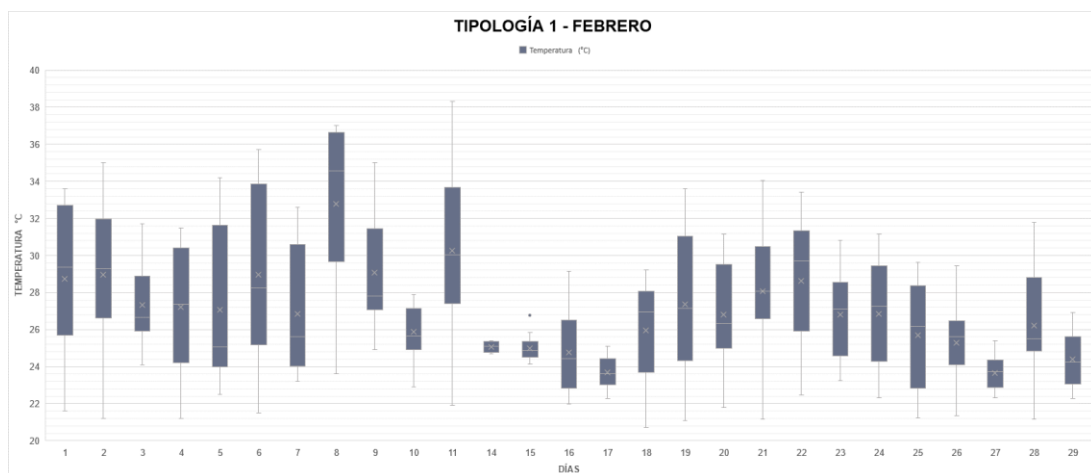


Figura 88. Gráfico de temperatura de tipología 1 en el mes de febrero
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

En cuanto a la tipología 2 para el mes de febrero se observan resultados similares. La mediana de la temperatura es de 26°C. Esto significa que la mitad de los días tuvieron una temperatura inferior a 26°C y la otra mitad tuvieron una temperatura superior a 26°C. El rango intercuartílico (IQR) es de 10°C. Esto significa que el 50% de los días tuvieron una temperatura entre 22°C y 32°C. Los extremos inferiores y superiores se extienden hasta 20°C y 38°C, respectivamente. Esto significa que hay algunos días con temperaturas muy bajas o muy altas.

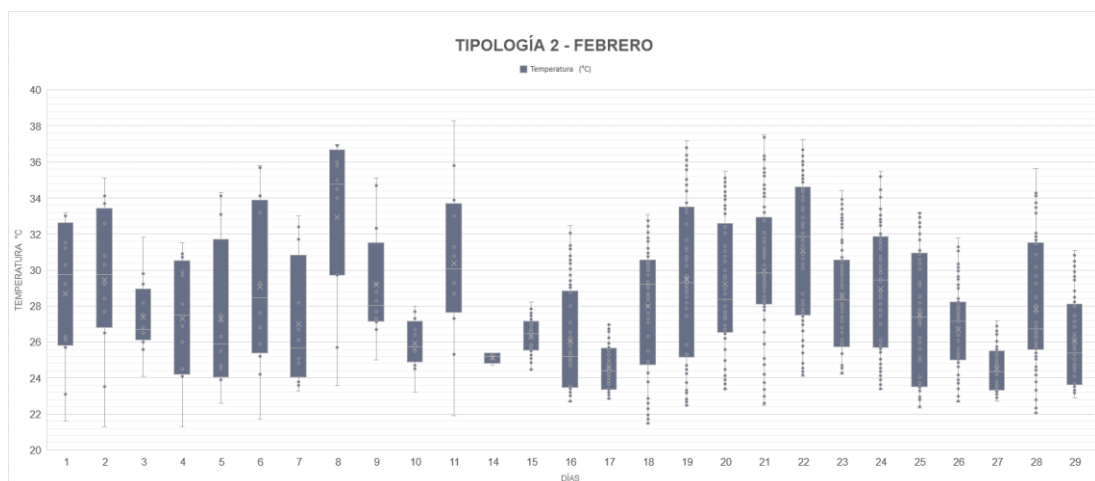


Figura 89. Gráfico de temperatura de tipología 2 en el mes de febrero.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

Para la tipología 1 en el mes de marzo la mediana es de 25 °C. La mediana de la temperatura (línea dentro de la caja) fluctúa entre los 23°C y los 32°C a lo largo del mes. La anchura de la caja indica la dispersión de la mitad central de los datos. Días como el 7, 10, y 25 tienen una caja más estrecha, lo que sugiere menos variabilidad en la temperatura. Las líneas de extensión muestran el rango de los datos, excluyendo los valores atípicos. Se extienden desde 20 a 35 °C

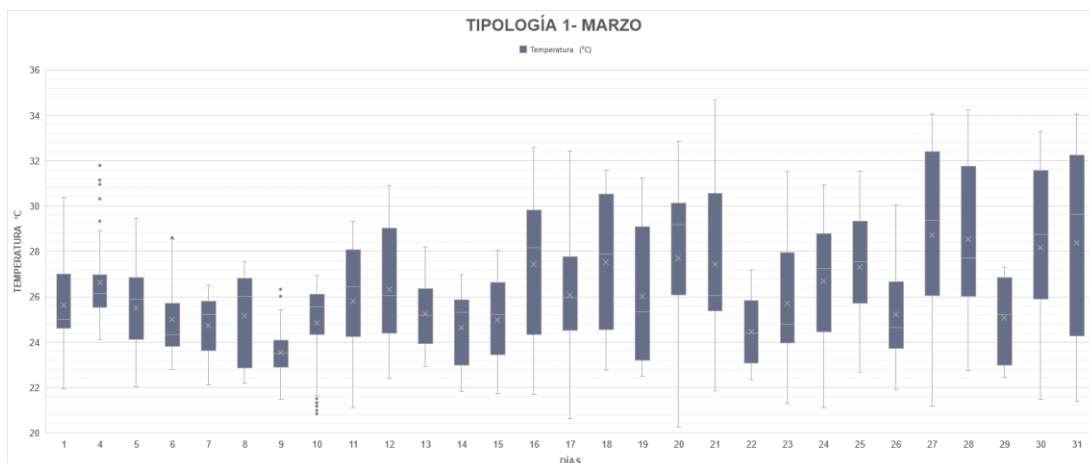


Figura 90. Gráfico de temperatura de tipología 1 en el mes de marzo
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

Observando la mediana a lo largo del mes para la tipología 2, se puede notar que, por ejemplo, el día 11 tiene una mediana de aproximadamente 28°C, el día 16 cerca de 32°C, y el día 27 alrededor de 34°C. Los bigotes se extienden desde los cuartiles hasta los valores mínimos y máximos, excluyendo los puntos atípicos que están representados por puntos individuales. La gráfica destaca la variabilidad y dispersión de las temperaturas, mostrando días con mayor variación como el 16 y el 20, en contraste con días de menor variabilidad como el 6 y el 10.

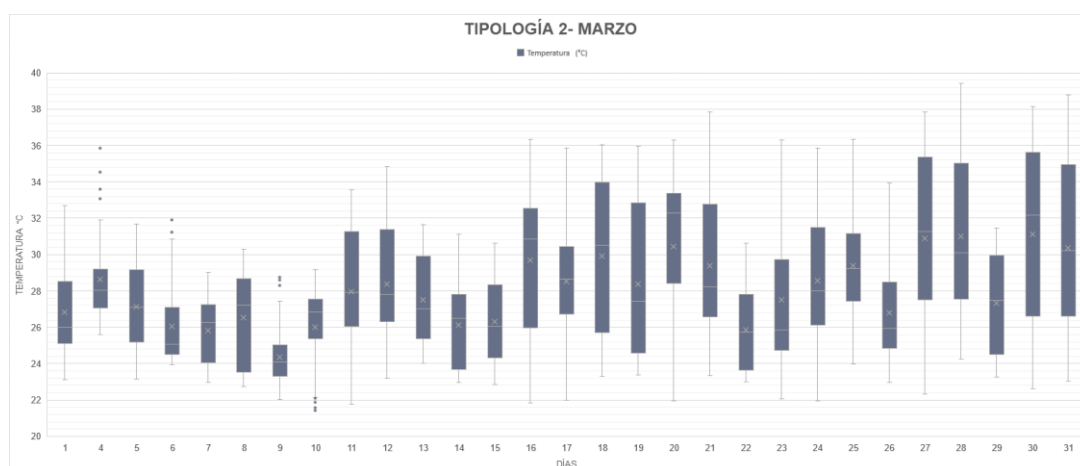


Figura 91. Gráfico de temperatura de tipología 2 en el mes de marzo.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

En ambos tipos de vivienda y para ambos meses, se observa una variabilidad significativa en las temperaturas diarias, como se refleja en las medianas que fluctúan entre valores como 25°C y 34°C. Esto indica que los días más cálidos pueden alcanzar temperaturas

considerablemente más altas que los días más frescos, afectando la comodidad térmica de los residentes. La anchura de la caja en las gráficas de caja y bigotes muestra la dispersión de las temperaturas diarias. Días con una caja más estrecha sugieren menos variabilidad, lo que podría indicar condiciones más estables en términos de temperatura ambiental. Por otro lado, días con una caja más ancha señalan una mayor variabilidad, lo que podría implicar fluctuaciones más amplias en las condiciones térmicas a lo largo del día.

Humedad Relativa

Esta gráfica muestra la distribución de la humedad relativa diaria para la "tipología 1" de vivienda durante el mes de febrero. El eje x representa los días del mes, mientras que el eje Y muestra la humedad relativa en porcentaje (%). A lo largo del mes, se observa una variabilidad significativa en la humedad relativa, con días mostrando mayor dispersión de datos, como el 3, el 6 y el 12, mientras que otros días presentan un rango más estrecho, como el 14 y el 28.

La mediana varía entre días; por ejemplo, el día 1 tiene una mediana de aproximadamente 80%, el día 15 cerca de 70%, y el día 28 alrededor de 85%. Las líneas de extensión se extienden desde los cuartiles hasta los valores mínimos y máximos, excluyendo los puntos atípicos que se representan como puntos individuales. Esta gráfica permite identificar tendencias, dispersión y posibles valores atípicos en los datos de humedad relativa para cada día del mes.

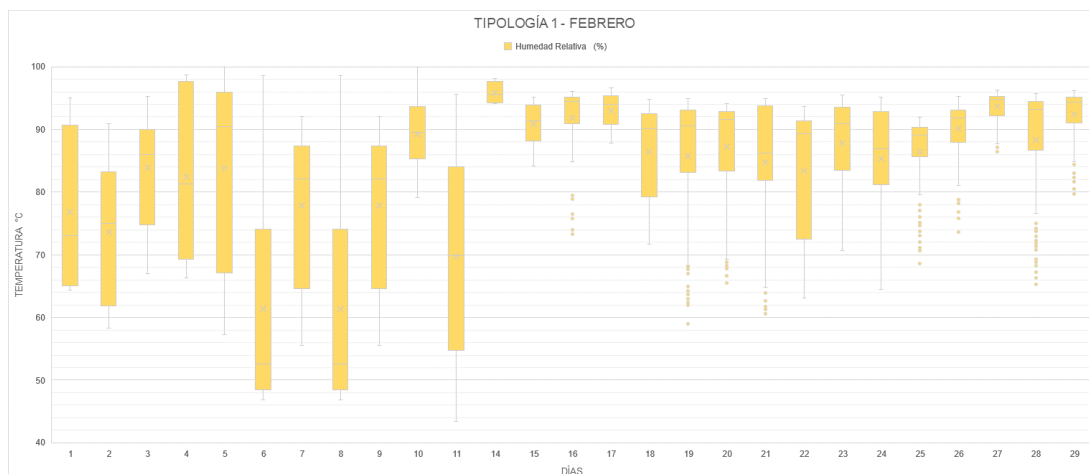


Figura 92. Gráfico de humedad relativa de tipología 1 en el mes de febrero.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

En cuanto a la tipología 2 para el mes de febrero, La humedad relativa mediana es de aproximadamente 50%. Esto significa que la mitad de los valores registrados fueron inferiores al 50% y la mitad fueron superiores. El rango intercuartílico (IQR) es de aproximadamente 25%. Esto indica que el 50% medio de los valores de datos se encuentran dentro de un rango del 25%. El valor mínimo de humedad relativa es alrededor del 40%. Esto sugiere que hubo algunos casos en los que el aire estaba muy seco. El valor máximo de humedad relativa es cercano al 90%. Esto implica que también hubo períodos de alta humedad.

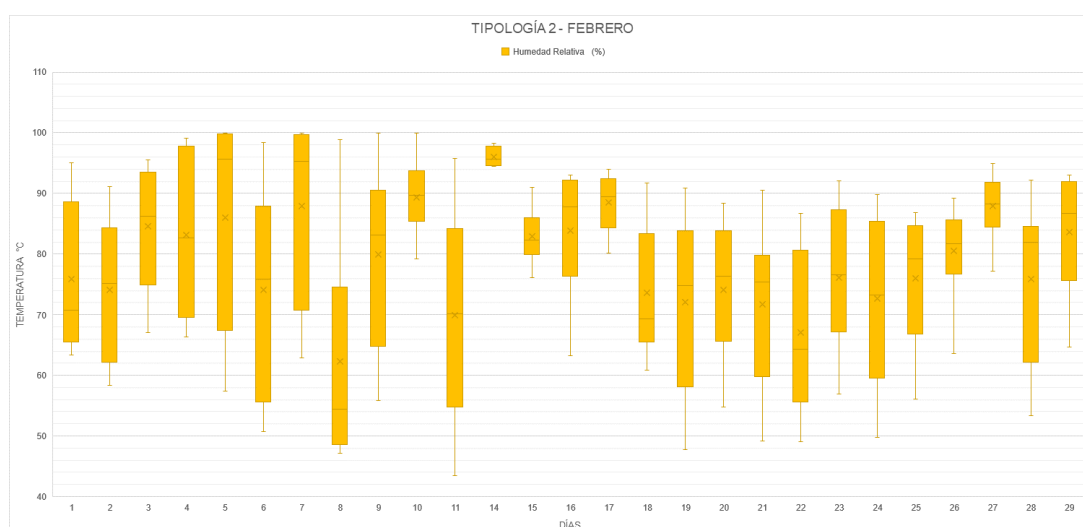


Figura 93. Gráfico de humedad relativa de tipología 2 en el mes de febrero.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

El gráfico de humedad relativa para la tipología 1 en marzo (figura 94) muestra que, en general, el ambiente estuvo bastante húmedo, pero con algunos días más secos, como el 6 y el 30. La línea del gráfico sube y baja, indicando cambios en la humedad a lo largo del mes

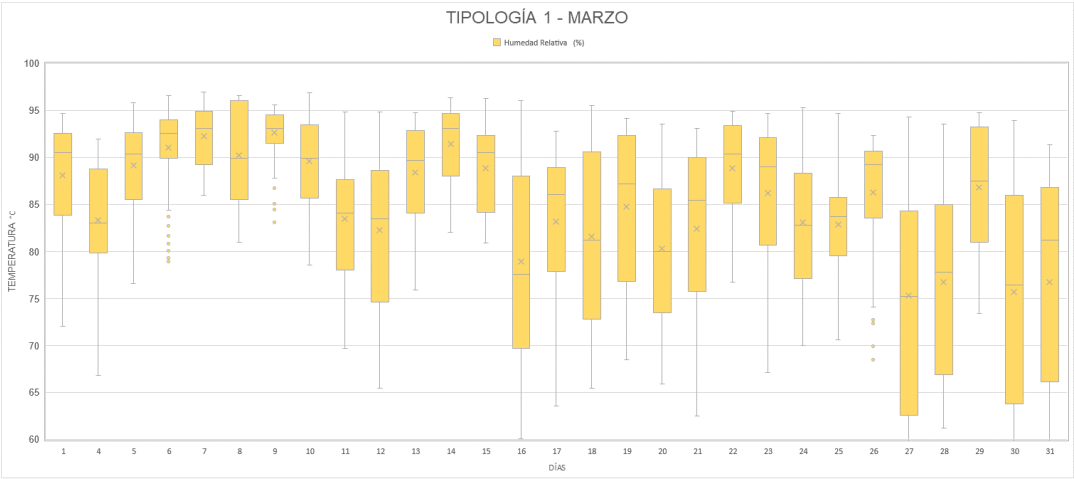


Figura 94. Gráfico de humedad relativa de tipología 1 en el mes de marzo.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

La tipología 2 presenta una humedad relativa en marzo que disminuye gradualmente desde un inicio húmedo (80-90%) hacia finales de mes (60-80%). La figura 95 muestra una mayor variabilidad al inicio del mes, con valores atípicos los días 5 y 6. Hacia finales de marzo, la humedad se estabiliza en niveles moderados.

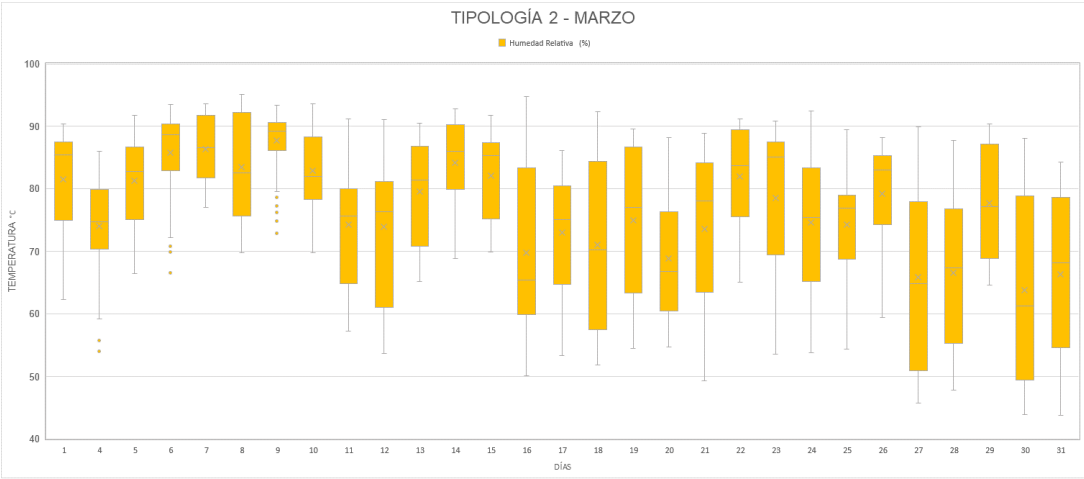


Figura 95. Gráfico de humedad relativa de tipología 1 en el mes de marzo.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

A continuación, se presenta la tabulación de datos de la temperatura y humedad en las cubiertas de zinc de las dos tipologías de vivienda (tabla 18). Los resultados del monitoreo de las cubiertas de zinc revelaron variaciones significativas en las condiciones térmicas y de humedad. En cuanto a la temperatura, se registraron valores máximos que oscilaron entre 25.1 °C y 57.0 °C, con una temperatura promedio total de 48.2 °C. Las mínimas fluctuaron entre 21.7 °C y 37.3 °C, estableciendo un promedio general de 29.5 °C. Este rango diverso refleja la amplitud térmica diaria experimentada en el período analizado.

En relación a la humedad, se evidenciaron igualmente variaciones significativas. Los niveles máximos de humedad oscilaron entre 67.2% y 86.7%, con un promedio total de 77.0%. Por otro lado, las cifras mínimas fluctuaron entre 53.4% y 81.0%, estableciendo un promedio de 66.6%. Estos datos compendiados ofrecen una visión integral de las condiciones climáticas a las que estuvieron expuestas las cubiertas de zinc durante el periodo de estudio.

Tabla 18. Tabulación de datos de monitoreo de las cubiertas

días	Temperatura (°C)			Humedad Relativa (%)		
	max	prom	min	max	prom	min
1	50.9	31.9	25.6	73.9	64.3	55.8
2	50.0	40.5	29.7	69.2	66.7	62.6
3	50.3	34.4	26.1	77.1	65.3	58.8
4	34.0	26.8	23.0	83.4	82.3	80.3
5	52.0	41.1	28.9	78.7	74.0	71.6
6	51.7	33.1	27.3	85.8	77.1	74.4
7	54.1	43.0	33.7	79.1	68.1	65.3
8	43.4	37.4	30.4	75.8	73.5	70.2
9	52.0	38.5	31.6	72.5	70.7	69.2
10	56.0	42.8	32.3	72.1	66.1	63.8
11	48.8	36.5	26.4	81.4	79.5	77.3
12	44.4	34.9	31.8	74.2	62.3	59.0
13	40.2	34.0	26.0	84.8	77.5	72.0
14	57.0	48.1	33.4	75.5	61.7	55.5
15	40.4	35.6	28.1	79.6	74.1	70.7
16	54.5	41.1	31.5	70.9	59.8	53.4
17	49.3	39.1	31.2	76.2	65.4	60.8
18	25.1	23.4	21.7	86.7	84.9	81.0
19	55.3	45.6	37.3	76.1	70.2	66.8
20	55.1	44.8	33.6	67.2	65.8	64.0
TOTAL	48.2	37.6	29.5	77.0	70.5	66.6

Tipología 1  Tipología 2 

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

3.4 Resultados de la modelación de viviendas en REVIT

Tras completar el levantamiento arquitectónico, se procedió a realizar el modelado en Revit de las dos tipologías de viviendas, incorporando las características constructivas ya existentes en la realidad de dichas viviendas. Este proceso permitió transferir los diseños al software de simulación.



Figura 96. Modelado en Revit de la tipología 1 y 2 de vivienda.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

Siguiendo los lineamientos de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), se han evaluado los valores de transmitancia térmica, densidad y calor específico de cada componente de las viviendas (muros, pisos, techo, puertas, ventanas). Estos datos, detallados en la tabla 19, han sido incorporados en el software de simulación.

Tabla 19. Características termofísicas de la envolvente de las viviendas

Capa	espesor (cm)	Conductividad (W/mK)	Densidad (kg/m ³)	calor específico (J/kgK)
Paredes exteriores (de dentro hacia afuera)				
bloque de concreto	15	0.62	1040	864
mortero de cemento y arena	3	0.76	2000	970
enlucido interior	1	0.72	1760	880
Paredes internas				
mortero de cemento y arena	3	0.76	1000	970
enlucido exterior	1	0.72	1760	880
Piso (de adentro hacia afuera)				
balda cerámica	2	0.84	1922	920
Hormigón vertido	5	2.1	2400	970
Techo				
zinc	0.6	110	7200	460
Aperturas	espesor (cm)	área neta (m ²)	valor U (W/m ² K)	transmitancia solar (%)
6 ventanas corredizas				
vidrio simple	0.3	1.7	5.7	0.85
puertas				
1 puerta con acristalamientos				
vidrio simple	0.3	0.45	2.8	0.69
madera	4	1.25	2.5	0.69
2 puertas de aluminio	3	1.2	3.1	0.69

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

3.5 Diseño aplicativo de la propuesta

Para iniciar la implementación de estrategias de enfriamiento evaporativo indirecto, se diseñó un intercambiador de calor. En este contexto, se llevaron a cabo estudios y análisis detallados del intercambiador de punto de rocío. Estos enfoques se abordaron y contextualizaron en el marco teórico de la presente investigación, debido a que estudios previos han demostrado su eficacia en climas cálidos y húmedos, como el seleccionado para esta investigación.

El caudal de ingreso del viento es un parámetro crucial en el diseño y funcionamiento de un intercambiador de calor evaporativo indirecto. Este flujo de aire, al entrar en contacto con el material poroso del intercambiador saturado con agua, promueve la evaporación y, consecuentemente, el enfriamiento del aire.

- Intercambiador de punto de rocío (diseño con flujo contracorriente)

En el diseño de este intercambiador, se ha implementado un sistema de flujo contracorriente, reconocido por su eficiencia y compacidad, destinado a transferir calor entre dos fluidos que circulan en direcciones opuestas a través de tubos y placas metálicas. El módulo tiene dimensiones de 1,20 x 0,3 x 0,56 m, y las placas de chapa metálica, con dimensiones de 0,15 x 0,15 x 0,01 m, se disponen verticalmente, creando un espacio a través del cual el aire circula, permitiendo un eficiente intercambio de temperatura.

En este diseño específico, se utilizan tubos de cobre de 35 mm con orificios para el drenaje de agua. Estos tubos están recubiertos con un material cerámico poroso, como una almohadilla de fibras, que retiene la humedad y facilita la liberación de aire frío a través de las placas. Para gestionar la evaporación y el enfriamiento, se rocía agua desde la parte superior a través de los tubos de cobre (figura 97). Este proceso permite que el agua se almacene y se evapore, contribuyendo al intercambio eficaz de calor. Se puede observar su funcionamiento a través de la sección esquemática de la figura 98.

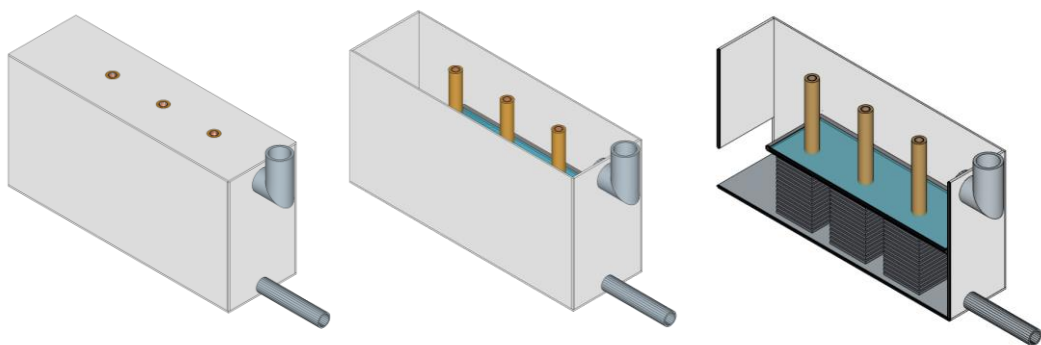


Figura 97. Modelo volumétrico de intercambiador de calor por punto de rocío
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

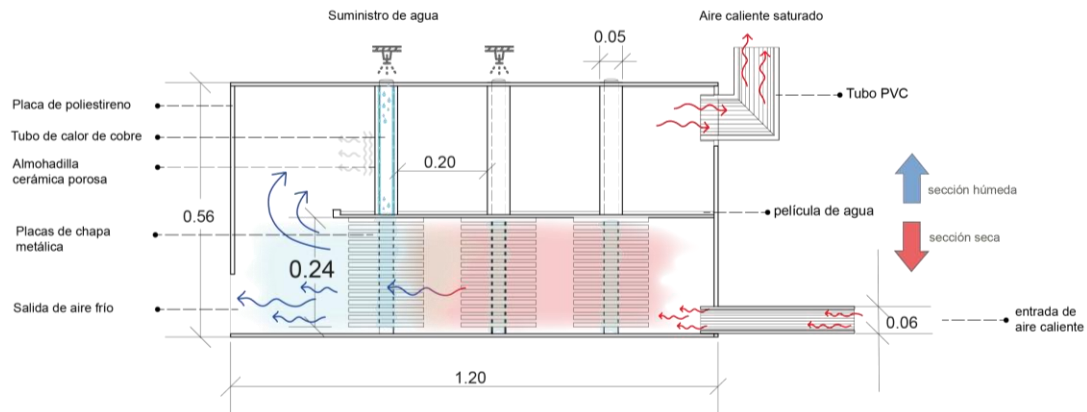


Figura 98. Sección esquemática de intercambiador de calor de placas con flujo contracorriente.

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

En la fase final del diseño, se integraron los dispositivos en el modelo BIM de Revit. Para las tipologías de una planta, se optó por una ubicación central en la fachada frontal, orientada hacia el noroeste, coincidente con la dirección predominante del viento durante el período de estudio. En el caso de la vivienda de dos plantas, el dispositivo se situó a una altura cercana a la cubierta, aprovechando el espacio entre la envolvente y la cubierta. Estas ubicaciones cumplen con la normativa RITE, maximizando la eficiencia del sistema y garantizando una adecuada ventilación.

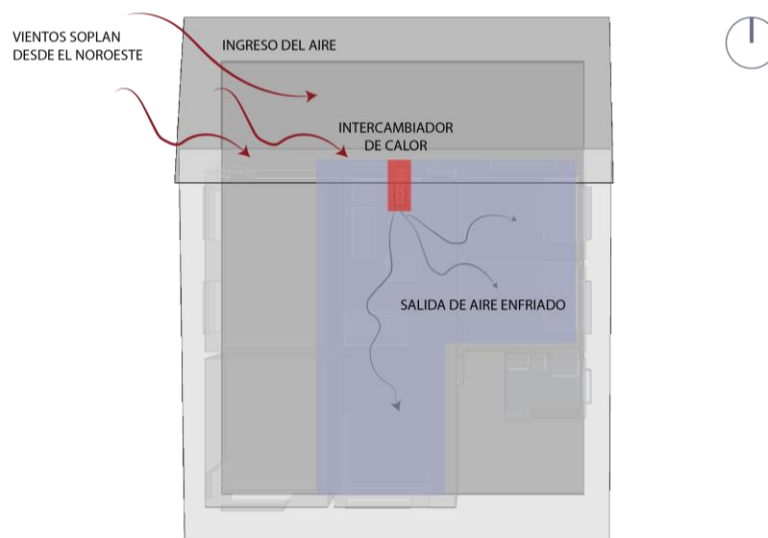


Figura 99. Ubicación de intercambiador de calor en tipología de vivienda de un piso.

Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

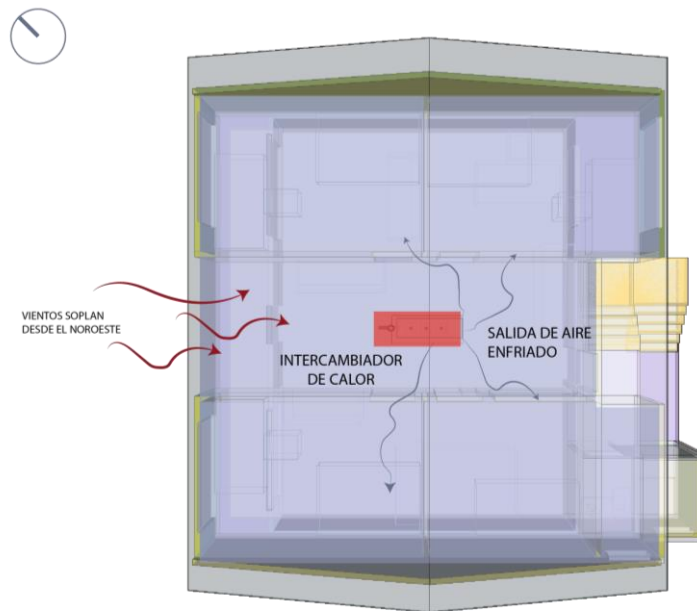


Figura 100. Ubicación de intercambiador de calor en tipología de vivienda de dos pisos.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

3.6 Resultado de simulaciones en Ansys

- Simulación de situación actual de las viviendas

En la simulación llevada a cabo en Ansys para analizar térmicamente las viviendas en su estado actual, se utilizaron modelos y algoritmos para estudiar el comportamiento térmico de un componente específico. La geometría del componente se ingresó con precisión desde Revit, incluyendo las propiedades termofísicas de los materiales involucrados. Durante la simulación, se aplicaron condiciones de carga térmica y se consideraron los efectos de la conducción, convección y radiación térmica.

En relación con la primera tipología, según el espectro de colores, la temperatura de la cubierta alcanza hasta los 45.43 °C entre las 12:00 y las 15:00 horas. Se observa cómo el calor se propaga hacia los lados por las paredes y aberturas, destacándose un mayor impacto térmico en la parte baja de la cubierta. Además, se observa una absorción significativa de calor que se extiende hasta el suelo, donde la temperatura alcanza los

20.77 °C. Como resultado también, el software genera una gráfica que ilustra las temperaturas máximas, medias y mínimas y cómo estas aumentan durante el lapso de 10 segundos.

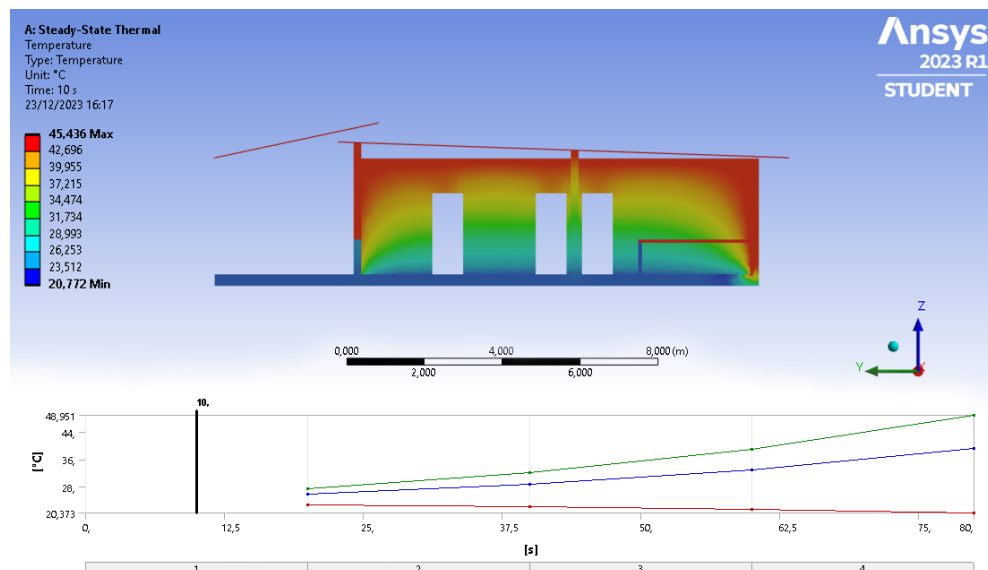


Figura 101. Simulación en perfil de tipología 1 actual
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

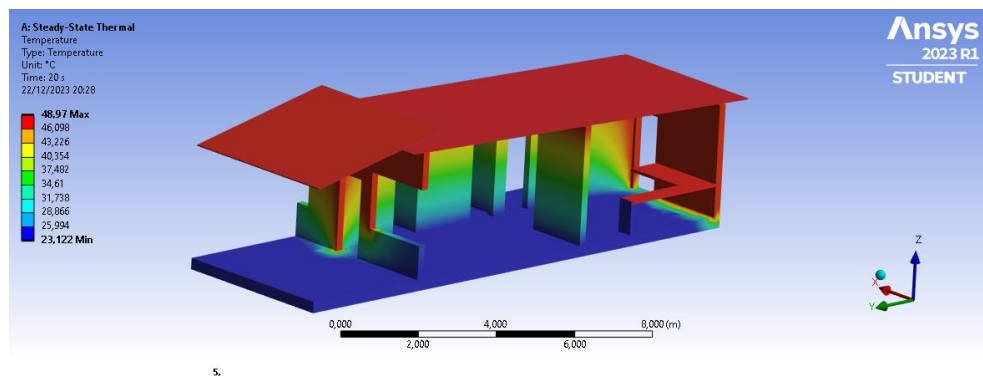


Figura 102. Simulación 3D de tipología 1 actual
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

En cuanto a la simulación de la tipología 2, se observa que el segundo nivel es el principal receptor de la radiación solar, evidenciado por la temperatura de su cubierta, que alcanza los 46.88 °C desde el mediodía hasta las 15:00 horas. Este aumento térmico se distribuye de manera uniforme en todos los espacios, con la excepción de una pequeña área en el lado posterior, donde se encuentra la entrada. En la planta baja, se logran niveles considerables de confort, ya que la temperatura desciende hasta los 25.8 °C. Este confort térmico se atribuye en parte al

entrepiso, que consiste en una losa de hormigón capaz de absorber y disipar el calor eficientemente.

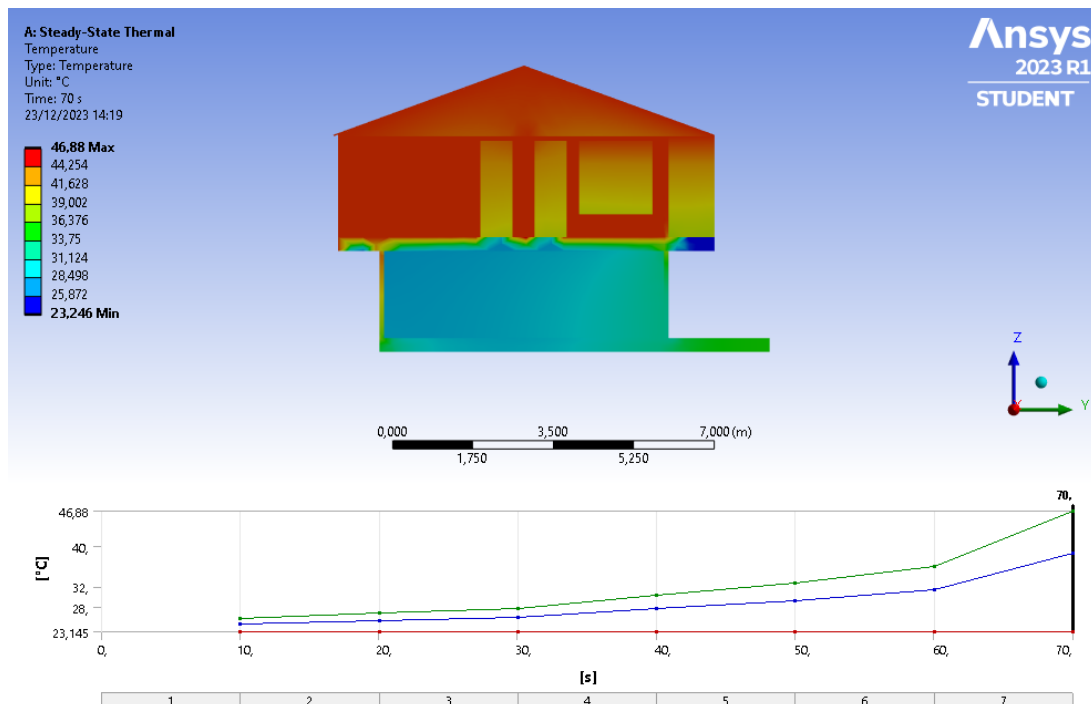


Figura 103. Simulación en perfil de tipología 2 actual.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

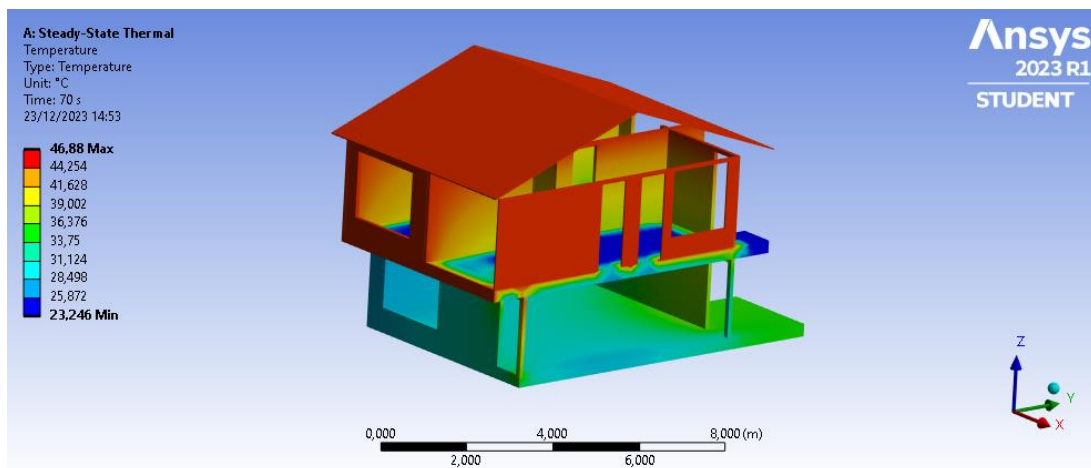


Figura 104. Simulación 3D de tipología 2 actual.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

Las simulaciones de las dos tipologías de viviendas proporcionaron una representación detallada sobre su comportamiento térmico. En la primera tipología, se identificaron

áreas críticas con una absorción significativa de calor, resaltando la necesidad de estrategias de mitigación específicas. Por otro lado, la segunda tipología evidenció un impacto térmico diferenciado entre los dos niveles, destacando la importancia de considerar estrategias de diseño específicas para cada área de la vivienda.

Ambas simulaciones relevaron la necesidad de abordar de manera específica los desafíos térmicos en cada tipología, teniendo en cuenta el enfoque en el diseño y selección de materiales. En el contexto de los intercambiadores de calor de enfriamiento evaporativo indirecto, su expectativa fue que estas simulaciones proporcionen información valiosa para evaluar la eficacia de estas estrategias en el contexto de viviendas, contribuyendo así al desarrollo de soluciones sostenibles y eficientes para mejorar el confort térmico en entornos habitacionales.

La simulación forma parte e interpretación de los datos obtenidos del levantamiento in situ lo que permite generar un análisis del estado actual y posterior a ello generar la comparativo por medio del intercambiador y ver el comportamiento de confort.

- Simulación de funcionamiento del intercambiador de calor

La simulación del funcionamiento de intercambiadores de punto de rocío implicó la creación de un modelo tridimensional que representa con precisión la geometría del intercambiador y sus componentes, como los tubos, las aletas y los fluidos circulantes. Se definieron las propiedades termo fluidodinámicas de los materiales y fluidos involucrados, y se aplicaron las condiciones del contorno analizadas en las condiciones de operación del intercambiador. Luego, se estableció una malla tridimensional para discretizar el dominio y se resolvieron ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos computacional (CFD) para obtener perfiles detallados de temperatura, velocidad y presión en todo el sistema.

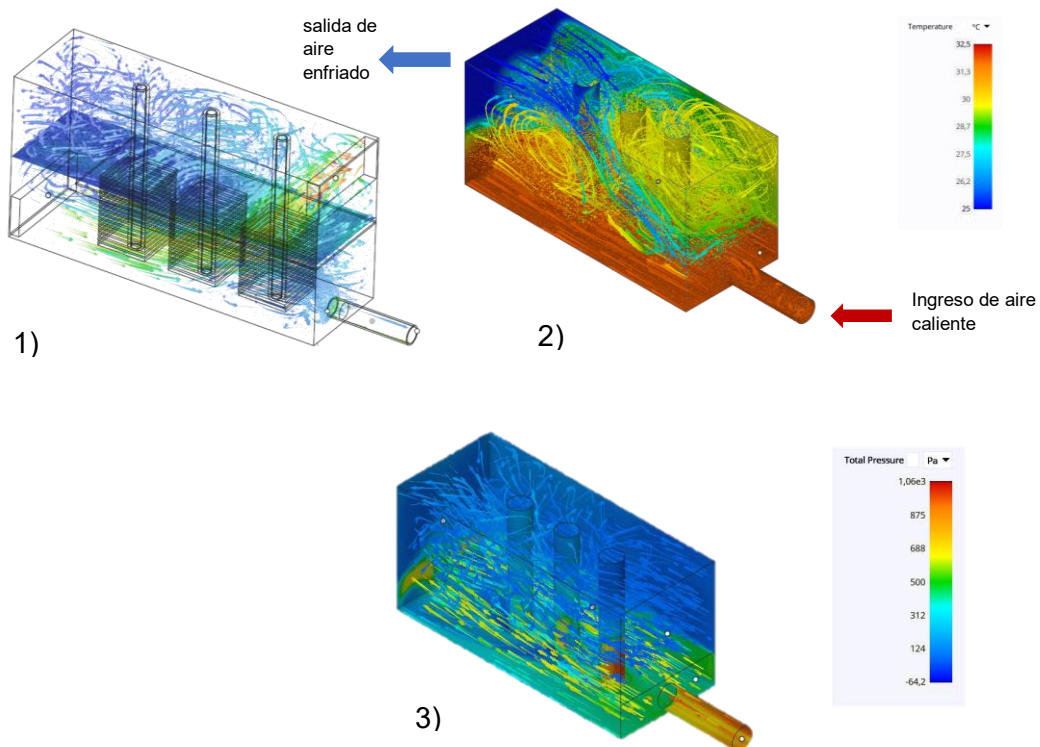


Figura 105. Simulación de intercambiador de calor por punto de rocío 1) flujo del aire y 2) temperatura y 3) Presión total
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

Se obtuvo resultados de la simulación del intercambiador del flujo de temperatura a través de los tubos que ingresa desde el exterior con un valor de 36, 85°C, se colocaron las propiedades de los materiales y mediante el agua evaporada el aire sale a 22 °C al interior de las viviendas. Se observa igualmente la simulación del flujo en volumen que muestra la interrelación y funcionamiento entre el agua y el aire. Para llevar a cabo la simulación numérica del sistema de enfriamiento evaporativo, se introdujeron los siguientes datos en el software ANSYS para cada tipología de vivienda.

Para tipología 1:

Datos

- Cantidad de agua utilizada (Vagua): 0.20 litros (equivale a 0.080 kg)
- Temperatura del agua que ingresa (T_{in}): 22°C
- Temperatura inicial exterior ($T_{int,inicial}$): 31.3°C

- Área del espacio (AAA): 100 m²
- Calor específico del aire (cairec): Aproximadamente 1.005 kJ/kg·°C
- Densidad del aire (paire): Aproximadamente 1.2 kg/m³ (a temperatura ambiente y presión normal)
- Velocidad del viento (v): 1.2 m/s

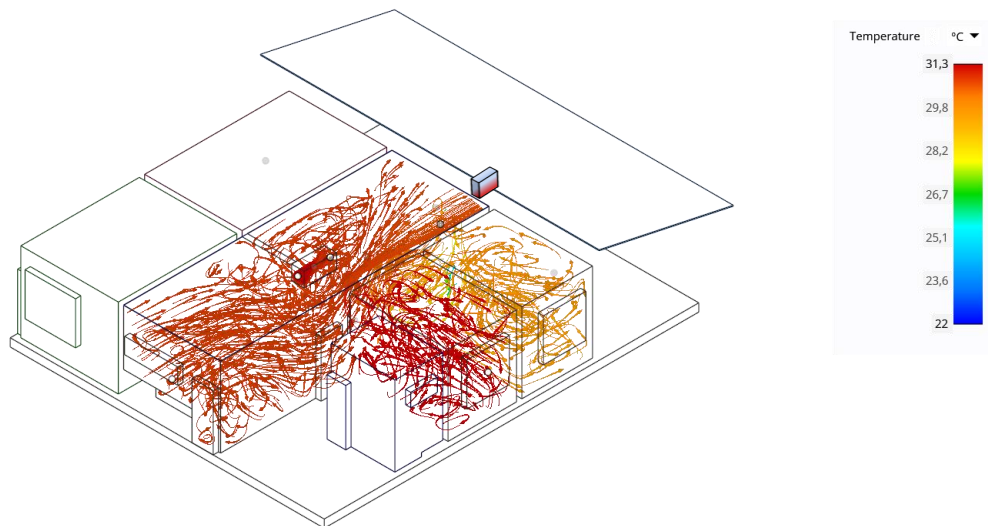


Figura 106. Simulación de temperatura interna con intercambiador en tipología 1.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

Para tipología 2

Datos:

- Cantidad de agua utilizada (Vagua): 0.20 litros (equivale a 0.080 kg)
- Temperatura del agua que ingresa (Tin): 22°C
- Temperatura inicial del exterior (Tint,inicial): 31.23°C
- Área del espacio (AAA): 100 m²
- Calor específico del aire (cairec): Aproximadamente 1.005 kJ/kg·°C
- Densidad del aire (paire): Aproximadamente 1.2 kg/m³ (a temperatura ambiente y presión normal)
- Velocidad del viento (v): 1.5 m/s

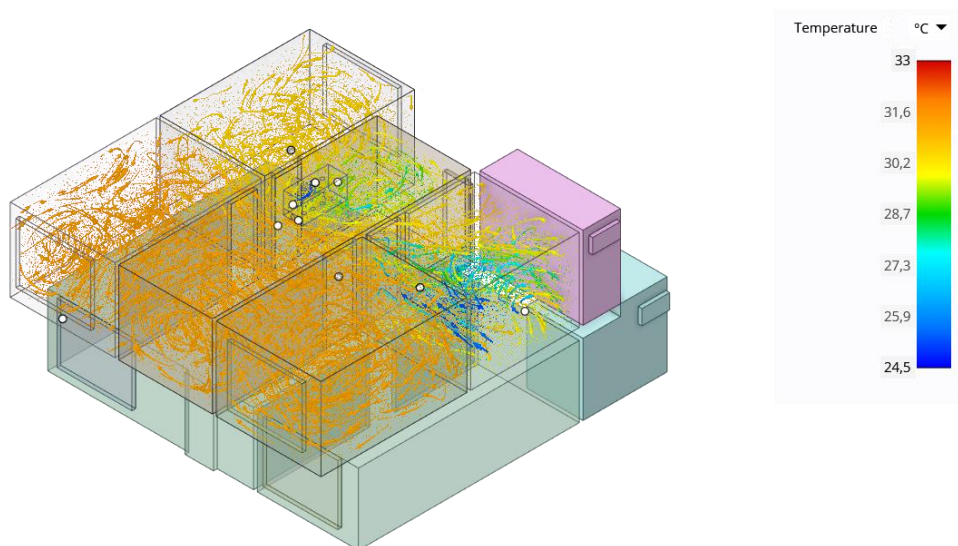


Figura 107. Simulación con intercambiador en tipología 2 de temperatura.
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

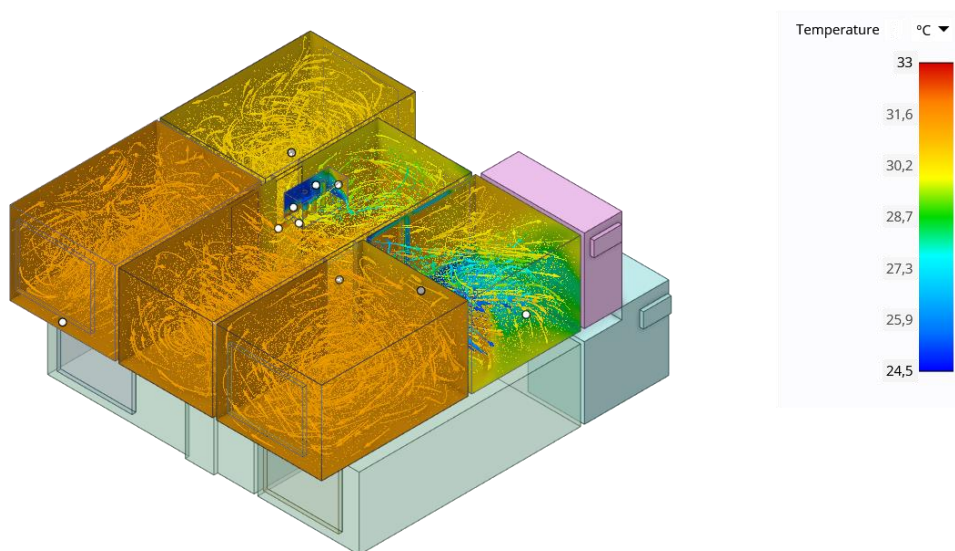


Figura 108. Simulación con intercambiador en tipología 2 de flujo del aire
Realizado por: Shiguango Nayeli, 2024.

3.7 Cálculo de calor transferido y reducción de temperatura de intercambiador de calor

Se llevó a cabo una simulación numérica calculando el calor transferido y la reducción de temperatura que se logra al aprovechar la condensación del vapor de agua.

Calor transferido (QQ):

Primero, convertimos el volumen de agua a masa:

$$m_{agua} = V_{agua} \cdot \rho_{agua}$$

$$m_{agua} = 0.2 \text{ kg}$$

Calculamos el calor transferido QQ multiplicando masa del agua que se va a evaporar, medida en kilogramos (kg) por el calor latente (Lv) de vaporización del agua, que es la cantidad de energía necesaria para convertir 1 kg de agua líquida en vapor sin cambiar su temperatura, típicamente valorado en 2260 kJ/kg a temperatura y presión normales.

$$Q = m_{agua} \cdot L_v$$

$$Q = 0.2 \text{ kg} \cdot 2260 \text{ kJ/kg}$$

$$Q = 452 \text{ kJ}$$

Reducción de temperatura ($\Delta T \Delta t$):

Para determinar la masa de aire involucrada en el proceso, hemos empleado la ecuación 3, considerando la influencia de la velocidad del viento sobre la evaporación. Este cálculo nos permite cuantificar el volumen de aire afectado por el cambio de fase del agua y, en consecuencia, estimar la reducción de temperatura.

$$m_{aire} = \rho_{aire} \cdot A \cdot h \cdot v$$

Tipología 1

Donde h es la altura promedio del espacio (3 m) y v es la velocidad del viento (1.2 m/s).

$$m_{aire} = \rho_{aire} \cdot A \cdot h \cdot v$$

$$m_{aire} = 1.2 \text{ kg/m}^3 \cdot 150 \text{ m}^2 \cdot 3 \text{ m} \cdot 1.2 \text{ m/s}$$

$$m_{aire} = 648 \text{ kg}$$

Calculamos la reducción de temperatura ΔT :

$$\Delta T = \frac{Q}{m_{aire} \cdot c_{aire}}$$

$$\Delta T = \frac{452 \text{ kJ}}{648 \text{ kg} \cdot 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{°C}}$$

$$\Delta T \approx 0.70 \text{ °C}$$

Tipología 2

$$m_{aire} = \rho_{aire} \cdot A \cdot h \cdot v$$

$$m_{aire} = 1.2 \text{ kg/m}^3 \cdot 150 \text{ m}^2 \cdot 4 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m/s}$$

$$m_{aire} = 1080 \text{ kg}$$

Calculamos la reducción de temperatura ΔT :

$$\Delta T = \frac{Q}{m_{aire} \cdot c_{aire}}$$

$$\Delta T = \frac{452 \text{ kJ}}{1080 \text{ kg} \cdot 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{°C}}$$

$$\Delta T \approx 0.42 \text{ °C}$$

Los resultados obtenidos para la reducción de humedad relativa (%) en las simulaciones realizadas mediante el software que estima el valor de reducción de la humedad relativa en función del intercambio de calor y la humedad del ambiente. En particular, el software permitió calcular la reducción de la humedad relativa para dos tipologías diferentes de viviendas

Para la tipología 1, con una humedad relativa inicial de 80.45%, la simulación arrojó una reducción de 3.265%, llevando la humedad relativa final a 77.185%.

Para la tipología 2, con una humedad relativa inicial de 81.91%, la reducción de la humedad relativa estimada fue de 5.9656%, resultando en una humedad relativa final de 75.9444%.

CAPITULO IV: DISCUSIONES

- **Factibilidad para la mejora del confort térmico**

Se realizó una evaluación utilizando un enfriador evaporativo con 0.2 litros de agua en un espacio de 100 m² con una altura de 3 metros y una velocidad del viento de 1.2 m/s para tipología 1. Para tipología 2 se dio en 150 m², con una altura de 4 metros y una velocidad del viento de 1.5 m/s. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Reducción de Temperatura: La temperatura en el espacio se reduciría aproximadamente 0.70°C para tipología 1 y 0.42°C para tipología 2. Esta reducción, aunque modesta, podría contribuir a una ligera mejora del confort térmico en condiciones específicas.

Reducción de Humedad Relativa: Se estimó una disminución de aproximadamente de 3.26%, % para tipología 1 y 5.96% para tipología 2 en la humedad relativa del ambiente. Esta reducción puede ser beneficiosa para mitigar la sensación de humedad en el aire.

Estos resultados sugieren que, con 0.2 litros de agua, el enfriador evaporativo puede proporcionar una mejora marginal en el confort térmico y en las condiciones de humedad relativa. Sin embargo, la efectividad del sistema podría variar según las condiciones climáticas locales y la sensibilidad individual al confort térmico.

- **Factibilidad y consumo energético de sistema de enfriamiento evaporativo indirecto**

Para evaluar la viabilidad de los intercambiadores de calor, se deben tener en cuenta las condiciones climáticas locales, aspecto que fue considerado en esta investigación. Se exploró la alternativa de enfriar sin añadir humedad al interior de la vivienda, evitando así la exposición directa al ambiente. El diseño del intercambiador garantizó que no

ingresará humedad al interior. Además, se consideró el espacio habitable a enfriar cubriendo así un 48% del área. En términos de consumo energético, se percibe como factible dado que el intercambiador no requeriría energía para su funcionamiento. A pesar de que el consumo energético es bajo, se requiere energía para bombear el agua y, en algunos casos, para accionar ventiladores. Además, el costo inicial de instalación puede ser superior al de otros sistemas, pero a largo plazo, los ahorros en consumo energético compensan esta inversión. Es fundamental tener en cuenta variables como el tamaño del espacio a enfriar, las condiciones climáticas locales y la calidad del agua, ya que estos factores influyen directamente en la eficiencia del sistema y, por lo tanto, en su costo. Además, es importante considerar los costos de operación a largo plazo, como el consumo de energía y el mantenimiento regular.

- Limitaciones

Se presentaron dificultades en la utilización del software con el componente Fluent debido a restricciones de licencia. En este proyecto, se optó por una versión gratuita destinada a estudiantes, ya que no fue factible adquirir una licencia profesional debido a la imposibilidad de establecer conexión con los servidores para dicha adquisición. A pesar de esto, se logró utilizar otros componentes como Workbench Ansys y Discovery Ansys.

Al momento de realizar el mallado hubo complicaciones debido a que no se permitía que la geometría exceda 32000 nodos. La limitación de no permitir que la geometría exceda estos nodos plantea desafíos en la representación detallada y precisa de la geometría del modelo. Los problemas asociados con esta limitación incluyeron la pérdida de detalles finos en la geometría, especialmente en áreas críticas donde se requería una resolución más fina para capturar fenómenos específicos del flujo o del campo de temperatura. Además, la restricción en el número de nodos afectó la precisión de los resultados y la capacidad de representar las condiciones de contorno y las características geométricas.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Conclusiones

El presente estudio evaluó la viabilidad de implementar un sistema de enfriamiento evaporativo indirecto en viviendas con cubiertas de zinc en la comunidad Rukullakta, Archidona. Mediante la recopilación de datos climáticos y simulaciones computacionales, se analizaron dos configuraciones de cubiertas para determinar su impacto en el confort térmico interior. Para ello, se analizaron datos de temperatura y humedad relativa recopilados durante el mes de febrero y marzo del 2024. Además de recopilar datos necesarios como velocidad del viento y radiación solar obtenidas de la estación meteorológica de la universidad Ikiam Los resultados obtenidos evidenciaron una considerable variabilidad en las condiciones climáticas, lo que sugiere la necesidad de soluciones de climatización adaptadas a las características locales. A continuación, se detallan las principales conclusiones derivadas de este análisis:

- Las condiciones climáticas dentro de las viviendas presentan una considerable variabilidad tanto en temperatura como en humedad relativa, lo cual es característico de un clima tropical.
- Se registraron temperaturas diarias que varían significativamente entre 24°C y 34°C para la Tipología 1 y entre 20°C y 38°C para la Tipología 2, con una mayor dispersión en la segunda mitad de febrero.
- La humedad relativa en la Tipología 1 fluctuó entre 40% y 95%, mientras que en la Tipología 2 varió entre 43% y 99%, indicando condiciones de aire muy seco a muy húmedo.
- Las condiciones climáticas que inciden en la operación eficiente de las estrategias de enfriamiento evaporativo indirecto comprendieron factores como la

temperatura del aire, la intensidad de los vientos predominantes, la humedad relativa y la radiación solar. Es importante destacar que, en la zona de estudio, los vientos son mayormente calmados, teniendo una influencia relativamente limitada en el ingreso al intercambiador de calor.

- El viento puede aumentar la tasa de evaporación y mejorar la eficiencia del sistema. Sin embargo, un viento excesivo puede dificultar el control de la humedad relativa en el interior.
- La geometría del intercambiador de calor, así como la orientación y disposición de los elementos constructivos, influyen significativamente en la eficiencia del sistema de enfriamiento evaporativo.
- Los resultados obtenidos son específicos para las condiciones de prueba y pueden variar significativamente en función de factores como la temperatura ambiente, la humedad relativa exterior, la velocidad del viento y la radiación solar.
- El uso de un enfriador evaporativo con tan solo 0.2 litros de agua en espacios de considerable tamaño (100 y 150 m²) ha demostrado tener un efecto limitado en la reducción de la temperatura y la humedad relativa. Si bien se observó una disminución en ambos parámetros, esta fue relativamente modesta.
- Los resultados de las simulaciones proporcionan una base sólida para optimizar el diseño de los sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto, permitiendo ajustar variables como la geometría del intercambiador, la velocidad del aire y la distribución del flujo.
- Las simulaciones en software permitieron visualizar la distribución de la temperatura y la velocidad del fluido en el interior del intercambiador, lo que facilitó la identificación de zonas críticas y la optimización del diseño.

- La efectividad del sistema se vio influenciada por factores como el tamaño de los espacios interiores, la altura del techo y la velocidad del viento. Espacios más grandes y con mayor altura, como la tipología 2, mostraron una reducción ligeramente menor en la temperatura y una mayor reducción en la humedad relativa.

- **Recomendaciones**

- Para lograr una mayor reducción de la temperatura y la humedad, se recomienda aumentar la capacidad del enfriador evaporativo, ya sea incrementando el volumen de agua o utilizando múltiples unidades.
- Se recomienda llevar a cabo la construcción de un prototipo físico a escala, utilizando la misma materialidad que se empleó en el modelo 3D. Esta medida se propone con el fin de obtener resultados más certeros y validar la viabilidad práctica del intercambiador en condiciones del mundo real.
- Es esencial realizar un análisis detallado de costos y beneficios antes de la implementación a gran escala, considerando no solo eficiencia del sistema sino también la viabilidad económica. Además, para futuras investigaciones, se recomienda la optimización continua del diseño de intercambiadores de calor, buscando mejoras en la eficiencia y la sostenibilidad.
- El diseño del sistema de enfriamiento debe ser personalizado para cada aplicación. Cada aplicación tiene requisitos específicos en términos de capacidad de enfriamiento, distribución del aire, condiciones ambientales, la ubicación del enfriador y la integración con otros sistemas.
- El enfriamiento evaporativo puede complementarse con otras estrategias pasivas para mejorar su eficacia. La ventilación natural y el sombreado pueden

reducir la carga térmica del edificio y mejorar la eficiencia del enfriamiento evaporativo

- Realizar un análisis energético detallado para evaluar el ahorro energético potencial de la implementación de un intercambiador de calor evaporativo si se desea añadir un ventilador, bomba de agua u otros componentes que se requieran para maximizar su funcionamiento.
- Se recomienda implementar sistemas de monitoreo para evaluar el desempeño del sistema de enfriamiento en condiciones reales y realizar ajustes si es necesario. Se deben instalar sensores para medir variables como la temperatura, la humedad, el caudal de aire y el consumo energético.
- La Legionelosis es una enfermedad asociada al crecimiento de bacterias en sistemas de agua. Es importante evaluar el riesgo de esta enfermedad en sistemas de enfriamiento evaporativo.
- Continuar investigando y desarrollando modelos de simulación para evaluar el impacto de diferentes variables en el rendimiento de los sistemas de enfriamiento evaporativo. La investigación continua es necesaria para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los intercambiadores de calor. Se deben explorar nuevas tecnologías y materiales, así como desarrollar modelos de simulación más sofisticados.
- Se sugiere realizar estudios adicionales para evaluar la durabilidad, el mantenimiento a largo plazo y el comportamiento de los intercambiadores de calor en diversas condiciones climáticas. Estos estudios ayudarán a mejorar el conocimiento sobre su rendimiento y adaptabilidad en aplicaciones prácticas.
- Es importante mencionar que ANSYS, siendo un software interesante y completo para el uso en la ingeniería, puede tener un costo asociado. Se sugiere explorar

la adquisición de una licencia de pago si se planea realizar la continuación de este estudio o es recomendable indagar otros softwares de simulaciones térmica y de fluidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amer, O., Boukhanouf, R., & Ibrahim, H. G. (2015). A Review of Evaporative Cooling Technologies. *International Journal of Environmental Science and Development*, 6(2), 111–117. <https://doi.org/10.7763/IJESD.2015.V6.571>
- ARC. (2023). Panorama eléctrico 2023.
- Asadbeigi, S., Ahmadi, E., Goodarzi, M., & Sagharichian, A. (2023). Analyzing and simulating heat transfer and designing a shell and tube heat exchanger for the pasteurization process of tomato paste: A CFD study. *Heliyon*, 9(11), e21593. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E21593>
- ASHRAE. (2013). *Condiciones de Ambiente Térmico para Ocupación Humana*. https://www.academia.edu/44452257/Condiciones_de_Ambiente_T%C3%A9rmico_para_Ocupaci%C3%B3n_Humana
- ASHRAE. (2017). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines#technology1>
- Barranco, O. (2015). La arquitectura bioclimática. *MÓDULO ARQUITECTURA CUC*, 15, 31–40. <https://doi.org/10.17981/moducuc.15.1.2015.03>
- Barros, J., & Troncoso, A. (2010). *ATLAS CLIMATOLÓGICO DEL ECUADOR*. Escuela Politécnica Nacional.
- Bhamare, D. K., Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. *Energy and Buildings*, 198, 467–490. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.06.023>
- Blender, M. (2015). *El confort térmico - Arquitectura y Energía*. Arquitectura y Energía. <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/el-confort-termico/>
- Briceño, I. (2018). *Prototipo de sistema de torre de viento para enfriamiento habitacional híbrido en clima cálido*.
- Cárdenas, R. E., García, L. A., Esparza, C. J., Moreno, J. R., & Navarro, J. F. (2023). Sistemas de Enfriamiento Evaporativo para uso en elementos verticales: una revisión del estado del arte. *Ciencia Nicolaita*, 87. <https://doi.org/10.35830/CN.VI87.663>
- Carrillo, E. (2020). *Caracterización de sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto en cubiertas para obtener confort higrotérmico en edificaciones en climas cálido-húmedos* [Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Azcapotzalco]. <https://doi.org/10.24275/uama.5761.7658>
- Castillo, E. (2022). *Calor e Índices de Evaluación por Calor*. www.uniquindio.edu.co
- COCUPO. (2020). *Viviendas de la región amazónica*. <https://laregionamazonica.com/viviendas-de-la-region-amazonica/>
- Conforme, G., & Castro, J. (2020). Arquitectura bioclimática. *Polo Del Conocimiento: Revista Científico - Profesional*, ISSN-e 2550-682X, Vol. 5, N°. 3 (MARZO 2020), 2020, Págs. 751-779, 5(3), 751–779. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7398396&info=resumen&idioma=SPA>
- Cruz, D. (2017). *COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS CUBIERTAS EN EL CLIMA DE QUITO*.

- Dear, R., & Brager, G. (1998). *Desarrollo de un modelo adaptativo de preferencia y confort térmico: Informe final sobre RP-884*.
https://www.researchgate.net/publication/269097185_Developing_an_Adaptive_Model_of_Thermal_Comfort_and_Preference_-_Final_Report_on_RP-884
- Del Toro, M. (2018). *Los diagramas bioclimáticos. Sustentable & Sostenible*.
<https://blog.deltoroantunez.com/2018/12/los-diagramas-bioclimaticos.html>
- Díaz, A. (2019). *Clasificación bioclimática de Austin Miller*. <https://biogeografia.net/bioclimate06b.html>
- Díaz, A. (2019). *Parámetros climáticos*. <https://biogeografia.net/bioclimate02.html>
- Díaz, M. (2020). *Arquitectura y cambio climático* -.
https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=Gd8MEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT3&dq=+zonas+climaticas+arquitectura&ots=4HjkV86odC&sig=mwopU-j8Y_jPaSfDbkf7LYa40sw#v=onepage&q=zonas%20climaticas%20arquitectura&f=false
- Díaz, O. (2012). La cubierta metálica en el clima cálido húmedo: análisis del comportamiento térmico y efecto en el confort del techo de zinc de la vivienda vernácula dominicana. *Universidad Politécnica de Cataluña*.
- Djongyang, N., Tchinda, R., & Njomo, D. (2010). Thermal comfort: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2626–2640. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.07.040>
- ENED. (2020). *Documento Metodológico de la Encuesta Nacional de Edificaciones (ENED)*. www.ecuadorencifras.com
- Escobar, V. (2018). La cubierta ventilada metálica en el clima cálido húmedo (tesis de doctorado). In *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <http://hdl.handle.net/10803/462099>
- Esparza. (2015). Estudio experimental de dispositivos de enfriamiento evaporativo indirecto para un clima cálido sub-húmedo. *Programa Interinstitucional de Doctorado En Arquitectura (PIDA) Universidad Autónoma de Aguascalientes, Universidad de Colima, Universidad de Guanajuato y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, May 2015*.
- Esparza, C., Urbina, C., Aguilar, S., & Elizondo, M. (2020). *Protecciones solares frías. Potencial del agua como sistema de enfriamiento pasivo en protecciones solares para zonas cálidas subhúmedas*. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*.
https://www.researchgate.net/publication/338581442_Protecciones_solares_frias_Potencial_del_agua_como_sistema_de_enfriamiento_pasivo_en_protecciones_solares_para_zonas_calidas_subhmedas
- Ferrer, F. (2004). *SIGNIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA EN LOS PROCESOS ECOLÓGICOS*. *Técnicas de Clasificación Climática*.
- Frigerio, E., Lozano, R., & Saravia, L. (2018). *SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN NATURAL: NUEVOS ENSAYOS*.
- Fuentes, V. A. (2022). Apuntes de arquitectura bioclimática. *Apuntes de Arquitectura Bioclimática*.
<https://doi.org/10.24275/UAMA.1242.9688>
- García, E. (2004). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. *Instituto de Geografía*, 246.
<http://www.librosoa.unam.mx/handle/123456789/1372>

- García, & Islas. (2022). Estudios de arquitectura bioclimática. *Exploraciones, Intercambios y Relaciones Entre El Diseño y La Tecnología*, 16(1), 57–79. <https://doi.org/10.16/CSS/JQUERY.DATATABLES.MIN.CSS>
- Geetha, N. B., & Velraj, R. (2012). *Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage*. https://www.researchgate.net/publication/285851165_Passive_cooling_methods_for_energy_efficient_buildings_with_and_without_thermal_energy_storage_-_A_review
- Givoni, B. (1982). *PASSIVE INDIRECT EVAPORATIVE COOLING BY SHADED ROOF PONDS: A MATHEMATICAL MODEL*. 13–1. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-029405-6.50048-9>
- Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18(1), 11–23. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K)
- Givoni, B. (1994). *Refrigeración pasiva y de baja energía de edificios*.
- Glanville, P., Kozlov, A., & Maisotsenko, V. (2011). *Dew Point Evaporative Cooling: Technology Review and Fundamentals*.
- Gómez, A. (2008). Clasificación Climática Thornthwaite. *Unidad de Ciencias de La Atmósfera*. <https://pdfcoffee.com/clasificacion-climatica-thornthwaite-pdf-free.html>
- Gonzales, A., Loza, L., Quezada, G., & Torres, R. (2022). La clasificación climática de Thornthwaite y su aplicación en la cuenca de Cajititlán, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. *Estudios de La Cienega*, 02(04), 65–88. <https://revistaestudiosdelacienega.com/ojs/index.php/rec/article/view/54/46>
- González, A. (2023). *Qué es el confort térmico y cómo se evalúa*. <https://blog.zeroconsulting.com/que-es-el-confort-termico-como-se-evalua>
- González, D. (2018). *Arquitectura bioclimática* (Científico Técnica).
- González, E. (2018). *SISTEMAS PASIVOS DE CLIMATIZACIÓN Y LOS EDIFICIOS DE CONSUMO DE ENERGÍA CASI NULO (EECN-NZEB)*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/328942915_SISTEMAS_PASIVOS_DE_CLIMATIZACION_Y_LOS_EDIFICIOS_DE_CONSUMO_DE_ENERGIA_CASI_NULO_EECN-NZEB
- González, E., & González, S. (2013). Estudio experimental sobre el comportamiento térmico de un nuevo tipo de techo-estanque para el enfriamiento pasivo en clima húmedo. *Ambiente Construido*, 13(4), 149–171. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212013000400011>
- González, S. (2011). *ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO*. Universidad Internacional de Andalucía.
- Gonzalo, G. (2015). *Manual de Arquitectura Bioclimática y Sustentable* (5th ed.).
- Gonzalo, G. (2019). Manual Arquitectura Bioclimatica Sustentable 2015 CAP14. *Manual Arquitectura Bioclimática*, 5(1), 297–306. https://www.researchgate.net/publication/334231462_ManualArquitecturaBioclimaticaSustentable_2015_CAP14
- Guerra, M. (2013). *Arquitectura Bioclimática como parte fundamental para el ahorro de energía en edificaciones*. Editorial Universidad Don Bosco. <http://hdl.handle.net/11715/548>

- Hernández, M., Rizo, L., & Frómeta, Z. (2017). RECOMENDACIONES DE DISEÑO CON ENFOQUE MEDIOAMBIENTAL PARA CUBIERTAS LIGERAS EN EDIFICACIONES DEL CENTRO HISTÓRICO DE SANTIAGO DE CUBA. In *Ciencia en su PC* (Vol. 1).
- Herrera, L. C. (2014). Eficiencia de estrategias de enfriamiento pasivo en clima cálido seco. *Revista de Arquitectura*, 16(1), 86–95. <https://doi.org/10.14718/revarq.2014.16.10>
- Inusa, M., & Zafer, H. (2017). Application of Passive Cooling Techniques in Residential Buildings: A Case Study of Northern Nigeria. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 07(01), 24–30. <https://doi.org/10.9790/9622-0701012430>
- Kharrufa, S. N., & Adil, Y. (2008). Roof pond cooling of buildings in hot arid climates. *Building and Environment*, 43(1), 82–89. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2006.11.034>
- Kishore, V. V. N. (1988). Assessment of natural cooling potential for buildings in different climatic conditions. *Building and Environment*, 23(3), 215–223. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(88\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0360-1323(88)90006-6)
- Kristianto, M. A., Utama, N. A., & Fathoni, A. M. (2014). Analyzing Indoor Environment of Minahasa Traditional House Using CFD. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 172–179. <https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2014.03.023>
- Labastid, D., Bolobosky, M., Mogollón, L., & James, A. (2018). Implementación de un Intercambiador de Calor en Techos de Zinc. *KnE Engineering*, 3(1). <https://doi.org/10.18502/keg.v3i1.1478>
- Lacomba, R. (1991). *MANUAL DE ARQUITECTURA SOLAR* (Primera). Trillas.
- Leiva, X. (2017). *ESTRATEGIAS DE DISEÑO SOLAR PASIVO PARA BRINDAR CONFORT TÉRMICO EN VIVIENDAS DE LA CIUDAD DE LOJA, SECTOR AMABLE MARÍA*. UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR.
- Li, G., Hu, Y., Liu, J., Fang, X., & Kang, J. (2021). Review on Fault Detection and Diagnosis Feature Engineering in Building Heating, Ventilation, Air Conditioning and Refrigeration Systems. *IEEE Access*, 9, 2153–2187. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3040980>
- Linés, A. (1998). Contribución al concepto de clima. In *Doctor en Ciencias Físicas. Meteorólogo Territoris* (Vol. 1).
- Linés, A. (2010). Clima y cambio climático. *RAM (Revista Del Aficionado a La Meteorología)*, 26(3).
- Marchante, G., & González, A. (2020). Evaluación del confort y disconfort térmico. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 41(3), 21–40. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59282020000300021&script=sci_arttext#B8
- Martin Evans, J. (2012). Técnicas bioclimáticas de diseño: Las “Tablas de Mahoney” y los “Triángulos de confort.” *Habitat y Energía*, 2(2), 27–33. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/portafolio/article/view/12752/12740>
- Martín, S. (2018). *El terreno como intercambiador. Enfriamiento pasivo aplicado a un edificio de nueva planta* [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/49966/>
- Melendez, A. (2016). *Meteorología y climatología*. <https://multimedia.uned.ac.cr/pem/climatologia/2elementos/22elementos.html>
- Miglietti, S. O. (2016). Mastering the climate : theories of environmental influence in the long seventeenth century [Universidad de Warwick]. In *Warwick*. <http://webcat.warwick.ac.uk/record=b3037362~S1>

- Montazeri, H., Blocken, B., & Hensen, J. L. M. (2015). Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 83, 129–141. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2014.03.022>
- Montesano, J. P., & Dipietro, Á. (2018). Simulación de un proceso de enfriamiento de leche con un Intercambiador de placas, con el software UniSim Design R443 y UniSim PHE R440. *Lurbé, R.M., Barón, I., Risetto, M.A. (Comps.). X Congreso Argentino de Ingeniería Industrial Memorias. EdUTecNe: 2018 Disponible En: https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/15220*
- Moreno, M. (2009). “ELEMENTOS Y FACTORES CLIMÁTICOS: LOS CLIMAS.”
- Mourello, R. (2020). *LECTURA: Elementos y Factores del Clima – Recursos Académicos.* <https://www.recursosacademicos.net/elementos-y-factores-del-clima/>
- Naboni, E., Lee, D. S. H., & Fabbri, K. (2017). Thermal Comfort-CFD maps for Architectural Interior Design. *Procedia Engineering*, 180, 110–117. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.04.170>
- Navarra. (2022). Viento. Meteorología y Climatología de Navarra. <http://meteo.navarra.es/definiciones/viento.cfm>
- Navarra, M. (2019). *Clasificación climática de Köppen.* <http://meteo.navarra.es/definiciones/koppen.cfm>
- NEC. (2018). *EFICIENCIA ENERGÉTICA en Edificaciones Residenciales (EE).*
- Olcina, J. (1996). *EL CLIMA: FACTOR DE DIFERENCIACIÓN ESPACIAL. DIVISIONES REGIONALES DEL MUNDO DESDE LA ANTIGÜEDAD AL S. XVIII.* 79–98.
- Oliver, A., Neila, F. J., & García, A. (2012). Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. *Materiales de Construcción*, 62(305), 131–140. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.58010>
- Ordoñez, A. (2021). *Clima y lugar.* <https://www.seiscubos.com/conocimiento/viento>
- Oropeza, I., Petzold, A. H., & Bonilla, C. (2017). Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling. *Energy and Buildings*, 145, 251–258. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.04.031>
- Ortiz, E. B., Torres, J., & Véliz, J. F. (2021). Evaluación térmica y lumínica en prototipos de cubiertas ligeras, para clima cálido húmedo. *Revista Hábitat Sustentable*, 11(2). <https://doi.org/10.22320/07190700.2021.11.02.05>
- Peña, A., Delgado, R., Guevara, V., Rodríguez, L., & Savon, Y. (2020). Estudios de clima de montaña en Cuba. El clima de montaña a escala local | Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo. *Medio Ambiente Y Desarrollo*, 20(39), 1–8. <https://cmad.ama.cu/index.php/cmاد/article/view/257>
- Perez, J., & De la Barrera, F. (2021). *Rol de la vegetación en el control del microclima urbano y en la adaptación a los efectos del cambio climático en un barrio de San Pedro de la Paz, Chile.* <https://revistas.udec.cl/index.php/urbe/article/view/4658/6319>
- Pérez, M. (2022). *Análisis, Modelamiento y Viabilidad de un Sistema de Enfriamiento Evaporativo Indirecto Regenerativo Contracorriente en Términos de la Efectividad del Bulbo Húmedo.*
- Perez, M., & Porras, L. (2022). *Análisis, Modelamiento y Viabilidad de un Sistema de Enfriamiento Evaporativo Indirecto Regenerativo Contracorriente en Términos de la Efectividad del Bulbo Húmedo.* Universidad Industrial de Santander.

- Rajski, K., Danielewicz, J., & Brychcy, E. (2020). Performance evaluation of a gravity-assisted heat pipe-based indirect evaporative cooler. *Energies*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/en13010200>
- Real Academia Española. (2023). *cubierta* | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE. <https://dle.rae.es/cubierta>
- Sáiz, J. L. (1986). La arquitectura popular como base de una arquitectura bioclimática. Aplicación al enfriamiento pasivo. *Informes de La Construcción*, 38(385), 59–69. <https://doi.org/10.3989/ic.1986.v38.i385.1695>
- Sánchez, B. (2014). Arquitectura Bioclimática: Conceptos y técnicas - EcoHabitar. In *EcoHabitar*. <https://ecohabitar.org/arquitectura-bioclimatica-conceptos-y-tecnicas/>
- Santamouris, M. (2016). Cooling the buildings – past, present and future. *Energy and Buildings*, 128, 617–638. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>
- Santillán, N. S., & Garduño, R. (2008). *Algunas consideraciones acerca de los sistemas de clasificación climática*.
- seiscubos. (2020). *Modelos matemáticos de confort*. <https://www.seiscubos.com/conocimiento/modelos-matematicos-de-confort>
- SENA. (2012). *PREPARACIÓN DE SUPERFICIES Y APLICACIÓN DE ACABADOS*. https://repositorio.sena.edu.co/sitios/albanileria_restauracion_edificaciones/preparacion_superficies.html
- Serrano, M. (2018). *Masa térmica de un cerramiento*. <https://www.certicalia.com/blog/masa-termica-de-un-cerramiento>
- Soto Barrionuevo, A. (2018). Análisis de estrategias bioclimáticas aplicadas a edificaciones nZEB. *Revista Doctorado UMH*, 4(2), 1–13.
- Souza, E. (2020). *10 tipos de techos y las posibilidades de las cubiertas de pizarra*. ArchDaily. <https://www.archdaily.cl/cl/951304/10-tipos-de-techos-y-las-posibilidades-de-las-cubiertas-de-pizarra>
- Tabares, J.-E., & Arango-Díaz, L. (2024). Impacto de las propiedades superficiales de una cubierta sobre el desempeño térmico interior. Análisis descriptivo sobre un local comercial de gran superficie en tres ciudades colombianas. *Revista de Arquitectura*, 26(1), 165–180. <https://doi.org/10.14718/REVARQ.2024.26.3702>
- Tang, R., & Etzion, Y. (2005). Cooling performance of roof ponds with gunny bags floating on water surface as compared with a movable insulation. *Renewable Energy*, 30(9), 1373–1385. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.10.008>
- Tiwari, G. N., Kumar, A., & Sodha, M. S. (1982). A review—Cooling by water evaporation over roof. *Energy Conversion and Management*, 22(2), 143–153. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(82\)90036-X](https://doi.org/10.1016/0196-8904(82)90036-X)
- Torres, J. E. (2018). Comportamiento térmico de la cubierta en un clima cálido húmedo. Repercusión energética en el edificio [Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. In *UPCommons*. <https://doi.org/10.5821/disertación-2117-125312>
- Tovar, R., & Castillo, J. A. (2017). *Enfriamiento pasivo por techos fríos en habitaciones*. www.cie.unam.mx/
- Vaz, T. (2021). *Clasificación Climática de Köppen*. <https://energiatoday.com/el-clima/clasificacion-climatica-koppen/>

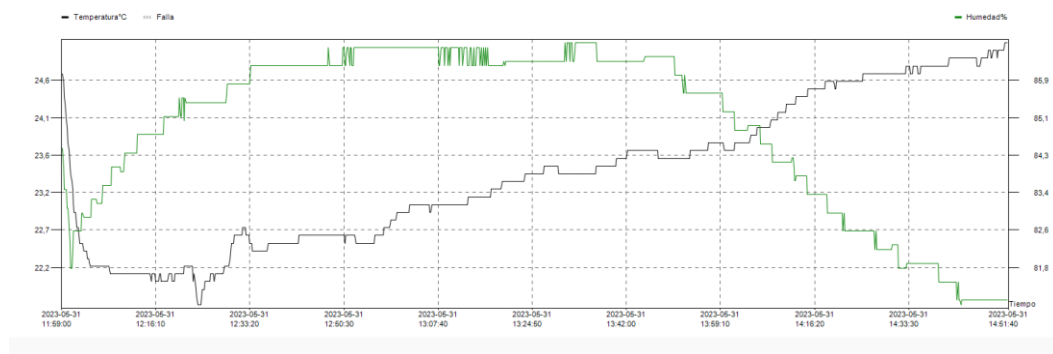
- Vidal, S., & Barona, J. (2022). Analysis and evaluation of the thermal performance of roofing systems used in dry construction for residential buildings located in the city of Santiago de Cali and its area of influence. *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, 25(1). <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i1.11363>
- Xuan, Y. M., Xiao, F., Niu, X. F., Huang, X., & Wang, S. W. (2012). Research and application of evaporative cooling in China: A review (I) – Research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3535–3546. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.01.052>

ANEXOS

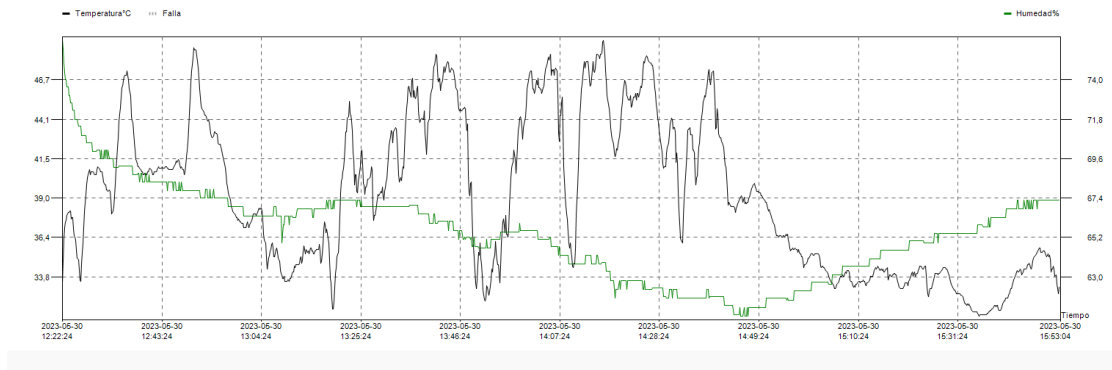
Anexo A. Ficha de registro de datos de clima interior en viviendas

Ficha para el registro de datos en campo							
Semana: al		Latitud:		Longitud:		Hoja N°	
# de vivienda:							
FECHA	HORA INICIO	HORA FIN	TEMPERATURA (°C)			PRECIPITACIÓN (°mm)	HUMEDAD RELATIVA (%)
			ACTUAL	MAXIMA	MÍNIMA		
TOTAL							
PROMEDIO							
MAXIMA							
MÍNIMA							

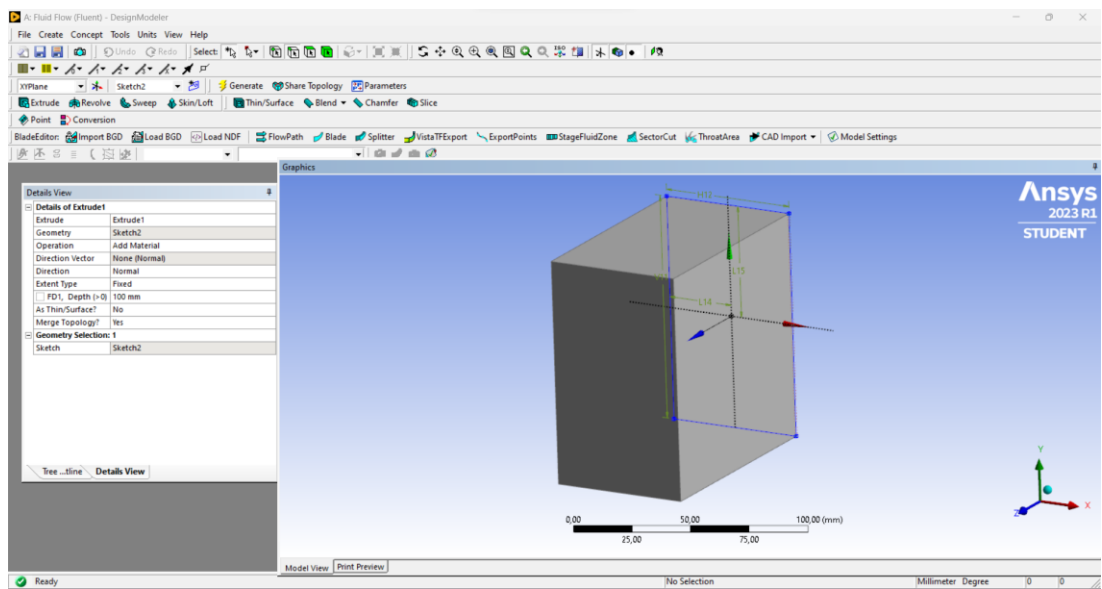
Anexo B. Gráfica de monitoreo de cubierta de tipología 2 en software Elitech



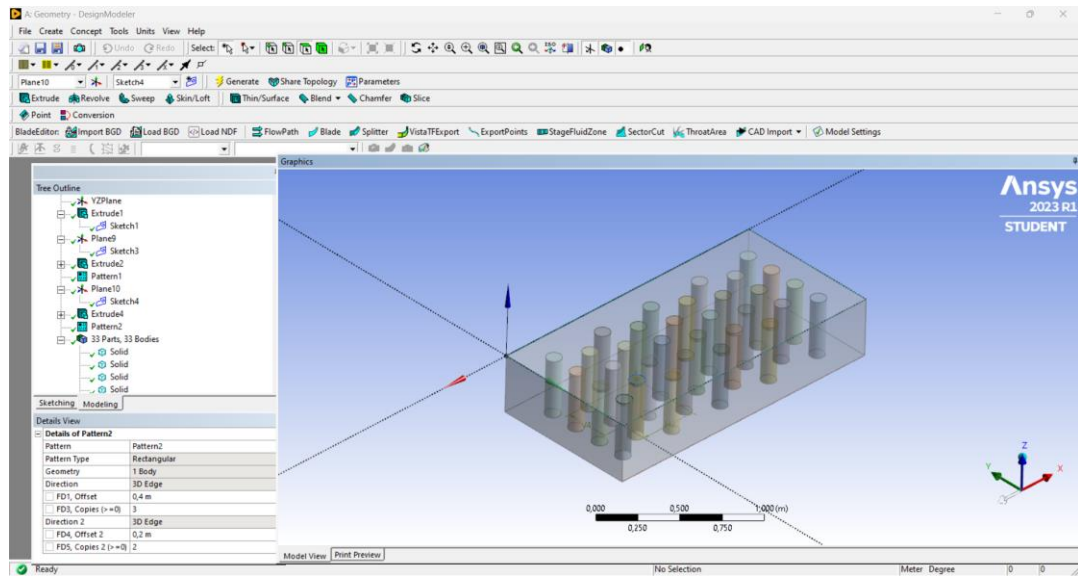
Anexo C. Gráfica de monitoreo de cubierta de tipología 1 en software Elitech



Anexo D. Proceso de crear geometría de intercambiador en Ansys



Anexo E.. Proceso de insertar tubos de calor en intercambiador en Ansys



Anexo F. Proceso de mallado de intercambiador

