

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO**

DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO



EVALUACIÓN PROSPECTIVA DE ESCENARIOS DE OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO DE MORFOLOGÍA URBANO-ARQUITECTÓNICA DE SECTORES EN RIESGO DE POBREZA ENERGÉTICA ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

T E S I S

que para obtener el grado de

DOCTORA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

Presenta

NAYELI MONTSERRAT CASTREJON ESPARZA

Director de Tesis

DR. MARCOS EDUARDO GONZÁLEZ TREVIZO

Co-director de Tesis

DR. AARÓN TADEO ONCHI RASCÓN

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, ENERO DE 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO



DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

EVALUACIÓN PROSPECTIVA DE ESCENARIOS DE OPTIMIZACIÓN
MULTIOBJETIVO DE MORFOLOGÍA URBANO-ARQUITECTÓNICA DE
SECTORES EN RIESGO DE POBREZA ENERGÉTICA ANTE EL CAMBIO
CLIMÁTICO

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO
DE DOCTORA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO PRESENTA

NAYELI MONTSERRAT CASTREJON ESPARZA

Correo electrónico: Nayeli.castrejon@uabc.edu.mx
Identificador ORCID: 0000-0001-7243-0999

Director de tesis: Dr. Marcos Eduardo González Trevizo
Identificador ORCID: 0000-0002-7382-2641

Co-Director de tesis: Dr. Aarón Tadeo Onchi Rascón
Identificador ORCID: 0000-0003-2167-6758

Revisor de tesis: Dra. Karen Estrella Martínez Torres

Revisor de tesis: Dr. Julio César Rincón Martínez

Revisor de tesis: Dr. Aníbal Luna León

Ensenada, Baja California, enero de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

**Evaluación prospectiva de escenarios de optimización
multiobjetivo de morfología urbano-arquitectónica de sectores
en riesgo de pobreza energética ante el cambio climático**

TESIS

Que para obtener el grado de Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño presenta:

Nayeli Montserrat Castrejón Esparza

Aprobada por:



Dr. Marcos Eduardo González Trevizo

Director de tesis



Dr. Aarón Tadeo Onchi Rascón

Co-director de tesis



Dra. Karen Estrella Martínez Torres



Dr. Julio César Rincón Martínez

Sínodo



Dr. Aníbal Luna León

Sínodo



Dr. Francisco Fernández Melchor

Sínodo

Ensenada, Baja California, México, 23 de enero de 2026



DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Declaro que la tesis que se presenta contiene material original que no ha sido presentado para la obtención de un grado académico o diploma en esta u otra institución de educación superior. Asimismo, declaro que hasta donde yo sé no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona excepto donde se reconoce como tal a través de las citas.

Ensenada, B.C., enero de 2026

Nayeli Montserrat Castrejon Esparza

AVAL DE TERMINACIÓN DE TESIS

Fecha: 23 de enero de 2026

DR. JULIÁN ISRAEL AGUILAR DUQUE
Director de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
Presente. -

Para dar cumplimiento al artículo 106 del ESTATUTO ESCOLAR DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, en su TÍTULO CUARTO DE LOS TÍTULOS PROFESIONALES, GRADOS ACADÉMICOS Y DIPLOMAS, CAPÍTULO ÚNICO, sobre los requisitos para la obtención del grado de **Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño**, como director de tesis en la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento de Arquitectura y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño Se emite la presente acta que avala que la estudiante:

NAYELI MONTSERRAT CASTREJON ESPARZA

ha concluido su tesis de grado titulada:

**EVALUACIÓN PROSPECTIVA DE ESCENARIOS DE OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO DE
MORFOLOGÍA URBANO-ARQUITECTÓNICA DE SECTORES EN RIESGO DE POBREZA
ENERGÉTICA ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO**

Lo anterior en virtud de que se realizaron las correcciones y recomendaciones del comité tutorial, por lo que ha sido aprobada para el proceso de presentación de examen de grado.

DIRECTOR DE TESIS **DR. MARCOS EDUARDO GONZÁLEZ TREVIZO**


FIRMA

CO-DIRECTOR DE TESIS **DR. AARÓN TADEO ONCHI RASCÓN**


FIRMA



DEDICATORIA

A mí misma

Como reconocimiento al esfuerzo, la constancia y la disciplina sostenidos a lo largo de este proceso doctoral, así como a la capacidad de perseverar frente a los desafíos académicos y personales que implicó su desarrollo.

A mi madre

Por su apoyo incondicional, su confianza permanente y su fortaleza, que han sido un pilar fundamental a lo largo de mi formación académica y personal.

AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis doctoral ha sido posible gracias al acompañamiento académico, institucional y humano de diversas personas e instancias, a quienes expreso mi más sincero agradecimiento:

En primer lugar, agradezco profundamente a mi **director de tesis, el Dr. Marcos Eduardo González Trevizo**, por su guía constante, rigor académico y confianza a lo largo de todo el proceso de investigación. Su experiencia, observaciones críticas y compromiso con la calidad científica fueron fundamentales para la consolidación del enfoque metodológico y el desarrollo de este trabajo

Deseo expresar un agradecimiento muy especial al **Dr. Aarón Tadeo Onchi Rascón**, codirector de esta tesis, y al **Dr. Aníbal Luna León**, miembro del comité tutorial, por su apoyo decisivo durante la etapa experimental de la investigación. Su asesoría técnica, disposición permanente y acompañamiento cercano en el diseño del experimento, fueron determinantes para la viabilidad y calidad de los resultados obtenidos. Sin su colaboración y experiencia, esta investigación no habría sido posible.

Asimismo, agradezco a la **Dra. Karen Estrella Martínez Torres** y al **Dr. Julio César Rincón Martínez**, miembros del comité tutorial, por la revisión crítica del manuscrito y por sus valiosas observaciones, las cuales contribuyeron a fortalecer la solidez teórica, metodológica y argumentativa de la tesis.

Expreso también mi agradecimiento a la **UABC** y al **MyDAUD** por proporcionar el marco institucional necesario para el desarrollo de esta investigación doctoral; asimismo, reconozco el apoyo de la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)** por el otorgamiento de la beca de estudios de doctorado, fundamental para la realización de este trabajo.

Finalmente, agradezco de manera especial a mi familia y a las personas cercanas que me acompañaron durante este proceso, por su apoyo incondicional, paciencia y comprensión a lo largo de esta etapa académica, cuyo respaldo fue esencial para la culminación de este trabajo; asimismo, agradezco a **Dios** por la fortaleza, constancia y claridad que me fueron concedidas a lo largo de este camino académico.

El acelerado crecimiento urbano y el cambio climático están intensificando el sobrecalentamiento urbano, la demanda energética residencial y el riesgo de pobreza energética en ciudades de países en desarrollo. Esta investigación propone un sistema de evaluación prospectiva basado en diseño evolutivo y optimización multiobjetivo para analizar cómo la morfología urbano-arquitectónica influye en el desempeño térmico-energético y en el riesgo presente y futuro de pobreza energética bajo condiciones climáticas actuales y proyectadas.

La metodología integra análisis multicriterio, monitoreo microclimático in situ, modelación paramétrica y simulación termoenergética, aplicando el algoritmo genético de clasificación no dominada II (NSGA-II) para generar escenarios de redensificación en un cañón urbano vulnerable al calor en la ciudad de Ensenada, México, bajo un clima mediterráneo semiárido. El análisis se desarrolló a partir de la evaluación de dos torres representativas, consideradas bajo configuraciones morfológicas óptimas y críticas, incorporando tanto condiciones climáticas actuales como un escenario climático prospectivo crítico de altas emisiones A2, correspondiente al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, AR4, A2), con un horizonte temporal proyectado hacia el año 2050.

Los resultados muestran que las configuraciones optimizadas reducen el consumo energético por enfriamiento hasta en un 18 % bajo condiciones actuales; sin embargo, bajo el escenario 2050 el consumo estival se incrementa entre 15 y 25 %, superando en la mayoría de los casos el umbral de 250 kWh/mes y detonando incrementos sustanciales en el costo energético anual. La pobreza energética, definida como un gasto energético superior al 10 % del ingreso anual, se presenta en 37,5 % de los escenarios actuales y en 87,5 % de los escenarios prospectivos, incluyendo configuraciones óptimas.

Los hallazgos evidencian que el cambio climático amplifica estructuralmente el riesgo de pobreza energética y subrayan la necesidad de integrar criterios socioeconómicos, tarifarios y de protección social en la planificación urbana y en las políticas de densificación bajo escenarios climáticos futuros.

Palabras clave: Optimización multiobjetivo, Pobreza energética, Morfología urbano-arquitectónica, Redensificación urbana, Cambio climático.

Rapid urban growth and climate change are intensifying urban overheating, residential energy demand, and the risk of energy poverty in cities of developing countries. This research proposes a prospective evaluation framework based on evolutionary design and multi-objective optimization to analyze how urban–architectural morphology influences thermal–energy performance and the present and future risk of energy poverty under current and projected climatic conditions.

The methodology integrates multi-criteria analysis, in situ microclimatic monitoring, parametric modeling, and building energy simulation, applying the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) to generate densification scenarios within a heat-vulnerable urban canyon located in Ensenada, Mexico, under a semi-arid Mediterranean climate. The analysis is based on the evaluation of two representative residential towers, considered under optimal and critical morphological configurations, incorporating both current climatic conditions and a high-emissions prospective climate scenario A2, corresponding to the Fourth Assessment Report of the IPCC (IPCC, AR4, A2), with a projected horizon toward the year 2050.

The results show that optimized configurations reduce cooling energy consumption by up to 18% under current conditions; however, under the 2050 scenario, summer energy demand increases by 15–25%, exceeding the 250 kWh/month threshold in most cases and triggering substantial increases in annual energy costs. Energy poverty, defined as an energy expenditure exceeding 10% of annual household income, is observed in 37.5% of current scenarios and in 87.5% of prospective scenarios, including optimized configurations.

The findings demonstrate that climate change structurally amplifies the risk of energy poverty and highlight the need to integrate socioeconomic, tariff-related, and social protection criteria into urban planning and densification policies under future climate scenarios.

Keywords: Multi-objective optimization, Energy poverty, Urban-architectural morphology, Urban densification, Climate change.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
Introducción	2
Resumen de capítulos	5
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1. Planteamiento de la investigación.....	7
1.1. Panorama general.....	7
1.2. Planteamiento del problema.....	9
1.3. Justificación	12
1.4. Pregunta de investigación	14
1.4.1. Preguntas de investigación secundarias	14
1.5. Hipótesis	14
1.6. Objetivos de la investigación.....	15
1.6.1. Objetivo general.....	15
1.6.2. Objetivos específicos	15
1.7. Alcances y limitaciones	16
1.7.1. Alcance	16
1.7.2. Limitaciones.....	19
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	21
2.1. Antecedentes	22
2.1.1. Estudios precursores de la isla de calor urbana	22
2.1.2. Introducción a los modelos de optimización multiobjetivo	23
2.2. Marco Conceptual.....	27
2.2.1. Pobreza energética	27
2.2.2. Terminología asociada al diseño evolutivo	30
2.3. Marco teórico	33
2.3.1. Isla de calor urbana	34
2.3.1.1. Causas y efectos de la ICU	38



2.3.1.2.	Estrategias de mitigación de la ICU	40
2.3.2.	Sistema energético en México	42
2.3.2.1.	Pobreza energética en México	42
2.3.3.	Vulnerabilidad térmica	44
2.3.4.	Morfología urbano-arquitectónica	47
2.3.4.1.	Microclima y consumo energético.....	49
2.3.5.	Optimización multiobjetivo	51
2.3.5.1.	Optimización multiobjetivo en arquitectura	52
2.4.	Estado del arte.....	54
2.4.1.	Tipos de algoritmos y herramientas de optimización	54
2.4.1.1.	Algoritmo NSGA-II.....	57
2.4.2.	Patrones geoespaciales presentes en el diseño y la optimización urbana orientados al rendimiento	59
2.4.3.	Tendencias de investigación en los objetivos de optimización	61
2.4.4.	Métricas de desempeño urbano.....	63
2.4.5.	Métricas de morfología urbana	66
2.5.	Marco normativo.....	68
2.5.1.	Regulaciones para la Reconfiguración de la Lotificación Urbana en Ensenada ..	69
2.5.2.	Normativas para el diseño de edificaciones condominales	71
2.6.	Dominios de conocimiento integrados	73
CAPÍTULO 3. MÉTODO		76
3.	Método	77
3.1.	Diseño de la investigación	77
3.1.1.	Procedimiento metodológico	78
3.2.	Diseño del experimento	83
3.2.1.	Objeto y variables de estudio.....	83
3.2.2.	Área de estudio	85
3.2.2.1.	Contexto general	85
3.2.2.2.	Caracterización climática.....	87
3.2.2.3.	Criterios de selección.....	90



3.2.3. Selección de unidad de análisis	91
3.2.4. Temporalidad del estudio.....	93
3.3. Análisis espacial de la vulnerabilidad térmica-energética	93
3.3.1. Análisis de sensibilidad	95
3.3.1.1. Adquisición y procesamiento de información sociodemográfica.....	97
3.3.2. Análisis de exposición	99
3.3.2.1. Adquisición y procesamiento de datos espectrales.....	101
3.3.2.2. Determinación del día típico cálido extremo	102
3.3.2.3. Descarga de imágenes satelitales	103
3.3.2.4. Cálculo de indicadores espectrales	104
3.3.2.5. Mapeo de exposición al calor	107
3.3.3. Cartografía de vulnerabilidad térmica-energética.....	107
3.4. Campaña de monitoreo in situ	108
3.4.1. Selección del periodo de estudio	109
3.4.2. Herramientas y equipo	110
3.4.3. Calibración del equipo	111
3.4.4. Criterios para la colocación de los instrumentos	116
3.4.5. Campaña de monitoreo	119
3.4.6. Procesamiento de datos.....	122
3.5. Modelo paramétrico urbano-arquitectónico.....	122
3.5.1. Modelado de la geometría primitiva.....	123
3.5.1.1. Relotificación y diseño de la planta tipo.....	123
3.5.1.2. Definición de genomas	127
3.5.1.3. Selección de torres representativas	129
3.5.2. Configuración termoenergética.....	132
3.5.2.1. Definición de sistemas constructivos.....	134
3.5.2.2. Definición de parámetros operativos	135
3.5.2.3. Definición de sistema HVAC	136
3.5.3. Herramientas y software	137
3.6. Optimización multiobjetivo	138
3.6.1. Definición de objetivos de optimización	139



3.6.2. Configuración operativa del algoritmo NSGA-II	142
3.6.3. Selección de escenarios	143
3.7. Evaluación térmico energética y estimación del riesgo de pobreza energética ..	144
3.7.1.1. Evaluación térmico-energética bajo escenarios climáticos presente y futuro	145
3.7.1.2. Estimación del riesgo de pobreza energética	146
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	147
4. Resultados	148
4.1. Análisis espacial de la vulnerabilidad térmica-energética	148
4.1.1. Análisis de sensibilidad sociodemográfica	149
4.1.2. Análisis de exposición térmica de la mancha urbana de Ensenada	152
4.1.2.1. Distribución espacial de la exposición térmica.....	153
4.1.2.2. Análisis de indicadores espectrales.....	155
4.1.3. Análisis de vulnerabilidad térmica-energética de Ensenada.....	159
4.1.4. Patrones de consumo eléctrico residencial	162
4.2. Caracterización del área de estudio	165
4.2.1. Unidad de análisis	168
4.2.1.1. Cañón urbano Lomitas	170
4.2.1.2. Cañón urbano Moderna	172
4.3. Monitoreo microclimático	175
4.3.1. Caracterización microclimática	175
4.3.2. Análisis de TBS en la colonia Lomitas y moderna a nivel peatón	180
4.3.2.1. Registros térmicos en la colonia Lomitas	180
4.3.2.2. Registros térmicos en la colonia Moderna.....	182
4.3.2.3. Comparación térmica entre colonias.....	183
4.3.3. Análisis del factor de cielo visible.....	184
4.4. Optimización multiobjetivo	189
4.4.1. Optimización multiobjetivo del cañón urbano Lomitas	190
4.4.1.1. Comportamiento global del proceso de optimización	190
4.4.1.2. Análisis de soluciones óptimas	196



4.4.1.3.	Selección del escenario óptimo y del escenario crítico	199
4.4.2.	Optimización multiobjetivo del cañón urbano Moderna	204
4.4.2.1.	Comportamiento global del proceso de optimización	204
4.4.2.2.	Análisis de soluciones óptimas	207
4.4.2.3.	Selección del escenario óptimo y del escenario crítico	210
4.4.3.	Análisis comparativo del proceso de optimización multiobjetivo entre Lomitas y Moderna	215
4.4.3.1.	Comparación del comportamiento global del proceso de optimización	215
4.4.3.2.	Comparación morfológica de las soluciones óptimas	216
4.5.	Evaluación térmico-energética de los escenarios	218
4.5.1.	Desempeño térmico-energético bajo condiciones climáticas actuales	218
4.5.2.	Impacto del cambio climático en el desempeño térmico-energético (2050)	228
4.6.	Evaluación de la pobreza energética	231
4.6.1.	Estimación del gasto energético e ingreso anual del hogar	233
4.6.2.	Pobreza energética bajo condiciones climáticas actuales	235
4.6.3.	Impacto del cambio climático en la pobreza energética hacia 2050	237
DISCUSIÓN		240
CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES		243
Conclusión		244
Síntesis de hallazgos principales		246
Futuras investigaciones		246
REFERENCIAS		249
ANEXOS		259
Anexo A: Esquema tarifario doméstica del CFE		260
Anexo B: Creación y codificación de indicadores de sensibilidad		262
Anexo C: Sectorización de la mancha urbana de la ciudad de Ensenada		267
Anexo D: Tendencia de crecimiento de la ciudad de Ensenada		268
Anexo E: Clasificación de la vivienda		269
Anexo F: Supuestos de consumos unitarios de combustible SENER		270



APÉNDICES	271
Apéndice A: Diagramas de dispersión correspondientes a la calibración	272
Apéndice B: Plano arquitectónico de la planta tipo	274
Apéndice C: Relotificación del cañón urbano de Lomitas	275
Apéndice D: Relotificación del cañón urbano de Moderna	275
Apéndice E: Índices espectrales	276
Apéndice F: Planta de conjunto del cañón urbano de Lomitas	278
Apéndice G: Planta de conjunto del cañón urbano de Moderna	279
Apéndice H: Matriz de genomas del cañón urbano de Lomitas	280
Apéndice I: Matriz de genomas del escenario óptimo y crítico del cañón urbano de Lomitas 281	
Apéndice J: Matriz de genomas del escenario óptimo y crítico del cañón urbano de Moderna 281	
Apéndice K: Matriz de genomas del cañón urbano de Moderna	282
Apéndice L: Comportamiento mensual y horaria de la temperatura de bulbo seco	283
Apéndice M: índices espectrales de la manca urbana de Ensenada por AGEB	284
Apéndice N: Esquema general del algoritmo para la optimización multiobjetivo y evaluación térmico-energética	287



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Incremento de la temperatura máxima del mes de agosto (2020 y 2024).....	10
Figura 2	Grado de vulnerabilidad (a), y riesgo (b) por olas de calor a escala nacional	11
Figura 3	Correlación entre las estrategias de mitigación con respecto a los ODS	13
Figura 4	Perspectiva deductiva del objeto de estudio en relación con el planteamiento del problema	18
Figura 5	Precusores en el estudio de la isla de calor urbana	23
Figura 6	Línea del tiempo de los modelos MOO con algoritmos genéticos	25
Figura 7	Diagrama de flujo del protocolo de búsqueda para síntesis de datos.....	34
Figura 8	Esquema de la isla de calor urbana	35
Figura 9	Efectos del fenómeno ICU	40
Figura 10	Estrategias ambientales para mitigar el efecto ICU	41
Figura 11	Vulnerabilidad al calor: dimensión	44
Figura 12	Respuesta de las vías fisiológicas de la tensión por calor humano	45
Figura 13	Indicadores de morfología urbana.....	48
Figura 14	Frecuencia de aplicación de algoritmos y herramientas de optimización y su naturaleza	55
Figura 15	Flujo de trabajo del algoritmo NSGA-II	58
Figura 16	Jerarquía de países en los ámbitos de investigación contemporáneos y número de publicaciones por país.....	60
Figura 17	Tendencias de investigación en objetivos de optimización (2015-2024)	62
Figura 18	Métricas de morfología urbana	67
Figura 19	Dominios de conocimiento integrados	75
Figura 20	Precisiones metodológicas para el diseño de la investigación	77



Figura 21	Procedimiento metodológico.....	80
Figura 22	Ubicación geográfica de la ciudad de Ensenada, B.C.	85
Figura 23	Comportamiento mensual y horario de la temperatura de bulbo seco	88
Figura 24	Comportamiento mensual y horaria de humedad relativa.....	89
Figura 25	Comportamiento mensual de la radiación solar global	89
Figura 26	Rosa de los vientos anual	90
Figura 27	Criterios de selección del área de estudio	91
Figura 28	Criterios de selección de la unidad de análisis	93
Figura 29	Metodología para determinar vulnerabilidad al calor	94
Figura 30	Proceso metodológico para el análisis de exposición al calor	100
Figura 31	Metodología para calcular LST y NDVI.....	106
Figura 32	Metodología para la adquisición de datos de la campaña de monitoreo	109
Figura 33	Registros de temperatura de bulbo seco.....	114
Figura 34	Registros de TBS y velocidad del viento corregidos tras la calibración de estaciones.....	115
Figura 35	Mapa de ubicación de los instrumentos en la colonia Moderna	117
Figura 36	Mapa de ubicación de los instrumentos en la colonia Las Lomitas	118
Figura 37	Mapa de ubicación para la captura de fotografías en la colonia Las Lomitas ..	121
Figura 38	Mapa de ubicación para la captura de fotografías en la colonia Moderna	121
Figura 39	Metodología del modelo paramétrico urbano-arquitectónico	123
Figura 40	Metodología para la reconfiguración de lotes y diseño de la planta tipo	124
Figura 41	Análisis de tipologías reales existentes	125
Figura 42	Identificación de tipologías geométricas predominantes	125
Figura 43	Diseño de la planta tipo.....	126



Figura 44	Genomas del modelo paramétrico urbano-arquitectónico	127
Figura 45	Selección de torres representativas en Lomitas.....	131
Figura 46	Selección de torres representativas en Moderna	132
Figura 47	Definición de zonas térmicas	133
Figura 48	Pseudocódigo del proceso de optimización	139
Figura 49	Relación entre los objetivos y los genomas del modelo.....	141
Figura 50	Distribución espacial de sensibilidad sociodemográfica al calor en la mancha urbana de Ensenada por AGEB	151
Figura 51	Distribución espacial de exposición térmica en la mancha urbana de Ensenada por AGEB	154
Figura 52	Índices espectrales de la mancha urbana de Ensenada por AGEB	156
Figura 53	Distribución espacial de vulnerabilidad térmica-energética de la mancha urbana de Ensenada por AGEB	161
Figura 54	Patrones promedio de kWh del bimestre agosto-septiembre para la tarifa 1 habitacional por vivienda.....	164
Figura 55	Delimitación del área de estudio	166
Figura 56	Área urbana con grado de vulnerabilidad muy alta: Lomitas	167
Figura 57	Área urbana con grado de vulnerabilidad muy baja: Moderna	168
Figura 58	Selección de la unidad de análisis	169
Figura 59	Planta del cañón urbano de Lomitas	171
Figura 60	Modelo 3D de la geometría primitiva del cañón urbano de Lomitas.....	171
Figura 61	Planta del cañón urbano de <i>Moderna</i>	173
Figura 62	Modelo 3D de la geometría primitiva del cañón urbano de Moderna	174
Figura 63	Temperatura de bulbo seco monitoreada por la estación meteorológica Davis y Acurite	176



Figura 64 Temperatura de bulbo seco máximas extremas monitoreadas por las estaciones Davis y Acurite	177
Figura 65 Velocidad del viento monitoreadas por las estaciones Davis y Acurite	178
Figura 66 Temperatura de bulbo seco monitoreada por los sensores en Lomitas	181
Figura 67 Temperatura de bulbo seco monitoreada por los sensores en Moderna.....	182
Figura 68 Relación entre SVF y TBS mínima en cañones urbanos de Lomitas.....	186
Figura 69 Relación entre SVF y TBS mínima en cañones urbanos de Moderna	188
Figura 70 Gráficos de desviación estándar por objetivo de aptitud: Lomitas	192
Figura 71 Gráficos de valores de aptitud por objetivo para cada individuo: Lomitas.....	194
Figura 72 Gráficos de la línea de tendencia de aptitud media por objetivo: Lomitas	196
Figura 73 Representación del frente de Pareto en el espacio de objetivos: Lomitas.....	197
Figura 74 Gráfico de coordenadas paralelas de la optimización multiobjetivo de Lomitas	200
Figura 75 Identificación del escenario óptimo y crítico global de Lomitas	201
Figura 76 Configuración morfológica 3D del escenario óptimo del cañón urbano Lomitas	203
Figura 77 Configuración morfológica 3D del escenario crítico del cañón urbano Lomitas	203
Figura 78 Gráficos de desviación estándar por objetivo de aptitud: Moderna	205
Figura 79 Gráficos de valores de aptitud por objetivo para cada individuo: Moderna	206
Figura 80 Gráficos de la línea de tendencia de aptitud media por objetivo: Moderna	207
Figura 81 Representación del frente de Pareto en el espacio de objetivos: Moderna	208
Figura 82 Gráfico de coordenadas paralelas de la optimización multiobjetivo de Moderna	211
Figura 83 Identificación del escenario óptimo y crítico global de Moderna	212



Figura 84 Configuración morfológica 3D del escenario óptimo del cañón urbano Moderna	214
Figura 85 Configuración morfológica 3D del escenario crítico del cañón urbano Moderna	214
Figura 86 Balance energético mensual: cañón urbano Lomitas	219
Figura 87 Balance energético mensual: cañón urbano Moderna	221
Figura 88 Consumo eléctrico mensual por condominio tipo de la TSC y TSE de Lomitas	224
Figura 89 Consumo eléctrico mensual por condominio tipo de la TSC y TSE de Moderna	227
Figura 90 Esquema conceptual para la estimación de la pobreza energética del hogar ...	232
Figura 91 Sectorización de la mancha urbana de la ciudad de Ensenada	267
Figura 92 Tendencia de crecimiento	268
Figura 93 Diagramas de dispersión correspondiente a la calibración de sensores de temperatura	272
Figura 94 Diagramas de dispersión correspondiente a la calibración de la estación	273
Figura 95 Plano arquitectónico de la planta tipo	274
Figura 96 Planta de conjunto de la relotificación del cañón urbano de Lomitas	275
Figura 97 Planta de conjunto de la relotificación del cañón urbano de Moderna	275
Figura 98 Índices espectrales de la mancha urbana de Ensenada	276
Figura 99 Planta de conjunto y perfil del cañón urbano de Lomitas	278
Figura 100 Planta de conjunto y perfil del cañón urbano de Moderna	279
Figura 101 Matriz de genomas del frente de Pareto del cañón urbano de Lomitas	280
Figura 102 Matriz de genomas del escenario óptimo y crítico del cañón urbano de Lomitas	281



Figura 103 Matriz de genomas del escenario óptimo y crítico del cañón urbano de Moderna	281
Figura 104 Matriz de genomas del frente de Pareto del cañón urbano de Moderna	282
Figura 105 Comportamiento mensual y horario de la temperatura de bulbo seco	283
Figura 106 Índices espectrales de la mancha urbana de Ensenada por AGEB	284
Figura 107 Esquema general del algoritmo para la optimización multiobjetivo y evaluación térmico-energética	287



INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Recomendaciones y hallazgos de investigaciones en estudios de optimización multiobjetivo.....	26
Tabla 2 Indicadores de vulnerabilidad energética	30
Tabla 3 Terminología asociada al diseño evolutivo	32
Tabla 4 Indicadores empleados para medir el fenómeno ICU.....	36
Tabla 5 Indicadores de vulnerabilidad sociodemográfica	46
Tabla 6 Variables empleadas para medir los factores socioeconómicos y de vulnerabilidad	47
Tabla 7 Variables empleadas para medir infraestructura gris.....	49
Tabla 8 Variables empleadas para medir el consumo de energía y el confort térmico	50
Tabla 9. Características computacionales clave de los algoritmos evolutivos aplicados a la optimización del diseño multiobjetivo.....	56
Tabla 10 Métricas de desempeño urbano por objetivo de optimización	64
Tabla 11 Normativa relativa a la densificación vertical de la ciudad	70
Tabla 12 Intensidad de uso de suelo habitacional unifamiliar	70
Tabla 13 Intensidad de uso de suelo habitacional multifamiliar.....	70
Tabla 14 Dimensiones y características mínimas de los espacios	71
Tabla 15 Dimensiones mínimas de cajones de estacionamiento	72
Tabla 16 Etapas, actividades, instrumentos y herramientas en la investigación	81
Tabla 17 Operacionalización de variables	84
Tabla 18 Indicadores de sensibilidad.....	97
Tabla 19 Precisiones de las herramientas y software empleados	99
Tabla 20 Indicadores de exposición.....	101
Tabla 21 Precisiones de las herramientas y software empleados	102



Tabla 22 Datos de la imagen satélital	104
Tabla 23 Cálculo de indicadores de exposición.....	105
Tabla 24 Datos técnicos de la imagen satélital	106
Tabla 25 Precisiones de las herramientas y software empleados	110
Tabla 26 Especificaciones de la calibración	112
Tabla 27 Ecuaciones de regresión aplicadas para la corrección de registros de sensores Trix-16 y estación Acurite	113
Tabla 28 Especificaciones del monitoreo	119
Tabla 29 Especificaciones para la captura de fotografías	120
Tabla 30 Rangos e intervalos de los genomas	129
Tabla 31 Valores U de construcción (W/m^2-K).....	135
Tabla 32 Propiedades físicas térmicas de los materiales de construcción	135
Tabla 33 Cargas internas.....	136
Tabla 34 Definición del sistema HVAC	136
Tabla 35 Herramientas y software	137
Tabla 36 Objetivos de optimización	140
Tabla 37 Configuración del algoritmo NSGA-II.....	143
Tabla 38 AGEB con nivel de sensibilidad muy alto.....	150
Tabla 39 AGEB con nivel de exposición muy alto.....	153
Tabla 40 AGEB con nivel de vulnerabilidad térmica.....	160
Tabla 41 Comparación microclimática entre Moderna y Lomitas (23/08/24-19/09/24)..	179
Tabla 42 TBS monitoreada por los sensores (23/08/24-19/09/24) en Lomitas	181
Tabla 43 TBS monitoreada por los sensores (23/08/24-19/09/24) en Moderna.....	183
Tabla 44 Fotografías hemisféricas y cálculo de SVF de Lomitas	184



Tabla 45 Fotografías hemisféricas y cálculo de SVF de Moderna	187
Tabla 46 Estadísticos descriptivos del genoma de las soluciones del frente de Pareto: Lomitas	199
Tabla 47 Comparación de los valores de los objetivos de aptitud para los escenarios óptimo y crítico de Lomitas	202
Tabla 48 Estadísticos descriptivos del genoma de las soluciones del frente de Pareto: Moderna	210
Tabla 49 Comparación de los valores de los objetivos de aptitud para los escenarios óptimo y crítico de Lomitas	213
Tabla 50 Comparativa del comportamiento global del proceso de optimización.....	216
Tabla 51 Comparación de los estadísticos descriptivos de los genomas de las soluciones del frente de Pareto	217
Tabla 52 Consumo eléctrico mensual promedio y costo anual estimado por condominio tipo de los escenarios óptimos y críticos del cañón urbano Lomitas	222
Tabla 53 Consumo eléctrico mensual promedio y costo anual estimado por condominio tipo de los escenarios óptimos y críticos del cañón urbano Moderna.....	226
Tabla 54 Consumo eléctrico mensual promedio y costo anual estimado por condominio tipo es los escenarios óptimos y críticos del cañón urbano Lomitas bajo condiciones climáticas prospectivas (2050).....	229
Tabla 55 Consumo eléctrico mensual promedio y costo anual estimado por condominio tipo es los escenarios óptimos y críticos del cañón urbano Moderna bajo condiciones climáticas prospectivas (2050).....	231
Tabla 56 Estimación del consumo de combustible por condominio tipo	234
Tabla 57 Estimación del riesgo de pobreza energética bajo condiciones climáticas actuales	236
Tabla 58 Estimación de riesgo de pobreza energética bajo el impacto del cambio climático	238



Tabla 59	Esquema tarifario doméstico vigente del CFE	260
Tabla 60	Límite de alto consumo de la tarifa DAC	260
Tabla 61	Cuotas aplicables a la Tarifa 1 2025	261
Tabla 62	Cuotas aplicables a la Tarifa de alto consumo eléctrico (DAC) 2025	261
Tabla 63	Desglose del indicador de densidad de población	262
Tabla 64	Desglose del indicador de población no derechohabiente	262
Tabla 65	Desglose del indicador de analfabetismo	262
Tabla 66	Desglose del indicador de población de habla indígena	262
Tabla 67	Desglose del indicador de demanda escolar	263
Tabla 68	Desglose del indicador de grado de escolaridad	263
Tabla 69	Desglose del indicador de porcentaje de vivienda con piso de tierra	263
Tabla 70	Desglose del indicador déficit de vivienda	263
Tabla 71	Desglose del indicador porcentaje de viviendas sin servicio de agua entubada	264
Tabla 72	Desglose del indicador porcentaje de viviendas sin servicio de drenaje	264
Tabla 73	Desglose del indicador porcentaje de viviendas sin servicio de electricidad	264
Tabla 74	Desglose del indicador razón de dependencia	264
Tabla 75	Desglose del indicador tasa de desempleo	265
Tabla 76	Desglose del indicador población económicamente activa	265
Tabla 77	Población de 60 y más	265
Tabla 78	Población de 0 a 14 años	265
Tabla 79	Población femenina	266
Tabla 80	Clasificación de la vivienda del Código de Edificación de Vivienda	269
Tabla 81	Supuestos de consumos unitarios de combustible	270



ÍNDICE DE ECUACIONES

(1).....	28
(2).....	103
(3).....	105
(4).....	107



LISTADO DE ABREVIATURAS

Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
AG	Algoritmo genético	MOO	Optimización Multiobjetivo
AGEB	Área Geoestadística Básica	NDBAI	Índice de Suelo Desnudo
COPLADE	Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado	NDBI	Índice de Edificación de Diferencia Normalizada
DAC	Tarifa Doméstica de Alto Consumo	NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
EPW	EnergyPlus Weather File	NSGA-II	Algoritmo Genético de Clasificación No Dominada II
EUI	Intensidad del uso de la energía	ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
EUIcooling	Intensidad del uso de la energía por enfriamiento	PE	Pobreza energética
FAR	Relación de superficie	PDUCP	Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población
H/W	Relación altura-ancho del cañón urbano	SEDATU	Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano
ICU	Isla de Calor Urbana	SIG	Sistema de Información Geográfica
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía	SVF	Factor de Cielo Visible
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático	TSC	Torre con Sobrecalentamiento
LST	Temperatura de la Superficie Terrestre	TSE	Torre con sobreenfriamiento
MNDWI	Índice de Agua de Diferencia Normalizada	WWR	Relación vano–macizo
MOEA	Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo		

INTRODUCCIÓN

Introducción

El crecimiento urbano en diversas ciudades de países en desarrollo se ha caracterizado por procesos de expansión horizontal y patrones de dispersión de ocupación territorial, lo que ha generado presiones significativas sobre el ambiente urbano y los sistemas energéticos (CONARED & SEDATU, 2024). Este modelo de desarrollo ha contribuido al incremento de la huella ecológica, la dependencia del transporte motorizado y la ineficiencia en el uso del suelo (SEDATU et al., 2020), al tiempo que ha intensificado fenómenos como la isla de calor urbano (ICU) y la pobreza energética. Esta última, entendida como la incapacidad de los hogares para acceder a servicios energéticos suficientes, seguros y asequibles, limita la capacidad de adaptación ante condiciones térmicas adversas (Nussbaumer et al., 2012).

En ciudades ubicadas en climas semiáridos de tipo BSk, estas dinámicas adquieren mayor relevancia debido a las fuertes variaciones térmicas entre el día y la noche, la escasez de vegetación y la alta exposición a la radiación solar. Tales condiciones incrementan las cargas energéticas por refrigeración y calefacción, especialmente en zonas donde las edificaciones presentan baja inercia térmica o estrategias pasivas insuficientes (Santamouris et al., 2015). En este contexto, la vulnerabilidad socioenergética se profundiza en sectores de bajos ingresos, donde la capacidad de adaptación frente a temperaturas extremas es limitada, incrementando el riesgo de pobreza energética (Bouzarovski & Simcock, 2017).

A nivel nacional, México ha impulsado en la última década políticas orientadas a contrarrestar los efectos negativos de la expansión urbana descontrolada. La Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) ha promovido lineamientos que favorecen la consolidación del tejido urbano mediante estrategias de densificación y aprovechamiento de infraestructura existente, destacando iniciativas como el Sistema Urbano Nacional 2020 y el Programa Nacional de Vivienda (PNV) (SEDATU, 2021). Estas políticas buscan fomentar modelos de ciudad compacta, eficientes en el uso de energía y resilientes frente a los efectos del cambio climático.

Ensenada, como ciudad de tamaño medio sujeta a presiones de crecimiento y con un clima mediterráneo semiárido, ejemplifica los retos asociados a la transición hacia modelos urbanos más densos y energéticamente eficientes. Su desarrollo histórico presenta patrones de expansión horizontal, fragmentación del tejido urbano, así como condiciones microclimáticas

que favorecen la intensificación del calor urbano, evidenciando la necesidad de estrategias integrales de transformación morfológica con criterios de sostenibilidad (Gobierno Municipal, 2024).

En este escenario, la redensificación urbana se ha consolidado como una estrategia relevante para optimizar el uso del suelo, aprovechar infraestructura existente y reducir los impactos negativos del crecimiento disperso (Rode et al., 2014). Sin embargo, su implementación exige considerar cuidadosamente la morfología urbano-arquitectónica para evitar efectos adversos, como el aumento del sobrecalentamiento urbano o la degradación de la calidad ambiental en zonas densamente construidas.

Ante estos desafíos, surge la necesidad de enfoques capaces de explorar configuraciones urbano-arquitectónicas que optimicen simultáneamente el desempeño térmico-energético, la calidad ambiental y la resiliencia climática. Los modelos generativos y los procesos de optimización multiobjetivo basados en algoritmos evolutivos permiten evaluar de manera integral múltiples variables morfológicas y su interacción con el microclima urbano, aportando herramientas para la toma de decisiones en contextos de densificación (Deb, 2001).

La presente investigación se desarrolla en este marco, con el propósito de evaluar escenarios prospectivos de redensificación mediante optimización multiobjetivo de la morfología urbano-arquitectónica en sectores vulnerables al calor. Integrando indicadores morfológicos, datos microclimáticos, simulaciones termoenergéticas y estimaciones de riesgo de pobreza energética, el estudio busca comprender cómo distintas configuraciones urbano-arquitectónicas pueden reducir el consumo energético y mejorar el desempeño térmico energético bajo condiciones actuales y futuras de cambio climático. Los hallazgos generados tienen como finalidad apoyar la formulación de políticas de densificación y adaptación climática en ciudades semiáridas, contribuyendo a un desarrollo urbano más eficiente, resiliente y equitativo.

Asimismo, esta investigación se fundamenta en evidencia internacional que demuestra que la optimización de indicadores de forma urbana puede incidir de manera significativa en la reducción del consumo energético y en la mejora de la eficiencia térmica urbana (Li et al., 2022; Liu et al., 2023; Mangan et al., 2021a; Mirzabeigi & Razkenari, 2022; Wang et al., 2021; Xu et al., 2023). Países como China, Italia y Alemania han incorporado estos modelos para el

desarrollo de ciudades energéticamente eficientes, edificios de energía neta cero y estrategias de gestión microclimática, así como para la planificación urbana y la optimización del rendimiento de los edificios (Yan et al., 2022). En este contexto, la integración de modelos de optimización multiobjetivo y metodologías de diseño evolutivo en arquitectura y urbanismo constituye un enfoque prometedor para fortalecer la sostenibilidad y la resiliencia urbana ante el cambio climático, al proporcionar soluciones basadas en el desempeño ambiental y la eficiencia energética.

En este sentido, el estudio propone un enfoque integral que articula la intersección de cuatro dominios disciplinares interdependientes: i) un dominio metodológico sustentado en técnicas de diseño evolutivo y optimización multiobjetivo; ii) un dominio energético orientado al análisis de cargas térmicas y pobreza energética; iii) un dominio urbano-arquitectónico centrado en la morfología y los procesos de densificación; y iv) un dominio climático-ambiental encargado de contextualizar las condiciones externas y los escenarios futuros de cambio climático

Resumen de capítulos

La presente investigación se estructura en cuatro capítulos que integran los fundamentos teóricos, el enfoque metodológico y los resultados derivados del análisis prospectivo de optimización morfológica en contextos de cambio climático:

Capítulo I. Expone el planteamiento del problema, la justificación y la pertinencia de la investigación, así como la pregunta de investigación, la hipótesis, los objetivos, el alcance y las limitaciones del estudio. En este capítulo se establecen los elementos conceptuales y contextuales que enmarcan la relevancia científica y social del trabajo.

Capítulo II. Desarrolla el marco teórico-referencial, en el cual se analizan los antecedentes, los fundamentos conceptuales, teóricos, metodológicos y normativos que sustentan la investigación. Se integran los ejes temáticos vinculados con la morfología urbano-arquitectónica, el desempeño térmico-energético, la isla de calor urbano, la pobreza energética, el diseño evolutivo y la optimización multiobjetivo.

Capítulo III. Describe la metodología del estudio, detallando el diseño de la investigación, el procedimiento analítico, las técnicas empleadas, así como los modelos y herramientas computacionales utilizados. El capítulo se estructura en ocho secciones: i) diseño de la investigación, donde se explica la selección del caso de estudio, las variables y los indicadores; ii) diseño del experimento, que presenta el procedimiento metodológico del experimento y los criterios de selección del área de estudio; iii) análisis espacial de la vulnerabilidad térmica-energética; iv) campaña de monitoreo; v) modelo paramétrico urbano-arquitectónico; vi) optimización multiobjetivo; vii) evaluación térmico-energética; y viii) evaluación del riesgo de pobreza energética. Esta estructura permite comprender de manera sistemática la lógica del modelo metodológico.

Capítulo IV. Presenta y discute los resultados obtenidos en relación con cada objetivo específico de la investigación. Incluye la evaluación comparativa de escenarios morfológicos, el análisis térmico-energético, la estimación del riesgo de pobreza energética y la integración de los hallazgos.

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.	Planteamiento de la investigación	7
1.1.	Panorama general	7
1.2.	Planteamiento del problema	9
1.3.	Justificación	12
1.4.	Pregunta de investigación	14
1.5.	Hipótesis	14
1.6.	Objetivos de la investigación.....	15
1.7.	Alcances y limitaciones	16

1. Planteamiento de la investigación

1.1. Panorama general

La urbanización global ha experimentado un crecimiento acelerado, con más del 64 % de la población mundial residiendo actualmente en áreas urbanas y una proyección del 68 % para 2050 (United Nations, 2018). Este proceso ha impulsado una expansión significativa de las superficies urbanas, sustituyendo áreas permeables por superficies impermeables que absorben y reemiten mayor radiación solar, intensificando la liberación de calor antropogénico y las emisiones de CO₂, factores determinantes en el cambio climático (Liu et al., 2023). Actualmente, los centros urbanos generan el 70 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), con un 28 % correspondiente a CO₂, y consumen más de dos tercios de la energía primaria mundial (United Nations, 2019).

Si las tendencias actuales persisten, se estima que la temperatura media global podría aumentar entre 0,3 y 4,8 °C para finales del siglo XXI, exacerbando el efecto ICU (IPCC, 2023a). Este fenómeno está directamente influenciado por la morfología urbana, que afecta el almacenamiento y la disipación térmica. Además, cada incremento de temperatura por encima de 24 °C puede elevar hasta un 4,6 % la demanda eléctrica para refrigeración, lo que sobrecarga las redes energéticas y provoca restricciones, cortes de suministro eléctrico, apagones y caídas de tensión (IEA, 2017). En respuesta a este panorama, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ha establecido como objetivo limitar el calentamiento global a 1,5 °C, promoviendo la eficiencia energética del sector de la construcción como estrategia clave para mitigar el cambio climático y reducir el consumo de energía (IPCC, 2023a).

El aumento en la frecuencia e intensidad de eventos de calor extremo también representa un riesgo creciente para la salud pública, afectando de manera diferenciada a la población de acuerdo con su nivel de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación (Szagri et al., 2023). La pobreza energética, que afecta a cerca de 200 millones de personas, aproximadamente el 15 % de la población mundial, agrava esta vulnerabilidad al limitar la capacidad de los hogares para mantener condiciones térmicas adecuadas (IEA, 2017). En este contexto, diversas investigaciones han demostrado que la configuración urbana y las propiedades térmicas de los materiales influyen significativamente en las condiciones microclimáticas, intensificando el

efecto ICU y afectando el confort térmico y la eficiencia energética (Chakraborty et al., 2020; Nagy et al., 2023).

Ante estos desafíos, se han desarrollado múltiples estrategias de mitigación clasificadas en tres grandes áreas: cobertura y uso del suelo, diseño urbano y planificación urbana (Gonzalez et al., 2021). La primera categoría incluye la implementación de parques urbanos, techos verdes y fríos, pavimentos con alta reflectancia y sistemas de infraestructura azul, los cuales reducen las temperaturas superficiales y modifican el microclima mediante la disminución de absorción solar y el incremento de la evapotranspiración (Santamouris & Yun, 2020). La segunda categoría se enfoca en estrategias basadas en la gestión de la radiación solar, el comportamiento de los fluidos y los sistemas hídricos urbanos, con el fin de mejorar las condiciones térmicas locales.

La tercera categoría, que constituye el enfoque principal de esta investigación, se centra en la planificación urbana y el diseño de la forma urbana, un componente crítico para el desarrollo sostenible de las ciudades y uno de los principales desafíos contemporáneos en arquitectura y urbanismo (Ciardiello et al., 2020a). La optimización de la forma urbana permite mejorar el desempeño ambiental y reducir el consumo energético. En este sentido, los modelos de optimización multiobjetivo (MOO) se han consolidado como herramientas esenciales para evaluar simultáneamente criterios como la eficiencia energética, el confort térmico y la reducción del sobrecalentamiento urbano (Harkouss et al., 2018). Estos modelos emplean algoritmos evolutivos que integran indicadores geométricos, energéticos y ambientales para generar configuraciones urbanas óptimas.

Diversos estudios han aplicado modelos MOO en el diseño urbano. Bahgat et al. (2020) optimizaron la geometría de cañones urbanos para reducir la radiación solar y mejorar la eficiencia energética. Abdollahzadeh y Biloría (2022) demostraron que la optimización de parámetros como la orientación, la relación de aspecto y la relación vano-macizo mejora el confort térmico exterior e interior. Liu et al. (2023) desarrollaron estrategias urbanas energéticamente eficientes mediante un marco de optimización de la forma urbana. Adicionalmente, investigaciones en Asia Oriental han propuesto modelos energéticos aplicados a la planificación urbana (Wang et al., 2021) y al diseño de edificios de oficinas en climas extremos (Xu et al., 2023).

La presente investigación se centra en la ciudad de Ensenada, Baja California, como caso representativo de ciudades costeras mediterráneas en desarrollo, donde la combinación de crecimiento urbano desordenado, expansión periférica y limitaciones normativas (PDUCPE 2024-2036, 2024) contribuye a la intensificación del sobrecalentamiento urbano y aumenta la vulnerabilidad de los hogares a la pobreza energética (Bouzarovski & Simcock, 2017; García & Graizbord, 2016; Middlemiss & Gillard, 2015). Esta problemática requiere un enfoque integrado que considere la interacción entre morfología urbana, desempeño térmico de los edificios y condiciones socioambientales, utilizando herramientas de diseño evolutivo y optimización multiobjetivo para la evaluación de escenarios urbanos prospectivos de redensificación urbana.

1.2. Planteamiento del problema

El incremento sostenido de las temperaturas a escala global, consecuencia del cambio climático, ha intensificado los desafíos térmicos y energéticos en las ciudades, amplificando los efectos negativos de la urbanización sobre el microclima urbano. En este contexto, la ICU y la pobreza energética se consolidan como fenómenos críticos en ciudades en crecimiento (Battista et al., 2019). Durante la última década (2014–2024), la Organización Meteorológica Mundial y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) han documentado los periodos más cálidos a escala global y nacional mediante análisis climatológicos. En el caso de México, el SMN reporta un incremento aproximado de 1,4 °C en la temperatura media anual, superando incluso el promedio global. Dicho incremento se sustenta en la perspectiva de la temperatura máxima promedio mensual esperada, derivada de productos climatológicos del SMN, como se muestra en la Figura 1 para los años 2020 y 2024 (SMN, 2021).

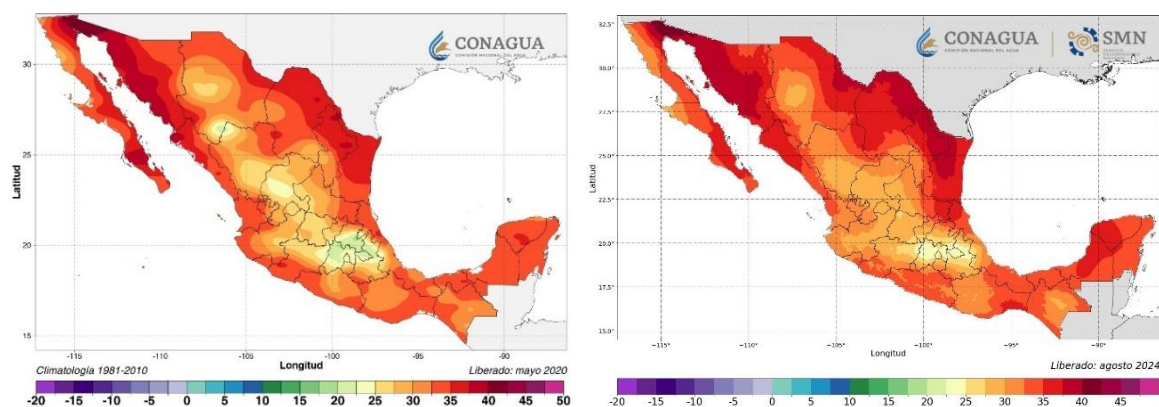
Este aumento térmico se ha traducido en un incremento de casos de estrés térmico, golpes de calor y mortalidad, particularmente en regiones del norte y sureste del país, según reportes de la Secretaría de Salud. En este marco, se estima que el 36,7 % de los hogares mexicanos vive en pobreza energética (García & Graizbord, 2016), condición que incrementa su vulnerabilidad frente a eventos de calor extremo.

En Ensenada, el crecimiento urbano ha estado marcado por una expansión horizontal, acelerada y desordenada, donde el ritmo de incremento de la superficie urbanizada ha superado ampliamente al crecimiento poblacional (Gobierno Municipal, 2020). Entre 2010 y 2020, la

superficie urbana del Centro de Población de Ensenada aumentó un 59 %, mientras que la población creció solo un 18 %, evidenciando un patrón de expansión territorial descontrolada y dispersa que ha generado insuficiencia de reservas de suelo para vivienda y mayor presión sobre áreas suburbanas y rurales (PDUCP 2024-2036).

Figura 1

Incremento de la temperatura máxima del mes de agosto (2020 y 2024)



Nota. Obtenido de la Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/pronostico-climatico/temperatura-form>. Acceso 2023-05-27.

En respuesta, el Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Ensenada (PDUCP 2024–2036) propone lineamientos para promover la densificación, gestionar eficientemente el suelo y fortalecer la adaptación al cambio climático. Sin embargo, su implementación enfrenta limitaciones derivadas de la dispersión urbana y de la vulnerabilidad socioambiental de los sectores periféricos, particularmente en la zona noreste de la ciudad, donde se concentra una proporción significativa de población en riesgo (PDUCP 2024, p. 33).

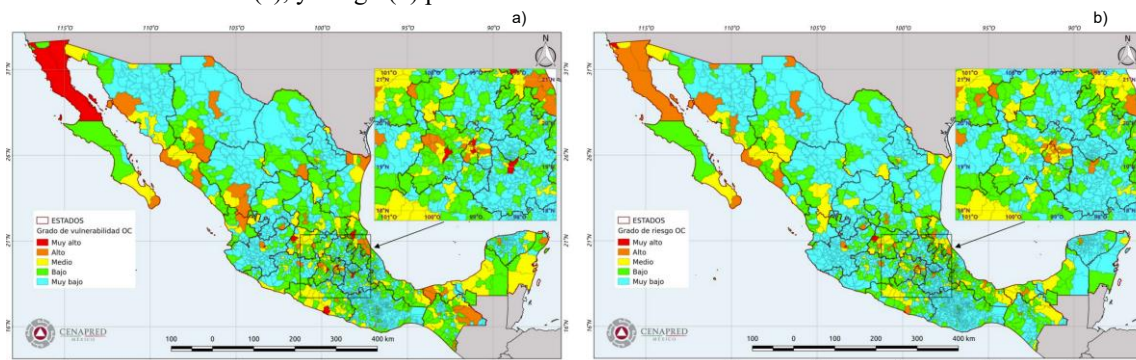
De forma paralela, el Programa Especial de Cambio Climático 2014–2018 (SEMARNAT, 2018) como el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California identifican al municipio como altamente vulnerable al cambio climático (Figura 2), con proyecciones de hasta +2,5 °C hacia mediados de siglo (COPLADE, 2017). Estas tendencias anticipan un incremento de las cargas térmicas y de la demanda energética residencial, situación especialmente crítica en áreas con viviendas de bajo desempeño térmico y con hogares de ingresos limitados (García & Graizbord, 2016).

Aunque las políticas recientes promueven la densificación como estrategia para contener la expansión urbana y mejorar la eficiencia del uso del suelo (SEDATU, 2021) persiste un

desafío central: la falta de herramientas que permitan evaluar de forma integrada cómo la configuración morfológica de nuevos escenarios densificados influye en el microclima local, el sobrecalentamiento urbano y la demanda energética residencial. Esta brecha entre investigación climática, diseño urbano y toma de decisiones limita la posibilidad de orientar modelos de densificación compatibles con la resiliencia térmica y energética.

Figura 2

Grado de vulnerabilidad (a), y riesgo (b) por olas de calor a escala nacional



Nota. Obtenido de “Mapas de riesgo por temperaturas máximas” por Arlette et al., 2018. Sistema Nacional de Protección Civil Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Ante ello, resulta necesario comprender cómo las configuraciones densificadas generadas mediante optimización evolutiva influyen en el desempeño térmico-energético y el riesgo de pobreza energética bajo escenarios climáticos presentes y futuros. La presente investigación analiza escenarios de densificación en un cañón urbano de Ensenada mediante técnicas algorítmicas de diseño evolutivo con el fin de evaluar de qué manera la morfología urbano-arquitectónica condiciona la demanda de enfriamiento y la vulnerabilidad energética en un contexto de progresivo calentamiento.

En síntesis, el problema central se estructura en torno a la necesidad de determinar cómo las configuraciones urbanas densificadas, optimizadas mediante técnicas evolutivas, influyen en el desempeño térmico-energético y, en consecuencia, en el riesgo de pobreza energética en ciudades mediterráneas semiáridas con sectores socioespacialmente vulnerables, como Ensenada.

1.3. Justificación

La intensificación del calor urbano constituye una problemática creciente en el contexto del cambio climático, dado que las proyecciones científicas anticipan aumentos sostenidos en la frecuencia, duración e intensidad de las olas de calor hacia mediados de siglo (IPCC, 2023a). Este fenómeno incrementa las cargas térmicas sobre las edificaciones y agrava la vulnerabilidad de los hogares con menores ingresos, cuyas limitadas capacidades de adaptación restringen su acceso a condiciones de confort térmico (Chakraborty et al., 2020; Nagy et al., 2023). Bajo este marco, el cambio climático opera como un determinante macroclimático que amplifica y modula los procesos locales de sobrecalentamiento urbano, afectando de manera diferenciada a las configuraciones morfológicas densificadas.

En paralelo, los avances en diseño evolutivo y optimización multiobjetivo, particularmente mediante algoritmos genéticos como el algoritmo genético de clasificación no dominada II (NSGA-II), permiten explorar amplios espacios de alternativas morfológicas y evaluar de forma simultánea criterios vinculados con la geometría edificatoria, el desempeño térmico-energético y las condiciones climáticas. Estas herramientas ofrecen un marco robusto para la toma de decisiones urbanas basadas en desempeño, al posibilitar la identificación de configuraciones que maximizan el comportamiento térmico y reducen la demanda energética (Liu, Xu, Zhang, et al., 2023).

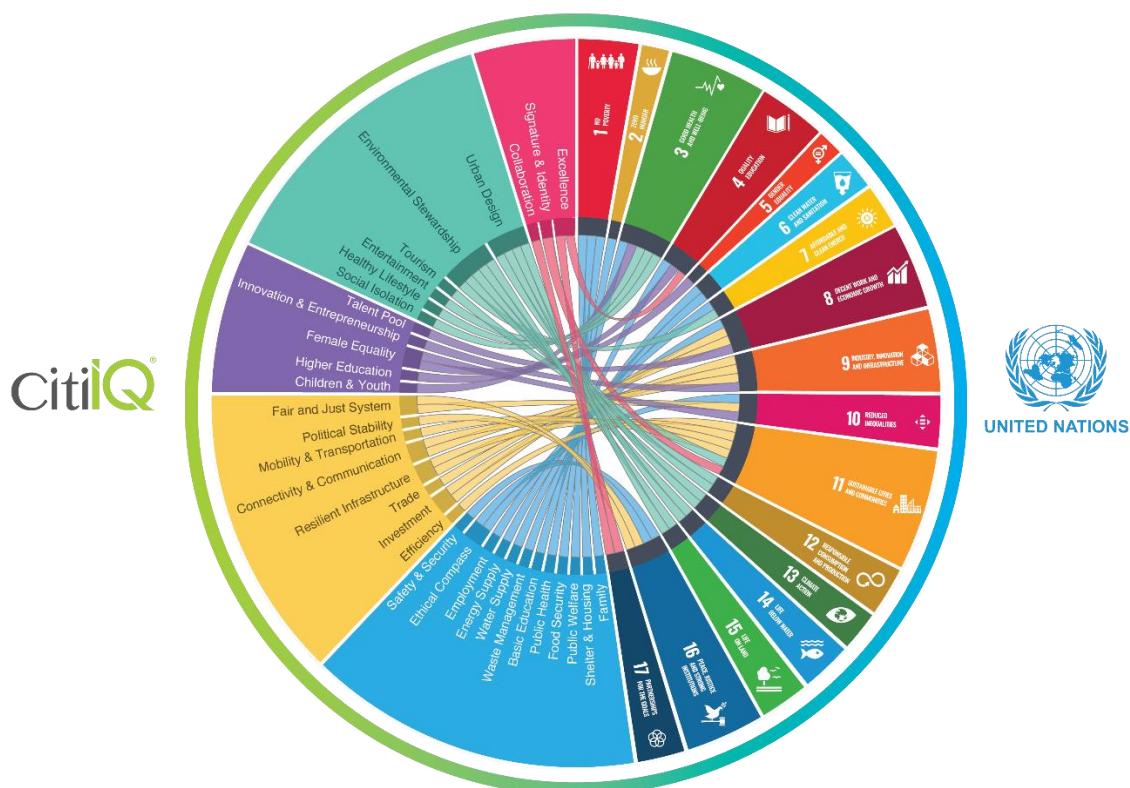
En este sentido, la presente investigación no busca demostrar la mitigación directa de la pobreza energética, sino aportar evidencia científica para evaluar prospectivamente cómo distintas configuraciones densificadas, optimizadas mediante técnicas evolutivas y normativa vigente, modifican la demanda energética por enfriamiento y calentamiento, así como el riesgo potencial de pobreza energética, tanto bajo condiciones climáticas actuales como en escenarios proyectados hacia 2050. Este enfoque permite evaluar los posibles impactos derivados de políticas de densificación contemporáneas, y aporta elementos para anticipar riesgos futuros asociados al aumento térmico proyectado por el cambio climático.

Asimismo, la investigación contribuye al avance de diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible: el ODS 3 (salud y bienestar), al evidenciar la relación entre calor extremo y vulnerabilidad térmica; el ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles), al promover criterios de densificación resiliente; y el ODS 13 (acción por el clima), al integrar escenarios climáticos

futuros en la evaluación de respuestas termoenérgicas. La Figura 3 muestra la correlación entre las estrategias de mitigación y los ODS (Naciones Unidas, 2019).

Figura 3

Correlación entre las estrategias de mitigación con respecto a los ODS



Nota. Obtenido a partir de <https://www.citiq.com/compatibility>. Acceso 21-11-2023

En conjunto, esta investigación establece un marco metodológico robusto y replicable que articula análisis multicriterio, monitoreo microclimático, modelación paramétrica, optimización evolutiva y simulación térmico-energética prospectiva, proporcionando bases científicas para la formulación de estrategias de densificación resiliente frente al cambio climático.

1.4. Pregunta de investigación

Pregunta de investigación principal

¿En qué medida y bajo qué condiciones las configuraciones de morfología urbano-arquitectónica generadas mediante optimización multiobjetivo influyen en el desempeño térmico-energético residencial y en el riesgo presente y futuro de pobreza energética en escenarios de densificación urbana bajo condiciones de cambio climático?

1.4.1. Preguntas de investigación secundarias

¿Cuál es la condición de vulnerabilidad térmica en la ciudad a nivel AGEB y cómo se relacionan los factores sociodemográficos, geoespaciales y ambientales en la configuración de los patrones de riesgo asociados al sobrecalentamiento urbano?

¿Cómo influyen las condiciones microclimáticas locales en el comportamiento térmico de los cañones urbanos de clima mediterráneo semiárido, y que variables ambientales resultan más determinantes en la modulación del microclima urbano?

¿Cómo puede optimizarse paramétricamente la morfología urbano-arquitectónica de un cañón urbano mediante un enfoque de optimización multiobjetivo, a partir de la variación de indicadores como la relación de superficie, la orientación de las huellas edificadas y el WWR, para explorar configuraciones densificadas con mejor desempeño energético?

¿Cómo inciden los indicadores de morfología urbano-arquitectónica optimizados mediante un modelo paramétrico en el desempeño térmico-energético de edificios multifamiliares y en el riesgo presente y futuro de pobreza energética de los escenarios óptimo y crítico, al incorporar proyecciones climáticas futuras hacia 2050 bajo el escenario de altas emisiones A2 del IPCC AR4?

1.5. Hipótesis

A partir de las preguntas de investigación planteadas, se formula la siguiente hipótesis de investigación: La influencia de la morfología urbano-arquitectónica optimizada sobre el desempeño térmico-energético residencial y el riesgo presente y futuro de pobreza energética en escenarios de densificación urbana varía en función de la interacción entre los indicadores

morfológicos, las condiciones climáticas y el contexto sociohabitacional, pudiendo manifestarse de forma diferenciada entre tipologías de vivienda con distinta capacidad de absorción económica frente a incrementos en los costos energéticos.

1.6. Objetivos de la investigación

1.6.1. Objetivo general

Evaluar prospectivamente escenarios de redensificación urbana generados mediante técnicas de optimización multiobjetivo de la morfología urbano-arquitectónica, con el fin de analizar su influencia en el desempeño térmico-energético residencial y en el riesgo presente y futuro de pobreza energética bajo condiciones de cambio climático.

1.6.2. Objetivos específicos

- Caracterizar y cartografiar la vulnerabilidad térmica en la ciudad de Ensenada a nivel AGEB mediante un análisis integral multicriterio que relacione información sociodemográfica, geoespacial y satelital, con el fin de identificar patrones espaciales de riesgo asociados al sobrecalentamiento urbano.
- Evaluar la influencia de las condiciones microclimáticas en cañones urbanos de clima mediterráneo mediante el monitoreo in situ de variables ambientales, con el propósito de caracterizar su comportamiento térmico.
- Desarrollar un modelo paramétrico que optimice los indicadores morfológicos urbano-arquitectónicos del cañón urbano mediante el algoritmo NSGA-II, ajustando la relación de superficie, la orientación de las huellas edificadas y el WWR conforme a las políticas de densificación urbana vigentes, con el fin de explorar configuraciones densificadas y analizar su desempeño energético a razón de sus cargas térmicas.
- Evaluar el desempeño térmico-energético prospectivo del escenario óptimo y crítico derivado de la optimización, utilizando proyecciones climáticas futuras en el escenario crítico de altas emisiones del IPCC (A2 AR4) para estimar cómo el cambio climático modifica las cargas de enfriamiento y el riesgo de pobreza energética para el año 2050.

1.7. Alcances y limitaciones

1.7.1. Alcance

El presente estudio establece un marco metodológico para la evaluación prospectiva de escenarios de redensificación urbana mediante técnicas algorítmicas de diseño evolutivo aplicadas a la morfología urbano-arquitectónica de un cañón urbano identificado como vulnerable al calor. Es importante precisar que el cañón urbano no constituye la unidad de análisis principal, sino que funciona como marco espacial, morfológico y microclimático dentro del cual se evalúa el comportamiento térmico-energético de edificaciones representativas. El alcance de la investigación se estructura en dos dimensiones principales: metodológica y prospectivo-temporal.

a) Alcance metodológico

La investigación se desarrolla a escala de cañón urbano con el propósito de reproducir un contexto realista de densificación, incorporando efectos de sombreado, obstrucción radiativa y geometría urbana que influyen directamente en el desempeño térmico de las edificaciones. En este contexto, se implementa un flujo paramétrico-computacional basado en el algoritmo evolutivo NSGA-II, operado en los entornos *Rhino-Grasshopper-Wallacei* y acoplado con simulaciones energéticas mediante *Ladybug* y *Honeybee*. El alcance metodológico comprende los siguientes elementos:

- Optimización multiobjetivo de la morfología urbano-arquitectónica, ajustando parámetros tales como la relación de aspecto del cañón, la relación de superficie edificada, la orientación de las huellas y la relación vano-macizo de las torres. Esta optimización se realiza exclusivamente bajo la normativa vigente de densificación urbana y utilizando condiciones climáticas actuales, sin incorporar escenarios normativos alternativos ni proyecciones climáticas futuras en esta fase, con el fin de evaluar el desempeño de configuraciones factibles dentro del marco regulatorio existente.
- Selección y simulación térmico-energética de dos torres representativas, las cuales constituyen la unidad de análisis edificatoria del estudio. Las torres seleccionadas

corresponden a configuraciones extremas derivadas de un análisis de sombras y exposición solar:

- una torre con tendencia predominante al sobrecalentamiento, asociada a mayores cargas de enfriamiento;
- y otra con tendencia al sobreenfriamiento, relacionada con mayores cargas de calentamiento.

Estas torres funcionan como casos representativos del comportamiento térmico-energético potencial de la edificación multifamiliar dentro del cañón urbano redensificado, mientras que el resto de las torres generadas operan como elementos contextuales de sombreado que configuran el entorno urbano, sin que se busque caracterizar de forma exhaustiva el comportamiento termoenergético del conjunto en su totalidad.

- Estimación del riesgo de pobreza energética presente y prospectivo, calculada a partir de la relación entre el gasto total de energía y el ingreso anual del hogar. El análisis emplea el esquema tarifario doméstico vigente en 2025, sin modelar variaciones futuras en los costos energéticos ni escenarios económicos alternativos, con el fin de aislar el efecto combinado de la morfología y el cambio climático.

b) Alcance temporal y prospectivo

Una vez identificados el escenario óptimo y el escenario crítico a partir del proceso de optimización desarrollado bajo condiciones climáticas actuales y conforme a la normativa urbana vigente, no se ejecuta una nueva optimización bajo escenarios futuros. En su lugar, la evaluación prospectiva se realiza mediante un análisis térmico-energético hacia 2050, incorporando proyecciones climáticas correspondientes al escenario de altas emisiones A2 del IPCC-AR4, aplicadas exclusivamente a las dos torres representativas previamente seleccionadas.

Este enfoque metodológico responde a un objetivo específico del estudio: analizar el comportamiento futuro de configuraciones morfológicas factibles en el presente, generadas bajo políticas y regulaciones urbanas actualmente vigentes, frente a condiciones climáticas proyectadas, en lugar de diseñar soluciones hipotéticas sustentadas en marcos normativos aún no implementados. De esta manera, la investigación busca anticipar y poner en evidencia los

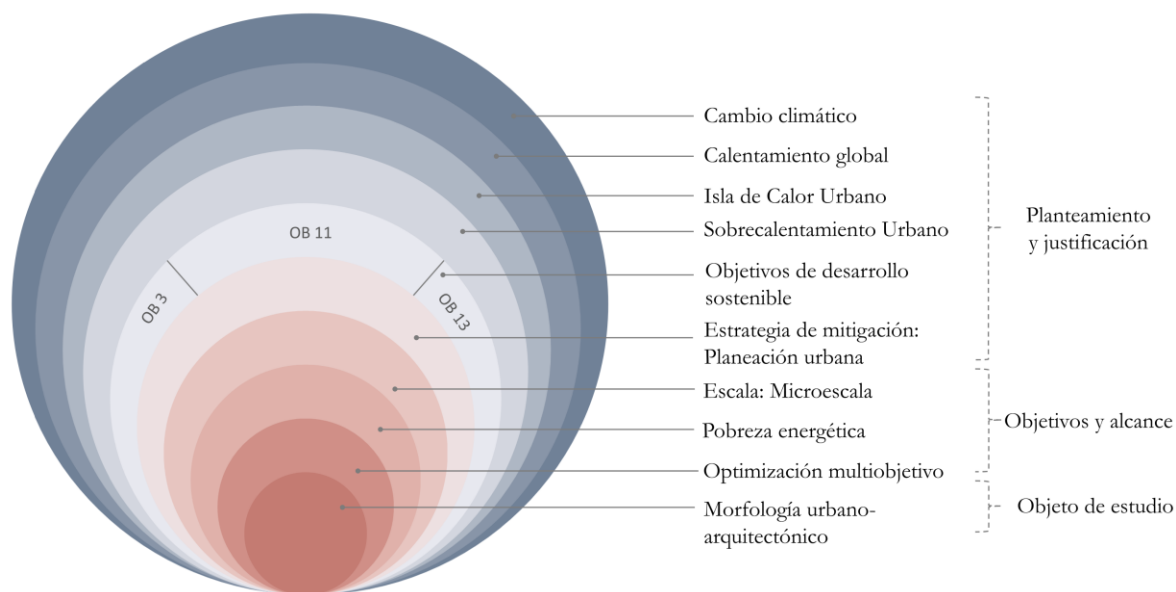
riesgos asociados a la continuidad de los modelos de densificación actuales, particularmente en términos de incremento de la demanda de enfriamiento y del riesgo de pobreza energética hacia 2050.

Desde esta perspectiva, los escenarios prospectivos no tienen como finalidad la mitigación directa de la pobreza energética, sino la estimación de la probabilidad de que la población densificada enfrente condiciones de pobreza energética en el futuro, como resultado de la interacción entre: i) la normativa de densificación vigente; ii) las morfologías urbano-arquitectónicas optimizadas bajo clima presente; y iii) el incremento térmico proyectado por el cambio climático. El estudio no incorpora escenarios alternativos de regulación urbana ni políticas futuras de eficiencia energética, con el propósito de que los resultados obtenidos puedan ser interpretados de manera directa como evidencia técnica para apoyar la toma de decisiones por parte de las autoridades urbanas y energéticas.

Finalmente, la investigación se sitúa dentro de la problemática más amplia del cambio climático y el sobrecalentamiento urbano, abordada desde una perspectiva de microescala morfológica mediante simulación paramétrica y diseño evolutivo. La Figura 4 sintetiza este enfoque mediante un diagrama tipo cebolla, el cual articula la relación entre: i) la problemática global del calentamiento urbano; ii) la pobreza energética; y iii) la optimización generativa de la forma urbano-arquitectónica como herramienta para la planificación de escenarios futuros.

Figura 4

Perspectiva deductiva del objeto de estudio en relación con el planteamiento del problema



1.7.2. Limitaciones

A pesar de su enfoque integral y del empleo de metodologías de optimización generativa y evaluación termoenergética, la siguiente investigación presenta un conjunto de limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los resultados y a su aplicabilidad en otros contextos.

i. Dependencia de datos secundarios y resolución espacial

La estimación de vulnerabilidad térmica se apoya en información procedente de fuentes oficiales, particularmente la Comisión Federal de Electricidad (CFE) e INEGI. La disponibilidad, periodicidad y resolución espacial de estos datos condicionan la precisión del diagnóstico.

ii. Restricciones computacionales asociadas al proceso de optimización

La implementación del algoritmo genético NSGA-II para la generación de escenarios morfológicos implica una elevada demanda computacional, particularmente al incrementar el número de generaciones, el tamaño de la población o la complejidad geométrica de las edificaciones simuladas. Estas limitaciones obligaron a simplificar ciertos componentes del modelo urbano-arquitectónico y a restringir el número total de configuraciones evaluadas. En consecuencia, el espacio de diseño explorado, si bien robusto, no representa la totalidad de combinaciones posibles.

iii. Alcance contextual y transferibilidad de los resultados

Las simulaciones y modelos desarrollados están diseñados específicamente para el contexto de Ensenada, Baja California, bajo un clima mediterráneo semiárido y condiciones locales de vulnerabilidad térmica. Por lo tanto, la extrapolación directa a otras ciudades requiere una adaptación cuidadosa de parámetros climáticos, geomorfológicos, socioenergéticos y normativos. La replicabilidad metodológica es alta; sin embargo, la comparabilidad directa de los resultados es limitada.

iv. Suposición de normativa urbana estática y costos energéticos constantes

El análisis prospectivo se basa en la normativa vigente de densificación urbana, asumiendo que los coeficientes de ocupación del suelo, las regulaciones volumétricas y los lineamientos constructivos permanecerán constantes hacia el año 2050. De manera

similar, la estimación del riesgo de pobreza energética se realiza empleando el esquema tarifario y los costos de la energía vigentes, sin incorporar proyecciones futuras del precio de la energía. Si bien existe evidencia de que las tendencias en el costo energético son crecientes, su modelación prospectiva implica una complejidad adicional asociada a variables económicas, políticas y regulatorias que exceden el alcance del presente estudio. Cabe señalar que la inclusión de escenarios de incremento en el precio de la energía probablemente acentuaría aún más la magnitud de los resultados obtenidos, incrementando el riesgo estimado de pobreza energética. En este sentido, la incorporación explícita de proyecciones tarifarias y económicas se plantea como una línea prioritaria de investigación futura y como un complemento natural del marco metodológico aquí propuesto.

A pesar de estas limitaciones, la investigación establece una base metodológica rigurosa para la integración de optimización multiobjetivo, modelación térmico-energética y análisis de vulnerabilidad urbana. Asimismo, aporta un marco replicable para estudios futuros sobre la relación entre densificación urbana, cambio climático y riesgo de pobreza energética en ciudades de contextos similares.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

2.1.	Antecedentes.....	22
2.2.	Marco Conceptual.....	27
2.3.	Marco teórico.....	33
2.4.	Estado del arte	54
2.5.	Marco normativo	68
2.6.	Dominios de conocimiento integrados	73

2.1. Antecedentes

2.1.1. Estudios precursores de la isla de calor urbana

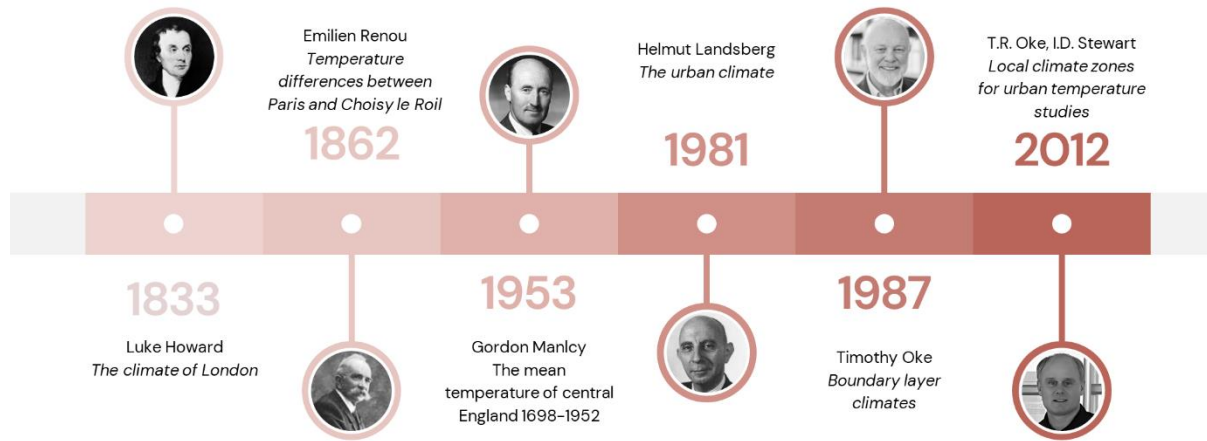
Las primeras observaciones sobre variaciones térmicas en entornos urbanos se atribuyen a Luke Howard, farmacéutico y meteorólogo inglés. En su obra *The Climate of London (1833)*, Howard identificó diferencias de temperatura entre el entorno urbano de Londres y sus áreas circundantes, particularmente durante la noche y el día. Sus registros indicaron un incremento térmico de 1.579 °F, fenómeno que atribuyó al uso generalizado del carbón como fuente de energía en los sectores doméstico e industrial (Howard, 1833).

Sin embargo, no fue hasta 1958 que Gordon Manley formalizó este fenómeno bajo la denominación de Isla de Calor Urbano (ICU). Posteriormente, diversas investigaciones evidenciaron que la morfología urbana desempeña un papel determinante en la configuración del microclima y la intensidad de la ICU. En este contexto, Landsberg definió la ICU como “un reflejo de los cambios microclimáticos totales provocados por las alteraciones de las superficies urbanas” (Landsberg, 1981, p. 275).

En 1987, Oke refinó esta conceptualización en su obra *Boundary Layer Climates*, describiendo la ICU como la diferencia en las condiciones climáticas entre los centros urbanos y sus áreas rurales circundantes. A través de estudios exhaustivos, Oke analizó las causas físicas subyacentes a la formación de la ICU, estableciendo correlaciones con factores como la densidad poblacional, las condiciones climáticas locales, la geometría de los cañones urbanos y las propiedades térmicas de los materiales superficiales (Oke, 1987).

A partir de estos hallazgos, múltiples investigadores han ampliado el campo de estudio, desarrollando modelos, metodologías y técnicas para evaluar y mitigar los efectos de la ICU. La Figura 5 presenta una síntesis temporal de los principales autores y sus contribuciones al estudio de la isla de calor urbano, identificados a partir de una revisión exhaustiva de la literatura científica.

Figura 5
Precursores en el estudio de la isla de calor urbana



Nota. Elaborado a partir de la revisión de la literatura

2.1.2. Introducción a los modelos de optimización multiobjetivo

Un enfoque prometedor para abordar los desafíos contemporáneos asociados al diseño urbano y arquitectónico ha sido el desarrollo y la aplicación de modelos de optimización multiobjetivo mediante algoritmos genéticos (AG), debido a su capacidad para explorar amplios y complejos espacios de soluciones y gestionar simultáneamente múltiples criterios de desempeño (Schwartz et al., 2016). Estos algoritmos de búsqueda estocástica forman parte del conjunto de algoritmos evolutivos introducidos por primera vez por John Holland en la década de 1960, en el marco de sus investigaciones sobre sistemas adaptativos y procesos de selección natural (Holland, 1992).

No obstante, fue hasta la década de 1980 cuando se desarrollaron los primeros algoritmos evolutivos multiobjetivo (MOEA), a partir del trabajo de David Schaffer, quien incorporó la optimización basada en la dominancia de Pareto como estrategia de selección dentro de los algoritmos evolutivos. Este enfoque permitió mejorar de manera progresiva la calidad de las soluciones en función de múltiples criterios en conflicto, descartando aquellas alternativas menos favorables mediante procesos análogos a la selección natural (Deb et al., 2000).

Los algoritmos genéticos se fundamentan en los principios de la teoría darwiniana, que enfatiza la selección natural como el mecanismo que impulsa la evolución de las especies. En

términos computacionales, estos algoritmos están diseñados para simular los procesos de evolución biológica y reproducción genética mediante la implementación de mecanismos como el cruce, la mutación y la selección de parámetros dentro de una población de soluciones candidatas a un problema específico (Holland & Goldberg, 1988; Katoch et al., 2021). Cada solución se denomina individuo y se representa mediante un cromosoma, el cual está compuesto por un conjunto de parámetros (genes) que codifican una solución potencial. La forma en que se estructuran estos cromosomas influye de manera significativa en el rendimiento del algoritmo y en su capacidad para explorar el espacio de búsqueda.

Las soluciones generadas a lo largo del proceso evolutivo se someten a variaciones y posteriormente se evalúan mediante un mecanismo de selección que favorece aquellas con mejor desempeño. En este contexto, la supervivencia de una solución se determina a partir de una función de aptitud, la cual valora su idoneidad dentro del espacio de soluciones posibles (Holland, 1992).

A lo largo de las últimas décadas, los algoritmos genéticos han demostrado ser herramientas versátiles para la resolución de problemas complejos de optimización en diversos ámbitos. En el campo de la informática, han sido empleados con éxito en la optimización de programación y planificación de tareas (Mohammed et al., 2017). En ingeniería, se han aplicado en la optimización estructural, permitiendo la reducción del peso de elementos constructivos sin comprometer la integridad estructural ni los límites de tensión admisibles (Shopova & Vaklieva, 2006). Asimismo, en el ámbito de la logística y la gestión de la cadena de suministro, estos algoritmos han sido utilizados para optimizar la asignación de recursos en problemas de asignación generalizada, logrando reducciones significativas en los costos de transporte y mejoras en la eficiencia operativa (Dörterler et al., 2017).

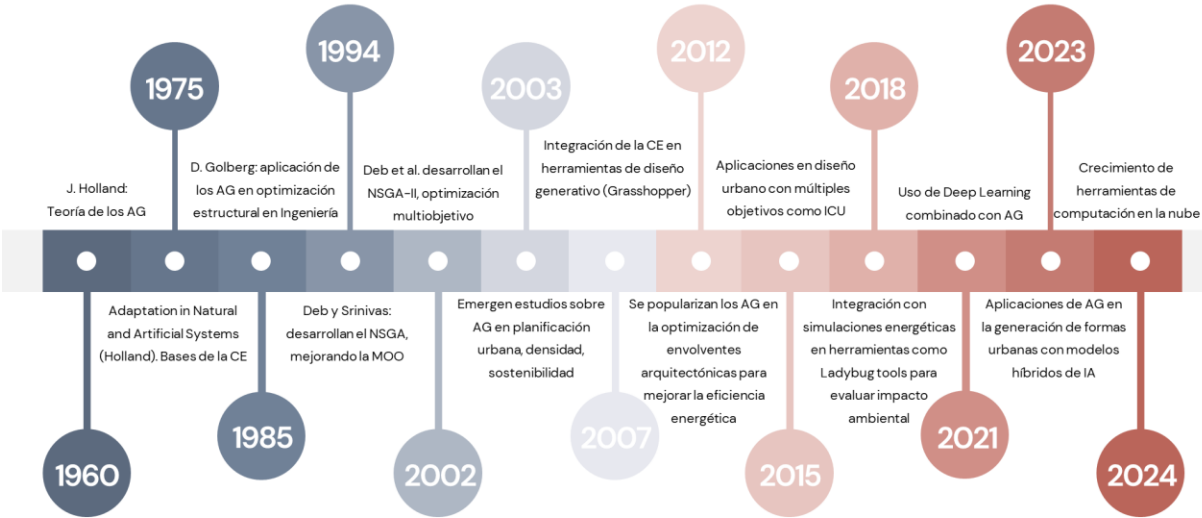
En el campo de la arquitectura y el urbanismo, los algoritmos genéticos han adquirido una relevancia creciente debido a su capacidad para abordar problemas de optimización multiobjetivo en los que es necesario considerar simultáneamente objetivos en conflicto, como el impacto ambiental, la eficiencia energética, el confort térmico y los costos asociados al diseño (Showkatbakhsh & Makki, 2022). En años recientes, se ha avanzado de manera significativa en la integración de estos algoritmos con datos en tiempo real, análisis predictivos y modelos de

optimización basados en la nube, consolidando enfoques más holísticos y adaptables para el diseño urbano contemporáneo (Li et al., 2020).

En comparación con enfoques convencionales de optimización determinista, los modelos basados en algoritmos genéticos ofrecen una mayor flexibilidad al permitir la evaluación simultánea de múltiples variables de diseño y la generación de conjuntos de soluciones alternativas, en lugar de una única solución óptima (Evola et al., 2020).

La Figura 6 se muestra una línea de tiempo de los modelos de optimización multiobjetivo con algoritmos genéticos aplicados en el diseño de formas urbanas identificados a partir de una revisión exhaustiva de la literatura científica.

Figura 6
Línea del tiempo de los modelos MOO con algoritmos genéticos



Nota. Elaborado a partir de la revisión de la literatura

La Tabla 1 presenta una síntesis de estudios significativos sobre optimización multiobjetivo en distintas escalas de análisis. La estructura de la tabla se compone de cuatro apartados: en la primera columna se detallan el autor, el año y la ubicación de la investigación; la segunda y tercera columna incluye las palabras clave y la escala del objeto de estudio; y en la última columna se exponen los principales hallazgos y resultados obtenidos en cada investigación.

Tabla 1

Recomendaciones y hallazgos de investigaciones en estudios de optimización multiobjetivo

Autor/Ciudad	Palabras clave	Escala	Hallazgos y recomendaciones
Lau et al., (2014) Europa	ICU; Relación H/W; Morfología urbana; Radiación solar	Distrito	Demostraron la influencia de la morfología urbana con respecto a la exposición de la radiación solar.
Hu et al., (2016) China	ICU; SVF; Morfología urbana; Diseño paramétrico	Distrito	Implementaron un modelo paramétrico para mitigar la ICU al optimizar el factor de cielo visibles (SVF).
Chokhachian et al., (2017) Génova, Italia	ICU; Morfología urbana; Estrategias de mitigación	Cañón urbano	Observaron que existe una relación significativa entre los parámetros climáticos y la intensidad de la ICU.
Sosa et al. (2017) Mendoza, Argentina	Morfología urbana; Habitabilidad térmica ICU; Microclima	Distrito	Analizó la influencia entre la morfología urbana en el microclima con el fin de determinar el nivel de confort térmico en zonas de baja densidad en una ciudad con clima árido
Vuckovic et al., (2019) Viena, Australia	Densificación urbana; Confort térmico; ICU	Distrito	Demostraron que las técnicas de densificación urbana suelen ser efectivas para reducir la temperatura del aire y mejorar las condiciones de confort.
Hamdan y Oliveira (2019) Emiratos Árabes Unidos	Cañón urbano; UTCI ICU; Modelo paramétrico	Cañón urbano	Encontraron que las superficies sombreadas por medio de vegetación reducen en 5 °C el índice de confort térmico universal.
Evola et al., (2020) Italia	Temperatura media radiante; Índice universal de confort térmico; Confort exterior; Isla de calor urbana; Modelado urbano; Grasshopper tools	Cañón urbano	En comparación con otros enfoques existentes, la metodología empleada (diseño evolutivo) ofrece una mayor flexibilidad, lo que permite estudios paramétricos del impacto de diferentes soluciones de diseño en ambientes interiores y exteriores.
<i>Nota.</i> Elaborado a partir de la revisión de literatura			

2.2. Marco Conceptual

El presente capítulo establece los fundamentos teóricos que sustentan la investigación, mediante la revisión y articulación de conceptos clave vinculados al fenómeno de la pobreza energética y los enfoques basados en diseño evolutivo aplicados en contextos urbanos. Estos dos ejes conceptuales convergen en esta investigación como componentes esenciales para comprender y optimizar la relación entre forma urbana y el consumo energético en contextos de cambio climático

En primer lugar, se aborda la pobreza energética como una problemática multidimensional que trasciende la simple carencia de recursos energéticos, incorporando aspectos de desigualdad, habitabilidad y justicia ambiental. Se presentan sus principales definiciones, metodologías de medición y criterios de evaluación relevantes para el contexto urbano mexicano.

Posteriormente, se exploran los fundamentos del diseño evolutivo como enfoque computacional aplicado a la optimización de problemas de diseño complejos, particularmente en contextos multiobjetivo, como los que se abordan en esta investigación. El marco conceptual expuesto permite comprender los principios fundamentales que rigen este tipo de algoritmos, tales como el concepto de población, generaciones, individuos, y los mecanismos de cruce, mutación y selección. Estos elementos operan de forma análoga a los procesos evolutivos naturales, permitiendo generar y refinar soluciones de diseño mediante ciclos iterativos de evaluación y mejora. Esta perspectiva es esencial para entender la lógica que subyace a los modelos de optimización aplicados en el desarrollo de formas urbanas eficientes desde el punto de vista ambiental y energético.

2.2.1. Pobreza energética

La pobreza energética es una condición multidimensional que se refiere a la incapacidad de un hogar para acceder a servicios energéticos adecuados para satisfacer sus necesidades básicas de bienestar térmico, iluminación, refrigeración de alimentos y otros usos esenciales. Este fenómeno no solo refleja una carencia de recursos económicos, sino también limitaciones estructurales relacionadas con la eficiencia energética de la vivienda, el acceso a infraestructura energética y las condiciones climáticas (Bouzarovski & Petrova, 2015).

En el ámbito del desarrollo global, el acceso a la energía desempeña un papel fundamental para abordar retos vinculados al cambio climático, la salud, la educación y, particularmente, la pobreza energética. En los países en desarrollo, este fenómeno adquiere una dimensión crítica, ya que la energía resulta esencial para hacer frente a eventos climáticos extremos, como las olas de calor, y para mejorar la calidad de vida de las poblaciones más vulnerables (Santamouris, 2019). Diversos estudios sugieren que existe una relación entre el acceso al aire acondicionado, los niveles de ingreso y la reducción de la mortalidad asociada a las olas de calor (Díaz et al., 2018).

Históricamente, la línea de investigación sobre pobreza energética se ha desarrollado principalmente en Reino Unido, en respuesta a la crisis del petróleo de 1973. No obstante, en las últimas décadas, regiones como América Latina y Asia han comenzado a generar propuestas propias para mitigar este fenómeno (García y Graizbord 2016). En este contexto, se han propuesto diversos enfoques e indicadores para medir la PE, con el fin de capturar su complejidad y adaptar las estrategias de intervención a contextos específicos.

Uno de los enfoques más influyentes es el denominado *Low Income–High Costs* (LIHC), propuesto originalmente por Boardman (1991) y posteriormente adaptado por Hills (2012) para el contexto británico. Este enfoque ha servido de base para su aplicación en varios países del Sur Global, particularmente América Latina, África y Asia. No obstante, debido a la escasez de información desagregada sobre ingresos y costos energéticos en muchos países de América Latina, se ha optado por metodologías indirectas, basadas en umbrales de gasto energético.

Una de las aproximaciones más comunes consiste en identificar a los hogares cuyo gasto energético supera un determinado porcentaje del ingreso total disponible. El umbral más utilizado es del 10%, lo que implica que un hogar se considera en situación de pobreza energética si destina más del 10% de sus ingresos al pago de servicios energéticos (Boardman, 1991). Este criterio, si bien sencillo, no considera las diferencias en necesidades energéticas según el clima, el tamaño del hogar o la eficiencia de la vivienda. Este indicador se calcula mediante la siguiente expresión:

$$PE = \frac{GE_i}{I_i} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

- PE: condición de pobreza energética del hogar
- Ge_i : gasto energético anual del hogar (costo eléctrico y gas)
- I_i : ingreso anual total del hogar

Por su parte, Barnes (2018) identifica cuatro enfoques principales para la medición de la pobreza energética:

- i. Necesidades físicas mínimas: se basa en estimar la cantidad mínima de energía requerida para satisfacer necesidades básicas como cocinar e iluminar. Sin embargo, su aplicación es limitada debido a las diferencias significativas entre países y hogares.
- ii. Tipo y cantidad de energía utilizada por hogares en situación de pobreza: este enfoque establece un umbral de consumo o acceso energético específico, por debajo del cual los hogares se consideran en pobreza energética (Hernández 2016, p. 2).
- iii. Proporción del ingreso destinada a energía: considera que los hogares que destinan más del 10% de sus ingresos a energía se encuentran en situación de PE, siguiendo el criterio ya mencionado.
- iv. Relación entre ingreso y consumo energético mínimo: se centra en identificar el punto de ingreso por debajo del cual los hogares no pueden aumentar su consumo energético, aunque este sea insuficiente, lo que refleja una privación energética estructural (Hernández 2016, p. 2).

En años recientes, se ha propuesto un enfoque más integral a través del Índice de Pobreza Energética Multidimensional (MEPI), desarrollado por Nussbaumer et al. (2012). Este índice permite medir tanto la intensidad como la incidencia de la PE, considerando múltiples dimensiones del acceso energético. El MEPI ha sido aplicado en diversas regiones, incluyendo África, Filipinas, Ecuador y, recientemente, en siete países latinoamericanos, entre ellos México. Este índice considera cinco dimensiones fundamentales, descritas en la Tabla 2 del presente documento, y constituye una herramienta valiosa para comprender la naturaleza compleja de la pobreza energética en contextos diversos.

Tabla 2
Indicadores de vulnerabilidad energética

Dimensión	Indicador	Variable
Cocina	Combustible moderno para cocinar	Tipo de combustible para cocinar
Electricidad	Acceso a electricidad	Cuenta con acceso a electricidad
Electrodomésticos	Electrodomésticos	Cuenta con refrigerador
Entretenimiento / Educación	Dispositivos de entretenimiento	Cuenta con radio o televisión
Comunicación	Medios de telecomunicaciones	Cuenta con celular o línea telefónica

Nota: Elaborado a partir de “Measuring energy poverty : Focusing on what matters”, por Nussbaumer, P., Bazilian, M., & Modi, V. (2012). Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1), 231–243.

En el marco de la presente investigación, el concepto de pobreza energética se aborda desde una perspectiva integrada que articula el desempeño termo-energético de las edificaciones con la configuración morfológica del entorno urbano. A partir de la simulación energética de escenarios morfológicos densificados, se evalúa cómo las variables urbano-arquitectónicas inciden en la demanda energética por acondicionamiento térmico y, en consecuencia, en la carga económica que dicha demanda representa para los hogares. De este modo, la pobreza energética se analiza como un resultado emergente de la interacción entre forma urbana, eficiencia térmica y condiciones climáticas, tanto bajo escenarios actuales como prospectivos de cambio climático, permitiendo identificar configuraciones urbanas que, aun cumpliendo criterios de densificación, pueden incrementar o mitigar el riesgo socioenergético en contextos urbanos vulnerables.

2.2.2. Terminología asociada al diseño evolutivo

En el marco de esta investigación, el proceso de optimización multiobjetivo basado en diseño evolutivo utiliza una serie de conceptos fundamentales que permiten comprender la lógica general mediante la cual se generan, evalúan y seleccionan configuraciones urbano-arquitectónicas. La definición de esta terminología resulta esencial para interpretar adecuadamente el funcionamiento de los modelos evolutivos empleados y los resultados derivados de su aplicación.

En primer lugar, cada *individuo* corresponde a una configuración específica del cañón urbano generada por el algoritmo evolutivo. Dicho individuo se define a partir de un *genotipo*, entendido como el conjunto de variables de decisión (como la altura de las edificaciones, la orientación de la huella y la relación vano–macizo), y de un *fenotipo*, que representa la

manifestación geométrica y espacial de dichas variables en el modelo tridimensional. El conjunto de individuos evaluados en un mismo ciclo conforma una *población*, la cual agrupa las alternativas de diseño consideradas en una iteración determinada del proceso evolutivo. Cada uno de estos ciclos se denomina *generación*, y su sucesión permite al algoritmo explorar progresivamente un amplio espectro de configuraciones posibles dentro del espacio de búsqueda (Makki et al., 2015).

Dentro del genotipo, cada variable de decisión opera como un *gen*, cuya manipulación mediante operadores evolutivos posibilita la exploración eficiente de soluciones. Entre estos operadores destacan el *cruce*, que intercambia genes entre dos individuos para generar descendientes con combinaciones de características morfológicas, y la *mutación*, que introduce variaciones aleatorias con el objetivo de incrementar la diversidad poblacional y evitar la convergencia prematura hacia soluciones subóptimas. La intensidad con la que actúan estos operadores se controla mediante la *probabilidad de cruce* y la *probabilidad de mutación*, parámetros que regulan, respectivamente, la frecuencia de recombinación de los genotipos y la magnitud de las variaciones introducidas. Asimismo, el *índice de distribución* asociado a estos operadores determina el grado de similitud o divergencia de los descendientes respecto a sus progenitores, influyendo directamente en la exploración del espacio morfológico (Makki et al., 2015).

El resultado central de un proceso de optimización multiobjetivo es el *frente de Pareto*, el cual agrupa las soluciones *no dominadas*, es decir, aquellas configuraciones para las cuales la mejora de un objetivo, por ejemplo, la reducción del consumo energético por enfriamiento no es posible sin comprometer el desempeño de otro objetivo, como la relación de aspecto o la relación de superficie construida (Deb, 2001). Este frente sintetiza los compromisos existentes entre densificación urbana, desempeño térmico-energético y calidad ambiental, y constituye una base conceptual para el análisis comparativo de las soluciones generadas.

Finalmente, la *semilla aleatoria* empleada en cada ejecución del algoritmo define el estado inicial del proceso evolutivo y permite asegurar la *reproducibilidad del experimento*, posibilitando la replicación exacta de los resultados bajo las mismas condiciones iniciales. En la Tabla 3 se presenta una síntesis de los principales términos empleados en los modelos de diseño evolutivo considerados en esta investigación

Tabla 3
Terminología asociada al diseño evolutivo

Término	Descripción
Individuo	Una unidad generada por la simulación evolutiva, representada por un genotipo y un fenotipo que comprende la población.
Generación	Número de interacciones por ejecución de la simulación.
Población	Todos los individuos generados por la simulación evolutiva a lo largo de todas las generaciones.
Gen	Cada variable de decisión del modelo. Cada gen controla cómo se modifica una característica morfológica del cañón urbano.
Genotipo	Conjunto de genes que define una configuración específica. En el estudio representa la estructura paramétrica que determina la forma urbano-arquitectónica del escenario evaluado.
Fenotipo	Manifestación geométrica del genotipo en el modelo tridimensional.
Objetivos de aptitud	Criterios que orientan la selección evolutiva.
Valor de aptitud	Medida cuantitativa que refleja el desempeño de cada individuo con base a la optimización.
Rango de aptitud	Permite ordenar jerárquicamente las configuraciones en función de su desempeño integral.
Mutación	Modificación aleatoria en uno o más genes del individuo. Introduce diversidad morfológica.
Cruce	Intercambio de genes entre dos configuraciones. Permite combinar características morfológicas de distintas soluciones, generando nuevas alternativas urbanas.
Probabilidad de cruce	Porcentaje de soluciones en la generación que se reproducirá para la siguiente generación; es decir, el número de veces que se produce un cruce de cromosomas en una generación, o bien, la posibilidad de que dos cromosomas intercambien algunas de sus partes. Una tasa del cruce del 100 % significa que todos los descendientes se generan por cruce.
Probabilidad de mutación	El porcentaje de mutaciones que toma lugar en la generación (Deb et. al. recomienda que la probabilidad de mutación sea $1/n$, donde n es el número de variables en el diseño del problema. De tal manera que el valor predeterminado es $1/n$).
Índice de distribución de cruce e índice de distribución de mutación	Un valor de índice de distribución grande da una mayor probabilidad de generar descendientes cercanos a las soluciones parentales, mientras que un valor de índice de distribución pequeño permite seleccionar soluciones distantes como soluciones secundarias.
Semilla aleatoria	Valor inicial que determina la secuencia de reproducción, selección y recombinación. Permite reproducir los escenarios de optimización bajo las mismas condiciones, garantizando trazabilidad metodológica.
Frente de Pareto	Conjunto de soluciones no dominadas que presentan el mejor equilibrio entre múltiples objetivos.

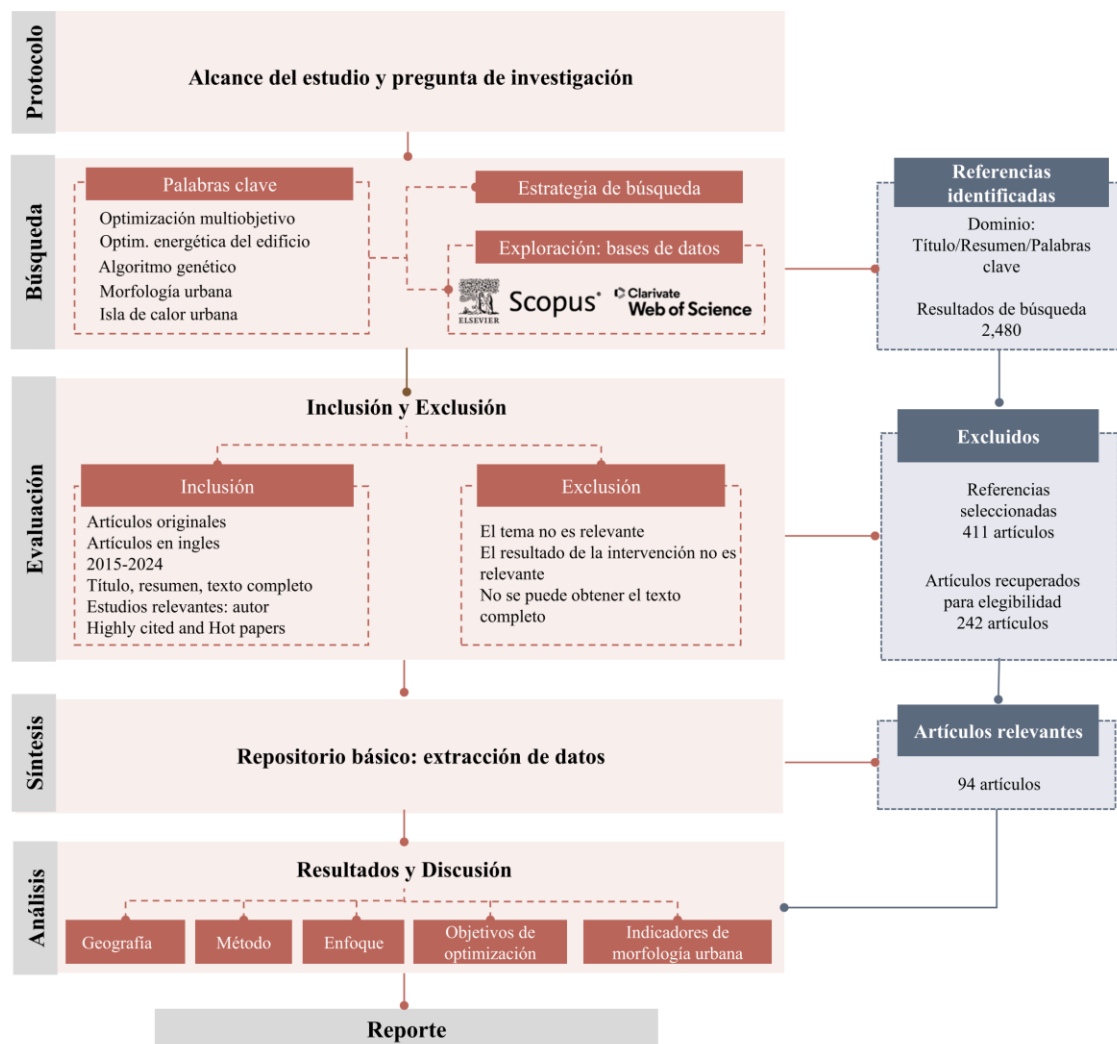
2.3. Marco teórico

La revisión de la literatura se realizó siguiendo las pautas establecidas por el marco de Protocolo, Búsqueda, Evaluación, Síntesis, Análisis e Informe (PSALSAR, por sus siglas en inglés) (Mengist et al., 2020), para garantizar un alto nivel de confiabilidad, precisión metodológica, exhaustividad, sistematización y reproducibilidad, al tiempo que se minimiza el sesgo. Este enfoque metodológico es ampliamente adoptado en la comunidad científica para mitigar los riesgos asociados con el sesgo de publicación en varias disciplinas. La metodología facilitó la evaluación del cuerpo de conocimiento existente, la identificación de tendencias de investigación y la detección de brechas en el campo de la optimización de la forma urbana. Para este propósito, se utilizó el método de “snowballing” (Wohlin et al., 2022) para ampliar el conjunto de publicaciones relevantes relacionadas con el tema. Este método implica explorar las referencias contenidas en las citas de publicaciones previamente seleccionadas y usar una herramienta visual para explorar los artículos pertinentes según el número de citas recibidas.

La estrategia de búsqueda, los criterios de selección, la recopilación de datos y el análisis exhaustivo se llevaron a cabo utilizando dos bases de datos de renombre internacional para la obtención de información científica bibliográfica: *Scopus* y *Web of Science (WOS)*. Se empleó una combinación de palabras clave específicas, incluyendo “optimización multiobjetivo”, “optimización energética del edificio”, “algoritmo genético” y “morfología urbana” para realizar la búsqueda. Este proceso generó un total de 2,480 artículos originales, que posteriormente fueron sometidas a un riguroso proceso de filtrado basado en criterios de inclusión y exclusión.

En la primera etapa de selección, se aplicaron criterios como el año de publicación, el tipo de documento (específicamente artículos originales), el idioma (limitado a publicaciones en inglés) y la relevancia del título, el resumen y las palabras clave. Estos criterios redujeron el número de artículos a 242 manuscritos. Además, se consideraron los artículos designados como “*highly cited papers*” y “*hot papers*” en la base de datos WOS. La segunda etapa de selección implicó una evaluación exhaustiva de los artículos restantes, examinando su contenido completo y omitiendo aquellos que no se correspondían con el objetivo de la investigación. Se examinaron un total de 94 artículos originales, como se ilustra en Figura 7.

Figura 7
Diagrama de flujo del protocolo de búsqueda para síntesis de datos



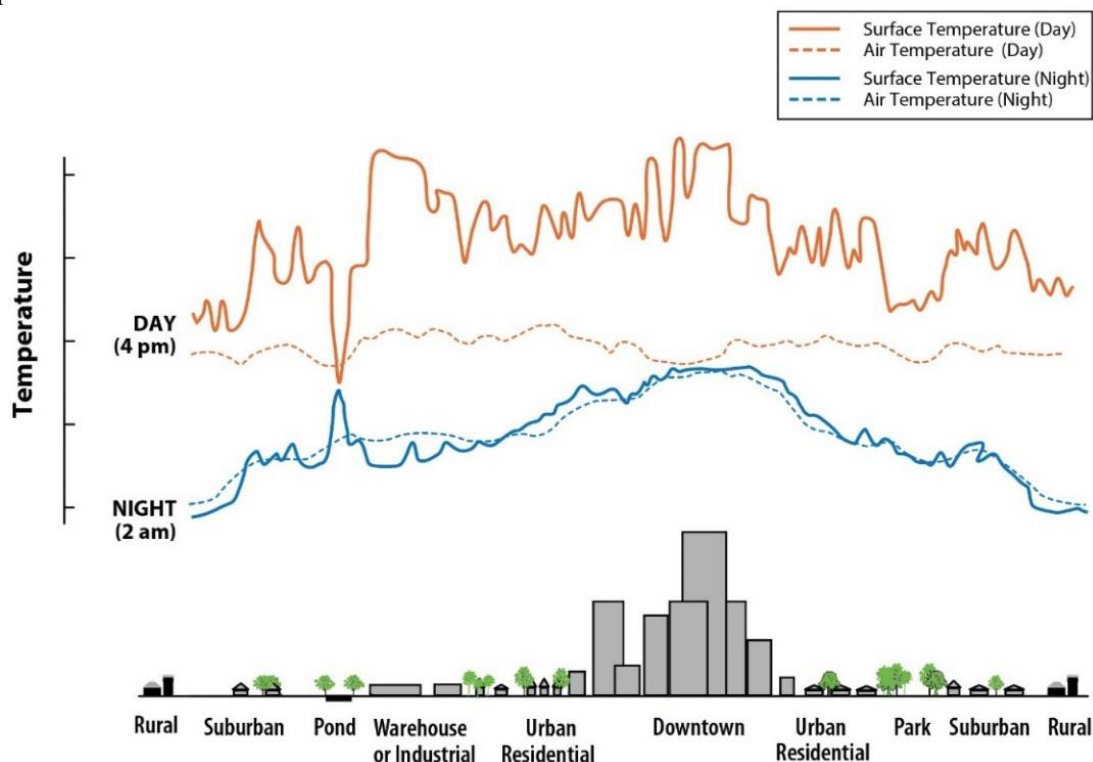
2.3.1. Isla de calor urbana

El fenómeno de la isla de calor urbano constituye uno de los impactos ambientales más significativos asociados al proceso contemporáneo de urbanización, particularmente en ciudades sometidas a procesos acelerados de crecimiento y densificación. Su estudio resulta fundamental para comprender cómo la morfología urbano-arquitectónica, las dinámicas socioeconómicas y las condiciones microclimáticas interactúan y modifican el balance térmico urbano, generando incrementos sistemáticos de temperatura respecto a los entornos rurales circundantes (Santamouris, 2015a).

La urbanización se ha consolidado como uno de los procesos territoriales más determinantes del siglo XXI. Actualmente, más de la mitad de la población mundial reside en áreas urbanas, y se proyecta que esta proporción continúe en aumento en las próximas décadas. Este crecimiento urbano, acompañado por el incremento de las actividades antropogénicas y del consumo energético, ha contribuido al aumento de la temperatura media del aire tanto a escala local como global (ONU, 2001). En este contexto, las ciudades no solo alteran el clima local, sino que generan microclimas urbanos específicos, siendo la ICU una de sus manifestaciones más estudiadas.

Desde una perspectiva física, la ICU se define como la diferencia sistemática de temperatura entre áreas urbanizadas y sus entornos rurales, resultado de la modificación de las propiedades radiativas, térmicas y aerodinámicas de la superficie urbana. Este fenómeno se ve intensificado por la sustitución de superficies naturales por materiales impermeables de alta capacidad térmica, la reducción de infraestructura verde, la geometría de los cañones urbanos y la acumulación de calor antropogénico (Oke, 1987).

Figura 8
Esquema de la isla de calor urbana



Nota: Obtenido de *Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2019). Urban Heat Islands. Science for a Changing World. <https://doi.org/1-888-392-8545>*

La ICU modifica de manera significativa el ambiente térmico urbano, deteriora las condiciones de confort térmico en espacios exteriores, incrementa las cargas de enfriamiento de las edificaciones y se asocia con un aumento en la morbilidad y mortalidad durante eventos de calor extremo (Aleksandrowicz, 2017). La Figura 8 ilustra esquemáticamente la formación del fenómeno y sus principales componentes.

Con el fin de sistematizar el análisis del fenómeno, Rajagopal et al. (2023) propusieron una clasificación de variables asociadas a la ICU organizada en cuatro dimensiones principales: i) intensidad del fenómeno, ii) infraestructura gris, iii) factores socioeconómicos y iv) vulnerabilidad. La Tabla 4 sintetiza los indicadores comúnmente empleados para la medición y evaluación de la ICU, incluyendo variables de temperatura superficial, temperatura del aire, temperatura radiante media y métricas espaciales asociadas a la estructura urbana.

Tabla 4
Indicadores empleados para medir el fenómeno ICU

Indicador	Indicador
Intensidad de la isla de calor urbano superficial (SUHI)	Media SUHI
Temperatura de la superficie terrestre (LST)	Flujo de calor neto
Temperatura del aire o de bulbo seco	Densidad neta de flujo de calor sensible de cuerpo negro
Temperatura de la superficie	Índice de varianza del campo térmico urbano
Temperatura radiante media (TRM)	Índice de agregación
Temperatura diurna	Intensidad de la ICU de la capa dosel
Temperatura aparente	Intensidad de enfriamiento
Capa de dosel	Densidad
Número de parches	

Nota: Obtenido de A review of recent developments in the impact of environmental measures on urban heat island. Por Rajagopal, P., Priya, R. S., & Senthil, R. (2023). Sustainable Cities and Society, 88(October 2022), 104279. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104279>

En las últimas décadas, la densificación vertical se ha consolidado como una estrategia central de planificación urbana orientada a contener la expansión horizontal, optimizar el uso del suelo y reducir la presión sobre la infraestructura y los ecosistemas periurbanos (SESATU, 2016). No obstante, su implementación plantea retos específicos en términos de microclima urbano y comportamiento térmico, particularmente en relación con la formación e intensidad de la ICU.

El incremento en la altura edificatoria y en la relación de aspecto de los cañones urbanos modifica de manera sustancial los patrones de radiación solar, ventilación natural y almacenamiento térmico, generando efectos complejos que varían en función del contexto climático y de la configuración morfológica adoptada. Oke (1987) fue uno de los primeros en señalar que el aumento de la relación altura–ancho en cañones urbanos profundos puede reducir la radiación solar directa incidente durante el día, favoreciendo condiciones térmicas más frescas a nivel del suelo; sin embargo, también advirtió que estas configuraciones tienden a disminuir la pérdida radiativa nocturna, contribuyendo a un mayor almacenamiento de calor y a temperaturas nocturnas elevadas.

Diversos estudios han demostrado que los cañones urbanos profundos asociados a procesos de densificación vertical pueden inducir efectos térmicos contrastantes. En un estudio comparativo, Williamson et al. (2009) destacaron que los cañones urbanos con relaciones altura–ancho elevadas tienden a favorecer la formación de islas frías diurnas, como resultado de la sombra proyectada por los edificios y de la reducción de la exposición radiativa del suelo. No obstante, los autores también advierten que estas mismas configuraciones pueden propiciar islas de calor más intensas durante determinados periodos del día, debido a un menor factor de cielo visible, una ventilación restringida y una mayor acumulación de calor sensible en las superficies urbanas.

Investigaciones más recientes han reforzado esta visión no lineal del fenómeno. Qaid et al. (2016) observaron que edificaciones de mayor altura no necesariamente incrementan la intensidad de la ICU, siempre que se mantenga una proporción geométrica adecuada del cañón urbano y se favorezca la ventilación natural. De manera complementaria, Du et al. (2025) analizaron de forma cuantitativa la relación entre la morfología urbana y la intensidad de la ICU, incorporando variables clave asociadas a la densificación vertical, como la altura edificatoria, la densidad construida y el factor de cielo visible. A partir de un marco de optimización multiobjetivo aplicado a tejidos urbanos de alta densidad, los autores identificaron una correlación negativa significativa entre la altura de los edificios y la intensidad de la isla de calor urbana acumulada, atribuida principalmente al aumento del sombreado y a una mayor circulación de aire a nivel urbano. Asimismo, se observó que valores elevados de FCV se asocian con un incremento de la intensidad de la ICU, debido a una mayor exposición radiativa

de las superficies urbanas, mientras que configuraciones con mayor densidad edificatoria tienden a reducir la acumulación térmica mediante el incremento de áreas sombreadas.

En este sentido, la densificación vertical no debe interpretarse como un factor intrínsecamente mitigador o intensificador de la ICU, sino como un proceso cuya incidencia térmica depende de la interacción entre la geometría urbana, las propiedades térmicas de los materiales y las condiciones climáticas locales (Santamouris, 2015b).

2.3.1.1. Causas y efectos de la ICU

La magnitud de la intensidad del fenómeno ICU depende de una combinación de factores climáticos, geográficos y morfológicos propios de cada ciudad. Blender (2015) señala que la reducción de infraestructura verde y azul, los procesos derivados de la urbanización y el uso extensivo de superficies impermeables incrementan significativamente la intensidad de la ICU.

En un enfoque complementario, Rajagopalan et al., (2014) clasifican los factores que determinan la incidencia y severidad del fenómeno en dos grandes categorías: i) factores meteorológicos, incluyendo la temperatura del aire, la velocidad y dirección del viento, y la radiación solar; y ii) factores vinculados a la estructura urbana, tales como la relación de aspecto de los cañones urbanos, la densidad edificatoria, el factor de visión del cielo (Sky View Factor), las propiedades térmicas de los materiales de construcción y el continuo incremento de la población urbana.

De manera similar, Deng y Wong (2020) proponen una clasificación que agrupa las variables involucradas en: i) edificaciones, ii) infraestructura verde y iii) pavimentos. A partir de la revisión de la literatura, es posible sintetizar las principales causas que contribuyen al desarrollo del fenómeno ICU en tres categorías fundamentales: i) características de la forma urbana, ii) propiedades térmicas y radiativas de los materiales empleados en la construcción y en las superficies urbanas, y iii) disminución y fragmentación de la infraestructura verde.

i. Forma urbana

Se cree que la geometría urbana es la principal razón para el desarrollo de ICU, esto se debe a los múltiples parámetros que intervienen en la forma geométrica de las ciudades. Estos parámetros están implicados en el balance energético del ambiente térmico y en el

desarrollo de microclimas urbanos (Kim & Brown, 2021). El impacto de la forma urbana sobre la intensidad de los efectos de la ICU se resume por dos razones principales: i) las estructuras urbanas absorben grandes cantidades de radiación, lo que provoca un aumento de las temperaturas del aire, y ii) la geometría urbana altera los patrones del viento. Diversos estudios demostraron que los flujos de viento disminuyen las temperaturas del aire.

ii. Propiedades térmicas de los materiales

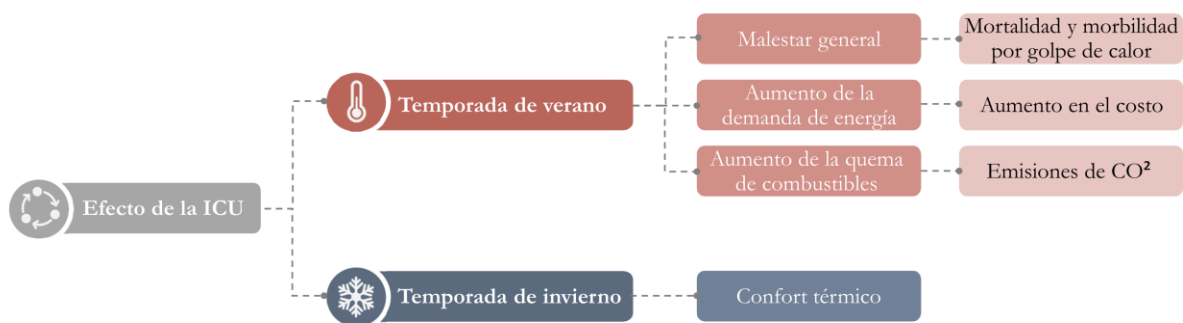
Las propiedades térmicas de los materiales de las superficies urbanas son claves en el aumento de la temperatura del ambiente térmico, el consumo de energía y, por lo tanto, en las condiciones de confort de los espacios interiores y exteriores. Los materiales con alta admitancia térmica y alta conductividad térmica absorben la radiación solar de onda corta, y parte del calor almacenado es liberado a la superficie a través de procesos convectivos y radiativos aumentando la temperatura de la superficie urbana (Hudson, 2010).

iii. Disminución de infraestructura verde

La vegetación juega un papel importante en el entorno urbano ya que proporciona diversos beneficios al medio ambiente, regula la temperatura y disminuye el efecto de sobrecalentamiento urbano. No obstante, en las áreas urbanas, la infraestructura verde está disminuyendo a medida que las superficies permeables son reemplazadas por áreas artificiales. Como resultado, la liberación de calor latente se reduce debido a la ausencia de estas (L. Xu et al., 2021).

Estudios recientes han demostrado que el sobrecalentamiento urbano puede duplicar la huella ecológica de las ciudades, aumentar las concentraciones de dióxido de carbono, reducir significativamente el confort térmico exterior, aumentar las cargas de refrigeración de los edificios y la mortalidad y morbilidad relacionada con el calor (Santamouris, 2016; Schinasi et al., 2018). La Figura 9 ilustra estos efectos de manera sintética.

Figura 9
Efectos del fenómeno ICU



Nota: Obtenido de Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2019). Urban Heat Islands. Science for a Changing World. <https://doi.org/1-888-392-8545>

2.3.1.2. Estrategias de mitigación de la ICU

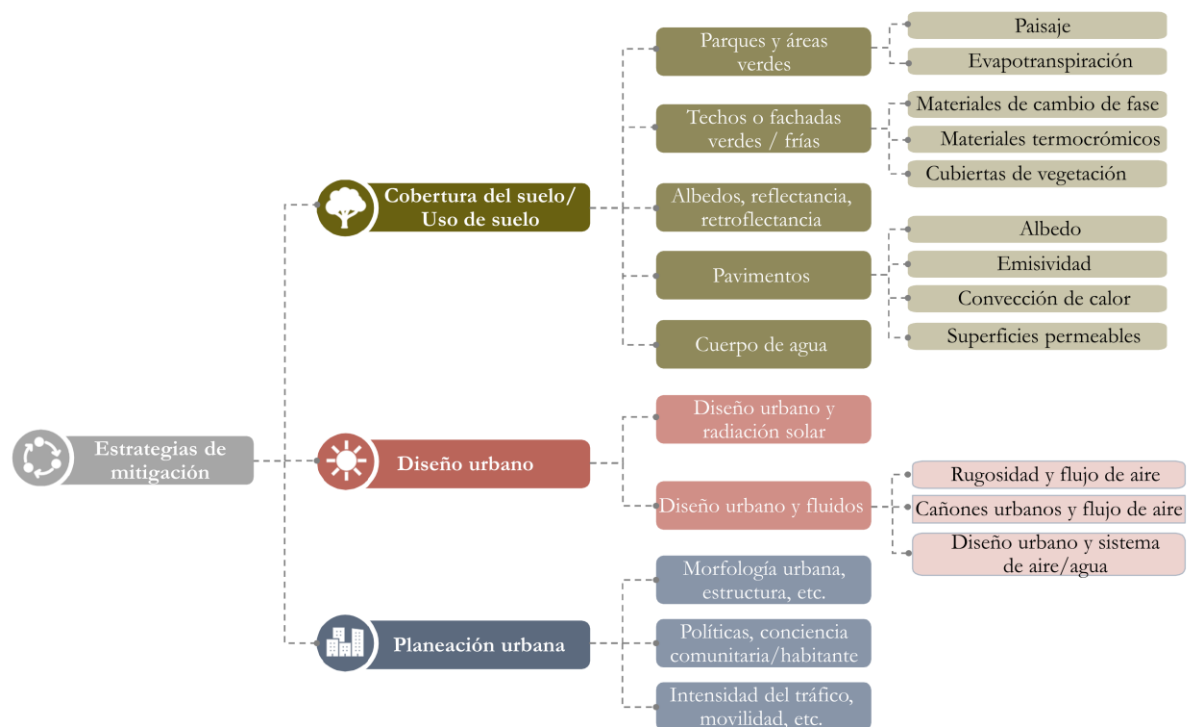
Ante esta problemática, los futuros escenarios de mitigación plantean la implementación de diversas estrategias para reducir el impacto de la ICU, mejorar la calidad de vida de la población y los niveles de confort térmico en espacios interiores y exteriores (Santamouris et al., 2017). Los estudios sobre estrategias de mitigación se han estudiado ampliamente a través de la simulación de diferentes materiales, la introducción de tecnologías y la identificación de formas urbanas óptimas (Rajagopal et al., 2023). Algunas de estas estrategias incluyen la elección y combinación de diferentes tecnologías como, simulación microclimática; materiales avanzados (materiales termocrómicos, superficies fluorescentes altamente reflectantes, etc.); cambios en la geometría urbana; infraestructura verde; sistemas avanzados de agua y evaporación y sistemas de control solar. Estudios han demostrado que la combinación de diversas estrategias pueden llegar a reducir la temperatura máxima media del aire hasta 3 °C (Garshasbi & Santamouris, 2019; Santamouris & Fiorito, 2021).

A nivel mundial se han detectado diversas estrategias de mitigación de la ICU como consecuencia del cambio climático, sin embargo se agrupan en tres grupos: i) cobertura de suelo/uso de suelo, que incluye la implementación de parques, áreas verdes, techos verdes/fríos, uso de superficies frescas e incorporación de infraestructura azul; ii) diseño urbano centrado en estrategias relacionadas con la radiación solar, fluidos y los sistemas de agua; y iii) planeación

urbana, que incluye políticas públicas, participación comunitaria, estructura y morfología urbana, etc. (Gonzalez et al., 2021). En la Figura 10 se presentan las diferentes estrategias de mitigación que conforman cada uno de los grupos descritos con anterioridad. Esta investigación implementa las estrategias de planeación urbana, a través del estudio de la morfología urbana.

Figura 10

Estrategias ambientales para mitigar el efecto ICU



Nota: Obtenido de “Research trends on environmental, energy and vulnerability impact of Urban Heat Islands: An overview” por Gonzalez, M., Martinez, K., Armendariz, J., Santamouris, M., Bojorquez, G., & Luna, A. (2021). Energy and Buildings, 246, 111051. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111051>

Un estudio realizado en cinco ciudades de China, se encontró que al disminuir la altura y la densidad de los edificios, los grados de ICU se reducían en un 20% (Liu et al., 2020). Ngarambe et al. (2021) identificó que la intensidad de la ICU disminuye al reducir la relación de área bruta de suelo. Por otro lado, Liang et al., (2020) observó que la expansión, la densidad, la escala y la continuidad urbana mejoraron los efectos de ICU a nivel local. Otros estudios han demostrado que los edificios de gran altura presentan temperaturas más bajas que los edificios de poca altura (Rajagopal et al., 2023).

No obstante, el desarrollo de tecnologías de información en las últimas décadas ha permitido la aplicación de modelos y técnicas complejas que permiten el diseño y la evaluación de estrategias que mitiguen los efectos causados por el sobrecalentamiento urbano a nivel micro y mesoescala. Así como el estudio de múltiples objetivos en investigaciones relacionadas con la composición morfológica de las ciudades.

2.3.2. Sistema energético en México

El sistema energético mexicano se caracteriza por una alta dependencia de fuentes fósiles. Según la Secretaría de Energía (SENER, 2022), aproximadamente el 86 % de la oferta energética nacional proviene de combustibles como gas natural, petróleo y carbón, mientras que las energías renovables representan apenas un 14 %, incluyendo hidroeléctrica, solar, eólica y biomasa. Esta matriz energética tiene importantes implicaciones ambientales, económicas y sociales, especialmente en el contexto urbano, donde se concentra más del 80 % de la población del país (INEGI, 2020).

El crecimiento urbano desordenado, combinado con la expansión de sistemas de transporte ineficientes y el aumento en el uso de aparatos eléctricos para climatización, ha incrementado significativamente la demanda energética en las ciudades. De acuerdo con la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE, 2021), el sector residencial representó el 26 % del consumo eléctrico nacional en 2020, y esta proporción tiende a aumentar durante periodos de calor extremo. En regiones áridas y semiáridas del norte del país, la climatización representa hasta el 70 % del consumo energético residencial durante el verano (Benincá et al., 2023). En el Anexo A se presenta el esquema tarifario doméstica proporcionado por la Comisión Federal de Electricidad, entidad responsable de la generación, transmisión y distribución de electricidad en México.

2.3.2.1. Pobreza energética en México

La pobreza energética es un fenómeno emergente en México que ha cobrado relevancia ante la intensificación de las olas de calor y la creciente desigualdad socioeconómica. Aunque no existe una definición oficial a nivel nacional, se entiende como la incapacidad de un hogar para acceder a servicios energéticos adecuados para satisfacer sus necesidades básicas de

bienestar térmico, iluminación, refrigeración de alimentos, entre otros (Bouzarovski & Petrova, 2015).

En México, la PE se ha abordado mediante metodologías indirectas debido a la limitada disponibilidad de datos sobre ingresos y gastos energéticos desagregados. Una de las aproximaciones más comunes es el uso del umbral del 10%, lo que implica que un hogar se encuentra en situación de pobreza energética si destina más del 10% de sus ingresos totales a cubrir sus necesidades energéticas (Boardman, 1991).

Investigaciones recientes, como las de García y Graizbord (2016) y Hernández (2016), han propuesto el uso de indicadores multidimensionales adaptados al contexto latinoamericano, que consideran variables como el acceso a sistemas de climatización, la calidad de la infraestructura eléctrica, el material de construcción de la vivienda y las condiciones climáticas locales. Además, estudios como los de (Díaz et al. (2018) han evidenciado que el acceso al aire acondicionado está correlacionado con los niveles de ingreso y con la reducción de la mortalidad durante olas de calor, lo que resalta la intersección entre pobreza energética y vulnerabilidad térmica.

En el contexto del cambio climático, la pobreza energética adquiere una dimensión crítica. Las olas de calor se han intensificado en frecuencia y magnitud en el territorio mexicano, y las proyecciones climáticas del IPCC indican que esta tendencia se acentuará durante las próximas décadas (IPCC, 2023b). La falta de acceso a soluciones tecnológicas para el confort térmico, como sistemas de enfriamiento eficientes, incrementa la exposición y sensibilidad de ciertos grupos poblacionales ante temperaturas extremas.

Según, la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) estima que cerca del 15 % de la población mundial vive en pobreza energética, lo que equivale a alrededor de 200 millones de personas (IEA, 2017). De mantenerse las tendencias actuales, las proyecciones de las Naciones Unidas advierten que para 2030 podría aumentar el número de personas sin acceso a energía moderna (World Energy Outlook, 2010).

En México, aunque la cobertura eléctrica nacional supera el 98%, existen regiones donde la calidad del suministro es deficiente y los costos de electricidad son elevados en relación con el ingreso promedio. Esto es especialmente problemático en zonas urbanas periféricas y asentamientos informales, donde la infraestructura energética es precaria.

2.3.3. Vulnerabilidad térmica

La vulnerabilidad térmica se refiere a la susceptibilidad de individuos o grupos sociales a los efectos adversos de la exposición a temperaturas elevadas, especialmente en contextos urbanos donde el fenómeno de ICU intensifica las condiciones térmicas extremas. Diversas investigaciones han evidenciado que el calor extremo está estrechamente vinculado con un aumento en la incidencia de enfermedades, hospitalizaciones y mortalidad a escala global (Xia et al. 2018).

El IPCC define la vulnerabilidad como “el grado en que los sistemas geofísicos, biológicos y socioeconómicos son susceptibles e incapaces de hacer frente a los impactos adversos del cambio climático, incluida la variabilidad y los eventos extremos” (IPCC, 2007 p. 783). Esta vulnerabilidad se compone de tres factores clave: (a) la exposición, (b) la sensibilidad y (c) la capacidad de adaptación. La exposición hace referencia a los aspectos físicos y de ubicación que contribuyen a un aumento de la vulnerabilidad. La sensibilidad está relacionada con las características intrínsecas de la población que la hacen susceptible a una mayor exposición al calor. La capacidad de adaptación, por su parte, consiste en la habilidad de un sistema para resistir o recuperarse de eventos extremos y/o daños (Das, et al., 2020) (Figura 11).

Figura 11

Vulnerabilidad al calor: dimensión

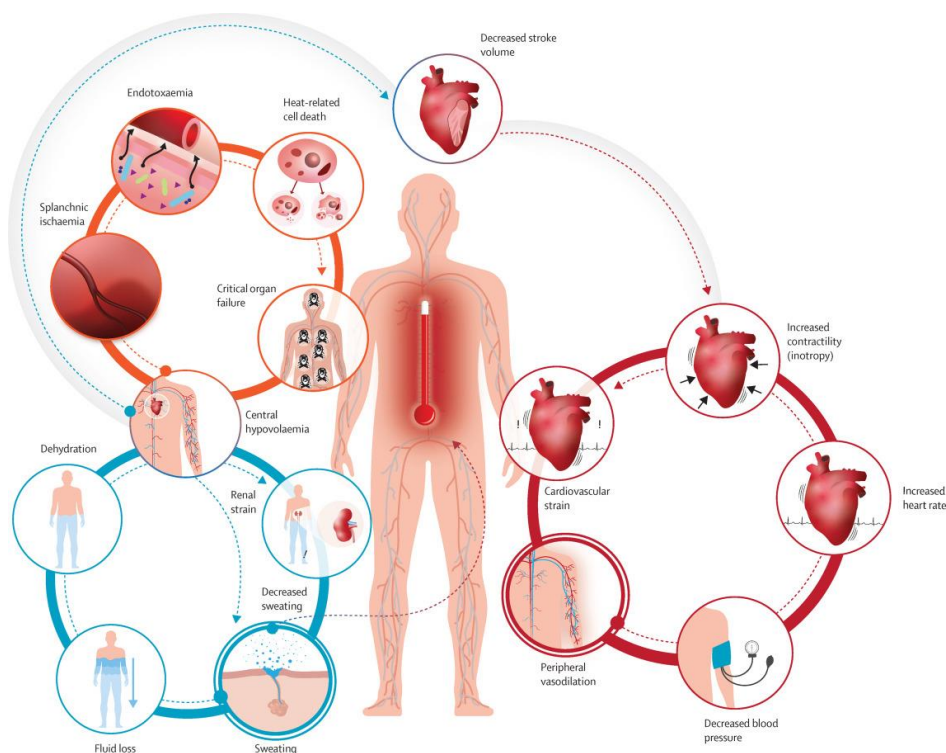


En este sentido, se han desarrollado metodologías para evaluar la vulnerabilidad térmica de manera espacial. Por ejemplo, Inostroza et al. (2016) propusieron un índice de vulnerabilidad al calor para la ciudad de Santiago de Chile, basado en sistemas de información geográfica (SIG). Dicho índice integró información de teledetección y datos socioeconómicos mediante análisis de componentes principales (PCA), y permitió identificar variaciones espaciales significativas entre los niveles de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación a escala intraurbana.

Desde una perspectiva fisiológica, cuando el cuerpo humano se enfrenta al estrés térmico, activa mecanismos de autorregulación como la vasodilatación periférica —que incrementa el flujo sanguíneo hacia la piel para facilitar la disipación del calor— y la sudoración, mediante la cual el calor interno se elimina a través de la evaporación (Ebi et al., 2021). Estas respuestas pueden afectar de manera diferenciada según la edad, la salud y otros factores individuales. La Figura 12 describe las rutas fisiológicas asociadas al golpe de calor.

Figura 12

Respuesta de las vías fisiológicas de la tensión por calor humano



Nota: Obtenido de “Hot weather and heat extremes: Health risks” por Ebi, K. L., Capon, A., Berry, P., Broderick, C. (2021). The Lancet, 398(10301), 698–708. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01208-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01208-3)

La literatura científica ha identificado una serie de características sociales y demográficas que aumentan la sensibilidad urbana frente al sobrecalentamiento, entre ellas: la calidad de la vivienda, el género, la edad, el nivel educativo, el estatus socioeconómico y el acceso a servicios básicos (Tabla 5). Evidencia epidemiológica sugiere que los adultos mayores (mayores de 65 años), los niños, las mujeres y los residentes de bajos ingresos presentan un riesgo elevado de mortalidad y morbilidad atribuible al calor extremo (Das et al., 2021).

Tabla 5
Indicadores de vulnerabilidad sociodemográfica

Indicador	Descripción
Densidad de población	Número de personas por sector
Densidad demográfica	Área de la superficie por sector
Total de viviendas	Número de viviendas por sector
Población sin afiliación a servicios de salud	Número de personas que no cuentan con servicios de salud
Población < 12 años y > 65 años	Número de personas considerados menores de edad y adultos de la tercera edad
Población femenina	Población femenina respecto de la población total
Viviendas sin electricidad	Hogares que viven sin conexión eléctrica
Pobreza	Población que vive por debajo del umbral de la pobreza

Nota: Elaborado a partir de la revisión de la literatura

Un estudio realizado por Sanchez y Reames (2019) en Estados Unidos reveló que el 69,4 % de los hogares por debajo del umbral de pobreza y el 53,2 % de los hogares que reciben asistencia pública se localizan en zonas de alto riesgo frente a olas de calor, lo que confirma la fuerte correlación entre vulnerabilidad socioeconómica y exposición térmica.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que las olas de calor, agravadas por el cambio climático causan más de 150,000 muertes al año, afectando de forma desproporcionada a niños, adultos mayores, personas con enfermedades crónicas y poblaciones de bajos ingresos (Zhou et al., 2020). Esta situación subraya la urgencia de integrar el análisis de vulnerabilidad en los estudios sobre ICU, con el fin de diseñar estrategias de mitigación más equitativas y eficaces (Wang et al., 2021).

Adicionalmente, el aumento de las temperaturas globales incrementa la presión sobre los sistemas energéticos. En la última década, la temperatura media de la superficie terrestre ha aumentado en aproximadamente 1,09 °C respecto al periodo 1850–1900 (IPCC, 2013). Se estima que, por cada grado adicional por encima de los 24 °C, la demanda de electricidad para

climatización se incrementa en hasta un 4,6 % (IEA, 2017). Este aumento en el consumo energético, cuando no es acompañado por un acceso equitativo a la energía, intensifica los niveles de pobreza energética. La Tabla 6 muestra las variables asociadas a la vulnerabilidad y las condiciones socioeconómicas que contribuyen a comprender la exposición diferencial de la población al fenómeno (Rajagopalan et al., 2014).

Tabla 6

Variables empleadas para medir los factores socioeconómicos y de vulnerabilidad

Variable	Variable
Densidad de la población o densidad media	Densidad de la población por debajo de la línea de pobreza
Población total o población urbana	Índice de vulnerabilidad social
Producto interno bruto (PIB) per cápita	Índice de desarrollo urbano
PIB total	Vulnerabilidad ICU
Índice de impacto del riesgo ambiental	Diferencia población urbana-rural
Índice de impacto en la salud	Población que requiere asistencia pública
Riesgo de salud	Zona de riesgo para la salud

Nota: Obtenido de A review of recent developments in the impact of environmental measures on urban heat island. Por Rajagopal, P., Priya, R. S., & Senthil, R. (2023). Sustainable Cities and Society, 88 (October 2022), 104279. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104279>

2.3.4. Morfología urbano-arquitectónica

Diversos estudios han demostrado que los indicadores de forma urbana se encuentran entre los factores más importantes que influyen en el efecto ICU y el microclima urbano local, debido a que el rápido crecimiento de la población y la urbanización no planificada alteran los parámetros microclimáticos (Banerjee et al., 2022). Por lo que el tema de la relación entre la morfología urbana e ICU con respecto a la planificación urbana, la ecología urbana y el cambio climático cada vez ha tomado mayor relevancia en las últimas décadas. Esto se debe a que gran parte del entorno construido es irreversible o costosa de modificar una vez que la forma urbana se encuentra definida (Liang et al., 2020).

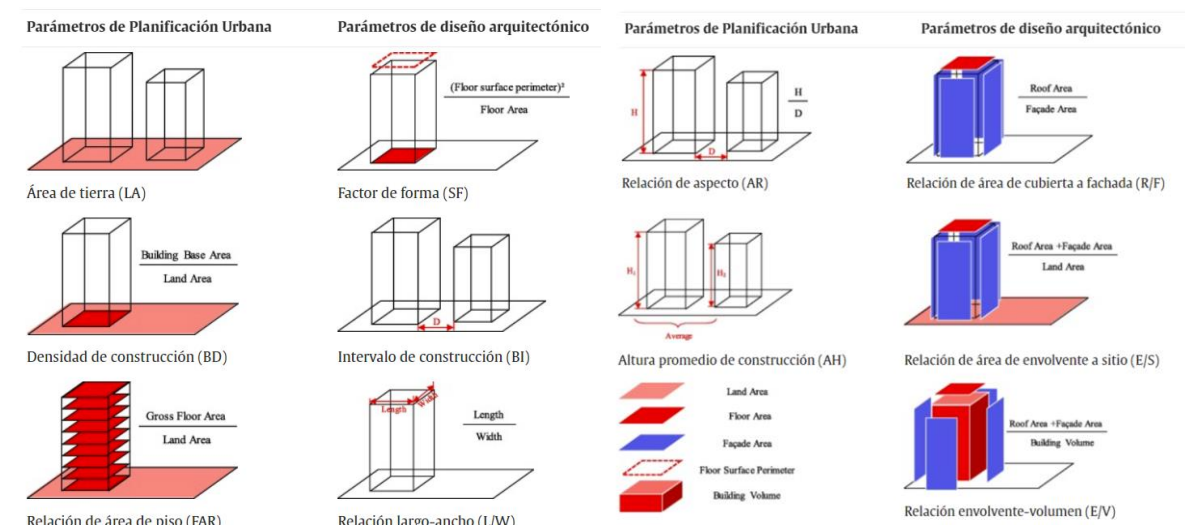
La clasificación de los parámetros de diseño suele depender en gran medida de la escala de estudio. En escala del cañón urbano, la altura de los edificios (H), el ancho de la calle (W), la relación de aspecto (H/W) y el factor de cielo visible (SVF) son los parámetros utilizados para describir la geometría urbana. Por otro lado, a escala urbana o de bloque además de los indicadores de la escala anterior, se incluyen la relación de área de piso (FAR), la relación de

superficie a volumen (S/V), la relación de cobertura del edificio (BCR) y la relación de espacio abierto (OSR) (Ibrahim, Kershaw, Shepherd, & Coley, 2021).

En general, las investigaciones de morfología urbana en las últimas dos décadas han consistido: i) en estudios que investigan el impacto de la geometría urbana en el consumo de energía, la radiación solar pasiva y la disponibilidad de luz natural; ii) y estudios relacionados con la geometría urbana, ICU y microclima urbano (Ibrahim, Kershaw, Shepherd, & Coley, 2021). De acuerdo con Tian y Xu, (2021), los indicadores que conforman la morfología urbana se clasifican en dos grupos: i) parámetros de planificación urbana y ii) parámetros de diseño arquitectónico. Los indicadores de planificación urbana están compuestos por parámetros como el área de terreno, la densidad de construcción, la relación de área de piso, relación de aspecto y la altura media de construcción.

Mientras que, los indicadores de diseño urbano se encuentran en función a escala de edificio. Este grupo se componen de los parámetros de factor de forma, intervalo de construcción, la relación entre el largo y ancho del edificio, la relación entre el área de la cubierta y el área de fachada, la relación del área de la envolvente y el área del terreno y la relación de la envolvente y el volumen del edificio. En la Figura 13 ilustran los indicadores que conforman ambos grupos.

Figura 13
Indicadores de morfología urbana



Nota: Obtenido de “A morphology-based evaluation on block-scale solar potential for residential area in central China” por Tian & Xu (2021). Solar Energy. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.049>.

En complemento a estos enfoques Rajagopal et al. (2023) desarrollaron una clasificación de variables. La Tabla 7 organiza dichas variables correspondientes a los factores asociados con la infraestructura gris.

Tabla 7
Variables empleadas para medir infraestructura gris

Variable	Variable
Índice de acumulación de diferencia normalizada (NDBI)	Densidad de construcción
Factor de cielo visible (SVF)	Fracción de superficie edificable
Altura del edificio o altura media de los edificios	Relación de aspecto (H/W)
Huella del edificio	Densidad vial
Superficie total de la envolvente	Relación superficie/volumen
Densidad del parche	Índice de dimensión
Tamaño urbano o tamaño del área urbana	Orientación del edificio y calle
Tasa de cobertura del edificio	Relación de construcción
Superficie edificable	Uso del edificio
Distancia de las carreteras principales	Volumen de construcción
Ancho de la calle	Distancia de los edificios
Área total construida	Relación de superficie impermeable

Nota: Obtenido de A review of recent developments in the impact of environmental measures on urban heat island. Por Rajagopal, P., Priya, R. S., & Senthil, R. (2023). Sustainable Cities and Society. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104279>

2.3.4.1. Microclima y consumo energético

En la actualidad, aproximadamente el 50 % de la población mundial vive en ciudades y se espera que para el 2050 esta cifra aumentante al 68 %. Dado que las ciudades consumen más de dos tercios de la energía primaria del mundo, emiten más del 70 % de dióxido de carbono (CO₂) que repercute en el cambio climático, siendo los edificios los principales consumidores de energía (40 %) y responsables del 36 % de las emisiones de CO₂ totales a nivel mundial. Se estima que esta proporción seguirá en aumento, particularmente en países en desarrollo (Liu et al., 2023).

El rápido crecimiento de las ciudades ha aumentado la popularidad de los estudios de microclima urbano, dado que la composición morfológica de una ciudad altera los parámetros del microclima, la temperatura es uno de los indicadores microclimáticos más importante, ya que aumenta el consumo de energía de los edificios, la mortalidad y morbilidad de las personas y el confort térmico. Por lo que, diversos investigadores han estudiado el impacto de la forma

urbana en el consumo energético e identificado una serie de indicadores a lo largo de la historia, que se pueden agrupar en tres categorías: i) densidad; ii) geometría; y iii) tipo de construcción. La densidad representa un factor clave que controla la intensidad del desarrollo del suelo urbano, suelen emplearse indicadores como i) relación de área de piso (FAR); ii) densidad de construcción (BD); iii) tasa de espacio abierto (OSR) y iv) el número promedio de pisos como métricas de densidad (Liu et al., 2023). Rajagopal et al. (2023) realizó una clasificación de las variables empleadas para medir el consumo de energía y el confort térmico, estas se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8

Variables empleadas para medir el consumo de energía y el confort térmico

Variable para medir consumo de energía	Variable para medir confort térmico
Carga de enfriamiento	Temperatura equivalente fisiológica (PET)
Demanda de energía	Voto medio previsto (PMV)
Consumo de energía	Índice de confort térmico universal (UTCI)
Carga de calefacción	Índice de nivel de confort térmico
Carga de calefacción por hora	Índice de malestar

Nota: Obtenido de A review of recent developments in the impact of environmental measures on urban heat island. Por Rajagopal, P., Priya, R. S., & Senthil, R. (2023). Sustainable Cities and Society. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104279>

Un estudio desarrollado por Quan et al. (2016) en Shanghai, China descubrieron después de llevar a cabo simulaciones de consumo de energía en bloques, que cuanto mayor es la proporción de bloques, mayor es la intensidad de uso de energía del edificio. Así mismo, Li et al. (2021), observo una disminución en la demanda energética de calefacción al evaluar diversos indicadores de morfología urbana como la altura promedio de los edificios, la tasa de cobertura, la relación en el área de piso y al aumentar las proporciones de parcela.

En cuanto a la categoría de geometría, Mangan et al. (2021) divide los indicadores de geometría a razón de dos escalas, la escala urbana y la escala de construcción o edificio. Este último se compone de los factores de coeficiente de forma, la altura y orientación del edificio y el número de pisos, mientras que la escala urbana incluye indicadores como la relación de aspecto de la calle, el factor de cielo visible y la orientación de la calle. Se ha demostrado en diversos estudios que la forma óptima de morfología urbana mejora significativa la eficiencia energética, reduciendo la demanda de energía, sin embargo, las superficies urbanas subyacentes

y las configuraciones de paisaje juegan un papel clave en el consumo de energía de los edificios (Benincá et al., 2023).

Hoy en día, gracias al rápido desarrollo de la tecnología de la información, los investigadores han desarrollado en los últimos años diversas herramientas de modelado energético para edificios urbanos a través de enfoques de simulación numérica. Desde plataformas informáticas y de datos basados en la web enfocadas en el modelado de energía de edificios, como CityBES, UMI, etc. que permiten evaluar el impacto de la geometría del edificio en el consumo de energía. Hasta herramientas paramétricas de análisis ambiental y energético, como Ladybug Tools, un complemento de evaluación de rendimiento para la plataforma paramétrica asistida por algoritmos Grasshopper, que han ganado cada vez más atención en la industria debido a los beneficios que ofrecen las herramientas paramétricas para el modelado de geometría urbana y arquitectónica (Liu et al., 2023). En países como China, España, Alemania, Australia y Estados Unidos se han implementado técnicas algorítmicas de diseño evolutivo basados en algoritmos de optimización multiobjetivo en estudios de diseño y planificación urbana, microclima urbano y consumo energético.

2.3.5. Optimización multiobjetivo

Los modelos de optimización multiobjetivo (MOO), en el contexto del diseño evolutivo, se basan en procesos de búsqueda inspirados en la teoría darwiniana de la selección natural y en la reproducción genética, y han sido ampliamente utilizados como marco general para la exploración de soluciones de diseño en arquitectura y urbanismo. Estos modelos emplean esquemas evolutivos con elitismo, en los que intervienen mecanismos de cruce, mutación y selección aplicados a una población de soluciones candidatas a un problema específico. A través de iteraciones sucesivas, las soluciones son sometidas a variaciones controladas y a procesos de evaluación que favorecen aquellas con mejor desempeño conforme a los objetivos definidos (Camporeale, 2017, págs. 37-38). En este sentido, el diseño evolutivo emplea un marco algorítmico que permite expresar los parámetros y reglas que determinan tanto los requisitos del diseño como las configuraciones resultantes.

Los MOO permiten determinar una solución óptima o un conjunto de posibles soluciones entre varias alternativas factibles, en función de objetivos de rendimiento y de restricción definidas. La naturaleza de dichas soluciones depende de la complejidad del problema de

optimización y de la interacción entre las variables de diseño consideradas (Carrapiço et al., 2020). Diversas investigaciones han señalado que la aplicación de algoritmos genéticos en problemas de optimización ha experimentado un crecimiento sostenido desde principios del siglo XXI, superando a otros métodos tradicionales en términos de flexibilidad y capacidad exploratoria (Kheiri, 2018).

Durante la última década, países como China, Italia, España, Alemania, Australia y Estados Unidos han incorporado ampliamente métodos algorítmicos de diseño evolutivo en estudios de optimización multiobjetivo orientados al diseño urbano, el microclima urbano, el confort térmico y el consumo energético. En este contexto, se han desarrollado marcos integrales de optimización energética centrados tanto en la configuración de la envolvente edificatoria como en la forma urbana y la planificación de conjuntos edificados.

En comparación con otros enfoques convencionales, la optimización multiobjetivo basada en algoritmos evolutivos ofrece una mayor flexibilidad y permite evaluar de manera simultánea conjuntos de soluciones de diseño tanto en entornos interiores como exteriores, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones orientada al desempeño ambiental y energético (Evola et al., 2020). Asimismo, Xu et al. (2019) señalan que la optimización asistida por computadora constituye una alternativa eficaz para mejorar las condiciones ambientales en áreas urbanas complejas.

2.3.5.1. Optimización multiobjetivo en arquitectura

La aplicación de la optimización multiobjetivo en arquitectura y urbanismo ha permitido abordar de manera integrada problemas complejos relacionados con el desempeño energético, el confort térmico, la radiación solar y la configuración morfológica de edificios y tejidos urbanos. Diversos estudios han demostrado que los modelos basados en diseño evolutivo constituyen una herramienta eficaz para explorar configuraciones espaciales que equilibran objetivos ambientales, energéticos y funcionales.

Ascione et al. (2019) implementaron un marco integral de optimización energética multiobjetivo enfocado en el diseño de la envolvente del edificio, demostrando que la combinación de variables geométricas y parámetros operativos permite reducir significativamente la demanda energética. De manera similar, Carlucci et al. (2015)

desarrollaron un enfoque de optimización multiobjetivo aplicado a edificios de consumo energético casi nulo, en el que se minimiza el malestar térmico y visual mediante el uso de algoritmos genéticos, destacando la eficacia del algoritmo NSGA-II en la identificación de soluciones de compromiso.

En el ámbito urbano, Bahgat et al. (2020) analizaron la optimización de un espacio urbano abierto en el sur de Italia con el objetivo de reducir la radiación solar incidente, el consumo energético por refrigeración y mejorar el confort térmico exterior en un cañón urbano. De manera complementaria, Ciardiello et al. (2020) propusieron un enfoque multiobjetivo orientado a la energía para nuevos edificios en climas mediterráneos, optimizando simultáneamente la forma y la envolvente edificatoria mediante algoritmos genéticos, con reducciones de hasta 60 % en la demanda energética anual y 23 % en los costos energéticos.

Showkatbakhsh y Makki (2020) emplearon algoritmos evolutivos multiobjetivo, como SPEA-2 y NSGA-II, para generar morfologías urbanas adaptativas frente a condiciones ambientales cambiantes, obteniendo conjuntos de soluciones divergentes y robustas. Posteriormente, estos autores desarrollaron un marco metodológico para la selección de soluciones óptimas dentro del frente de Pareto generado (Showkatbakhsh & Makki, 2022).

Otros estudios han explorado la relación entre morfología urbana y desempeño energético a distintas escalas. Xia y Li (2021) desarrollaron un flujo de trabajo computacional autónomo para la generación y simulación de morfología urbana, evaluando el consumo energético y la exposición a la radiación solar en bloques residenciales. Sus resultados evidenciaron que el acceso a la radiación solar es más sensible a los cambios morfológicos que el consumo energético. En el contexto latinoamericano, Chi et al. (2021) implementaron herramientas paramétricas y algoritmos evolutivos multiobjetivo para optimizar el diseño ambiental de sombreados urbanos adaptativos en espacios públicos de Cancún, México, logrando mejoras significativas en el confort térmico exterior mediante el índice UTCI.

Asimismo, Abdollahzadeh y Biloría (2022) demostraron que la optimización simultánea de factores de diseño como la orientación, la relación H/W, la tipología edificatoria y la relación ventana-pared puede incrementar de manera sustancial las condiciones de confort térmico exterior e interior, reduciendo el consumo energético por refrigeración y calefacción hasta en 25,85 %, 72,76 % y 93,67 %, respectivamente. En una línea similar, Mo et al. (2022) aplicaron

diseño paramétrico y algoritmos genéticos para optimizar la forma espacial de aulas universitarias en China, logrando reducciones del consumo energético del orden de 7,5 % a 14,5 %.

En conjunto, estos estudios evidencian que la optimización multiobjetivo basada en diseño evolutivo constituye una herramienta consolidada para el análisis y la generación de configuraciones urbano-arquitectónicas orientadas al desempeño energético y ambiental. Este cuerpo de literatura proporciona el sustento empírico y metodológico que enmarca la selección del algoritmo específico empleado en la presente investigación.

2.4. Estado del arte

2.4.1. Tipos de algoritmos y herramientas de optimización

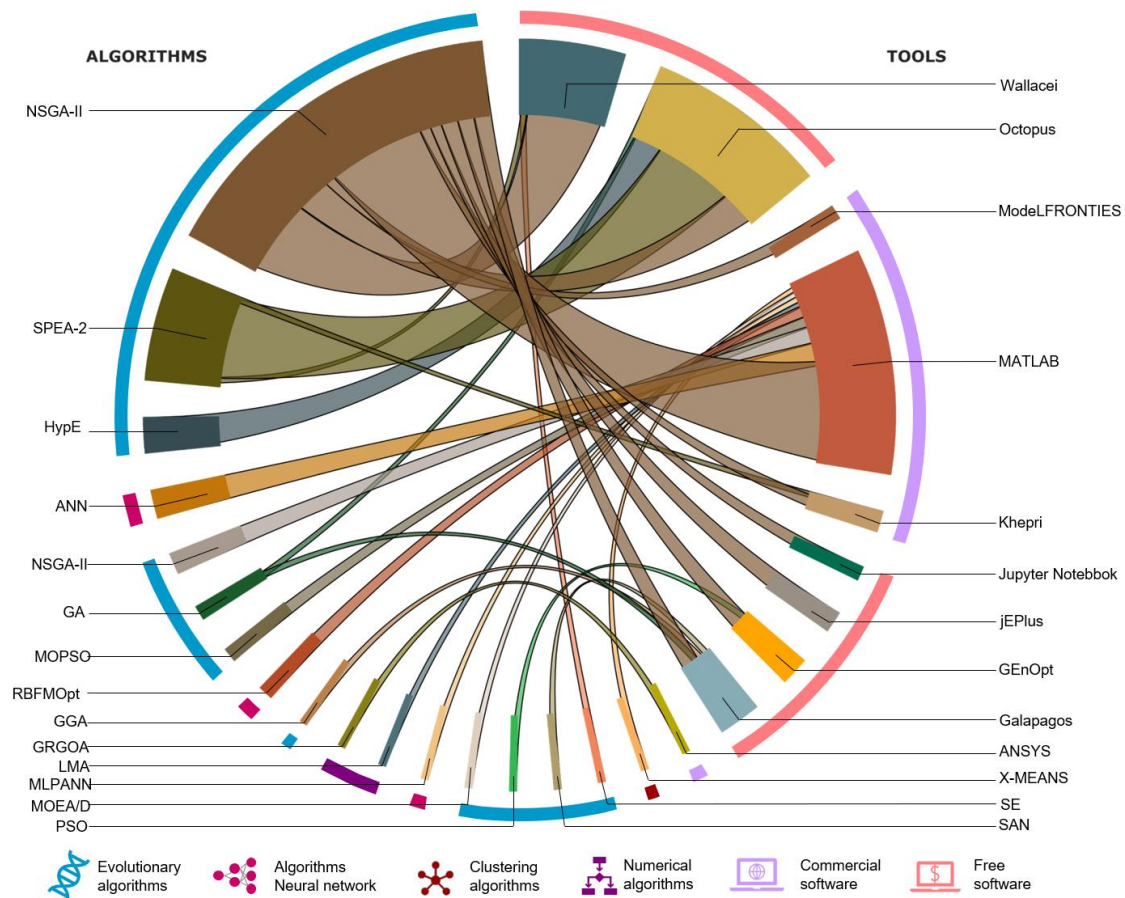
Los modelos de optimización multiobjetivo aplicados a la morfología urbana emplean una amplia variedad de algoritmos y herramientas de optimización, con el objetivo de abordar la complejidad inherente a la generación y evaluación de formas urbanas basadas en el desempeño. La Figura 14 sintetiza la relación entre los tipos de algoritmos y las herramientas de optimización identificadas en la literatura, distinguiendo 17 clases de algoritmos y 10 tipos de herramientas, clasificadas como comerciales o de acceso gratuito, incluyendo software libre y de código abierto.

Los algoritmos evolutivos se identifican como los enfoques más recurrentes, al concentrar el 77,6 % de los estudios analizados. Dentro de esta categoría, el algoritmo NSGA-II destaca como el más utilizado, presente en el 69,8 % de los casos, seguido por SPEA-2 con el 21,9 %. Otros algoritmos reportados incluyen NSGA-III (4,1 %), algoritmo genético (GA) (2,7 %) y el algoritmo genético de Galápagos (GGA) (1,5 %). De manera complementaria, un 13,7 % de los estudios emplea algoritmos alternativos como el algoritmo de estimación de hipervolumen (HypE) (5,3 %), la red neuronal artificial (ANN) (4,2 %), el algoritmo de optimización de enjambre de partículas multiobjetivo (MOPSO) y el algoritmo basado en radiales (RBFMOpt) (2,1 % cada uno). El 8,7 % restante se distribuye entre enfoques menos frecuentes, como la optimización por enjambre de partículas (PSO), X-means, el algoritmo de optimización de grado relacional de Grey (GRGOA), el algoritmo evolutivo multiobjetivo basado en la descomposición (MOEA/D), la red neuronal artificial

de perceptrón multicapa (MLPANN), el algoritmo de Levenberg-Marquardt (LMA), la evolución simulada (SE) y el recocido simulado (SAN), cada uno con una participación aproximada del 1,2 %.

Figura 14

Frecuencia de aplicación de algoritmos y herramientas de optimización y su naturaleza



Tal como se presenta en la Tabla 9, esta taxonomía de algoritmos proporciona una visión histórica y comparativa de las características computacionales claves asociadas al diseño evolutivo aplicado a la optimización multiobjetivo de formas urbanas y edificios. La comprensión de estos atributos resulta fundamental para la selección de herramientas de diseño evolutivo adecuadas, dado que el análisis morfológico urbano exige enfoques personalizados, escalables y adaptables, capaces de gestionar objetivos de rendimiento en competencia, alta complejidad computacional y compatibilidad con entornos de simulación intensivos y plataformas de computación en la nube.

La selección de un algoritmo específico depende de múltiples factores, entre los que se incluyen la naturaleza del problema de optimización, la disponibilidad de datos, los recursos computacionales y la experiencia del investigador. En este contexto, también resulta relevante el papel de las herramientas de optimización, entre las que destacan MATLAB, Octopus y Wallacei X, con tasas de uso del 34,0 %, 27,6 % y 17,0 %, respectivamente. Otras herramientas reportadas incluyen Galapagos (5,3 %), GenOpt (4,2 %), jEPlus (3,1 %), Khepri (3,1 %), ModeFRONTIER (2,1 %) y ANSYS (1,0 %).

Tabla 9.

Características computacionales clave de los algoritmos evolutivos aplicados a la optimización del diseño multiobjetivo

Año	Algoritmo	Concurrencia / Nube*	Frente de Pareto ¹	Multiobjetivo ²	Compatibilidad	Estocástica ⁴	Global ⁵	Evolutivo ⁶	Elitismo ⁷
1943	ANN	4 ✓							
1944	LMA	1 Δ							
1975	GA	2 ✓							
1982	GRGOA	1 Δ							
1983	SAN	1 Δ							
1986	MLPANN	1 ✓							
1990	RBFMOpt	2 ✓							
1990	SE	1 Δ							
1995	PSO	1 ✓							
2000	X-means	1 Δ							
2001	SPEA-2	16 ✓							
2002	MOPSO	2 ✓							
2002	NSGA-II	51 ✓							
2007	MOEA/D	1 ✓							
2009	HypE	5 ✓							
2010	GGA	1 ✓							
2014	NSGA-III	3 ✓							

Nota: ¹ Dominio, ² Número de objetivos, ³ Número de herramientas (>5), ⁴ Aleatoriedad, ⁵ Espacio de búsqueda, ⁶ Mecanismo de búsqueda, ⁷ Tipo de selección,

*Nube: se refiere a la compatibilidad con la nube: ✓ = compatible; Δ= menos compatible o rara vez integrado en contextos MOO en la nube.

Basado en Alexakis et al. (2025), Zhang et al. (2024), Machairas et al. (2014) y Wang et al. (2022).

De manera específica, MATLAB se ha consolidado como un entorno de programación ampliamente utilizado para cálculos numéricos en múltiples disciplinas, aunque presenta limitaciones en términos de visualización tridimensional (The Math Works Inc, 2024). En los estudios revisados, el 53,1 % emplea NSGA-II, el 12,5 % utiliza ANN y el 9,3 % implementa NSGA-III, mientras que el 25,1 % restante integra algoritmos como MOPSO, RBFMOpt, MLPANN, X-means y MOEA/D. Por su parte, Octopus, desarrollado para su integración con Grasshopper, se basa principalmente en los algoritmos HypE y SPEA-2, aunque también admite

NSGA-II y GA, permitiendo identificar soluciones que equilibran múltiples objetivos definidos por el usuario (Vierlinger, 2018). Wallacei X, en tanto, funciona como un motor evolutivo especializado en optimización multiobjetivo dentro de Grasshopper, empleando principalmente NSGA-II e incorporando algoritmos de agrupamiento como K-means para el análisis posterior de soluciones (Makki et al., 2019). Finalmente, Galapagos opera como una herramienta de optimización de un solo objetivo, utilizando algoritmos como GA, GGA, SA y NSGA-II, y facilitando la exploración de soluciones óptimas o cuasi óptimas en problemas de diseño paramétrico (Rutten, 2010).

Durante la última década, los modelos MOO basados en la plataforma Rhino–Grasshopper, en conjunto con EnergyPlus y Radiance, han sido ampliamente adoptados en estudios de modelado energético y simulación de iluminación natural. Esta adopción se atribuye a su compatibilidad con flujos de trabajo paramétricos y a la integración con los complementos Ladybug y Honeybee, los cuales permiten evaluar de manera detallada el impacto de los parámetros de diseño sobre el desempeño energético y ambiental, así como identificar conjuntos de soluciones que conforman el frente de Pareto.

2.4.1.1. Algoritmo NSGA-II

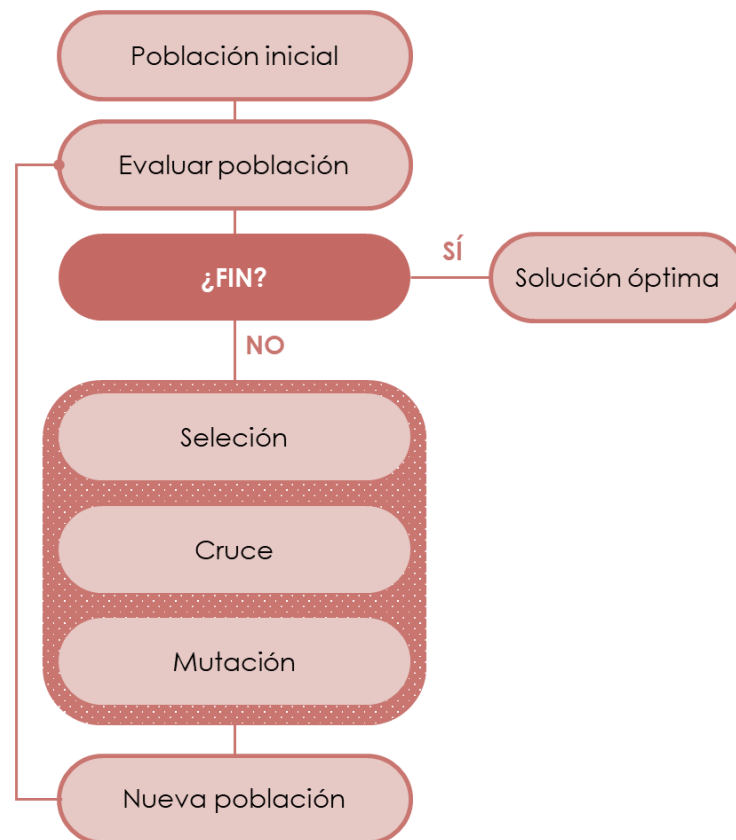
El algoritmo evolutivo de clasificación no dominada II (NSGA-II), desarrollado por Deb, Agrawal, Pratap y Meyarivan en el año 2000, se ha consolidado como uno de los enfoques más difundidos y validados en la literatura científica sobre optimización multiobjetivo. Este algoritmo surge como una evolución del NSGA original, incorporando mejoras orientadas a reducir la complejidad computacional, preservar la diversidad poblacional y garantizar mecanismos de elitismo (Deb, 2001).

Desde el punto de vista teórico, el NSGA-II se basa en el principio de dominancia de Pareto, mediante el cual una solución se considera no dominada cuando no existe otra que mejore simultáneamente todos los objetivos del problema. A partir de este criterio, la población se clasifica en distintos frentes de Pareto, priorizando aquellas soluciones que representan los compromisos más equilibrados entre objetivos en conflicto, sin imponer jerarquías previas (Deb et al., 2002).

Una de las principales aportaciones del NSGA-II es la incorporación explícita de un mecanismo de elitismo, que permite conservar las mejores soluciones a lo largo de las generaciones. Este mecanismo se implementa mediante la combinación de poblaciones parentales y descendientes, seguida de un proceso de selección basado tanto en el ordenamiento no dominado como en la distancia de *crowding*, criterio que asegura la preservación de la diversidad dentro de cada frente. De este modo, el algoritmo evita la convergencia prematura y favorece una distribución homogénea de soluciones en el espacio de objetivos (Deb et al., 2002).

El funcionamiento del NSGA-II (ver Figura 15) se estructura como un proceso evolutivo iterativo, en el que una población inicial es evaluada mediante múltiples funciones objetivo y sometida a operadores genéticos de cruce y mutación. A lo largo de sucesivas generaciones, el algoritmo converge hacia un frente de Pareto estable y bien distribuido, que representa los compromisos óptimos entre los objetivos analizados (Park et al., 2020).

Figura 15
Flujo de trabajo del algoritmo NSGA-II



En el ámbito de la arquitectura y el urbanismo, el NSGA-II ha sido ampliamente utilizado para la optimización de la forma urbana, la configuración de cañones urbanos y el desempeño energético de edificaciones. Diversos estudios han documentado su eficacia para equilibrar densidad urbana, confort térmico y consumo energético bajo restricciones normativas y contextuales diversas (Alvarado et al., 2005; Correa et al., 2008). Investigaciones recientes incluyen la optimización de la orientación solar de edificios multifamiliares en Brasil (Benincá et al., 2023), el diseño de sistemas energéticos basados en datos (Qu et al., 2023) y la optimización del diseño de atrios en climas con veranos calurosos e inviernos fríos (Xiao et al., 2023).

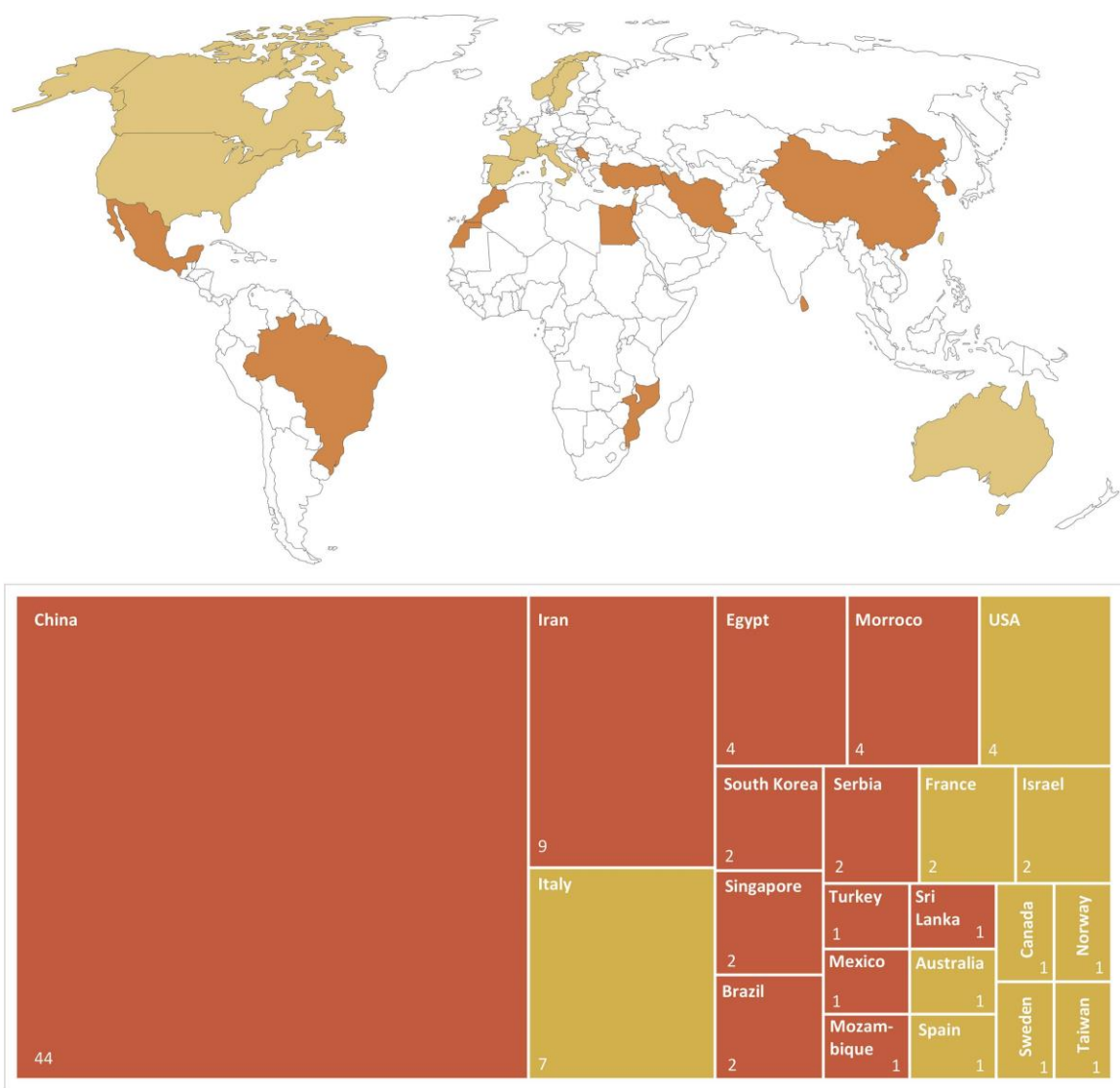
2.4.2. Patrones geoespaciales presentes en el diseño y la optimización urbana orientados al rendimiento

Esta sección aborda el estado actual del arte y la distribución global de la investigación. Según los datos presentados en Figura 16, 22 países son identificados como los más activos en este campo. Del total de estudios analizados, el 78 % se realizaron en países en desarrollo, destacando China (44, $\pm 46,8$ %), Irán (9, ± 10 %), Egipto (4, $\pm 4,2$ %) y Marruecos (4, $\pm 4,2$ %) como las naciones con mayor número de publicaciones sobre el tema. El 12,8 % restante de estudios son de países como Corea del Sur (2, $\pm 2,1$ %), Brasil (2, $\pm 2,1$ %), Singapur (2, $\pm 2,1$ %), Serbia (2, $\pm 2,1$ %), Turquía (1 $\pm 1,1$ %), México (1, $\pm 1,1$ %), Mozambique (1, $\pm 1,1$ %) y Sri Lanka (1, $\pm 1,1$ %). En contraste, el 22 % de las publicaciones revisadas provienen de economías desarrolladas, con Italia y EE. UU. contribuyendo con el 7 % (7 estudios) y el 4 % (4 estudios), respectivamente. El 11 % restante proviene de países como Francia (2, $\pm 2,1$ %), Israel (2, $\pm 2,1$ %), Australia (1, ± 1 %), España (1, $\pm 1,1$ %), Canadá (1, $\pm 1,1$ %), Noruega (1, $\pm 1,1$ %), Suecia (1, $\pm 1,1$ %) y Taiwán (1, $\pm 1,1$ %).

Los modelos MOO se han convertido en herramientas esenciales en el diseño urbano orientado al rendimiento, permitiendo a los diseñadores abordar objetivos de diseño múltiples, a menudo conflictivos, sin comprometer las metas establecidas (Showkatbakhsh & Makki, 2022). En países en desarrollo como China, la rápida urbanización y la expansión descontrolada han llevado a una mayor dependencia de los modelos MOO. La investigación en este contexto se centra principalmente en estrategias para mitigar efectos adversos como la UHI, mejorar el confort térmico y optimizar la eficiencia energética en ciudades de alta densidad. Por ejemplo,

los enfoques MOO se han implementado para apoyar a los tomadores de decisiones en sus esfuerzos por desarrollar entornos urbanos más verdes y compactos (Wicki et al., 2021). Las importantes contribuciones de China, Irán, Egipto y Marruecos a la investigación científica resaltan el papel crucial de la optimización urbana en la gestión del crecimiento y la minimización de los impactos ambientales en estos países, donde los enfoques de planificación tradicionales a menudo han demostrado ser insuficientes.

Figura 16
Jerarquía de países en los ámbitos de investigación contemporáneos y número de publicaciones por país



Nota. Las economías en desarrollo se muestran en naranja, mientras que las economías desarrolladas se representan en amarillo

Por ejemplo, Wu et al. (2024) realizaron un estudio para optimizar el confort térmico, la iluminación natural y el consumo de energía en edificios residenciales en China. Sus hallazgos revelaron una reducción del 44,1 % en el consumo de energía, una disminución del 10,9 % en el índice de confort térmico y una mejora del 1,7 % en la iluminación natural. De manera similar, Talaei y Sangin (2024) optimizaron el EUI, la exposición solar anual y la iluminación natural en las envolventes de los edificios de las instalaciones educativas en Irán, un país con climas mediterráneos, semiáridos y desérticos. Analizaron variables de diseño como el WWR y los sistemas fijos de sombreado externo. Los resultados demostraron reducciones en los tres objetivos e indicaron que las lamas horizontales superaron a otros sistemas de sombreado en la minimización de la exposición solar anual.

En contraste, los países desarrollados realizan menos estudios en este campo debido a la presencia de regulaciones urbanas avanzadas e infraestructura consolidada, lo que reduce la necesidad de modelos de optimización a gran escala. La investigación en estos países se ha centrado principalmente en la eficiencia energética de los edificios, la planificación urbana inteligente y la integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial y el análisis de big data. Italia y Estados Unidos lideran la producción científica en este ámbito, con estudios orientados a la reducción del consumo energético y la optimización de barrios en ciudades ya consolidadas (Mazzoli et al., 2023); a diferencia de los países en desarrollo, donde la optimización urbana se aplica a zonas de reciente expansión.

Esta distinción en la investigación y aplicación de los modelos MOO sugiere que mientras los países en desarrollo priorizan soluciones pragmáticas a los desafíos urbanos críticos, los países desarrollados se centran en la exploración científica y la mejora gradual de los sistemas urbanos. Además, los países en desarrollo tienen mayor flexibilidad para implementar estrategias de optimización, ya que proporcionan más oportunidades para la experimentación en la expansión de áreas urbanas. Por el contrario, los países desarrollados enfrentan regulaciones urbanas más estrictas que restringen modificaciones significativas a la morfología urbana.

2.4.3. Tendencias de investigación en los objetivos de optimización

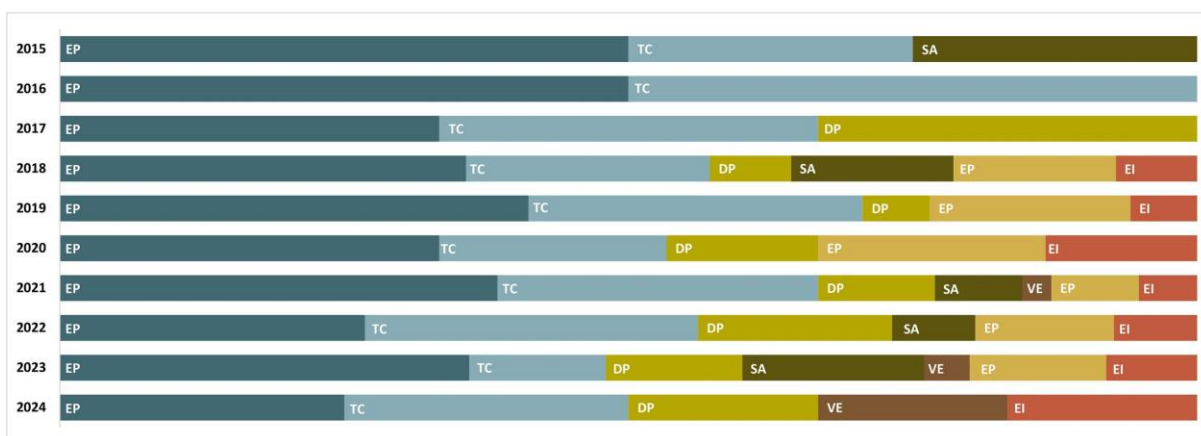
La Figura 17 ilustra las tendencias históricas recientes en la investigación relacionada con los objetivos de optimización, evaluando el número de publicaciones por año en siete

categorías: “Rendimiento energético” (EP), “Confort térmico” (TC), “Rendimiento de luz natural” (PD), “Accesibilidad solar” (SA), “Ventilación” (VE), “Rendimiento económico” (EcP) e “Impacto ambiental” (EI). Se observa que, en 2015, los objetivos más recurrentes fueron *EP*, *TC* y *SA*, representando el 50 %, 25 % y 25 % de las publicaciones anuales, respectivamente. En 2016, el enfoque se centró únicamente en *EP* y *TC*, cada uno representando el 50 % del total. En 2017, *EP*, *TC* y *DP* se convirtieron en los objetivos predominantes, cada uno representando el 33,3 % de las publicaciones. Ese mismo año, los estudios que enfatizaban *DP* ganaron prominencia, aunque disminuyeron en 2018 y 2019, pero resurgieron en 2020.

En 2018, hubo un interés notable en *EP* (35,71 %) y *TC* (21,42 %), junto con otros objetivos como *DP* (7 %), *SA* (14,2 %), *EcP* (7 %) y *EI* (14,2 %). *EcP* y *EI* comenzaron a recuperar interés durante este período. En 2019, se prestó especial atención a *EP* (41 %) y *TC* (29,4 %), mientras que otros objetivos explorados incluyeron *DP* (5,8 %), *EcP* (18 %) y *EI* (5,8 %). En 2020, los objetivos predominantes fueron *EP* (33,3 %), *TC* (20 %), *DP* (13,3 %), *EcP* (20 %) y *EI* (13,3 %). Para 2021, los investigadores se centraron en *EP* (38,4 %), *TC* (28,2 %), *DP* (10,2 %), *SA* (7,6 %), *VE* (2,5 %), *EcP* (7,6 %) y *EI* (5,1 %). En 2022, *TC* (29,2 %) y *EP* (26,8 %) lideraron, seguidos de *DP* (17 %), *SA* (7,3 %), *EcP* (12,1 %) y *EI* (7,3 %).

Figura 17

Tendencias de investigación en objetivos de optimización (2015-2024)



En 2023, *EP* dominó con 36 %, mientras que *TC* (12 %), *DP* (12 %), *SA* (16 %), *VE* (4 %), *EcP* (12 %) y *EI* (8 %) también se consideraron. Finalmente, en 2024, los objetivos más destacados fueron *EP* y *TC*, cada uno representando el 25 %, seguidos de *DP*, *VE* y *EI*, cada uno con 16,6 %. Estos resultados demuestran una clara tendencia hacia la optimización del

rendimiento energético y el confort térmico durante los años analizados. Enfatizando la importancia de la eficiencia energética y la calidad ambiental en el diseño y la planificación urbana contemporánea.

2.4.4. Métricas de desempeño urbano

En este sentido, la Tabla 10 proporciona una descripción detallada de las métricas de desempeño utilizadas en la investigación examinada sobre MOO. Estos estudios se concentran en evaluar el desempeño urbano en cuatro dimensiones principales: “Energía”, “Medio ambiente”, “Costo” y “Diseño urbano”. En el ámbito de *EP*, el enfoque principal está en el consumo de energía de los edificios. Las métricas asociadas incluyen tanto la demanda de energía como el EUI en áreas como refrigeración, calefacción y consumo total de energía. Talaei y Sangin (2024) desarrollaron un marco MOO para evaluar el EUI considerando una amplia gama de parámetros de diseño y desempeño de edificios. De manera similar, Ibrahim et al. (2021) examinaron la influencia de las características morfológicas de tres tipologías de bloques en el EUI, evaluando 3430 configuraciones geométricas hipotéticas que incorporaron una serie de indicadores y parámetros de diseño.

Los hallazgos indicaron una correlación significativa entre los parámetros de diseño y el desempeño con respecto al consumo de energía y el confort térmico. En otro estudio, Benincá et al. (2023) evaluaron la forma y la orientación de dos edificios residenciales multifamiliares en el sur de Brasil, con el objetivo de minimizar las demandas de refrigeración y calefacción. Los resultados mostraron que mejorar la orientación solar podría reducir el consumo energético total en un 22 % en diseños lineales.

Los estudios de PUDO relacionados con el “Medio ambiente” se centran en diversas áreas, incluyendo *TC*, *DP*, *SA*, *VE* y *EI*. *TC* se evalúa utilizando varios índices, como PMV, PPD, UTCI, CTR, PET y TDR. Bagheri y Dehghan (2022) utilizaron el índice PPD para maximizar la comodidad térmica en edificios residenciales, mientras que Wang et al. (2021) optimizaron el rendimiento térmico exterior utilizando el índice UTCI para edificios residenciales de gran altura en China. Ibrahim et al. (2021) demostraron que ajustar la relación altura-ancho y la orientación de los cañones urbanos podría reducir el UTCI en casi 6 °C en climas cálidos y áridos.

Tabla 10

Métricas de desempeño urbano por objetivo de optimización

Categoría	Objetivo de optimización	Métrica de rendimiento urbano
Energía	Rendimiento energético (EP)	Intensidad de uso de energía (EUI) Intensidad de uso de energía para refrigeración (CEUI) Intensidad de uso de energía para calefacción (HEUI) Carga energética (EL)
Medio ambiente	Confort térmico (TC)	Porcentaje de insatisfacción predicho (PPD) Voto medio predicho (PMV) Tasa de incomodidad térmica (TDR) Relación de tiempo de confort (CTR) Índice universal de confort térmico UTCI) Índice de temperatura equivalente fisiológica (PET)
	Rendimiento lumínico (DP)	Exposición solar anual (aSE) Autonomía de luz natural (DA) Factor de luz natural (DF) Autonomía espacial de luz natural (sDA) Iluminación útil de luz natural (UDI)
	Accesibilidad solar (SA)	Horas de luz solar (HS) Orientación solar (SO) Exposición solar
	Ventilación (VE)	Tasa de renovación del aire (ACR) Eficiencia de renovación del aire (AEE) Efectividad de la ventilación natural (NVE)
	Impacto ambiental (EI)	Emisiones de CO ₂ Índice de huella de carbono (CF) Reducción de carbono para energía renovables (CRRE)
Costo	Rendimiento económico (EcP)	Costo de ciclo de vida (LCC) Costo global de construcción (GC) Costo de inversión (IC) Costo de la envolvente del edificio (BEC) Costo energético anual (AEC)
Diseño urbano	Diseño urbano (UD)	Coefficiente de sombra Superficie total construida

Los objetivos relacionados con el rendimiento lumínico incluyen métricas como sDA, DF, DA, aSE y UDI. Sun et al. (2020) implementaron un flujo de trabajo para optimizar sDA y UDI en un edificio de biblioteca pública en Changchun, China, logrando aumentos de hasta un 11 % y un 4,7 %, respectivamente. De manera similar, Mo et al. (2022) emplearon métricas UDI, DF y DA para evaluar seis aulas orientadas de este a oeste en la Universidad de Shanghai, China, y observaron mejoras en UDI. Khani et al. (2022) establecieron que la orientación del edificio, los diferentes dispositivos de sombreado y las configuraciones de diseño de ventanas

redujeron el consumo de energía para calefacción, refrigeración e iluminación eléctrica, y mejoraron los valores de UDI.

La accesibilidad solar (SA) es un aspecto crítico del desempeño urbano, impactando significativamente el consumo de energía, el confort térmico exterior, el confort visual interior y la iluminación. Las métricas *SA* incluyen HS, orientación solar y exposición solar. Jayaweera et al. (2021) optimizaron el acceso solar para edificios residenciales de gran altura en áreas urbanas tropicales, logrando ahorros anuales de energía que van del 8 % al 12 % en la orientación norte-sur y del 28 % al 36 % en las direcciones este-oeste. Las métricas de ventilación se enfocan en la tasa de cambio de aire, la eficiencia de intercambio de aire y la efectividad de ventilación natural.

En la creciente búsqueda de la descarbonización del entorno construido, apoyada por varias iniciativas recientes, las emisiones de CO₂, el índice de huella de carbono y la reducción de carbono para energía renovable han surgido como métricas esenciales para evaluar la *EI*. Además, algunos estudios se centran en optimizar el *EcP* de los edificios utilizando métricas como el costo del ciclo de vida, el costo global de construcción, el costo de inversión, el costo energético anual y el costo de la envolvente del edificio (BEC).

Otros estudios han tenido como objetivo optimizar el diseño urbano (UD) para maximizar el coeficiente de forma y el área total del piso, lo que refleja una variedad de enfoques y consideraciones en la investigación actual sobre diseño urbano impulsado por el rendimiento y optimización. Ciardiello et al. (2020a) se centraron en optimizar la forma y la envoltura del edificio, demostrando que la optimización geométrica puede llevar a una reducción de hasta el 60% en la demanda anual de energía. Liu et al. (2023) examinaron la influencia de la forma urbana en el potencial de energía solar y el consumo de energía de los edificios en bloques residenciales en Jianhu, China, mediante la optimización de las formas urbanas para maximizar el potencial solar y las horas de luz solar; demostraron que factores como FAR, AF, la relación perímetro-área promedio, la densidad de edificios, el coeficiente de forma, SVF y OSR exhiben correlaciones significativas con el potencial solar.

2.4.5. Métricas de morfología urbana

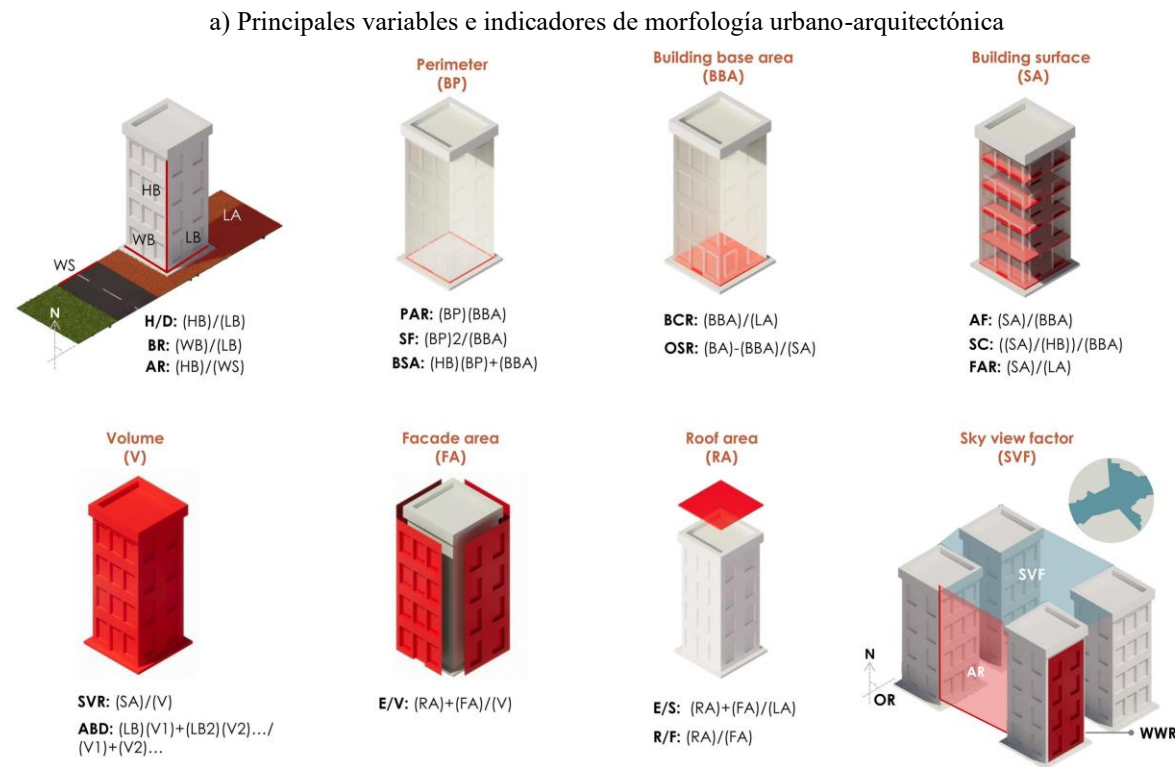
La Figura 18 ofrece una vista detallada de las métricas de morfología urbana mediante dos representaciones visuales complementarias. El gráfico superior (Figura 18a) esquematiza las principales variables e indicadores utilizados en estas métricas, junto con sus correspondientes expresiones matemáticas, ofreciendo una visión general clara de cómo se cuantifican y analizan estos aspectos en la investigación urbana. Simultáneamente, el diagrama de árbol (Figura 18b) clasifica las variables según su dominio en la literatura publicada, lo que proporciona información sobre la prevalencia y el enfoque de los estudios relacionados con estas variables.

Las métricas se organizan según la escala de estudio, lo que facilita un análisis detallado basado en el nivel de investigación requerido. En el contexto de un cañón urbano, se utilizan parámetros como altura (HB), ancho de calle (WS), relación de aspecto (AR), área del lote (LA) y SVF para describir la geometría urbana. Estos parámetros son esenciales para evaluar la interacción entre los edificios y el espacio público, así como para analizar la accesibilidad solar y la ventilación natural en áreas densamente construidas. A escala urbana o de manzana, además de los indicadores mencionados anteriormente, se incorporan métricas como índice de cobertura del edificio (BCR), relación de superficie (FAR), relación de espacio abierto (OSR) y relación envolvente-volumen (E/V) (Ibrahim et al., 2021). Estos indicadores son cruciales para evaluar la densidad de edificación y el uso del suelo, proporcionando un análisis detallado de la eficiencia y sostenibilidad del espacio urbano. La inclusión de estas métricas permite una comprensión integral de cómo las configuraciones urbanas influyen en la eficiencia energética y la calidad ambiental en entornos urbanos.

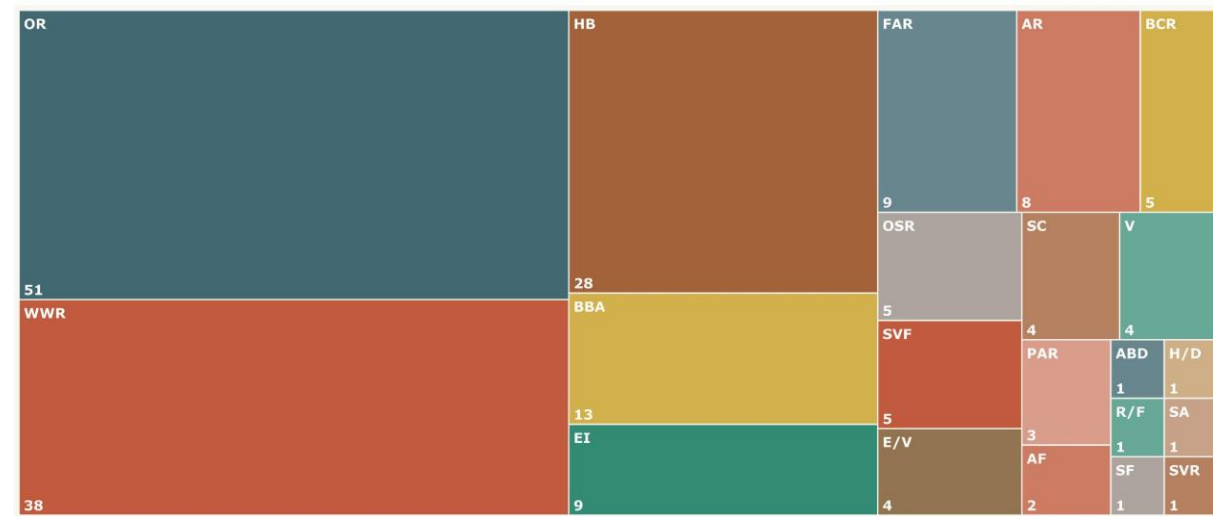
A escala de edificio, el análisis se centra en factores de forma arquitectónicos específicos. Según Manga et al., estos factores incluyen indicadores como el coeficiente de forma (SC), la relación entre el área del techo y la fachada (R/F), HB y orientación (OR) (Mangan et al., 2021a). Por otro lado, Tian y Xu consideran factores adicionales como el factor de forma (SF), superficie del edificio (BSA), relación de edificación (BR), relación envolvente-volumen (E/V) y la relación entre el área de la envolvente y el área del sitio (E/S) (Tian & Xu, 2021). En contraste, Biljecki y Shin se centran en aspectos como perímetro (BP), área del

edificio (BBA), BSA total, Volumen (V), área de la fachada (FA) o área de pared y el área de la envolvente, compuesta por la RA y la FA (Biljecki & Chow, 2022).

Figura 18
Métricas de morfología urbana



b) Diagrama de arbol sobre indicadores de morfología urbana y su prevalencia en la literatura publicada



Nota. El gráfico superior presenta esquemáticamente las variables e indicadores utilizados en las métricas de morfología urbana, junto con sus correspondientes expresiones matemáticas. El diagrama de árbol ilustra las variables involucradas en estas métricas, clasificadas según su prevalencia en la literatura publicada

Con base en una revisión exhaustiva de la literatura, se encontró que OR es el factor de diseño predominante en el 54,2 % de la investigación. En comparación, el 40,4 %, el 29,7 % y el 13,8 % de los estudios se centran en WWR, HB y BBA, respectivamente. Además, el 9,5 % de los estudios emplean métricas relacionadas con el aislamiento de la envoltura (EIN) y el FAR. AR se utiliza en el 8,5 % de la investigación, mientras que el 15,9 % se centra en el OSR, SVF y BCR, representando cada métrica el 5,3 % del total de estudios. El 23,4 % restante cubre varias otras métricas, incluyendo E/V, SC y V, cada una representando el 4,2 % de los estudios. En el 3,1 % de la investigación, el enfoque está en el PAR, mientras que el 2,1 % analiza el AF. Finalmente, el 6,0 % de los estudios se concentran en métricas como el ABD, BSA, R/F, SF, H/D y SVR, representando cada métrica el 1 % del total de estudios analizados.

El análisis revela una preferencia por variables que influyen directamente en la eficiencia energética y la exposición solar de los edificios. Métricas como IE, FAR y AR reflejan un énfasis en la optimización del rendimiento térmico y la densidad de uso del suelo. La inclusión de diversas métricas adicionales, aunque en menor proporción, indica un enfoque multiobjetivo para el diseño de edificios que aborda consideraciones volumétricas y espaciales, así como relaciones geométricas y de cobertura. Este enfoque integral facilita una solución holística a los desafíos del diseño urbano. La integración efectiva de estas métricas en el proceso de diseño es crucial para lograr edificios energéticamente eficientes, ambientalmente sostenibles y económicamente viables.

2.5. Marco normativo

El marco normativo considerado en la presente investigación se articula en torno a dos dimensiones principales que inciden directamente en la formulación y validación de los escenarios prospectivos de redensificación urbana. En primer lugar, la normativa relativa a la densificación vertical de la ciudad, que orienta los lineamientos regulatorios para la transformación del uso de suelo unifamiliar a multifamiliar vertical, considerando los criterios de frentes mínimos de lote, superficie mínima, Coeficiente de Ocupación del Suelo (COS) y Coeficiente de Utilización del Suelo (CUS), definidos en el Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Ensenada (PDUCPE 2024), así como en el Reglamento de Fraccionamientos del Estado de Baja California. En segundo lugar, la normativa asociada a los

reglamentos de construcción, particularmente aquellos aplicables al diseño de edificaciones de tipo condominal, los cuales condicionan el *layout* arquitectónico y la configuración morfológica de los modelos edificatorios a simular. A continuación, se detallan los elementos normativos incorporados en el estudio para cada una de estas dimensiones.

2.5.1. Regulaciones para la Reconfiguración de la Lotificación Urbana en Ensenada

Con el objetivo de establecer un marco normativo que fundamentara la propuesta de redensificación urbana en el área de estudio, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de los lineamientos regulatorios que rigen el desarrollo urbano en la ciudad de Ensenada, Baja California. En una primera etapa, se consultaron los acuerdos para el desarrollo urbano publicados en el Periódico Oficial del Estado de Baja California, lo que permitió identificar el tipo de fraccionamiento correspondiente en cada una de las zonas seleccionadas. A partir de esta clasificación, se procedió a revisar el Reglamento de Fraccionamientos del Estado de Baja California con el fin de establecer los frentes mínimos requeridos para los lotes según el tipo de fraccionamiento identificado.

Posteriormente, se consultó el PDUCPE 2024-2036, el cual proporcionó los valores normativos de COS, CUS y la superficie mínima de lote para el uso de suelo multifamiliar vertical. La integración de estos elementos normativos permitió diseñar la propuesta para la lotificación, transformando un uso de suelo originalmente unifamiliar a uno multifamiliar vertical, asegurando en todo momento el cumplimiento de los límites de ocupación y uso del suelo establecidos por la normatividad vigente. Este procedimiento garantiza que la estrategia de densificación se alinee con las disposiciones legales y contribuya a una morfología urbana más compacta y eficiente. La síntesis de los parámetros normativos utilizados en el rediseño de la lotificación se presenta en la Tabla 11, mientras que las Tabla 12 y Tabla 13 muestran, respectivamente, las intensidades de uso de suelo habitacional unifamiliar y multifamiliar, de acuerdo con los criterios establecidos en el marco normativo vigente.

Tabla 11

Normativa relativa a la densificación vertical de la ciudad

Lineamientos	Objetivo	Referencia
Periódico Oficial del Estado de Baja California	Identificar el tipo de fraccionamiento correspondiente en cada zona de estudio.	https://periodicooficial.ebajacalifornia.gob.mx/oficial/inicioConsulta.jsp
Reglamento de Fraccionamientos del Estado de Baja California	Identificar los frentes mínimos requerido para los lotes según el tipo de fraccionamiento.	Reglamento de Fraccionamientos del Estado de Baja California (1993), capítulo II, artículo 29, pág. 9. (Sánchez Díaz, 1993).
Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Ensenada 2024 - 2036	Identificar valores normativos de COS, CUS y superficie mínima de lote para uso de suelo multifamiliar vertical.	Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Ensenada 2024 - 2036 (PDUCP 2024). Tabla 62, pág. 110.

Tabla 12

Intensidad de uso de suelo habitacional unifamiliar

Densidad	Densidad baja		Densidad Media	Densidad alta
Parámetros	Campestre	Habitacional unifamiliar baja	Habitacional unifamiliar media	Habitacional unifamiliar alta
Densidad máxima en habitantes por hectáreas	15	78	119	182
Densidad máxima en viviendas por hectáreas	4	21	32	49
Superficie mínima de lote	1600 m ²	300 m ²	190 m ²	120 m ²
Coefficiente de ocupación del suelo (COS)	0.30	0.62	0.61	0.75
Coefficiente de utilización del suelo (CUS)	0.60	1.24	1.22	1.50

Nota: Obtenido del “Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Ensenada 2030 (PDUCP 2030)”. Tabla 61.

Tabla 13

Intensidad de uso de suelo habitacional multifamiliar

Densidad	Densidad baja	Densidad Media	Densidad alta
Parámetros	Habitacional multifamiliar baja	Habitacional multifamiliar media	Habitacional multifamiliar alta
Densidad máxima en habitantes por hectáreas	119	260	500
Densidad máxima en viviendas por hectáreas	32	70	135
Superficie mínima de lote	350 m ²	230 m ²	180 m ²
COS	0.50	0.60	0.50
CUS	2.00	3.00	5.00

Nota: Obtenido del “Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Ensenada 2030 (PDUCP 2030)”. Tabla 62.

2.5.2. Normativas para el diseño de edificaciones condominales

Como parte del análisis normativo para el diseño de escenarios de redensificación con uso habitacional multifamiliar vertical, se revisaron el Reglamento de la Ley de Edificaciones para el Municipio de Ensenada y el Reglamento del Régimen de Condominios para el Municipio de Ensenada. La finalidad de esta revisión fue establecer las dimensiones y características mínimas requeridas para los espacios habitables en viviendas bajo régimen multifamiliar, asegurando el cumplimiento de los estándares de habitabilidad y funcionalidad exigidos por la normativa local. En particular, se identificaron las dimensiones mínimas de los espacios interiores (como recámaras, baños, cocinas, estancias y cuartos de servicios) (Tabla 14), así como los criterios mínimos de diseño para escaleras y circulaciones verticales. Asimismo, el reglamento de edificaciones proporcionó los lineamientos para la configuración de cajones de estacionamiento, incluyendo tanto las dimensiones mínimas por unidad como el número mínimo requerido en zonas habitacionales, en función del número de viviendas proyectadas (Tabla 15).

Tabla 14

Dimensiones y características mínimas de los espacios

Tipo de edificación	Espacio	Área mínima entre muros (m ²)	Lado menor libre en metros	Altura mínima libre en metros
Vivienda unifamiliar, multifamiliar y mixta	Recámaras	7.29	2.70	2.30
	Sala o estancia	7.29	2.70	2.30
	Comedor	7.29	2.70	2.30
	Alcoba	4.59	1.70	2.30
	Cocina	3.75	1.50	2.30
	Baños y sanitarios	3.00	1.20	2.30
	½ baño	1.54	0.80	2.10
	Cuato de lavado	2.88	1.60	2.10
	Estancia-comedor-cocina	17.01	2.70	2.40
	Sala-comedor	14.31	2.70	2.40

Nota: Obtenido del "Reglamento de la Ley de Edificaciones para el municipio de Ensenada". Artículo 76, pág. 15. Ayuntamiento Ensenada, (2007).

Por otra parte, el Reglamento del Régimen de Condominios (Gobierno del Estado de Baja California, 2018) fue clave para determinar el porcentaje del predio que debe destinarse a áreas de uso común, aspecto esencial en el diseño de edificaciones de alta densidad que comparten infraestructura y servicios colectivos. De acuerdo con el Artículo 13 de dicho reglamento, *"el porcentaje destinado a áreas de uso común generales para recreación y áreas verdes no podrá ser inferior al 10% del área vendible del conjunto condominal..."* (p. 12). Los

criterios normativos derivados de ambos reglamentos fueron integrados en el diseño arquitectónico de las plantas tipo, garantizando que las propuestas de edificación cumplieran con los requerimientos mínimos de habitabilidad, funcionalidad y operación.

Tabla 15

Dimensiones mínimas de cajones de estacionamiento

	Tipos de vehículos		
	Compacto	Regular	Persona con discapacidad
Ancho	2.40	2.65	3.80
Longitud	4.80	5.40	5.40

Nota: Artículo 117. Dimensiones mínimas de cajones de estacionamiento: se deberá de proveer al menos un cajón de estacionamiento para todas y cada una de las viviendas de tipo multifamiliar” (p. 37).Obtenido del “Reglamento de la Ley de Edificaciones para el municipio de Ensenada”. Artículo 115, pág. 36 y 37. Ayuntamiento Ensenada, (2007).

2.6. Dominios de conocimiento integrados

Dado que el sobrecalentamiento urbano, la pobreza energética y la morfología urbano-arquitectónica constituyen fenómenos intrínsecamente complejos y multidimensionales, esta investigación se estructura a partir de cuatro Dominios de Conocimiento Integrados (DCI). Los DCI se entienden como conjuntos estructurados de saberes, enfoques analíticos y herramientas metodológicas provenientes de diversas áreas del conocimiento que, al integrarse, permiten abordar el objeto de estudio desde una perspectiva sistémica, capturando las interdependencias entre la forma urbana, el microclima, la eficiencia energética y vulnerabilidad socioambiental (Alexander, 2003; Repko & Szostak, 2020).

Los cuatro dominios que conforman este marco son: i) el dominio metodológico (diseño evolutivo), que constituye la base operativa del estudio; ii) el dominio energético, que representa la dimensión evaluativa de los resultados; iii) el dominio urbano-arquitectónico, que define el espacio morfológico de configuraciones posibles; y iv) el dominio climático-ambiental, que contextualiza el análisis bajo condiciones actuales y futuras de cambio climático.

I. Dominio Metodológico (Diseño Evolutivo)

Este dominio constituye el núcleo operativo de la investigación. Integra los principios y herramientas del diseño evolutivo, la optimización multiobjetivo y los algoritmos genéticos, para explorar de manera sistemática un amplio espectro de configuraciones morfológicas posibles. Su función es habilitar un proceso iterativo de exploración, selección y jerarquización de alternativas que serían inaccesibles mediante métodos tradicionales de diseño o análisis urbano.

II. Dominio Energético (Micro/Edificio)

Representa el eje de evaluación del desempeño térmico-energético de las configuraciones simuladas. Este dominio permite cuantificar el impacto de la forma urbano-arquitectónica en el consumo energético, así como estimar la pobreza energética presente y futura de los hogares, lo que constituye un aporte central para el análisis socioambiental del estudio.

III. Dominio Urbano-Arquitectónico (Meso/Micro)

Este dominio aborda la configuración física del entorno construido, incluyendo la morfología urbano-arquitectónica y la regulación del crecimiento urbano por densificación. Aquí se definen las variables de decisión y restricciones utilizadas en los modelos evolutivos, por lo que funciona como interfaz entre la realidad urbana y el modelo de optimización. Su integración permite analizar cómo las políticas vigentes de densificación y los parámetros morfológicos del cañón urbano influyen en el desempeño térmico-energético. De esta manera, este dominio constituye el puente crítico entre la normativa, la forma urbana resultante y los efectos térmicos asociados.

IV. Dominio Climático-Ambiental (Macroclimático)

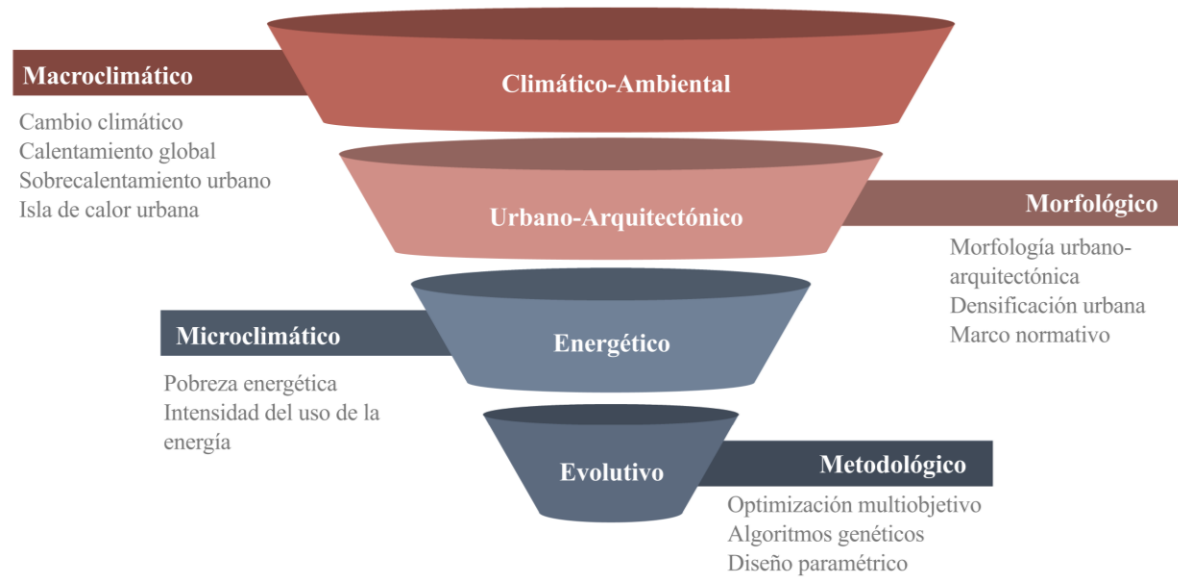
El dominio climático-ambiental proporciona el contexto macroclimático y microclimático necesario para interpretar adecuadamente los resultados. Incluye fenómenos como el cambio climático, el calentamiento global, el sobrecalentamiento urbano, la ICU y las condiciones microclimáticas locales. Este dominio no solo establece las condiciones externas bajo las cuales se evalúan los escenarios de optimización, sino que también permite proyectar su comportamiento hacia el futuro mediante el escenario crítico de altas emisiones (A2) perteneciente al cuarto reporte de evaluación (AR4) del IPCC. Al integrarse con los demás dominios, introduce la dimensión temporal y ambiental que enmarca al estudio.

La Figura 19 presenta el esquema conceptual de los DCI organizados mediante un diagrama de embudo que refleja la jerarquía lógica y causal de los fenómenos estudiados. En la parte superior se sitúa el dominio Climático-Ambiental, correspondiente a la escala macroclimática, que actúa como el determinante externo que condiciona las respuestas térmicas del sistema urbano. En un nivel intermedio se ubica el dominio Urbano-Arquitectónico, asociado a la escala morfológica, donde la configuración del cañón urbano, los procesos de densificación y el marco normativo vigente modulan la exposición térmica local y las interacciones entre clima y morfología.

El siguiente nivel corresponde al dominio Energético, vinculado a la escala microclimática, encargado de integrar los efectos directos de la morfología y del clima sobre la demanda de energía para enfriamiento y los indicadores de pobreza energética. Finalmente, en

la base del embudo se encuentra el dominio Metodológico-Evolutivo, donde convergen las técnicas de optimización multiobjetivo, los algoritmos genéticos y el diseño paramétrico, operando como el mecanismo integrador que permite modelar, evaluar y proyectar escenarios morfológicos bajo condiciones climáticas actuales y futuras.

Figura 19
Dominios de conocimiento integrados



El orden descendente del esquema no solo representa la dependencia jerárquica entre escalas (del macroclima al nivel edificio), sino también la estructura epistemológica general de la tesis, en la cual el diseño evolutivo constituye el punto de síntesis que articula los dominios previos para generar evaluaciones prospectivas del desempeño térmico-energético y del riesgo de pobreza energética.

CAPÍTULO 3. MÉTODO

3.	Método.....	77
3.1.	Diseño de la investigación.....	77
3.2.	Diseño del experimento	83
3.3.	Análisis espacial de la vulnerabilidad térmica-energética.....	93
3.4.	Campaña de monitoreo in situ	108
3.5.	Modelo paramétrico urbano-arquitectónico	122
3.6.	Optimización multiobjetivo	138
3.7.	Evaluación térmico energética y estimación del riesgo de pobreza energética..	144

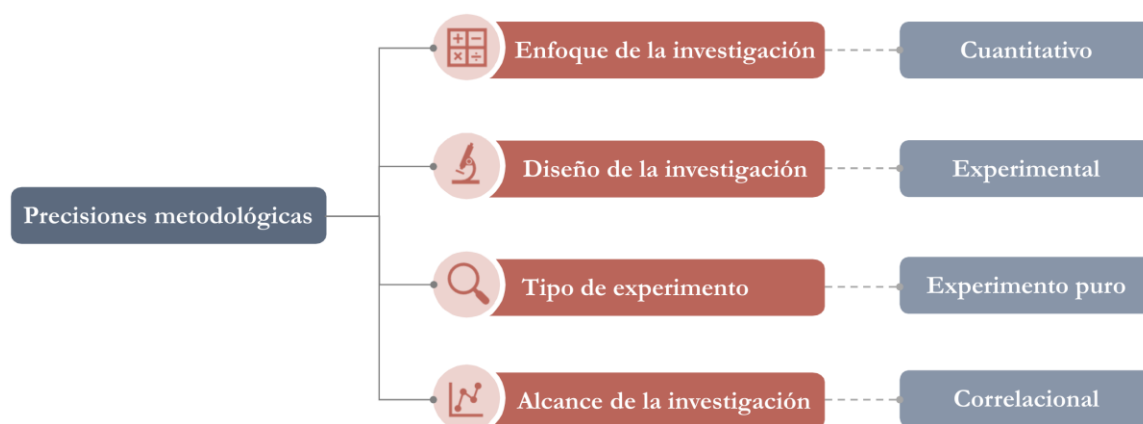
3. Método

3.1. Diseño de la investigación

De acuerdo con Hernández et al. (2014), el diseño de la investigación constituye un plan estratégico que el investigador formula con el objetivo de alcanzar los propósitos del estudio, responder a las preguntas de investigación y poner a pruebas las hipótesis formuladas. En el marco de la presente investigación, se adoptó un enfoque de carácter cuantitativo, con un alcance correlacional en consonancia con la naturaleza experimental del estudio y las variables que se analizaron. Una vez definido el enfoque metodológico, se procedió a establecer el diseño de la investigación. Conforme a la tipología propuesta por Hernández et al., este estudio se clasifica dentro de los diseños experimentales, en particular, dentro de la categoría de experimento puro. Este tipo de diseño es frecuentemente empleado en investigaciones de alcance correlacional y se caracteriza por las siguientes condiciones: i) la manipulación deliberada de variables independientes —en este caso, la morfología urbano-arquitectónica—; ii) la medición precisa de las variables dependientes —consumo energético—; iii) la implementación de escenarios comparativos que permiten evaluar condiciones de contraste y equivalencia; iv) el control riguroso de los factores experimentales que aseguran la validez interna y externa del estudio; y v) el control absoluto de variables externas al experimento que pudieran interferir en los resultados. En este contexto, la Figura 20 presenta una síntesis de las precisiones metodológicas asociadas al diseño experimental implementado en la investigación.

Figura 20

Precisiones metodológicas para el diseño de la investigación



Nota. Elaborado a partir de *Metodología de la Investigación*, por Hernández et al. (2014, p. 127)

En el marco de la evaluación prospectiva basada en simulación paramétrica, la validez interna del estudio se garantizó mediante el control explícito de las variables independientes asociadas a la morfología urbano-arquitectónica, manteniendo constantes las variables no objeto de análisis (sistemas constructivos, cargas internas, horarios de uso, parámetros operativos y tarifarios) dentro de un entorno de simulación computacional. Por su parte, la validez externa se abordó a partir de la construcción de escenarios normativamente viables y tipologías edificatorias representativas del contexto urbano de Ensenada, bajo el supuesto de que los resultados no buscan una generalización directa, sino la generación de evidencia técnica contextualizada. No obstante, la estructura metodológica propuesta presenta un alto grado de replicabilidad, lo que permite su aplicación en otros contextos urbanos con condiciones climáticas, morfológicas y socioenergéticas comparables, siempre que se realicen los ajustes contextuales correspondientes.

3.1.1. Procedimiento metodológico

El proceso metodológico desarrollado en este estudio, sintetizado en la Figura 21, se estructuró en seis fases secuenciales que permiten abordar de manera integrada los objetivos de investigación.

Fase I. Análisis espacial de vulnerabilidad térmica-energética

En esta primera fase, se llevó a cabo un análisis espacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el propósito de identificar y evaluar los niveles de vulnerabilidad térmica-energética en la ciudad de Ensenada. Para ello, se integraron datos sociodemográficos y geospaciales provenientes del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a nivel de Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB). Este análisis fue complementado con la generación de índices espectrales derivados de imágenes satelitales, lo cual permitió caracterizar condiciones térmicas superficiales. Con base en estos resultados, se seleccionaron dos AGEB con características contrastantes: una con un nivel de vulnerabilidad muy alto y otra con vulnerabilidad muy baja. La selección consideró indicadores claves, tales como el grado de vulnerabilidad al calor, la densidad poblacional y la proporción de adultos mayores (> 60 años).

Fase 2. Campaña de monitoreo in situ

En la segunda fase se implementó una campaña de monitoreo microclimático mediante estaciones meteorológicas y sensores de temperatura instalados en campo. Se registraron variables de temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, complementadas con fotografías hemisféricas utilizadas para el cálculo del SVF. Los datos obtenidos contribuyeron a la identificación y delimitación de los cañones urbanos representativos que serían objeto de modelación y optimización.

Fase 3. Modelo paramétrico urbano-arquitectónico

Una vez delimitados los cañones urbanos, se desarrolló un modelo paramétrico urbano-arquitectónico por medio de una plataforma computacional asistida por algoritmos (Grasshopper) y un visualizador 3D (Rhinceros), los cuales constituyen la base computacional para la optimización evolutiva. El modelo integra: i) la geometría morfológica ajustable, incluyendo altura edificatoria, orientación de huellas y dimensiones de las ventanas; y ii) la configuración energética unificada, necesaria para las simulaciones tanto en la etapa de optimización como en las evaluaciones prospectivas. Durante esta etapa, se definieron calendarios de ocupación, cargas internas, perfiles de equipos e iluminación, tasas de ventilación e infiltración, sistemas HVAC representativos y puntos de ajuste de enfriamiento y calefacción, siguiendo criterios de Honeybee y estándares ASHRAE. Estos parámetros se mantuvieron constantes en todas las simulaciones para garantizar comparabilidad entre escenarios.

Asimismo, se incorporaron restricciones normativas derivadas del PDUCP y del Reglamento de Edificaciones, con el fin de asegurar que la generación de escenarios optimizados se realizara estrictamente dentro del marco regulatorio vigente. De acuerdo con los alcances definidos, en esta etapa se empleó exclusivamente el clima presente, sin contemplar escenarios climáticos futuros.

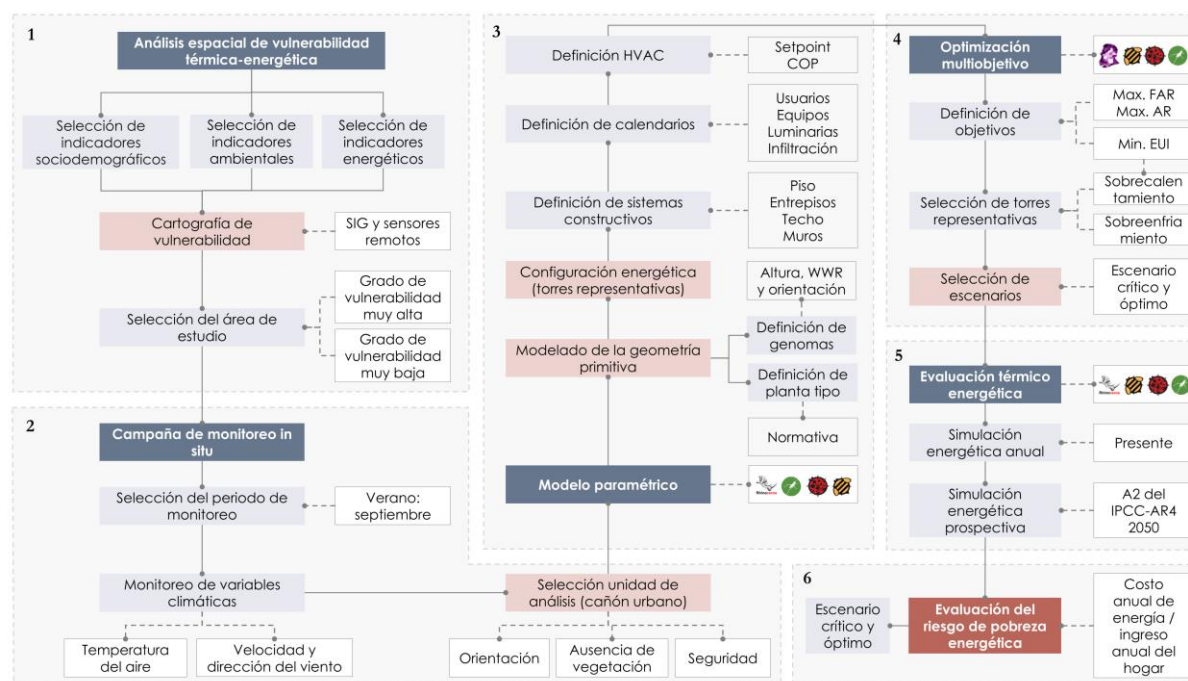
Fase 4. Optimización multiobjetivo

En esta fase se implementó el algoritmo evolutivo NSGA-II mediante el motor evolutivo Wallacei, acoplado con simulaciones ambientales (Ladybug) y energéticas (Honeybee). Se exploró un amplio espacio de soluciones morfológicas con el fin de optimizar simultáneamente indicadores urbano-arquitectónicos, como la relación vano-macizo, la relación

de superficie y la relación de aspecto, junto con una métrica energética: la Intensidad de Uso de la Energía (EUI) de refrigeración.

La optimización multiobjetivo generó un conjunto de escenarios. A partir de este conjunto se seleccionaron dos escenarios representativos: i) escenario óptimo que minimiza el EUI, y ii) un escenario crítico, que maximiza EUI. Para la evaluación energética detallada se seleccionaron como unidad de análisis dos torres representativas del cañón urbano, identificadas por presentar condiciones opuestas de sobrecalentamiento y sobreenfriamiento.

Figura 21
Procedimiento metodológico



Fase 5. Evaluación térmico energética

Definidos los escenarios óptimo y crítico, se realizó una simulación térmico-energética anual de ambas torres bajo clima presente y posteriormente bajo condiciones climáticas proyectadas. Para ello se adoptó el archivo climático correspondiente al escenario de altas emisiones A2 del IPCC-AR4 hacia 2050, con el objetivo de estimar cómo el incremento térmico futuro afectaría el comportamiento energético de las tipologías densificadas. El algoritmo NSGA-II no se ejecutó nuevamente para clima futuro; en su lugar, se evaluaron las tipologías ya optimizadas. Las edificaciones restantes del cañón urbano se mantuvieron como elementos

contextuales de sombreado, contribuyendo a los intercambios radiativos, a los efectos de sombreado y a la configuración geométrica del entorno.

Fase 6. Evaluación del riesgo de pobreza energética

Finalmente, con base en los resultados térmico-energéticos de los escenarios presentes y prospectivos, se determinó el riesgo de pobreza energética para ambas torres representativas, la evaluación se fundamentó en dos indicadores: i) el costo anual de energía (electricidad y gas), calculado con el esquema tarifario vigente en 2025, sin proyecciones económicas futuras; y ii) el ingreso anual del hogar.

El análisis permitió estimar cómo la densificación urbana, bajo el marco normativo actual, podría modificar la demanda de enfriamiento y calentamiento, así como el riesgo de pobreza energética en un contexto de cambio climático, ofreciendo evidencia sustantiva para la toma de decisiones urbanas orientadas a la resiliencia. Las especificaciones detalladas de las actividades realizadas en cada fase, así como los instrumentos, herramientas y software empleados, se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16

Etapas, actividades, instrumentos y herramientas en la investigación

Fases	Actividades	Instrumentos/herramientas
Determinación del grado de vulnerabilidad térmica-energética	• Selección de indicadores sociodemográficos (sensibilidad); • Selección de indicadores ambientales o índices espectrales (exposición); • Consumo energéticos promedios; • Determinación del día típico extremo de verano; • Descarga de imágenes satelitales; • Cálculo de indicadores de sensibilidad y exposición; • Cartografía de vulnerabilidad energética al calor; • Selección del área de estudio: AGEB con grado de vulnerabilidad muy alto y muy bajo.	• Bases de datos del INEGI y CENAPRED • Base de datos: SCOPUS • Base de datos del CFE • USGS Earth Explorer • Herramienta de mapeo de información geográfica (ArcGIS®)

Campaña de monitoreo in situ	• Selección de la unidad de análisis: cañón urbano; • Medición de vialidades; • Selección de variables climáticas a monitorear; • Selección del periodo de monitoreo: septiembre; • Selección de los instrumentos; • Colocación de los instrumentos: AGEB y cañón urbano; • Campaña de monitoreo; • Toma de fotografías hemisféricas para SVF.	• Flexómetro • Estación meteorológica inalámbrica Vantage Pro2 Davis 6152 • Estación meteorológica Acurite modelo 06059M • Registrador de datos HOBO modelo U12 Onset • Sensor de temperatura Log Tag TRIX-16 • Pantallas de Stevenson marca Acurite • Cámara Canon 80D con lente ojo de pez • Herramienta para calcular SVF (Rayman)
Modelo paramétrico	• Levantamiento de la topografía de los cañones urbanos; • Definición de los genomas (Indicadores geometricos); • Desarrollo de planta tipo y lotificación; • Modelado parametrico del primitivo geometrico del cañón urbano; • Selección de torres representativas (sobrecalentamiento y sobreenfriamiento) • Definición de sistemas constructivos; • Definición de calendarios de ocupación; • Definición de sistemas de climatización.	• Normativas de construcción • PDUCP 2024-2036 • Herramienta de interpolación de datos meteorológicos (Meteonorm®) • Interfaz gráfica de diseño computacional asistido por algoritmos denominada Grasshopper® • Visualizador 3D (Rhino 6®) • Complemento ambiental (Ladybug®) • Complemento de análisis energético (Honeybee®)
Optimización multiobjetivo	• Definición de objetivos de optimización; • Definición del tamaño de población: generaciones e individuos; • Selección del caso óptimo y crítico.	• Interfaz gráfica de diseño computacional asistido por algoritmos denominada Grasshopper® • Visualizador 3D (Rhino 6®) • Motor evolutivo(Wallacei®) • Complemento ambiental (Ladybug®) • Complemento de análisis energético (Honeybee®)

Evaluación térmico energética	• Evaluación de EUI anual presente en las torres representativas de ambos escenarios. • Proyección climática del escenario A2 del IPCC-ARA4 al 2050 en las torres representativas de ambos escenarios	• Herramienta de interpolación de datos meteorológicos (Meteonorm®) • Interfaz gráfica de diseño computacional asistido por algoritmos denominada Grasshopper® • Visualizador 3D (Rhino 6®) • Complemento ambiental (Ladybug®) • Complemento de análisis energético (Honeybee®)
Determinación del riesgo de pobreza energética	• Estimar el costo anual de energía: energía eléctrica y el costo del gas • Estimación del ingreso anual promedio de una unidad habitacional	• Hoja de cálculo

3.2. Diseño del experimento

3.2.1. Objeto y variables de estudio

El objeto de estudio de la presente investigación se enfoca en la morfología urbano-arquitectónica optimizada mediante un enfoque multiobjetivo, entendida como un conjunto de configuraciones geométricas que influyen de manera directa en las condiciones microclimáticas locales, el desempeño térmico-energético de las edificaciones y, en consecuencia, en el riesgo de pobreza energética en contextos de sobrecalentamiento urbano. Bajo esta perspectiva, la forma urbano-arquitectónica constituye un componente estratégico para reducir la exposición térmica y mejorar la eficiencia energética en cañones urbanos localizados en áreas con alta vulnerabilidad al calor (Abdollahzadeh & Bioria, 2021).

En correspondencia con este enfoque, las variables de estudio se definieron mediante un proceso de operacionalización orientado a garantizar la coherencia analítica a lo largo de las etapas de modelación paramétrica, optimización multiobjetivo y simulación termoenergética. La Tabla 17 presenta la estructura completa de variable, las cuales se agrupan en tres categorías:

- Variable dependiente. Se establecen dos variables dependientes debido a la estructura jerárquica del modelo metodológico. La primera, desempeño térmico-energético, constituye un resultado directo de la simulación anual y actúa como

insumo técnico para la evaluación de las configuraciones morfológicas optimizadas. La segunda, riesgo de pobreza energética, corresponde a un resultado socioeconómico derivado del consumo anual de energía y su relación con el ingreso del hogar. Aunque ambas variables dependen de la morfología urbano-arquitectónica, se evalúan en etapas distintas del proceso metodológico y se operacionalizan mediante indicadores diferenciados.

- ii. Variable independiente. Integrada por los indicadores morfológicos urbano-arquitectónicos que operan como parámetros de decisión dentro del modelo paramétrico. Estas variables (altura edificatoria, orientación de las huellas construidas y WWR) constituyen los atributos geométricos sobre los cuales actúa el algoritmo NSGA-II para la generación de configuraciones densificadas.
- iii. Variables de control. Asociadas a las condiciones climáticas, operativas y normativas del modelo energético, las cuales se mantienen constantes durante la fase de optimización para asegurar la validez experimental del proceso.

Tabla 17
Operacionalización de variables

Tipo de variable	Variable	Indicador
Dependiente	Desempeño térmico-energético	Intensidad del uso de energía (kWh/m ²)
		Carga térmica anual (kWh/año)
	Riesgo de pobreza energética	Consumo anual de energía (kWh/año)
		Costo anual de energía (MXN/año)
		Ingreso anual del hogar (MXN/año)
Independiente	Morfología urbano-arquitectónica	Relación costo/ingreso (%)
		Altura del edificio (m)
		Orientación de la huella del edificio (°)
		Relación vano-macizo (%)
		Relación de aspecto (H/W)
Control	Condiciones climáticas presentes y futuras (A2 IPCC-AR4)	Relación de superficie (FAR o CUS)
		Temperatura del aire
		Radiación solar
		Velocidad y dirección del viento

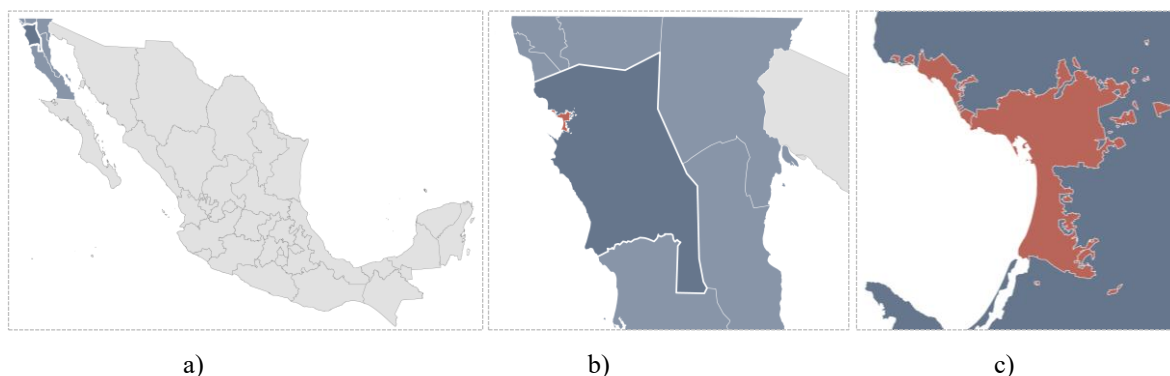
3.2.2. Área de estudio

3.2.2.1. Contexto general

La ciudad de Ensenada, ubicada en el estado de Baja California, dentro del municipio homónimo (véase Figura 22), constituye uno de los municipios con mayor extensión territorial de país, lo que condiciona su patrón de crecimiento (SEDATU et al., 2020). Se localiza en la región costera del Pacífico, entre las coordenadas 32° 12' 10" N y 116° 53' 03" O, a una altitud de 13 metros sobre el nivel del mar. Su superficie alcanza los 71,446 km² y alberga 119,796 viviendas habitadas, con una tasa promedio de ocupación de 3,16 habitantes por vivienda urbana. Aunque la densidad poblacional media es de 9 hab/km² (IMIPENS, 2018); en el sector Noreste (véase Figura 91 en el Anexo C) se registran valores significativamente mayores, alcanzando hasta 58,46 hab/km², de acuerdo con datos del Gobierno Municipal (2020).

Figura 22

Ubicación geográfica de la ciudad de Ensenada, B.C.



Nota. La figura (a) muestra la ubicación geográfica del estado de Baja California; la (b) el municipio de Ensenada; y la (c) la ciudad de Ensenada.

Las proyecciones del Comité Estatal de Planeación del Desarrollo prevén un incremento de aproximado 66,226 habitantes para 2030 en comparación con los registros de 2020, equivalente a una tasa de crecimiento anual del 0,98 % (COPLADE, 2017). Este incremento demográfico, sumado a un patrón histórico de expansión dispersa y fragmentada, ha propiciado la consolidación de asentamientos informales y la proliferación de periferias urbanas con accesos limitado a infraestructura y servicios básicos. El PDUCP-EN señala que entre 2010 y 2020 la mancha urbana incrementó su extensión en un 59 %, mientras que la población creció

solo un 18 %. En términos relativos, el suelo urbano se expandió 3,3 veces más rápido que la población (PDUCP, 2024, p. 36; p. 85), evidenciando un modelo de crecimiento territorial poco eficiente y altamente dependiente del automóvil.

Los sectores Noreste y Maneadero concentran el mayor crecimiento histórico de la huella urbana en las últimas dos décadas (véase Figura 92 en el Anexo D), registrando altos niveles de dispersión fuera de los límites de las AGEB. El sector Noreste destaca por concentrar el 41,4 % de las viviendas particulares habitadas, además de amplias superficies de suelo baldío (PDUCP, 2024, p. 36-37). Esta dinámica ha dado lugar a tramas urbanas discontinuas y fragmentadas, con ocupación irregular de espacios intersticiales y una morfología urbana extensa, poco eficiente y difícil de gestionar.

Desde una perspectiva ambiental, Ensenada se identifica entre los municipios con mayor vulnerabilidad ante el incremento de temperatura proyectado para las próximas décadas (Arlette et al., 2018). Tanto el Programa Especial de Cambio Climático (SEMARNAT, 2018) como el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California señalan una alta sensibilidad térmica debido a que la población está habituada a un clima templado-frío. Las proyecciones del COPLADE (2017a) estiman un aumento de hasta 2,5 °C en la temperatura media anual hacia mediados de siglo, lo que incrementará las cargas térmicas sobre las edificaciones y la demanda energética del sector residencial, especialmente en zonas con limitaciones económicas.

Ante este escenario, el PDUCP establece como objetivo central reorientar el modelo urbano hacia una ciudad compacta, con densidades altas, menor dispersión y una distribución equilibrada de usos y equipamientos (PDUCP, 2024, p. 94). Para ello, propone seis líneas estratégicas: i) fortalecimiento legislativo y de planeación, ii) atención al cambio climático, iii) gestión integral del riesgo, iv) recualificación territorial, v) densificación y mezcla de usos de suelo, y vi) regeneración urbana.

Estas problemáticas evidencian los retos que enfrentan actualmente las ciudades mexicanas y subraya la necesidad de vincular las políticas urbanas locales con los lineamientos nacionales e internacionales derivados de la Nueva Agenda Urbana, a través de un cambio de paradigma en la política territorial, tal como se establece en la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano (PDUCP, 2024, p. 85). En este marco,

la presente investigación se alinea con los esfuerzos locales de planificación sostenible al evaluar escenarios prospectivos de redensificación urbana mediante optimización multiobjetivo de indicadores morfológicos y energéticos.

3.2.2.2. Caracterización climática

Ensenada presenta un clima semiárido templado-frío, clasificado como BSk según Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006). Este clima se caracteriza por inviernos fríos, húmedos y con lluvias moderadas, y veranos cálidos y secos. La temperatura media estacional alcanza los 21,9 °C durante el verano y desciende a 13,3 °C en invierno. En términos de radiación solar global, la región presenta niveles elevados la mayor parte del año, superando los 700,0 W/m², excepto entre noviembre y febrero, cuando se registran niveles inferiores (Betti et al., 2024).

Si bien el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) dispone de normales climatológicas para la ciudad de Ensenada, estas se limitan principalmente a las variables de temperatura y precipitación, lo que resulta insuficiente para una caracterización climática integral del entorno urbano. La incorporación de variables adicionales, como la radiación solar y la velocidad del viento, requeriría su estimación a partir de registros de estaciones meteorológicas automáticas, implicando procesos de normalización y homogenización de datos que no forman parte de los objetivos ni del alcance de la presente investigación.

En este contexto, la caracterización climática se desarrolló mediante la elaboración de un archivo climático utilizando Meteonorm (versión 7.1.3.19872), herramienta basada en un sistema de interpolación climática que integra bases de datos meteorológicas globales y permite la generación estocástica de años meteorológicos típicos, ofreciendo una representación consistente y confiable de las condiciones climáticas locales. El uso de esta herramienta se encuentra validado por la Organización Meteorológica Mundial y ampliamente documentado en la literatura (Bern, 2024; Remund et al., 2014).

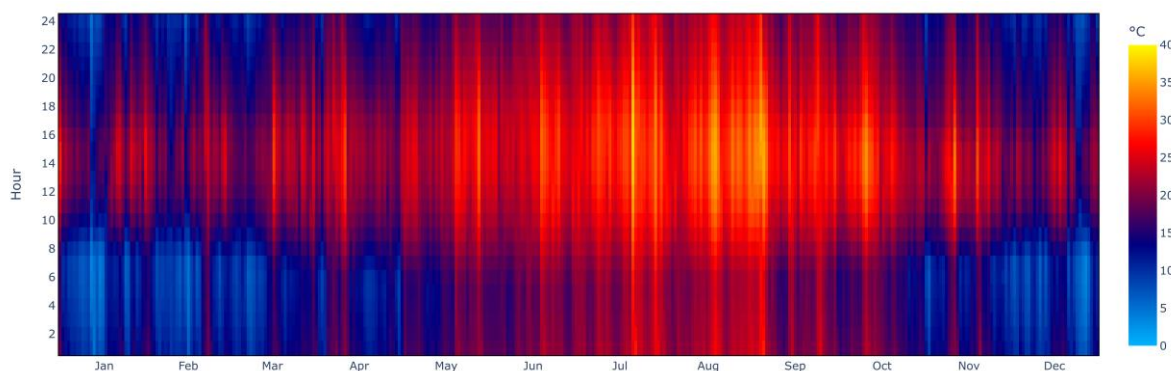
Los resultados evidencian condiciones de sobrecalentamiento sostenido durante el periodo comprendido entre junio y agosto, caracterizado por temperaturas medias elevadas y una alta frecuencia de horas cálidas a lo largo del día. Si bien septiembre no forma parte de este periodo, es el mes que registra los valores extremos más altos de temperatura, alcanzando máximas de hasta 39,2 °C, lo que se asocia a eventos puntuales de calor extremo más que a un

comportamiento térmico promedio. En términos de temperatura media mensual, los meses más cálidos corresponden a julio y agosto, con valores de 24,9 °C y 25,1 °C, respectivamente, mientras que diciembre se identifica como el mes más frío, con una media de 7,8 °C.

Como se muestra en la Figura 23, los meses cálidos comprenden junio, julio y agosto, mientras que los meses fríos se concentran en enero, febrero y diciembre. El rango de temperatura en la región oscila entre 3 °C y 36,8 °C. En términos higrotérmicos diarios, las temperaturas más bajas se registran alrededor de las 06:00 h, mientras que los valores máximos se alcanzan cerca de las 15:00 h. Las temperaturas medias se presentan aproximadamente a las 10:00 h y 20:00 h, lo que evidencia un comportamiento térmico característico de zonas costeras semiáridas, marcado por una fuerte oscilación diurna asociada a la radiación solar y a la influencia marítima, para mayor detalle y resolución, se remite al Apéndice L.

Figura 23

Comportamiento mensual y horario de la temperatura de bulbo seco

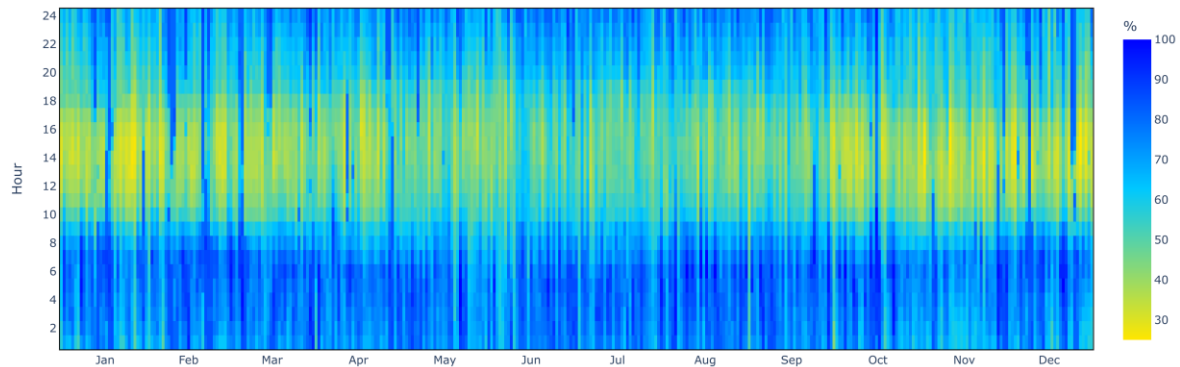


Nota. Obtenido *CBE Clima Tool*. Versión 0.8.12. Por Betti G., Tartarini F., Nguyen C., Schiavon S. (2022). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2212.04609>. Fecha de acceso 03/12/2023

En cuanto a la humedad relativa media anual, esta se estima en un 75,8 %. El mes más seco corresponde a enero, con un valor mínimo de 57,6 %, mientras que agosto presenta la mayor humedad relativa media, alcanzando un 86,1 %. Tal como se observa en la Figura 24, las condiciones higrotérmicas diarias muestran una variación significativa a lo largo del día: los valores más altos de humedad relativa se registran alrededor de las 06:00 horas, mientras que los más bajos ocurren aproximadamente a las 15:00 horas. Las condiciones medias se presentan hacia las 10:00 y 20:00 horas, reflejando la dinámica típica de los ciclos de temperatura y humedad en climas costeros semiáridos.

Figura 24

Comportamiento mensual y horaria de humedad relativa

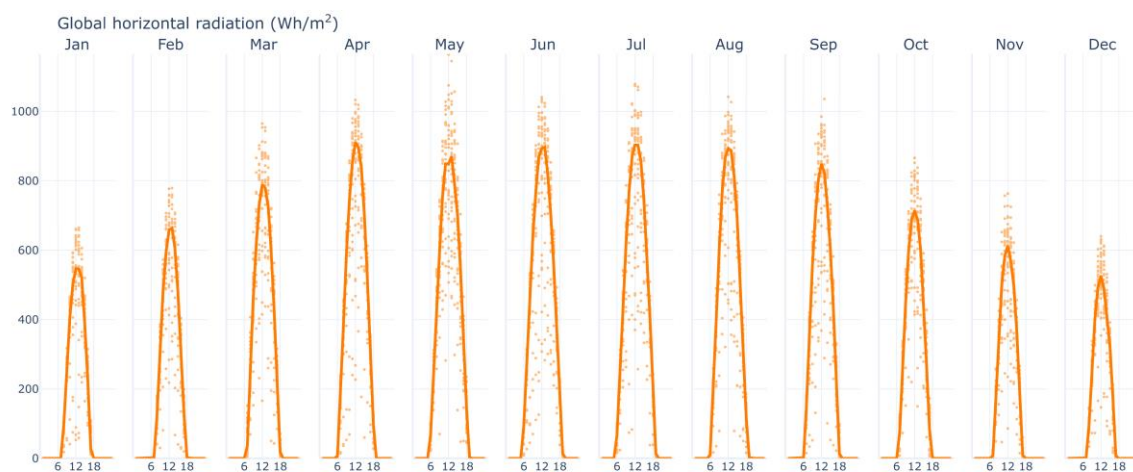


Nota. Obtenido *CBE Clima Tool*. Versión 0.8.12. Por Betti G., Tartarini F., Nguyen C., Schiavon S. (2022). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2212.04609>. Fecha de acceso 03/12/2023

En cuanto a la radiación solar global horizontal, se reportan valores elevados durante la mayor parte del año, con registros superiores a 700 W/m^2 , salvo en el periodo comprendido entre noviembre y febrero, cuando los registros son inferiores (Figura 25). La RSg promedio anual es de $847,3 \text{ W/m}^2$, con máximos que superan los 900 W/m^2 entre los meses de abril y septiembre. En contraste, durante diciembre y enero, la radiación solar máxima promedio desciende por debajo de los 600 W/m^2 , lo que incide directamente en la disponibilidad de luz natural y el potencial de aprovechamiento solar en el entorno construido.

Figura 25

Comportamiento mensual de la radiación solar global

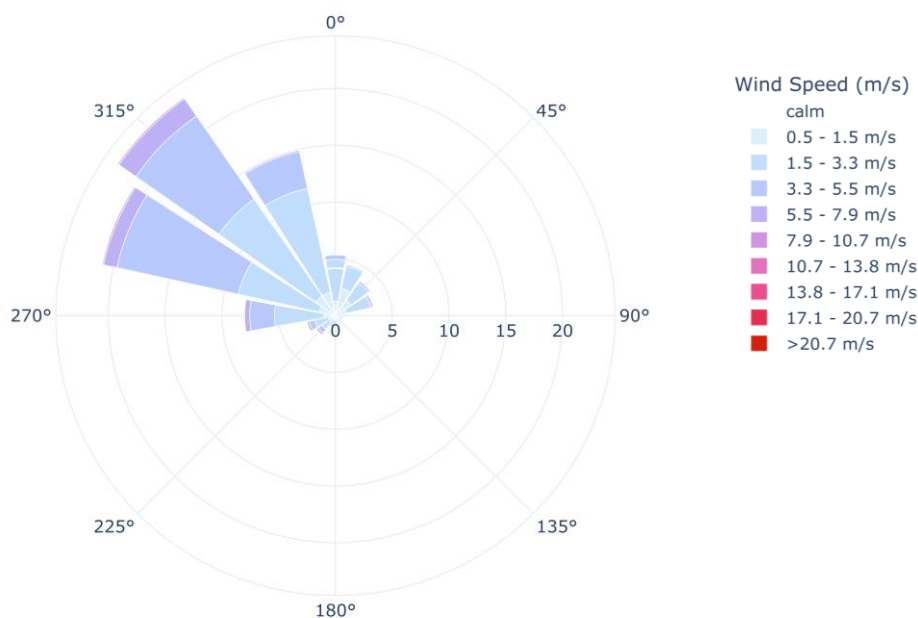


Nota. Obtenido *CBE Clima Tool*. Versión 0.8.12. Por Betti G., Tartarini F., Nguyen C., Schiavon S. (2022). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2212.04609>. Fecha de acceso 03/12/2023

Por último, la Figura 26 presenta la rosa de los vientos anual para la ciudad de Ensenada, en la cual se representa tanto la velocidad como la dirección predominante del viento. La velocidad media anual del viento es de 2,5 m/s, siendo los vientos predominantes aquellos provenientes del noroeste. En cuanto a la intensidad, las velocidades más frecuentes se sitúan en rangos bajos a moderados (1,5–5,5 m/s), con una presencia secundaria de eventos moderados (5,5–7,9 m/s), también asociados principalmente al sector dominante.

Figura 26

Rosa de los vientos anual

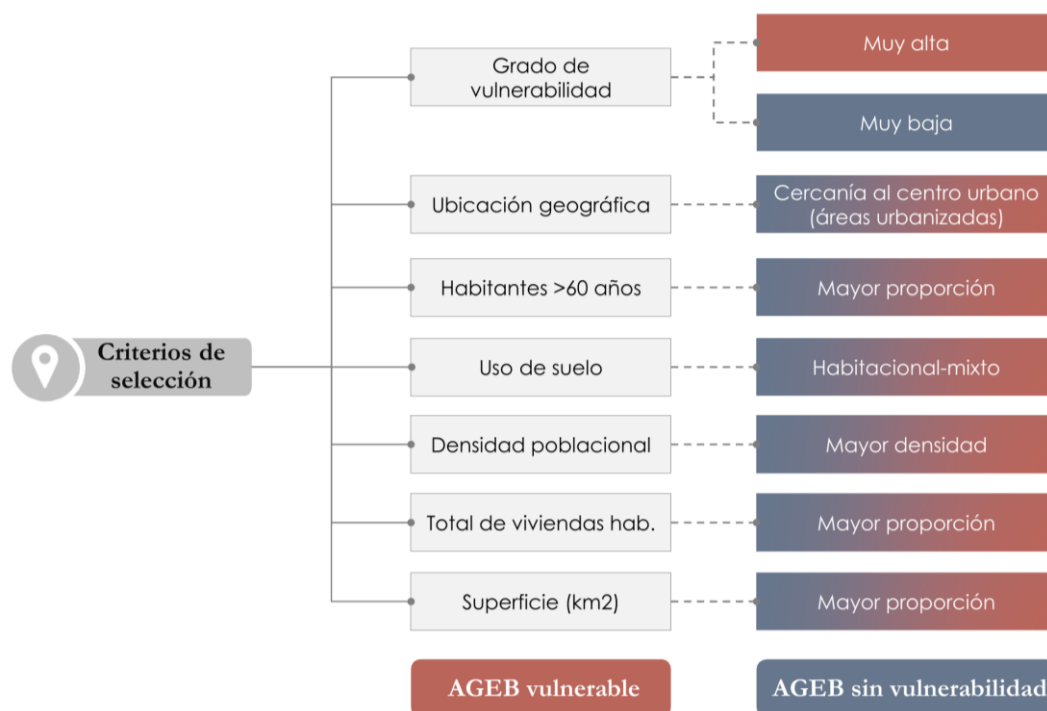


Nota. Obtenido *CBE Clima Tool*. Versión 0.8.12. Por Betti G., Tartarini F., Nguyen C., Schiavon S. (2022). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2212.04609>. Fecha de acceso 03/12/2023

3.2.2.3. Criterios de selección

Mediante la aplicación de SIG, se llevó a cabo un análisis espacial de la vulnerabilidad energética al calor a nivel AGEB, integrando indicadores ambientales y sociodemográficos. Esta metodología permitió identificar patrones espaciales de vulnerabilidad asociados al fenómeno de ICU en la ciudad. Como resultado, se seleccionaron dos sectores con características contrastantes: uno correspondiente a un nivel de vulnerabilidad muy alto y otro a un nivel muy baja. La delimitación del área de estudio consideró criterios específicos, tales como el grado de vulnerabilidad al calor, la densidad poblacional, la proporción de adultos mayores de 60 años y el uso de suelo habitacional-mixto, como se presenta en la Figura 27.

Figura 27
Criterios de selección del área de estudio



Para asegurar la pertinencia de la selección, se excluyeron aquellas AGEB situadas en zonas periféricas distantes de la mancha urbana, así como aquellas clasificadas como no urbanizadas. Adicionalmente, se priorizaron las AGEB caracterizadas por un uso de suelo habitacional-mixto y con una alta proporción de población mayores de 60 años, dado que este grupo etario presenta una mayor vulnerabilidad ante condiciones de sobrecalentamiento urbano

3.2.3. Selección de unidad de análisis

Una vez delimitada el área de estudio a partir del análisis espacial de la vulnerabilidad térmica-energética a nivel AGEB, se procedió a la selección de la unidad de análisis, definida en esta investigación como dos cañones urbanos representativos, localizados dentro de las AGEB previamente seleccionadas. La elección de estos cañones responde a la necesidad de analizar, de manera comparativa, el comportamiento microclimático, morfológico y térmico-energético en contextos urbanos con condiciones contrastantes de vulnerabilidad, manteniendo al mismo tiempo criterios de comparabilidad geométrica y funcional.

La selección de ambos cañones urbanos se fundamentó en un conjunto de criterios morfológicos, microclimáticos y contextuales, orientados a garantizar su pertinencia como unidades de análisis para los objetivos del estudio. En primer lugar, se consideró la orientación urbana, priorizando cañones con orientación oeste–este (W–E), identificada en la literatura como una de las configuraciones más críticas en términos de confort térmico y exposición solar. De acuerdo con Abdollahzadeh y Biloría (2022), las orientaciones W–E favorecen una mayor incidencia de radiación solar directa durante amplios periodos del día, incrementando la temperatura media radiante y el estrés térmico en climas cálidos y semiáridos.

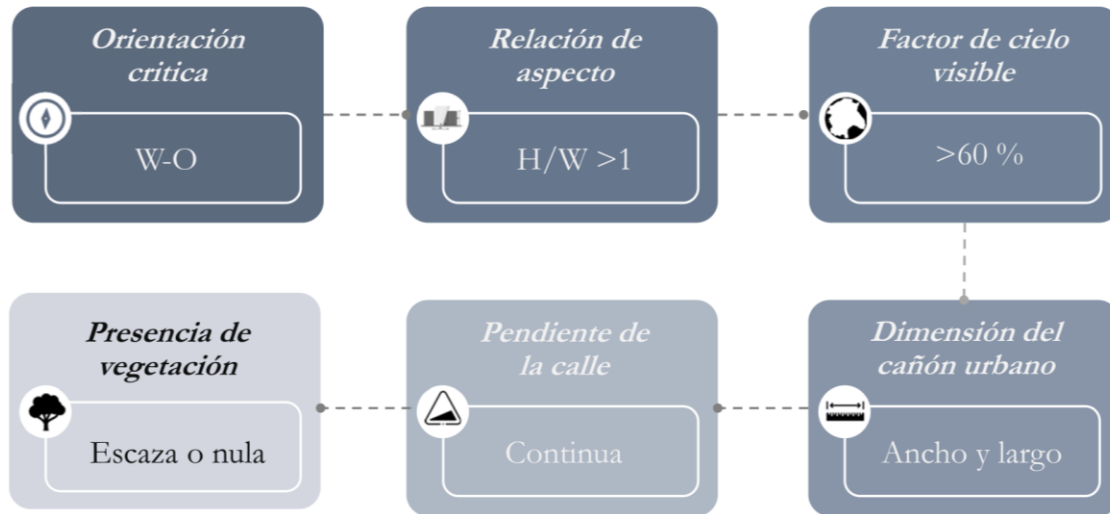
En segundo lugar, se incorporaron criterios geométricos del cañón urbano, particularmente la relación de aspecto (H/W) y el factor de cielo visible (SVF). Se seleccionaron cañones con una relación H/W menor a 1 y valores de SVF superiores al 60 %, configuraciones que, según Srivanit y Jareemit (2020), tienden a presentar condiciones térmicas desfavorables durante el día debido a una elevada exposición radiativa y a valores altos de temperatura media radiante. Estos parámetros resultan especialmente relevantes para el análisis del fenómeno de isla de calor urbana y su interacción con la forma urbana.

Adicionalmente, se consideraron características físicas y urbanas complementarias, tales como la longitud y el ancho del cañón, la pendiente de las laderas, la continuidad del frente construido y la presencia o ausencia de vegetación, dado su impacto directo en la dinámica térmica local, la ventilación natural y el comportamiento microclimático. Estos factores permiten una caracterización más precisa del entorno urbano y contribuyen a interpretar las diferencias observadas en los resultados posteriores. La Figura 28 sintetiza los criterios empleados para la selección de las unidades de análisis.

Finalmente, la selección de los dos cañones urbanos respondió al interés por contrastar dos contextos con niveles diferenciados de vulnerabilidad térmica-energética, identificados en el análisis previo: el cañón urbano Lomitas, asociado a un nivel alto de vulnerabilidad, y el cañón urbano Moderna, correspondiente a un nivel bajo. Esta selección comparativa permite evaluar cómo variaciones en la morfología urbano-arquitectónica y en el contexto socioespacial influyen en el comportamiento microclimático, el desempeño térmico-energético y el riesgo de pobreza energética, fortaleciendo el enfoque analítico y prospectivo de la investigación.

Figura 28

Criterios de selección de la unidad de análisis



3.2.4. Temporalidad del estudio

El periodo establecido para el análisis de vulnerabilidad energética, que incluye el cálculo de indicadores espectrales a partir de sensores remotos y SIG, corresponde al día típico extremo del mes más cálido. Este análisis, complementado con la adquisición de datos climáticos mediante la campaña de monitoreo, abarca los meses de agosto y septiembre, identificados como el periodo de mayor intensidad térmica a lo largo del año. Por otro lado, para el desarrollo de la optimización multiobjetivo y la evaluación termoenergética, se considerarán tanto el día típico cálido extremo como un análisis de comportamiento anual.

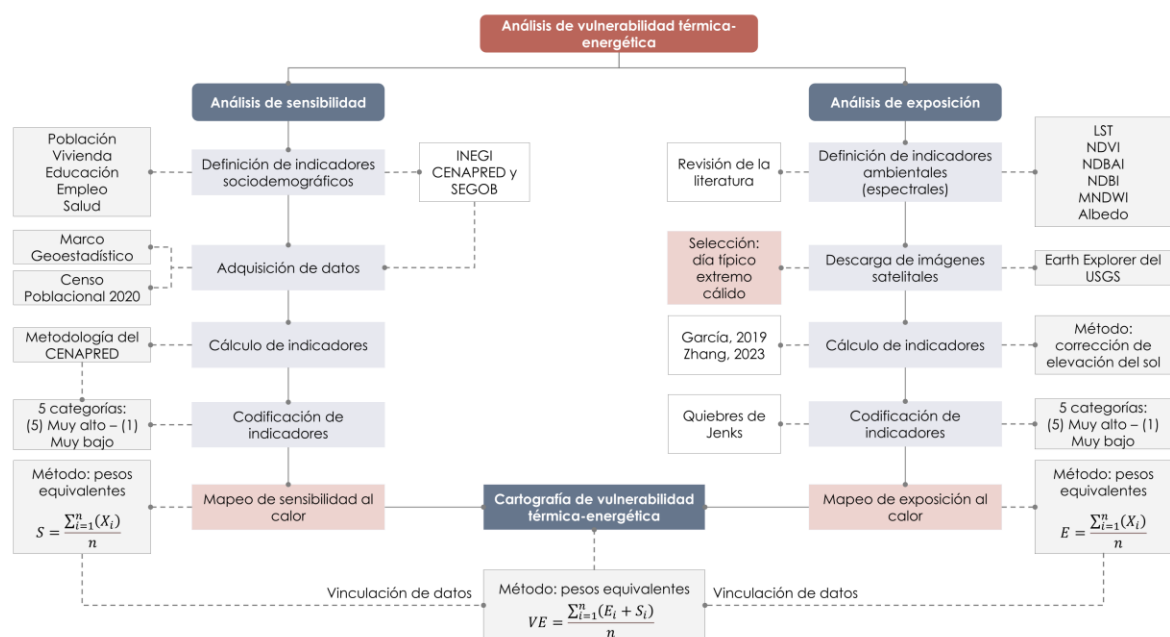
3.3. Análisis espacial de la vulnerabilidad térmica-energética

La fase inicial de la investigación se centró en el análisis de la vulnerabilidad térmica-energética frente al fenómeno ICU en la ciudad de Ensenada, mediante la elaboración de una cartografía basada en SIG y sensores remotos. Este análisis tuvo como propósito seleccionar el área de estudio pertinente conforme a los criterios establecidos en el apartado 3.2.2.3. *Criterios de selección*; y dar cumplimiento al primer objetivo específico de la investigación. Para ello, se empleó como unidad espacial de análisis el AGEB, desarrollada por el INEGI.

El AGEB constituye la unidad geográfica de referencia en México para la recolección y análisis de datos demográficos, económicos y sociales en los censos de población y vivienda. En el caso del municipio de Ensenada, se tiene un registro total de 308 AGEB. No obstante, para los fines del presente estudio, el análisis se delimitó exclusivamente a la mancha urbana consolidada de la ciudad, excluyendo zonas no urbanizadas o de carácter predominantemente rural, como la delegación Maneadero, cuyo uso de suelo es mayoritariamente agrícola y presenta patrones de ocupación rural y periurbana. La inclusión de este sector habría introducido dinámicas territoriales y socioenergéticas distintas, alterando la interpretación de los indicadores empleados, los cuales están diseñados para contextos urbanos. En consecuencia, el análisis se centró en un total de 231 AGEB, correspondientes exclusivamente al área urbana consolidada de Ensenada, garantizando la consistencia espacial y la comparabilidad de los resultados

La cartografía generada integra información sobre sensibilidad y exposición al calor, obtenida a partir de datos sociodemográficos y geoespaciales proporcionados por el INEGI, así como de indicadores espectrales derivados del procesamiento de imágenes satelitales mediante SIG. El proceso metodológico se estructuró en tres fases principales, representadas en la Figura 29.

Figura 29
Metodología para determinar vulnerabilidad al calor



- i. **Análisis de sensibilidad:** en esta fase se evaluaron las condiciones socioeconómicas de la población, considerando variables como edad, género, nivel socioeconómico y densidad poblacional en relación con situaciones de riesgo térmico. Este análisis permitió identificar los grupos poblacionales más vulnerables, como personas en situación de pobreza o con recursos limitados para afrontar emergencias derivadas del incremento de las temperaturas.
- ii. **Análisis de exposición:** en esta etapa se examinaron las condiciones ambientales mediante el uso de indicadores espectrales obtenidos de datos satelitales, tales como la Temperatura Superficial Terrestre (LST), el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (MNDWI), el Índice de Suelo Desnudo (NDBAI), el Índice de Edificación de Diferencia Normalizada (NDBI) y el Albedo. Estos indicadores facilitaron el análisis de la cobertura vegetal, la intensidad térmica y el grado de urbanización de las áreas evaluadas.
- iii. **Análisis de vulnerabilidad térmica-energética:** esta fase del estudio se centró en la integración de información sociodemográfica y ambiental con el propósito de evaluar de manera integral los factores de riesgo asociados al fenómeno ICU. La correlación entre las características de vulnerabilidad social y las condiciones térmicas locales permitió identificar las áreas más susceptibles dentro del área urbana consolidada. Con base en dicha información, se desarrolló un mapeo a nivel AGEb, utilizando un modelo de evaluación multicriterio. Este enfoque permitió determinar las zonas con mayor vulnerabilidad energética dentro del entorno urbano de Ensenada, constituyendo una base metodológica robusta para la formulación de estrategias de mitigación y adaptación frente a escenarios de sobrecalentamiento urbano.

3.3.1. Análisis de sensibilidad

Como parte del análisis de vulnerabilidad térmica-energética, esta fase inicial se centró en la evaluación del nivel de vulnerabilidad sociodemográfica de la población de Ensenada ante el incremento de las temperaturas. El proceso se inició con la identificación y selección de indicadores de sensibilidad, fundamentados en una revisión sistemática de literatura científica.

En total, se definieron 16 indicadores sociodemográficos, agrupados en cinco categorías temáticas principales: i) población, ii) vivienda, iii) educación, iv) empleo y v) salud. La Tabla 18 presenta el listado completo de estos indicadores junto con su respectiva clasificación.

A continuación, se describen las categorías empleadas, de acuerdo con los lineamientos metodológicos establecidos por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y la Secretaría de Gobernación (SEGOB) (CENAPRED & SEGOB, 2015, p. 75-88):

- Población: esta categoría permite identificar grupos sociales cuyas características demográficas, como la edad, el género, la pertenencia étnica o el grado de marginación, los hacen especialmente vulnerables a los efectos del sobrecalentamiento urbano.
- Vivienda: se considera el acceso y las condiciones físicas de las viviendas, factores que inciden directamente en el nivel de exposición y riesgo. Viviendas precarias incrementan la intensidad de los impactos térmicos y agravan los riesgos para la salud de sus ocupantes.
- Educación: el nivel educativo influye directamente en la capacidad de las personas para comprender fenómenos de riesgo y adoptar medidas de autoprotección. Una mayor escolaridad se asocia con una mejor preparación para enfrentar los efectos del cambio climático.
- Empleo: este indicador permite evaluar la disponibilidad de recursos económicos, los cuales determinan la capacidad de respuesta ante eventos térmicos extremos. En contextos de alta desigualdad, las familias de bajos ingresos tienden a priorizar necesidades inmediatas, limitando su resiliencia frente a amenazas adicionales.
- Salud: el acceso a servicios de salud representa un componente clave para la resiliencia poblacional. Evaluar la cobertura y calidad de estos servicios es fundamental, dado que inciden directamente en la capacidad de la población para enfrentar impactos derivados del aumento de las temperaturas.

De los 16 indicadores utilizados, 12 fueron adoptados directamente de los criterios propuestos por CENAPRED y SEGOB. La variable de marginación fue incorporada con base en la información del Consejo Nacional de Población (CONAPO), mientras que las variables

POB0_14, POB60_YMAS y POB_FEM fueron seleccionadas a partir de evidencia empírica identificada en la revisión de literatura científica. Este análisis estructurado permitió identificar las características de los grupos demográficos más vulnerables, ofreciendo un marco sólido para el diseño de estrategias de mitigación y adaptación enfocadas en reducir los impactos del calor extremo en áreas urbanas vulnerables.

Tabla 18
Indicadores de sensibilidad

Clasificación	Indicador	Descripción	Adquisición
Población	PI	Población de habla indígena	CENAPRED
	POB0_14	Población de 0 a 14 años	Bases de datos
	POB60_YMAS	Población de 60 años y más	Bases de datos
	POB_FEM	Proporción de población femenina	Bases de datos
	MARGINACIÓN	Marginación	CONAPO
Vivienda	VPT	Vivienda con piso de tierra	CENAPRED
	DV	Déficit de vivienda	CENAPRED
	VNDE	Vivienda sin electricidad	CENAPRED
	VND	Vivienda sin drenaje	CENAPRED
	VNDAE	Vivienda sin agua entubada	CENAPRED
Educación	ANA	Analfabetismo	CENAPRED
	GPE	Grado promedio de escolaridad	CENAPRED
	DEB	Demanda escolar de educación básica	CENAPRED
Empleo	RD	Razón de dependencia: población económicamente no activa	CENAPRED
	TDA	Tasa de desempleo	CENAPRED
Salud	PND	Población no derechohabiente	CENAPRED

3.3.1.1. Adquisición y procesamiento de información sociodemográfica

Con el objetivo de construir indicadores de sensibilidad sociodemográfica en el marco del análisis de vulnerabilidad al calor, se llevó a cabo un proceso sistemático de adquisición, depuración y análisis de datos. Para ellos, se emplearon herramientas de SIG y software

especializado, según se detalla en la Tabla 19. La metodología implementada incluyó la recopilación de información proveniente de fuentes oficiales y plataformas digitales desarrolladas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía. En una primera etapa, se descargó el Marco Geoestadístico correspondiente a la edición 2022, disponible en el portal institucional del INEGI (<https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#descargas>). Este archivo, en formato vectorial (shapefile), proporciona la delimitación geoespacial de las AGEb y constituyó la base cartográfica para el desarrollo del análisis espacial.

De forma complementaria, se accedió al Sistema de Consulta de Integración Territorial, Entorno Urbano y Localidad (SCITEL), también desarrollado por el INEGI (<https://www.inegi.org.mx/app/scitel/Default?ev=10>). A través de esta plataforma, se obtuvieron datos del Censo de Población y Vivienda 2020, desglosados a nivel de AGEb y manzana urbana para el municipio de Ensenada. Las variables extraídas incluyeron indicadores clave sobre condiciones socioeconómicas, características de la vivienda, nivel educativo, situación laboral y acceso a servicios de salud, insumos fundamentales para el cálculo de los indicadores de vulnerabilidad sociodemográfica. Los archivos fueron descargados en formato XLSX para su posterior tratamiento y análisis.

Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de limpieza y preparación de los datos, que consistió en la eliminación de valores inconsistentes, y la estandarización de las variables conforme a los lineamientos establecidos por la “Guía básica para la evaluación de la vulnerabilidad social” (CENAPRED & SEGOB, 2015, p. 75-88). Esta guía proporciona una metodología validada para el cálculo de indicadores de vulnerabilidad a partir de datos censales.

El cálculo de los indicadores se realizó mediante el software ArcGIS, herramienta que permitió generar mapas temáticos, gráficos estadísticos y bases de datos georreferenciadas. Cada indicador fue clasificado en cinco niveles de vulnerabilidad: muy baja (1), baja (2), media (3), alta (4) y muy alta (5), siguiendo las recomendaciones de codificación establecidas por CENAPRED (véase Anexo B).

Para determinar el nivel de sensibilidad o vulnerabilidad sociodemográfica de cada AGEb en la ciudad de Ensenada, se construyó un índice compuesto. Este índice se calculó como el

promedio de los valores codificados de las 16 variables seleccionadas, permitiendo cuantificar de forma estandarizada y comparativa el grado de vulnerabilidad en cada unidad geográfica. Los resultados obtenidos facilitaron la identificación de zonas prioritarias para la intervención, al señalar aquellas áreas con mayores niveles de vulnerabilidad sociodemográfica.

Tabla 19
Precisiones de las herramientas y software empleados

Actividad	Nombre	Imagen	Descripción
Definición de indicadores de sensibilidad	Scopus y Web of Science		Bases de datos
Adquisición de datos	INEGI		Descarga del marco geoestadístico 2022. (ver aquí) Descarga de datos referente al Censo de Población 2020 (ver aquí) por AGEB y manzana urbana.
Formulación de indicadores de vulnerabilidad	CENAPRED		Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estales y Municipales de Peligros y Riesgos: evaluación de la vulnerabilidad física y social (ver aquí).
Cálculo de indicadores	ArcGIS Desktop 10.8		Es una herramienta de información geográfica que permite diseñar mapas, tablas y gráficos. Así como la creación de bases de datos geográficos.

3.3.2. *Análisis de exposición*

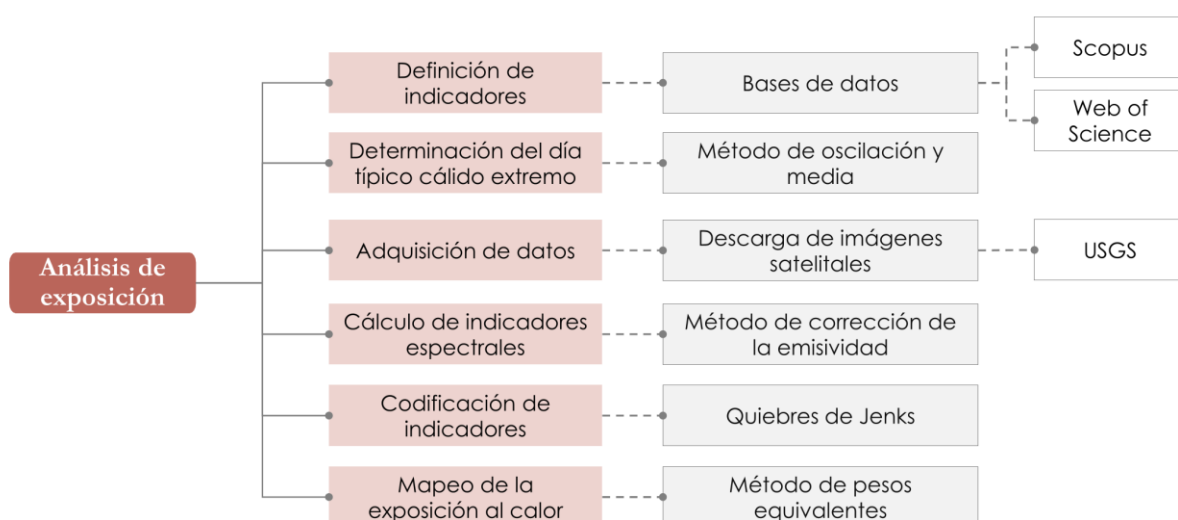
Esta segunda fase se enfocó en la evaluación de la exposición al calor. En este contexto, la exposición se entiende como el conjunto de condiciones físicas y espaciales que incrementan la susceptibilidad de ciertas áreas urbanas al sobrecalentamiento. El procedimiento metodológico seguido se presenta de forma esquemática en la Figura 30 e incluyó seis etapas principales: i)) definición de indicadores, ii) determinación del día típico cálido extremo, iii) adquisición de datos y iv) cálculo de indicadores espectrales, v) codificación de indicadores y vi) mapeo de la exposición al calor.

El proceso se inició con la identificación y selección de indicadores de exposición, fundamentada en una revisión exhaustiva de literatura científica especializada. Como resultado, se seleccionaron seis indicadores espectrales clave: i) Temperatura Superficial Terrestres (LST,

por sus siglas en inglés); ii) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés); iii) Índice de Agua de Diferencia Normalizada (MNDWI, por sus siglas en inglés); iv) Índice de Suelo Desnudo (NDBAI, por sus siglas en inglés); v) Índice de Edificación de Diferencia Normalizada (NDBI, por sus siglas en inglés); y vi) Albedo. Adicionalmente, se incorporó un indicador sociodemográfico complementario: la densidad de población. Este indicador facilitó la identificación de áreas densamente habitadas expuestas a condiciones térmicas extremas (véase Anexo B).

Figura 30

Proceso metodológico para el análisis de exposición al calor



Cada uno de los indicadores seleccionados aporta información específica y crítica sobre diversos aspectos del entorno urbano que inciden en la vulnerabilidad energética. La LST proporciona una medición directa de la intensidad térmica; el NDVI y el MNDWI reflejan la presencia de elementos naturales como vegetación y cuerpos de agua, fundamentales para la mitigación térmica; el NDBAI y el NDBI permiten caracterizar la distribución y densidad de superficies construidas; y el albedo cuantifica la capacidad reflectiva de las superficies, influyendo en los patrones de absorción y emisión de calor.

La Tabla 20 presenta una descripción detallada de estos indicadores. Su integración permite una evaluación comprehensiva de los factores biofísicos, urbanos y sociodemográficos

que inciden en la exposición al calor, sentando las bases para el diseño de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático en la ciudad de Ensenada.

Tabla 20
Indicadores de exposición

Abreviación	Indicador	Descripción
LST	Temperatura superficial terrestre	Representa la temperatura de la superficie. Los valores de LST varían en función de la hora, el día, la cubierta del suelo y las condiciones meteorológicas. Valores altos indican superficies calientes, mientras que valores bajos se asocian con zonas vegetadas o cuerpos de agua.
NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada	Este índice se utiliza para evaluar la densidad de vegetación. Es fundamental en estudios de cambio climático. El NDVI varía de -1 a 1. Valores negativos suelen indicar agua, valores cercanos a cero indican suelo desnudo o áreas sin vegetación, y valores positivos (entre 0,2 y 0,8) indican vegetación.
MNDWI	Índice de agua de diferencia normalizada	Se emplea para identificar y monitorear cuerpos de agua y el contenido de agua en la vegetación. El MNDWI varía de -1 a 1. Valores positivos indican la presencia de agua, mientras que valores negativos suelen representar áreas sin agua.
NDBAI	Índice de suelo desnudo	Este índice se utiliza para identificar y cuantificar áreas de suelo sin cobertura vegetal. Los valores más altos indican áreas con más suelo desnudo, mientras que valores más bajos sugieren la presencia de vegetación o agua.
NDBI	Índice de edificación de diferencia normalizada	Se emplea para identificar áreas urbanas o edificadas en imágenes satelitales. Valores positivos de NDBI indican áreas edificadas, mientras que valores negativos suelen representar áreas vegetadas o cuerpos de agua.
Albedo	Albedo	Representa la fracción de radiación solar reflejada por una superficie. Es importante para estudios climáticos y energéticos, ya que influye en la temperatura de la superficie y el balance energético de la Tierra. El albedo varía entre 0 (absorción total de radiación) y 1 (reflexión total).

3.3.2.1. Adquisición y procesamiento de datos espectrales

La adquisición de datos y el cálculo de los índices espectrales se llevaron a cabo mediante el uso de herramientas y software especializados, tal como se detalla en la Tabla 21. El primer paso consistió en la determinación del día típico cálido extremo, una etapa fundamental para la selección y descarga de imágenes satelitales Landsat 8 y 9 a través del portal del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Esta selección aseguró la representatividad térmica de los datos empleados para el análisis.

Tabla 21

Precisiones de las herramientas y software empleados

Actividad	Nombre	Imagen	Descripción
Definición de indicadores de sensibilidad	Scopus y Web of Science		Bases de datos
Adquisición de datos	Servicio Meteorológico Nacional (SMN)		Descarga de datos climáticos de la Estación Meteorológica Automática Emilio López Zamora para la determinación del día típico extremo.
	Servicio Geológico de Estados Unidos		Descarga de imágenes satelitales en el portal Earth Explorer del USGS (ver aquí)
	Satélite Landsat 8		Es un satélite de observación terrestre operado por la NASA. A través de las bandas 2-7, 10 y 11 se obtendrá una imagen satelital de Ensenada.
Cálculo de indicadores y mapeo	ArcGIS Desktop 10.8		Es una herramienta de información geográfica que permite diseñar mapas, tablas y gráficos. Así como la creación de bases de datos geográficos.

3.3.2.2. Determinación del día típico cálido extremo

Como parte fundamental del análisis de exposición térmica, se llevó a cabo la identificación del día típico extremo, entendido como la fecha que presenta las condiciones climáticas más representativas de calor extremo en un periodo determinado. Este día es crucial para la selección de imágenes satelitales y el análisis de indicadores espectrales, ya que permite capturar el máximo estrés térmico en el entorno urbano.

Para tal fin, se realizó una solicitud formal al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), con el objetivo de obtener registros de temperatura de bulbo seco generados por la Estación Meteorológica Automática (EMA) “Emilio López Zamora”, localizada en Ensenada. Esta estación, situada en las coordenadas geográficas 31° 89’ 13” N, 116° 60’ 03” O y a una altitud de 45 metros sobre el nivel del mar, proporcionó datos climáticos horarios correspondientes al periodo comprendido entre enero y diciembre del año 2019.

Una vez obtenida la base de datos, se procedió a un proceso de normalización para asegurar su calidad y representatividad. Como criterio mínimo de validez, se estableció que al menos el 50 % de los datos mensuales estuvieran disponibles, lo que equivaldría a un total aproximado de 8,760 horas de registros anuales. El análisis se efectuó a nivel horario con el fin de asegurar una representación detallada y continua de las condiciones térmicas locales.

El cálculo del día típico cálido extremo se realizó mediante el método de oscilación y media, descrito en la (2). Este enfoque se basa en la suma mensual de las diferencias absolutas de dos variables de sus variables climáticas:

- i. La oscilación térmica promedio diario (OSC_{md}) respecto a la oscilación térmica promedio mensual (OSC_{mm}) y;
- ii. La temperatura de bulbo seco promedio diaria (T_{md}) respecto a la temperatura de bulbo seco promedio mensual (T_{mm}).

$$D_{tm} = \Sigma[abs(osc_{md} - Osc_{mm}) - abs(T_{md} - T_{mm})] \rightarrow D_{tm} \cong 0 \quad (2)$$

Los resultados obtenidos mediante esta metodología permitieron identificar el 2 de septiembre de 2019 como el día típico extremo, al registrarse una temperatura máxima de bulbo seco de 29,3 °C. Esta fecha representa el punto de mayor intensidad térmica durante el año analizado y, por tanto, constituye un referente esencial para evaluar la vulnerabilidad energética urbana bajo escenarios de calor extremo. La identificación del día típico extremo no solo facilitó la selección precisa de imágenes satelitales representativas del fenómeno de sobrecalentamiento urbano, sino que también proporcionó una base metodológica robusta para el análisis detallado de los patrones espaciales de exposición al calor en la ciudad de Ensenada.

3.3.2.3. Descarga de imágenes satelitales

Una vez definidos los indicadores de exposición y establecido el día típico cálido extremo, se procedió a la descarga de imágenes satelitales a través del portal Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Para ello, se seleccionaron

imágenes provenientes del satélite Landsat 8-9 (OLI/TIRS), específicamente de la Colección 2, Nivel 1 (C2, L1), correspondientes al área de estudio en la ciudad de Ensenada. La elección de este satélite se fundamentó en su capacidad para proporcionar imágenes multiespectrales con una adecuada resolución espacial y temporal, lo cual resulta esencial para el análisis térmico de entornos urbanos. En particular, el Nivel 1 de la Colección 2 fue seleccionado debido a que permite aplicar el método de corrección de emisividad para el cálculo de indicadores espectrales, ofreciendo mayor precisión en las estimaciones.

Se seleccionó la imagen correspondiente a la fecha más cercana al día típico extremo previamente identificado, considerando criterios de calidad como baja cobertura de nubes, resolución espacial y la calidad de la imagen. La información técnica y los metadatos de las imágenes satelitales seleccionadas se detallan en la Tabla 22. Este procedimiento garantiza una base metodológica sólida para el cálculo posterior de los indicadores espectrales, contribuyendo al análisis integral de la exposición térmica en la zona de estudio.

Tabla 22
Datos de la imagen satelital

Satélite	Fecha	Hora	Cobertura de nubes	Resolución	Calidad
Landsat 8-9	05-09-19	18:16:58	0,03 %	30	5

3.3.2.4. Cálculo de indicadores espectrales

Una vez completada la descarga de las bandas espectrales 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10 y 11 del satélite *Landsat*, las imágenes fueron recortadas para ajustarse a la extensión geográfica correspondiente a la zona urbana de estudio. Este paso fue esencial para delimitar el análisis exclusivamente al entorno urbano de Ensenada, garantizando así una mayor precisión espacial en el procesamiento de los datos.

El cálculo de los indicadores espectrales se realizó mediante el software ArcGIS, aplicando el método de corrección por elevación solar o reflectancia a cada banda. Esta corrección permitió normalizar los valores en una escala estandarizada de 0 a 1. La fórmula empleada para esta normalización se detalla en la (3).

$$Con\left(\left(\frac{BAND * 0.00002 - 0.1}{\sin\left(SUN_{ELEVATION} * \frac{3.141592654}{180}\right)}\right) < 0.0, 0.0, \left(\frac{BAND * 0.00002 - 0.1}{\sin\left(SUN_{ELEVATION} * \frac{3.141592654}{180}\right)}\right)\right) \quad (3)$$

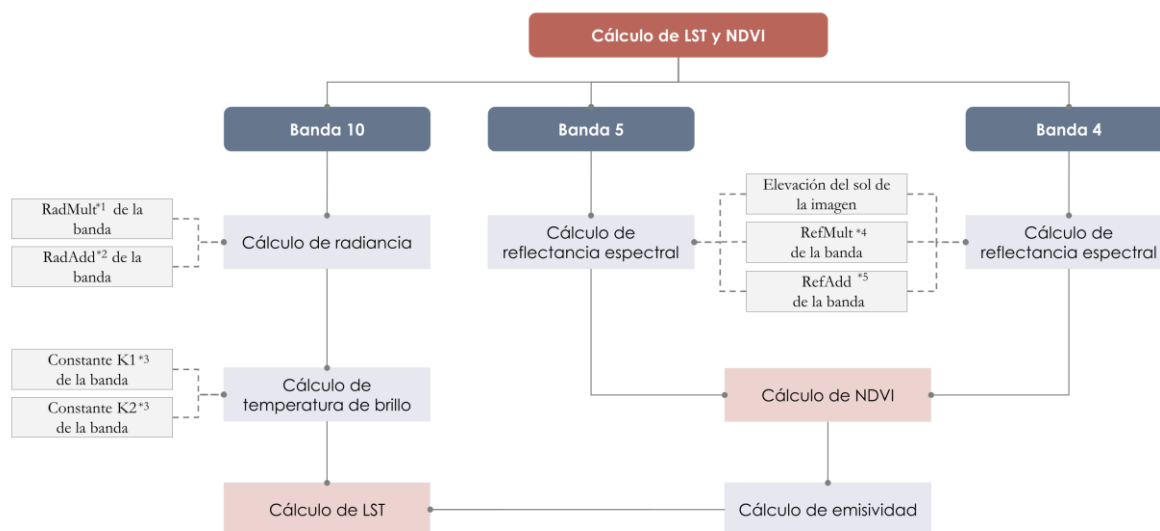
Posteriormente, se procedió al cálculo de los indicadores espectrales seleccionados, empleando expresiones matemáticas específicas para cada uno, las cuales se encuentran descritas en la Tabla 23. Estas fórmulas transforman la información espectral en valores cuantitativos que permiten caracterizar aspectos críticos del entorno urbano y natural, tales como la cobertura vegetal, la presencia de cuerpos de agua, el grado de urbanización y la proporción de suelo expuesto.

Tabla 23
Cálculo de indicadores de exposición

Indicador	Fórmula	Interpretación de bandas
LST	$((\text{Tem. brillo}) / (1 + ((10.895 * (\text{temp. Brillo}) / 14380) * \ln(\text{emisividad})))) - 273.15$	B2: reflectancia de la banda azul B3: reflectancia de la banda verde B4: reflectancia de la banda roja
NDVI	$(RB5) - (RB4) / (RB5) + (RB4)$	B5: reflectancia del infrarrojo cercano (NIR)
MNDWI	$(RB3) - (RB6) / (RB6) + (RB3)$	B6: reflectancia del infrarrojo de onda corta 1 (SWIR)
NDBAI	$(RB6) - (RB10) / (RB6) + (RB10)$	B7: reflectancia del infrarrojo de onda corta 2 (SWIR)
NDBI	$(RB6) - (RB5) / (RB6) + (RB5)$	B10: reflectancia del infrarrojo térmico de onda corta (1)
Albedo	$(0.356) (RB2) + (0.130) (RB4) + (0.373) (RB5) + (0.085) (RB6) + (0.072) (RB7) - (0.0018)$	B11: reflectancia del infrarrojo térmico de onda corta (2)

El procedimiento metodológico seguido en el componente ArcMap de ArcGIS para el cálculo de LST y del NDVI se ilustra en la Figura 31, lo cual permite visualizar de manera esquemática los pasos involucrados en el procesamiento de estos indicadores clave. Mientras que, los valores necesarios para las constantes de conversión térmica K1 y K2, así como la elevación solar, el factor de escala multiplicativo de reflectancia y el factor de escala aditivo de reflectancia, fueron extraídos de los archivos de metadatos generados durante el proceso de descarga en el portal Earth Explorer. Estos parámetros técnicos se sintetizan en la Tabla 24.

Figura 31
Metodología para calcular LST y NDVI



Nota. Metodología utilizada para la recuperación de la LST e NDVI en el software ArcGIS basada en el método de corrección de emisividad. *¹Factor de escala multiplicativo de radiancia. *²Factor de escala del aditivo de radiancia. *³Constante de conversión térmica. *⁴Factor de escala multiplicativo de reflectancia. *⁵Factor de escala del aditivo de reflectancia.

Tabla 24
Datos técnicos de la imagen satelital

Abreviación	Datos	Especificación
K1_Banda 10	Constante 1 de la banda 10	774,8853
K2_Banda 10	Constante 2 de la banda 10	1321,0789
Elevación del sol	Elevación del sol	57,97243218
RadMult Banda 10	Factor de escala multiplicativo de radiancia de la banda 10	0,0003342
RadAdd Banda 10	Factor de escala del aditivo de radiancia de la banda 10	0,1
RefMult Banda 4	Factor de escala multiplicativo de reflectancia de la banda 4	0,00002
RefAdd Banda 4	Factor de escala del aditivo de reflectancia de la banda 4	0,1
RefMult Banda 5	Factor de escala multiplicativo de reflectancia de la banda 5	0,00002
RefAdd Banda 5	Factor de escala del aditivo de reflectancia de la banda 5	0,1

3.3.2.5. Mapeo de exposición al calor

Finalmente, los indicadores de exposición fueron codificados en cinco niveles de exposición, que van desde muy baja (1) hasta muy alta (5) exposición, mediante la aplicación del algoritmo de rupturas naturales de Jenks (Jenks Natural Breaks). Este método, ampliamente utilizado en análisis geoespacial y estadístico, permite optimizar la distribución de los datos al minimizar la varianza dentro de cada clase y maximizar la varianza entre clases (Zhang et al., 2023). Su aplicación es particularmente valiosa en estudios ambientales y geográficos, ya que permite una clasificación precisa de los datos espaciales, destacando de manera efectiva las diferencias y similitudes dentro del conjunto de datos. En este contexto, su implementación permitió clasificar de manera óptima las AGEb de la ciudad, reflejando con precisión los niveles de exposición a condiciones ambientales extremas.

3.3.3. Cartografía de vulnerabilidad térmica-energética

En esta última etapa del análisis, se procedió a la integración de los indicadores codificados de sensibilidad y exposición, con el objetivo de calcular un índice compuesto de vulnerabilidad energética ante la ICU. Para ello, se aplicó el método de pesos equivalentes, el cual permite una evaluación proporcional y no sesgada de los distintos factores involucrados.

Este método consiste en la suma de los valores codificados por AGEb correspondientes a cada variable, seguida de su normalización mediante la división entre el número total de variables analizadas, en este caso, $n = 23$. Esta estrategia asegura que cada indicador tenga el mismo peso relativo dentro del índice compuesto, evitando que alguna variable domine el resultado final.

La (4) presenta formalmente este procedimiento. Donde E_i representa la codificación del nivel de exposición para cada tramo censal, S_i representa la codificación del nivel de sensibilidad para tramo censal y n corresponde al número total de variables consideradas en el análisis.

$$VC = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i + S_i)}{n} \quad (4)$$

Este enfoque metodológico permite una integración cuantitativa entre la susceptibilidad socioespacial de la población (sensibilidad) y la intensidad de las condiciones ambientales adversas (exposición). Así, el índice de vulnerabilidad energética ofrece una visión integral del riesgo térmico urbano. Los resultados obtenidos se presentan en el apartado *4.1 Análisis espacial de la vulnerabilidad térmica-energética*, el cual proporciona una representación espacial detallada de los niveles de vulnerabilidad identificados. Esta visualización geoespacial constituye una herramienta fundamental para el análisis comparativo entre áreas urbanas y para la formulación de estrategias de adaptación climática.

3.4. Campaña de monitoreo in situ

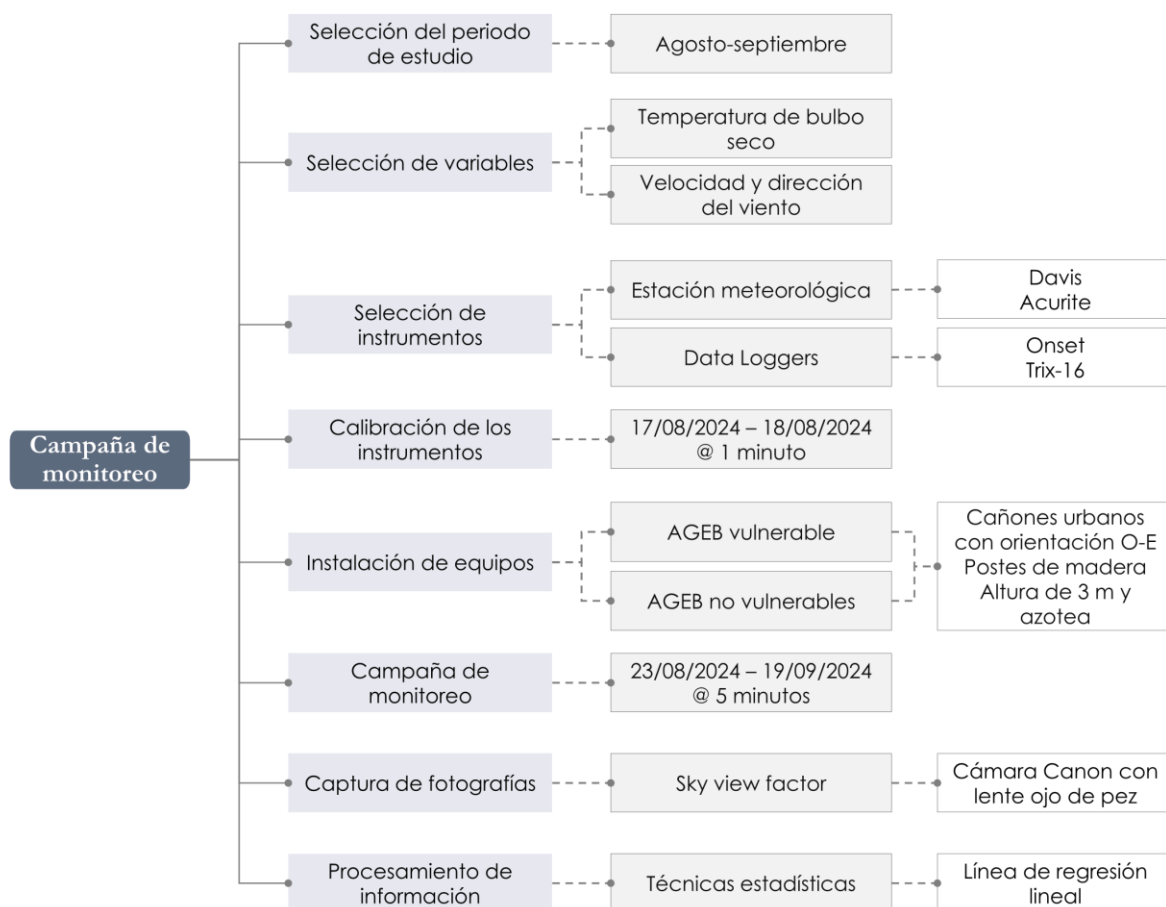
La recolección de datos climáticos constituye un componente fundamental en la presente investigación, ya que permite la identificación y delimitación de los cañones urbanos representativos que serían objeto de modelación y optimización en etapas posteriores. Asimismo, el cumplimiento de esta etapa metodológica contribuye directamente al logro del segundo objetivo específico de la investigación. La Figura 32 presenta de manera esquemática los principales pasos metodológicos seguidos durante la campaña de monitoreo climático a microescala. Este proceso incluyó la medición de variables meteorológicas clave, tales como la temperatura del aire, la velocidad y la dirección del viento.

Previo al desarrollo de la campaña de monitoreo, se realizó la calibración del equipo instrumental con el fin de garantizar la fiabilidad de los datos obtenidos. Posteriormente, se llevó a cabo el monitoreo de las variables climáticas mediante dos estaciones meteorológicas y sensores de temperatura. La campaña también contempló la captura de fotografías hemisféricas para el cálculo del SVF, lo que permitió complementar el análisis microclimático urbano.

La recolección de datos se llevó a cabo del 23/08/2024 al 19/09/2024. Durante este periodo, se realizaron tanto las mediciones meteorológicas como la obtención de registros fotográficos. El diseño y la ejecución de esta campaña se fundamentaron en lineamientos establecidos por normativas técnicas internacionales y nacionales, específicamente la norma ISO 7726, la norma mexicana NMX-AA-166/2-SCFI-2015 y la Guía del Sistema Mundial de observación (World Meteorological Organization, 2017).

Figura 32

Metodología para la adquisición de datos de la campaña de monitoreo



La recolección se efectuó con intervalos subhorarios, conforme a las prácticas recomendadas para estaciones automáticas, y se complementó con procedimientos de calibración, mantenimiento documentado, control y aseguramiento de la calidad, así como con el registro detallado de metadatos relativos al sitio, entorno, equipos y ajustes operativos. Estas acciones garantizan que, aun con las adaptaciones requeridas por las condiciones del cañón urbano, la campaña se desarrolló con apego a los estándares internacionales de observación meteorológica establecidos por la OMM.

3.4.1. Selección del periodo de estudio

El marco temporal de la campaña de monitoreo fue definido con base en el día típico cálido extremo previamente identificado, así como en la disponibilidad de imágenes satelitales

provenientes de los satélites Landsat 8 y 9. La campaña tuvo una duración aproximada de 28 días, desarrollándose entre el 23 de agosto y el 19 de septiembre de 2024, periodo que abarca las semanas más cálidas del año en la ciudad, correspondiente a la temporada de mayor estrés térmico.

3.4.2. Herramientas y equipo

Se emplearon diversos instrumentos especializados cuya descripción se presenta en la Tabla 25. Durante la campaña de monitoreo se utilizaron dos estaciones meteorológicas inalámbricas: una *Vantage Pro2 Davis 6152* y una *Acurite Atlas*, seleccionadas por su capacidad para registrar múltiples variables climáticas de forma continua y confiable.

Adicionalmente, se colocaron ocho sensores *Trix-16* para la medición puntual de temperatura del bulbo seco (TBS), de los cuales cinco fueron instalados en el sector urbano clasificado con grado de vulnerabilidad muy alto y tres en el sector identificado como no vulnerable. Asimismo, se utilizaron dos sensores *Hobo Onset*, colocados uno en cada AGEB seleccionada, con el propósito de complementar y validar los registros obtenidos por los sensores *Trix-16*. Todos los sensores fueron instalados conforme a lo establecido por las normativas internacionales para mediciones en microescala urbana. Esta distribución permitió comparar las condiciones térmicas entre contextos urbanos contrastantes.

Para la captura de fotografías destinadas al cálculo del SVF se realizó con una *cámara Canon EOS 80D*, equipada con un lente *EF-S 18–135 mm IS USM* y un lente *Canon EF 8–15 mm f/4L fisheye USM*, lo que permitió obtener imágenes hemisféricas necesarias para el análisis.

Tabla 25
Precisiones de las herramientas y software empleados

Equipo	Variables	Rango de medición	Precisión del equipo
Estación meteorológica AcuRite Atlas 	Temperatura del aire	-40,0 °C a 70,0 °C	± 17,2 °C
	Humedad relativa	0 a 100,0 %	± 2,0 %
	Velocidad del viento	0 a 71,3 m/s	± 1 mph <10 mph
	Dirección del viento	0 a 360,0 °	

Estación meteorológica
Davis



Temperatura del aire	0 °C a +65,0 °C	± 0,3 °C
Humedad relativa	0 a 100 %	± 2,0 %
Velocidad del viento	1 a 68,0 m/s	± 5,0 %
Dirección del viento	0 a 360,0 °	3,0 °

Datalogger
Hobo Onset U12



Temperatura del aire	0 °C a 50,0 °C	± 0,3 °C
Humedad relativa	10,0 a +90,0 %	± 2,5 %

TRIX-16

Temperatura del aire	-40,0 °C a +85,0 °C	± 0,5 °C
----------------------	---------------------	----------



Pantalla de Stevenson marca Acurite, modelo 06054M (protección solar para los sensores)



Cámara Canon 80D, lente EF-S 18-135mm IS USM con lente Canon ef 8-15mm f/41 fisheye usm



3.4.3. Calibración del equipo

Con el propósito de garantizar la precisión y confiabilidad en la recolección de datos climáticos, se llevó a cabo un proceso de calibración de los instrumentos de medición (Tabla 26). La calibración de los sensores de temperatura se realizó el 18 de agosto; para ello, los dispositivos fueron suspendidos con una separación de 15 cm entre sí, asegurando que estuvieran expuestos a condiciones ambientales homogéneas de temperatura, humedad relativa y viento. Las mediciones se configuraron con una frecuencia de un minuto.

Por su parte, la calibración de las estaciones meteorológicas se efectuó el 29 de agosto, ubicándolas a una distancia de un metro entre sí y bajo las mismas condiciones ambientales previamente descritas. En este caso, las mediciones se programaron con una frecuencia de cinco minutos, correspondiente al intervalo mínimo de registro permitido por la estación Davis. En total, se calibraron nueve sensores de temperatura: ocho Trix-16 y un Hobo Onset. Sin bien, el sensor Hobo Onset no contaba con una calibración certificada, fue empleado como sensor de referencia debido a que corresponde al sensor de mayor calidad técnica en comparación con los demás dispositivos.

Tabla 26
Especificaciones de la calibración

Variable monitoreada	Intervalo de monitoreo	Fecha y hora de inicio	Fecha y hora de terminación	Lomitas	Moderna
Sensores de temperatura					
Temperatura de bulbo seco	1 minuto	17/08/2024 Hora: 23:50	18/08/2024 Hora: 23:50	HOBO Onset 131 TRIX 648 TRIX 649 TRIX 650 TRIX 651 TRIX 653	TRIX 654 TRIX 655 TRIX 656
Estación meteorológica					
Temperatura de bulbo seco Humedad relativa Velocidad y dirección del viento	5 minutos	28/09/2024 23:50	29/09/2024 23:50	Estación Davis	Estación Acurite

El procedimiento de calibración consistió en la aplicación de análisis de regresión lineal simple, a partir de diagramas de dispersión elaborados entre los registros obtenidos por el sensor Hobo Onset (empleado como referencia) y los correspondientes a cada uno de los sensores Trix-16. Este análisis permitió identificar el grado de asociación lineal entre las mediciones y establecer las respectivas líneas de tendencia. A partir de estas se derivaron las ecuaciones lineales de ajuste, las cuales fueron utilizadas para corregir sistemáticamente los valores registrados por los sensores Trix-16. Esta etapa fue fundamental para asegurar la homogeneidad,

la precisión y la comparabilidad de los datos registrados durante la campaña de monitoreo microclimático.

De forma análoga, se realizó la calibración de las estaciones meteorológicas empleadas en el monitoreo. En este caso, los registros de la estación Davis fueron considerados como referencia para ajustar los valores reportados por la estación Acurite, siguiendo el mismo procedimiento de ajuste mediante regresión lineal. Una vez completadas las calibraciones, se dio inicio a la fase de monitoreo en campo. Los datos recolectados fueron sometidos a un proceso de depuración que incluyó la conversión de los registros originales a promedios horarios, seguido de la aplicación de las ecuaciones de calibración definidas previamente para garantizar la validez y consistencia de la información obtenida.

En el *Apéndice A* se presentan los diagramas de dispersión correspondientes a cada uno de los sensores y estaciones calibradas, junto con sus respectivas líneas de tendencia y ecuaciones de ajuste lineal. Por otro lado, la Tabla 27 resume las ecuaciones de las rectas de calibración obtenidas para cada dispositivo.

Tabla 27

Ecuaciones de regresión aplicadas para la corrección de registros de sensores Trix-16 y estación Acurite

Instrumento	Ecuación lineal de ajuste	Coefficiente de correlación (r)
Trix- 648	$Y = 1.0513X - 1.225$	0,9967
Trix-649	$Y = 1.0949X - 2.2438$	0,9929
Trix-650	$Y = 1.0674X - 1.5983$	0,9936
Trix-651	$Y = 1.1309X - 3.1693$	0,9868
Trix-653	$Y = 1.0608X - 1.4488$	0,9933
Trix-654	$Y = 1.0075X - 0.2046$	0,997
Trix-655	$Y = 1.0462X - 1.0393$	0,997
Trix-656	$Y = 1.1302X - 3.1506$	0,9879
E-Acurite (TBS)	$Y = 1.0075X - 0.2046$	0,8819
E-Acurite (viento)	$Y = 1.0075X - 0.2046$	0,8557

Nota. En el *Apéndice A* se muestran los diagramas de dispersion correspondientes a cada instrumento de medición

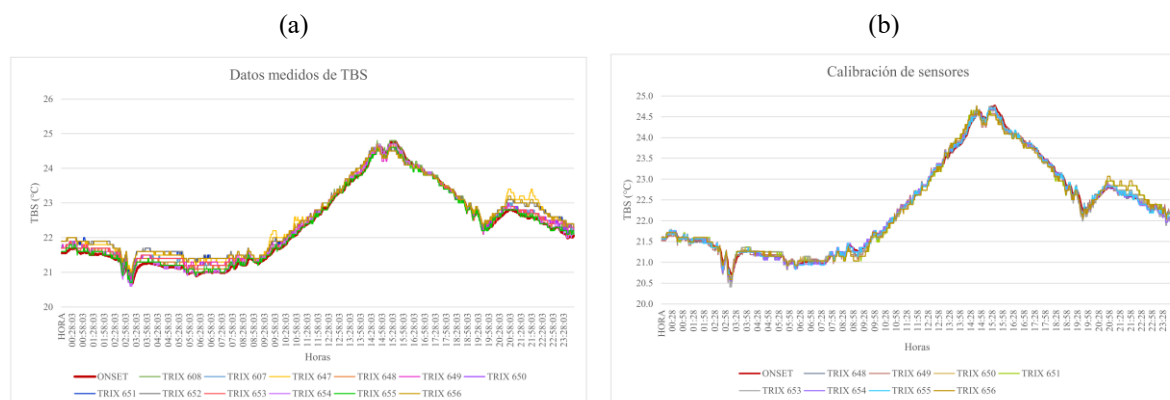
En general, los sensores Trix-16 muestran una correlación lineal muy alta entre sus registros y los valores de referencia del sensor Hobo Onset, con coeficientes de correlación (r) superiores a 0,9, con excepción de dos sensores, cuyos valores de R^2 se encuentran entre 0,8 y

0,9, lo que aún indica una correlación alta. Por su parte, la estación meteorológica Acurite presenta también una correlación alta con respecto a la estación Davis, utilizada como referencia, al registrar un coeficiente de determinación comprendido entre 0,8 y 0,9. Estos resultados evidencian una correspondencia adecuada en las mediciones de temperatura obtenidas por los distintos dispositivos, lo que respalda la fiabilidad del procedimiento de calibración aplicado y garantiza la validez de los datos empleados en la campaña de monitoreo.

En la Figura 33 (a) se muestran los datos de temperatura del bulbo seco (TBS) registrados por los sensores TRIx y la estación ONSET durante la fase de calibración en condiciones controladas. La variabilidad entre las curvas evidencia discrepancias puntuales entre algunos sensores respecto al patrón de referencia, particularmente durante ciertos intervalos horarios. Estas diferencias se atribuyen a desviaciones individuales en la sensibilidad de los dispositivos, las cuales resultan evidentes en los valores absolutos de TBS registrados antes del ajuste.

Figura 33

Registros de temperatura de bulbo seco



Nota. (a) Los datos reflejan las diferencias iniciales en las mediciones de temperatura entre los sensores y el sensor de referencia (ONSET) antes de la aplicación del ajuste. (b) Se observa una mejora sustancial en la correspondencia entre los dispositivos, lo cual evidencia la efectividad del procedimiento de calibración aplicado.

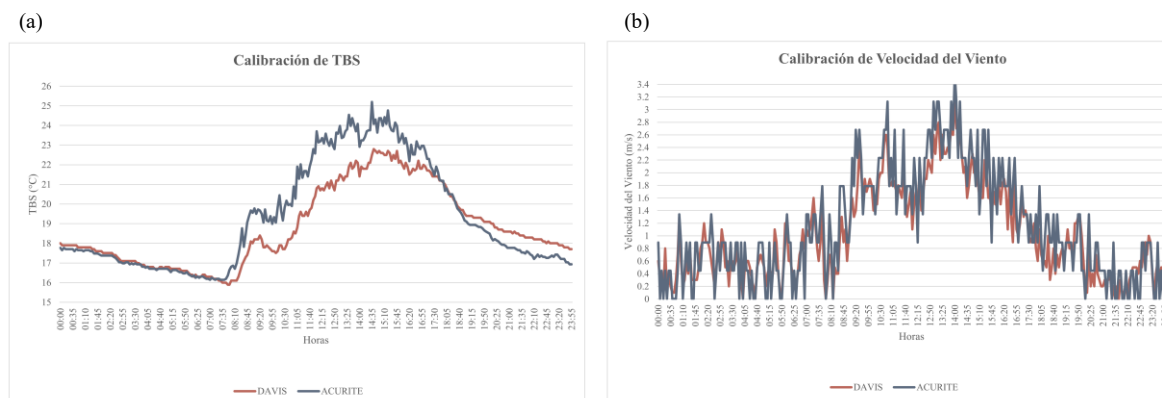
Posteriormente, la Figura 33 (b) presenta los mismos datos una vez corregidos mediante la aplicación de las ecuaciones lineales de ajuste derivadas del proceso de calibración. Como puede observarse, tras la corrección los perfiles térmicos se alinean de forma mucho más consistente con el sensor de referencia (ONSET), reduciendo significativamente las desviaciones observadas en la serie original. Esta homogeneización en los registros confirma la

efectividad del procedimiento de calibración aplicado, garantizando la comparabilidad y fiabilidad de los datos obtenidos por los diferentes sensores TRIIX durante la campaña de monitoreo ambiental. En conjunto con los coeficientes de correlación reportados en la Tabla 27, estos resultados refuerzan la validez del conjunto instrumental utilizado, permitiendo un análisis robusto del comportamiento térmico en los escenarios urbanos evaluados.

La Figura 34 (a) muestra los registros corregidos de TBS por las estaciones DAVIS (línea roja) y ACURITE (línea azul). Se observa que ambas estaciones presentan una tendencia térmica similar, con temperaturas más bajas en la madrugada, un incremento marcado a partir de las 08:00 h, alcanzando un máximo entre las 14:00 y 16:00 h, y un descenso posterior al atardecer. No obstante, se evidencia una discrepancia sistemática: la estación ACURITE tiende a registrar valores de TBS ligeramente superiores a los de DAVIS, especialmente entre las 09:00 y 17:00 h.

Figura 34

Registros de TBS y velocidad del viento corregidos tras la calibración de estaciones



Nota. (a) Registros de TBS corregidos tras la calibración de estaciones. (b) Registros de velocidad del viento corregidos tras la calibración de estaciones.

Por otro lado, la Figura 34 (b) presenta los datos corregidos de velocidad del viento. En este caso, se observa una mayor variabilidad en los registrados proporcionados por la estación ACURITE, particularmente durante el intervalo de mayor actividad eólica (de 10:00 a 17:00 horas), donde se alcanzan picos superiores a 3,0 m/s. En contraste, la estación DAVIS muestra una señal más suavizada, con valores generalmente menores. A pesar de las diferencias en la resolución y variabilidad, ambas estaciones muestran una sincronía general en los patrones

diarios de viento, lo cual indica una buena correlación en la tendencia, aunque con discrepancias en la amplitud de los registros.

3.4.4. Criterios para la colocación de los instrumentos

La instalación de los instrumentos se realizó conforme a lineamientos establecidos por la norma internacional ISO 7726 (1998), la OMM (2017) y la norma mexicana NMX-AA-166/2-SCFI-2015 (Secretaría de Economía, 2015), todas orientadas al monitoreo ambiental en microescala. En particular, se seleccionaron emplazamientos libres de obstrucciones que pudieran generar sombras o alterar el flujo natural del viento, garantizando simultáneamente condiciones seguras que evitaran la manipulación o sustracción de los equipos. La Figura 35 y Figura 36 muestra el mapa de ubicación de los instrumentos instalados en la colonia Moderna y Lomitas respectivamente.

La armonización de la recolección de datos climáticos conforme a los lineamientos de la OMM (2017) requirió el cumplimiento de especificaciones técnicas dirigidas a asegurar la comparabilidad, representatividad y validez de las observaciones. En este sentido, se siguieron los criterios establecidos en el Manual del Sistema Mundial de Observación, Volumen I – Aspectos mundiales, Anexo V del Reglamento Técnico, para la instalación, operación y mantenimiento de instrumentos, adaptando su implementación a las características físicas del sitio de estudio.

Aunque la OMM recomienda medir temperatura y humedad relativa entre 1,25 y 2,0 m sobre el nivel del terreno natural, en esta campaña los sensores se instalaron a 3 m de altura, con el fin de minimizar el riesgo de manipulación por transeúntes y resguardar la integridad del registro, manteniendo al mismo tiempo una exposición representativa y libre de obstrucciones. En el caso de la medición de velocidad y dirección del viento, la OMM establece una altura estándar de 10 m; no obstante, debido a las limitaciones físicas del cañón urbano y a la necesidad de garantizar la estabilidad estructural del equipo, la estación se instaló en las azoteas disponibles, alcanzando la altura máxima permitida por las edificaciones. Esta disposición permitió obtener mediciones coherentes con el flujo atmosférico local.

Figura 35

Mapa de ubicación de los instrumentos en la colonia Moderna



P1. Trix 656
C. Playa María



P2. Trix 655
María y Bahía Ángeles



P3. Trix 654
C. Bahía Magdalena



P4. Hobo Onset 0505
C. Bahía Magdalena



Estación Acurite
Av. Bahía de la Paz

La estación meteorológica Davis se colocó en la azotea de la Estación de Policía Norte, ubicada en la colonia Las Lomitas (AGEB vulnerable). Su instalación fue gestionada mediante un oficio emitido por autoridades académicas al director de Seguridad Pública Municipal del XXIV H. Ayuntamiento de Ensenada, B.C., C. David Armando Sánchez González. Por su parte, la estación Acurite, correspondiente a la colonia Moderna (AGEB no vulnerable), se instaló en la azotea de una vivienda particular perteneciente a una integrante del programa de posgrado, lo cual garantizó su resguardo y funcionamiento continuo.

Figura 36

Mapa de ubicación de los instrumentos en la colonia Las Lomitas



P1. Onset 6006
Av. Alhelies



P2. Trix 648
Av. Alhelies



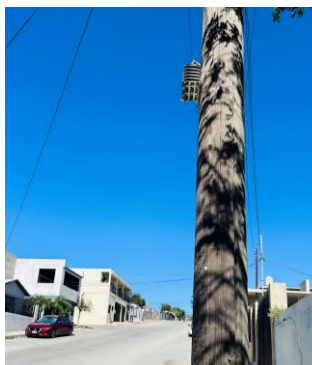
P3. Trix 649
Av. Alhelies



P4. Trix 650
C. Azucena



P5. Trix 651
C. Alcatraz



P6. Trix 653
C. Caléndura



Estación Davis
Blvd. Geranios



Armando de pantallas
Stevenson



Tapa y colocación de
las pantallas y sensores

Para los sensores de temperatura se aplicaron criterios de emplazamiento similares, priorizando cañones urbanos con orientación oeste–este representativos de diversas tipologías urbanas y que contaran con postes de madera adecuados para su instalación. Para reducir el riesgo de sombreado directo y manipulación indebida, se seleccionaron espacios urbanos seguros y abiertos. Cada sensor se montó dentro de una pantalla de Stevenson utilizando armellas cerradas de 19/40”, asegurando su suspensión adecuada y su protección frente a la radiación solar directa y del viento. Las pantallas se sellaron con láminas de PVC de 3 mm sujetas mediante cinchos y velcro, y se identificaron con adhesivos institucionales a fin de evitar su manipulación indebida.

3.4.5. Campaña de monitoreo

La campaña de monitoreo de las variables climáticas, que incluyó la operación de estaciones meteorológicas y sensores de temperatura, se desarrolló durante un periodo aproximado de 28 días, comprendidos entre el 23 de agosto y el 19 de septiembre de 2024, con una frecuencia de registro de datos a 5 minutos (véase Tabla 28). Esta etapa contempló inspecciones periódicas del estado de los equipos con el fin de garantizar su funcionamiento continuo y preciso, así como la recolección sistemática de datos a lo largo del periodo establecido.

Tabla 28
Especificaciones del monitoreo

Variable monitoreada	Intervalo de monitoreo	Altura de colocación	Fecha y hora de inicio	Fecha y hora de terminación	Lomitas	Moderna
Temperatura de bulbo seco	5 minuto	Sensores: 3 m	23/08/2024 Hora: 12:00	19/09/2024 Hora: 11:00	Onset 131	Onset 889
Humedad relativa					TRIX 648	TRIX 654
Velocida y dirección del viento		TRIX 649			TRIX 655	
		TRIX 650			TRIX 656	
		TRIX 651			Estación	
		Estaciones: azotea			TRIX 653	Acurite
					Davis	

3.4.5.1. Captura fotográfica

Con el propósito de caracterizar las condiciones geométricas de cada área y unidad de análisis, se llevó a cabo la captura de fotografías hemisféricas, las cuales permitieron estimar el

factor de cielo visible de los cañones urbanos. Este parámetro resulta fundamental en la modulación del microclima urbano, pues influye directamente en el balance radiativo y en la eficiencia de la ventilación natural.

Las fotografías hemisféricas se obtuvieron el 10 de septiembre de 2024 (véase Tabla 29). La integración de esta información complementa los datos meteorológicos registrados por los sensores locales y posibilita una evaluación más precisa del comportamiento térmico urbano, así como de su relación con la configuración morfológica del entorno construido. En cuanto al procedimiento de captura, en la colonia Las Lomitas las fotografías se tomaron en el centro de cada cañón urbano donde se instalaron los sensores. En la colonia Moderna, debido a la mayor longitud de las vialidades, se capturaron dos fotografías por punto de monitoreo, con el fin de representar adecuadamente la variación geométrica del entorno. Estos emplazamientos se ilustran en la Figura 37 y Figura 38.

Tabla 29
Especificaciones para la captura de fotografías

Variable monitoreada	Fecha y hora de inicio	Fecha y hora de terminación	Lomitas	Moderna
Factor de Cielo Visible	10/08/2024 Hora: 9:30	10/08/2024	Cámara Canon 80D, lente EF-S 18-135mm IS USM con lente Canon ef 8-15mm f/41 fisheye usm	

Las imágenes hemisféricas fueron procesadas mediante el software RayMan (Matzarakis et al., 2007), una herramienta ampliamente empleada en estudios de climatología urbana para la evaluación del confort térmico y la exposición solar. A través del análisis de estas imágenes, RayMan estima el SVF, el cual representa la fracción del cielo visible desde un punto determinado. Esta estimación toma en cuenta los obstáculos físicos presentes, como edificaciones, vegetación o elementos del mobiliario urbano, los cuales interfieren con la visibilidad del cielo y, por ende, con la disipación del calor acumulado.

Figura 37

Mapa de ubicación para la captura de fotografías en la colonia Las Lomitas



Figura 38

Mapa de ubicación para la captura de fotografías en la colonia Moderna



3.4.6. Procesamiento de datos

Para garantizar la precisión y confiabilidad de los datos recabados durante la campaña de monitoreo, se llevó a cabo un proceso de depuración y análisis de los datos climáticos registrados. En primera instancia, los datos fueron filtrados para obtener registros horarios, facilitando así su interpretación y análisis. Posteriormente, se aplicaron correcciones con base en los resultados obtenidos durante la fase de calibración, utilizando la ecuación de la recta derivada del ajuste por regresión lineal, lo que permitió corregir posibles desviaciones sistemáticas en las mediciones y homogenizar la base de datos, lo que incrementó la calidad y fiabilidad de la información utilizada en los análisis y simulaciones desarrollados en etapas posteriores del estudio. Una vez corregidos, los datos fueron representados gráficamente para identificar patrones y variaciones significativas en las condiciones microclimáticas de las áreas monitoreadas.

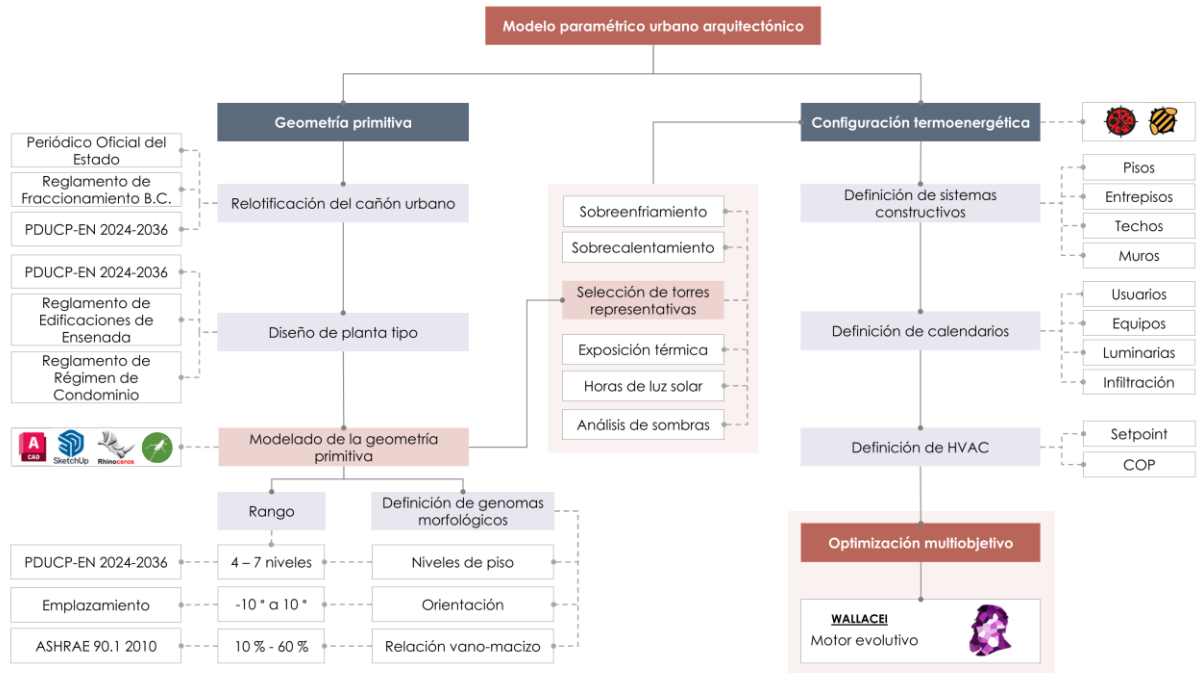
Finalmente, esta información fue empleada en etapas posteriores de la investigación para la validación del modelo de simulación numérica, en el marco del proceso de optimización multiobjetivo.

3.5. Modelo paramétrico urbano-arquitectónico

El modelo paramétrico urbano-arquitectónico constituye el núcleo operativo de esta investigación, al funcionar como el eslabón metodológico entre la estructura morfológica del cañón urbano y las etapas posteriores de optimización evolutiva y simulación térmico-energética. Esta fase integra criterios normativos, parámetros geométricos y principios de modelación generativa para construir una representación digital ajustable, capaz de reproducir múltiples configuraciones urbanas en coherencia con el marco regulatorio vigente.

La Figura 39 presenta de manera esquemática el proceso metodológico desarrollado para la construcción del modelo paramétrico, desde la revisión normativa y la relotificación del cañón urbano, hasta la configuración energética final que servirá como base tanto para la optimización multiobjetivo como para la simulación prospectiva.

Figura 39
Metodología del modelo paramétrico urbano-arquitectónico



3.5.1. Modelado de la geometría primitiva

El proceso de modelación se desarrolló en un entorno paramétrico, en el cual los genomas o variables de decisión fueron definidos para permitir la exploración sistemática del espacio de soluciones mediante el algoritmo NSGA-II. Antes de establecer estos genomas, fue necesaria una reconstrucción integral del cañón urbano, que incluyó: i) la relotificación con base en criterios normativos, ii) el diseño de la planta tipo multifamiliar, iii) la generación volumétrica del conjunto, y iv) la selección de torres representativas para los análisis térmicos y energéticos posteriores.

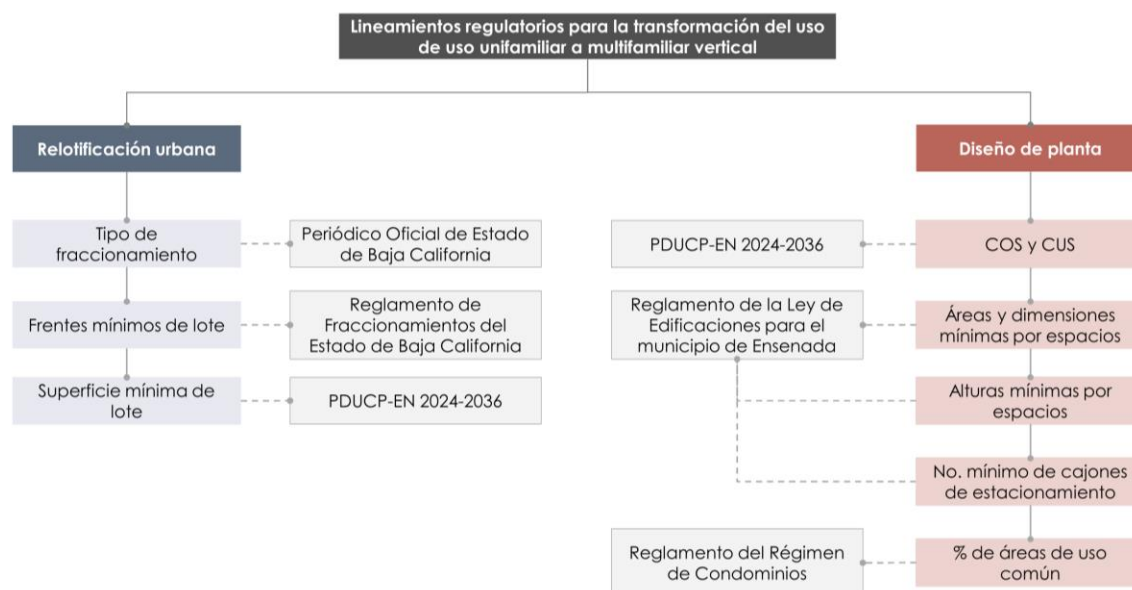
3.5.1.1. Relotificación y diseño de la planta tipo

El primer paso consistió en relotificar el patrón original de lotificación unifamiliar hacia un esquema multifamiliar vertical compatible con el marco normativo. La Figura 40 sintetiza este procedimiento. Para ello, se revisaron las disposiciones del Reglamento de Fraccionamientos del Estado de Baja California —Capítulo II, Artículo 35, Sección III—, que establece frentes mínimos de 10 m para vivienda de interés social (caso Lomitas) y 15 m para

vivienda residencial (caso Moderna) (Sánchez Díaz, 1993, pp. 15, 20). Sin embargo, al considerar los requerimientos de estacionamiento por unidad habitacional, fue necesario ampliar el frente hasta 34 m, lo que permitió una mejor integración de circulaciones, accesos y áreas comunes dentro del conjunto.

Figura 40

Metodología para la reconfiguración de lotes y diseño de la planta tipo



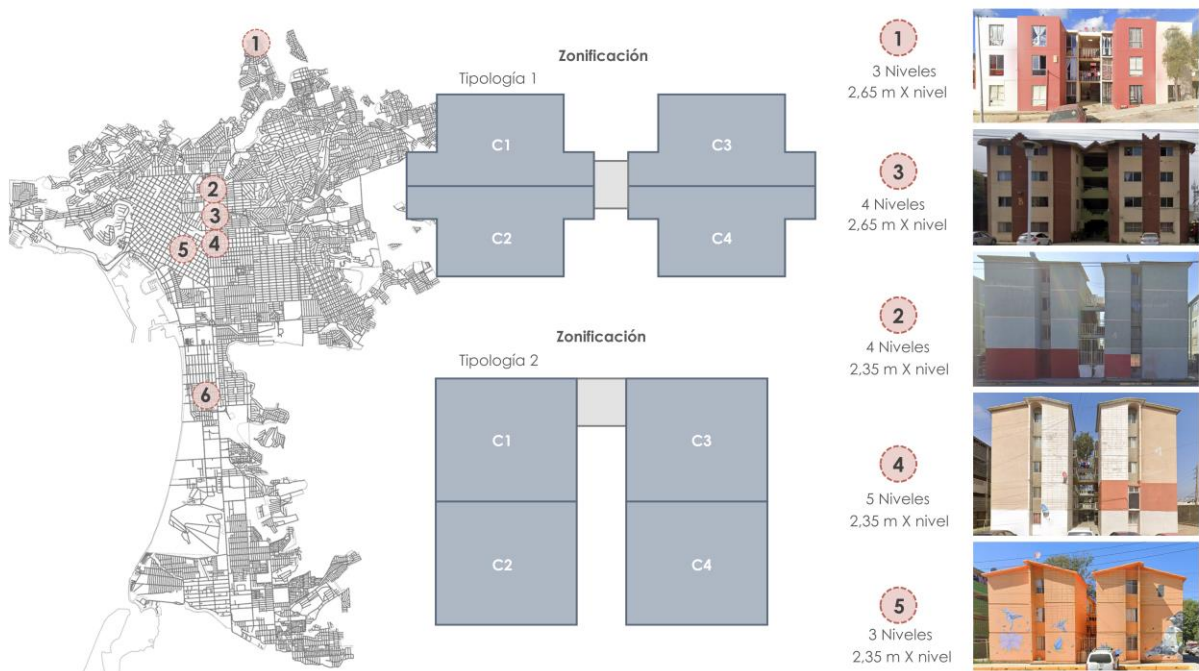
Una vez redefinida la lotificación, se procedió al diseño de la planta tipo que serviría como base morfológica para la generación de los volúmenes edificatorios. Esta etapa fue esencial porque la planta tipo define la estructura sobre la cual operarán las variables de decisión durante la optimización evolutiva. Con el fin de garantizar su pertinencia y coherencia con el contexto real, se realizó un análisis comparativo de diversas torres condominales existentes en Ensenada.

La Figura 41 muestra seis ejemplos representativos ubicados en los sectores Centro, Noreste y Chapultepec. El análisis permitió identificar patrones comunes en edificaciones multifamiliares de la ciudad: alturas entre 3 y 5 niveles, con dimensiones verticales que oscilan entre 2,35 m y 2,65 m por nivel, y la presencia de dos tipologías predominantes (véase Figura 42): i) la configuración en “H”, formada por cuatro bloques articulados por un corredor central, y ii) la tipología de doble bloque paralelo, donde dos volúmenes rectangulares se vinculan mediante el núcleo de escaleras con un corredor de circulación.

Figura 41
Análisis de tipologías reales existentes



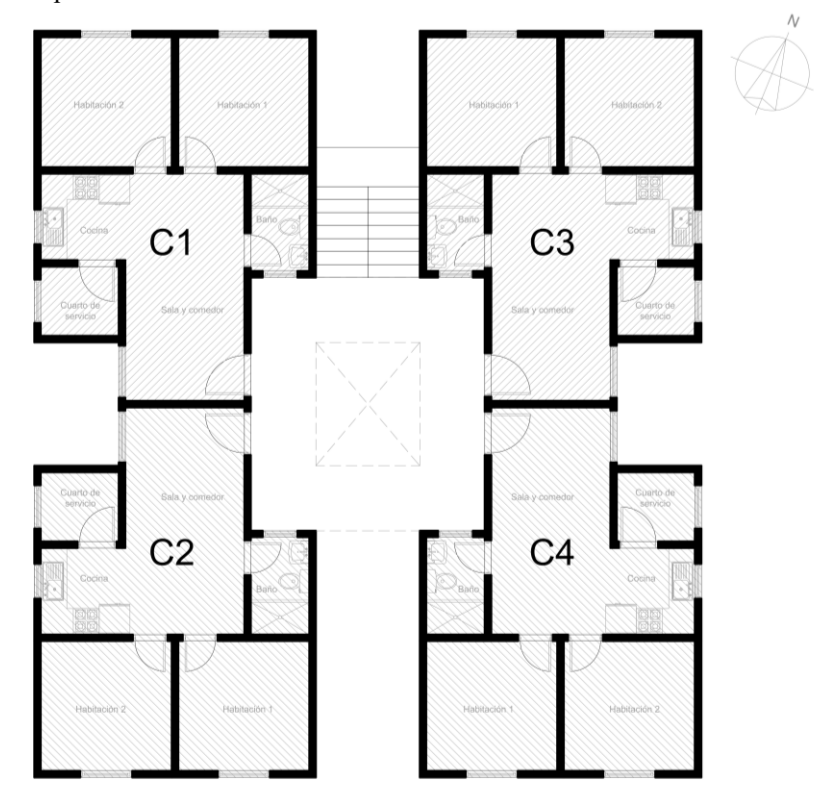
Figura 42
Identificación de tipologías geométricas predominantes



A partir de esta revisión empírica y de la disponibilidad de acceso al inmueble, se seleccionó como referencia directa la torre número 4. Su diseño fue adaptado para cumplir con los lineamientos normativos relacionados con habitabilidad, funcionalidad, áreas mínimas por espacio, alturas reglamentarias, cajones de estacionamiento y porcentajes de áreas de uso común establecidos por la normativa municipal (véase Tabla 14).

El modelo base adoptó una configuración en “H” derivada de una planta cuadrangular simétrica. El esquema incluye un patio central de 6,8 m² que funciona como espacio de ventilación e iluminación natural, articulado con un pasillo perimetral de 24,8 m² que conecta cuatro bloques habitacionales dispuestos simétricamente. Cada bloque cuenta con 46,8 m² de área habitable, lo que totaliza 187 m² por nivel. La distribución interior incorpora dos recámaras, un baño completo, un cuarto de lavado y un área común de sala-comedor-cocina. La incorporación de aperturas hacia el exterior y hacia el patio interior permite optimizar el aprovechamiento de la luz natural. La Figura 43 presenta el diseño final de la planta tipo; las especificaciones dimensionales completas se reportan en el Apéndice B.

Figura 43
Diseño de la planta tipo



Una vez validada la planta tipo, esta se integró en la nueva relotificación de ambas áreas de análisis. Para la colonia Lomitas se modelaron 15 torres (véase Apéndice C), mientras que para la colonia Moderna se generaron 12 torres (véase Apéndice D), ambas configuraciones en estricto cumplimiento con los lineamientos urbanos y normativos revisados.

3.5.1.2. Definición de genomas

Una vez establecida la geometría base del cañón urbano y de las torres multifamiliares, se procedió a definir los genomas del modelo paramétrico, entendidos como las variables de decisión que regulan el comportamiento evolutivo del sistema durante el proceso de optimización. Estos genomas actúan sobre parámetros morfológicos clave que inciden directamente en el desempeño térmico-energético de las edificaciones, modulando su interacción con el entorno, su exposición a la radiación solar y su estructura volumétrica. La selección de estos parámetros y la determinación de sus rangos de variación se fundamentaron en la normativa urbana y edificatoria vigente, así como en criterios técnicos pertinentes para climas mediterráneos. Se definieron tres genomas principales que estructuran el comportamiento del modelo (véase Figura 44):

Figura 44

Genomas del modelo paramétrico urbano-arquitectónico



- i. Relación vano-macizo o Window-to-Wall Ratio (WWR): determina el grado de exposición de la envolvente a la radiación solar y la transmisión de calor a través de

ventanas y muros, influyendo en la demanda energética asociada a iluminación y enfriamiento.

- ii. Altura de las edificaciones (número de pisos): controla la relación de aspecto del cañón urbano, la capacidad de densificación y la magnitud de las cargas térmicas derivadas de la ganancia solar, así como las condiciones de sombreado y ventilación entre edificios.
- iii. Orientación de la huella edificatoria: regula la incidencia de radiación solar directa, las condiciones de sombreado y la distribución espacial de ganancias térmicas dentro del espacio.

A continuación, se describen los intervalos asignados a cada genoma, junto con su justificación técnica y normativa (véase Tabla 30):

- Gen 1. WWR: intervalo 10,0 % a 60,0 %.

El rango se definió con base en los lineamientos del ASHRAE 90.1-2010, que establece proporciones recomendables según la zona climática. Para climas fríos se sugieren valores entre 40,0 % y 60,0 % a fin de maximizar ganancias solares, mientras que en climas templados se recomiendan proporciones entre 30,0 % y 50,0 % para equilibrar la iluminación natural y el control térmico. Considerando que Ensenada presenta condiciones de clima mediterráneo semiárido, se adoptaron intervalos de 30,0 % a 60,0 % para los espacios habitables (recámaras y área común). Para recintos con baja demanda de iluminación natural y requerimientos de privacidad (como baño y cuarto de servicio) se estableció un rango entre 10,0 % y 20,0 %, en concordancia con lo estipulado por ASHRAE para espacios secundarios.

- Gen 2. Niveles de piso: intervalo de 4,0 a 7,0 pisos.

Si bien el PDUCP autoriza edificaciones de hasta 10,0 niveles, la revisión normativa evidenció que, en los predios disponibles, el cumplimiento del número mínimo de cajones de estacionamiento por unidad habitacional se vuelve inviable para alturas superiores a siete niveles. En consecuencia, se adoptó un límite superior de siete

niveles. El mínimo de cuatro niveles se estableció para mantener coherencia con las tipologías condominales predominantes en Ensenada.

- Gen 3. Orientación de la huella edificatoria: intervalo de -10,0 ° a 10,0 °.

El rango de determinó con base en las restricciones físicas de emplazamiento.

Tabla 30

Rangos e intervalos de los genomas

Gen	Rango	Intervalo	Normativa
WWR	30,0 % - 60,0 % (recamaras y área común) 10,0 % - 20,0 % (baño y cuarto de servicio)	1,0 %	ASHRAE 90.1-2010
Niveles de piso	4,0 – 7,0 niveles	1 nivel (2,6 m)	Reglamento de la Ley de Edificaicones para el Municipio de Ensenada y el PDUCP 2024-2036
Orientación	-10,0 ° - 10,0 °	1,0 °	Restricciones del emplazamiento

Definidos los genomas del modelo y establecidos sus rangos de variación, la planta tipo fue parametrizada en Grasshopper® como una unidad habitacional genérica derivada de la geometría primitiva previamente desarrollada. Esta parametrización incorporó los genomas como variables de control del sistema, habilitando la generación automática de configuraciones morfológicas alternativas para su posterior evaluación mediante el proceso de optimización.

3.5.1.3. Selección de torres representativas

El cañón urbano se emplea como un marco morfológico y microclimático contextual, dentro del cual se evalúa el desempeño térmico-energético de edificaciones representativas seleccionadas estratégicamente. Bajo este enfoque, se analizaron dos torres por colonia, correspondientes a configuraciones extremas identificadas mediante un análisis sistemático de sombreado y exposición solar: una torre con alta exposición a la radiación directa, asociada a condiciones de sobrecalentamiento, y otra emplazada en un entorno con mayor grado de sombreado, vinculada a sobreenfriamiento.

El resto de las edificaciones generadas a partir del proceso de relotificación y optimización se mantiene explícitamente en el modelo como elementos contextuales, contribuyendo a los intercambios radiativos, a los efectos de sombreado y a la configuración

geométrica del entorno urbano, sin constituir unidades de análisis directo. Si bien no se modelan de forma explícita los procesos convectivos complejos ni los intercambios adiabáticos a escala urbana, los cuales exceden el alcance metodológico del presente estudio, estos efectos se incorporan de manera indirecta a través de la geometría urbana, la obstrucción radiativa y la interacción edificio–entorno, en coherencia con el nivel de resolución del modelo termoenergético empleado.

Para garantizar la comparabilidad entre edificaciones y maximizar la sensibilidad de los análisis, todas las torres fueron modeladas inicialmente con el número máximo de niveles permitido en el estudio, de modo que el comportamiento solar y térmico se evaluó bajo la condición de mayor volumen y exposición posible. A partir de esta configuración límite, se aplicaron los análisis descritos a continuación:

i. Análisis de proyección de sombras estacionales.

Se realizó una evaluación de sombras utilizando la herramienta 3D Sun Path desarrollada por Andrew Marsh, para los solsticios y equinoccios del año. Este análisis permitió identificar las torres con mayor y menor exposición solar durante los periodos críticos del ciclo anual, diferenciando su comportamiento según posición relativa dentro del cañón urbano.

ii. Análisis anual de horas de luz solar directa

Posteriormente, se empleó Ladybug para calcular las horas acumuladas de radiación solar directa incidente sobre las envolventes de cada torre. Este paso permitió cuantificar la variabilidad en la exposición solar anual y reconocer las edificaciones localizadas en condiciones de iluminación extrema, tanto por exceso como por déficit de radiación.

iii. Análisis energético preliminar

Finalmente, se realizó un análisis energético preliminar exclusivamente en las torres que, con base en los dos análisis anteriores, cumplieran con los criterios de sobreexposición a la radiación solar o de elevada incidencia de sombra. Para estas torres factibles se simuló el comportamiento térmico empleando la geometría base del modelo, con el fin de estimar las cargas de enfriamiento y calentamiento asociadas a cada condición.

La integración de estos tres análisis condujo a la selección final de las dos torres representativas por colonia, descritas a continuación:

- i. Torre de sobrecalentamiento (TSC): presenta mayor riesgo de pobreza energética asociada a cargas de enfriamiento, debido a que se encuentra más expuesta a la radiación solar directa, lo que incrementa su nivel de sobrecarga térmica y el potencial de sobrecalentamiento.
- ii. Torre de sobreenfriamiento (TSE): presenta mayor riesgo de pobreza energética asociada a cargas de calentamiento, debido a la mayor exposición a la proyección de sombras, lo que limita la ganancia solar disponible y disminuye la iluminación natural.

La Figura 45 muestra la ubicación de ambas torres dentro del cañón urbano de Lomitas, mientras que la Figura 46 corresponde al cañón urbano de Moderna. Estas torres constituyen la base para la configuración térmico-energética detallada empleada en la etapa de optimización evolutiva y simulación prospectiva.

Figura 45

Selección de torres representativas en Lomitas

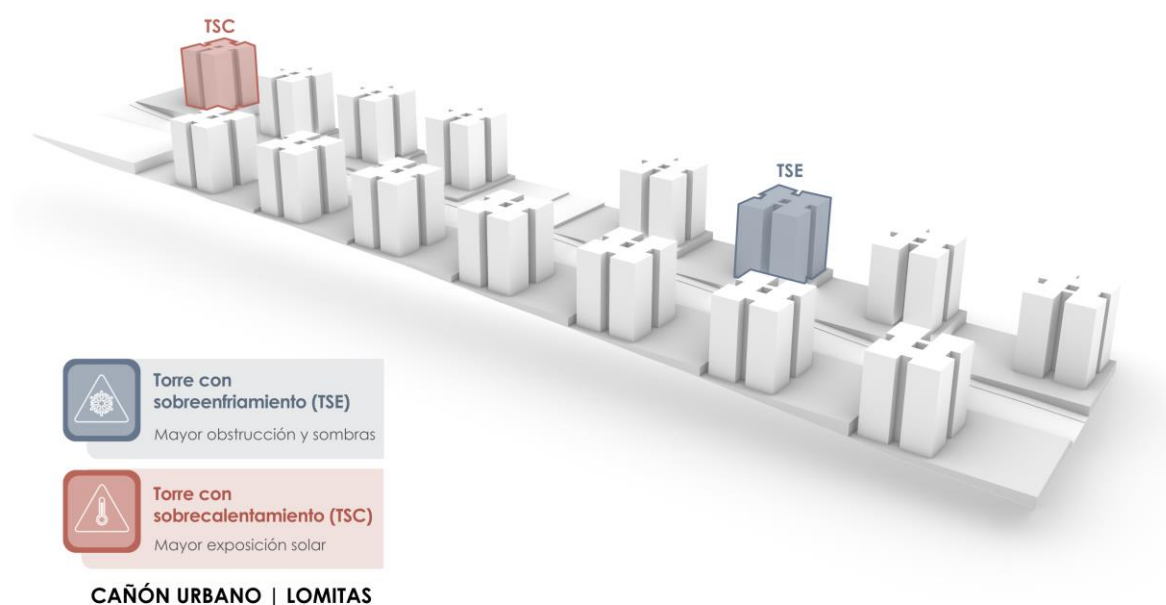
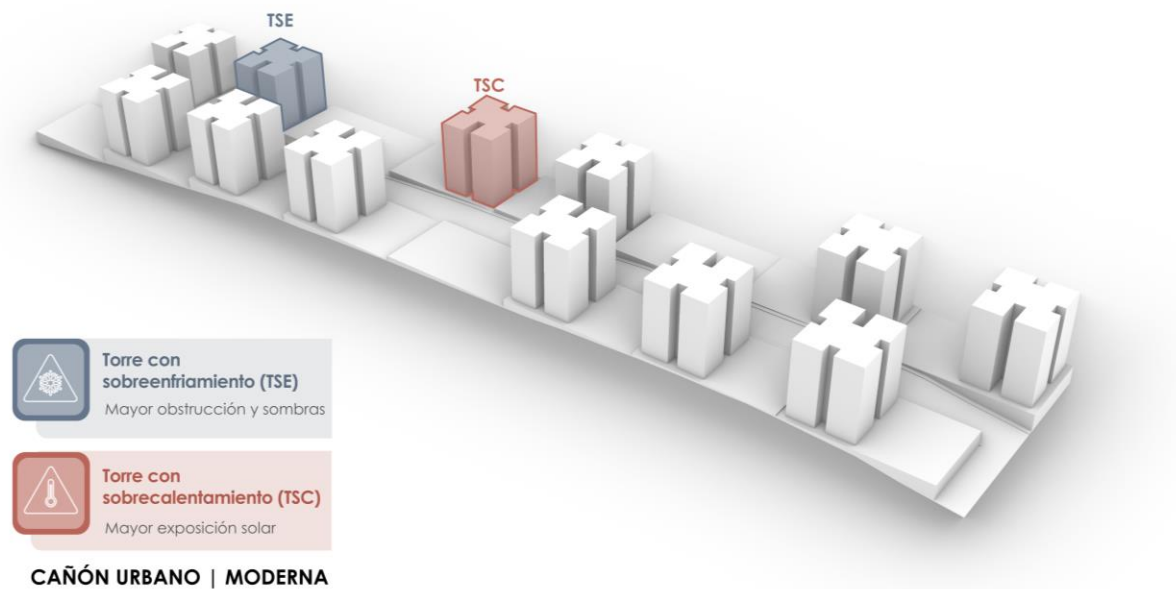


Figura 46
Selección de torres representativas en Moderna



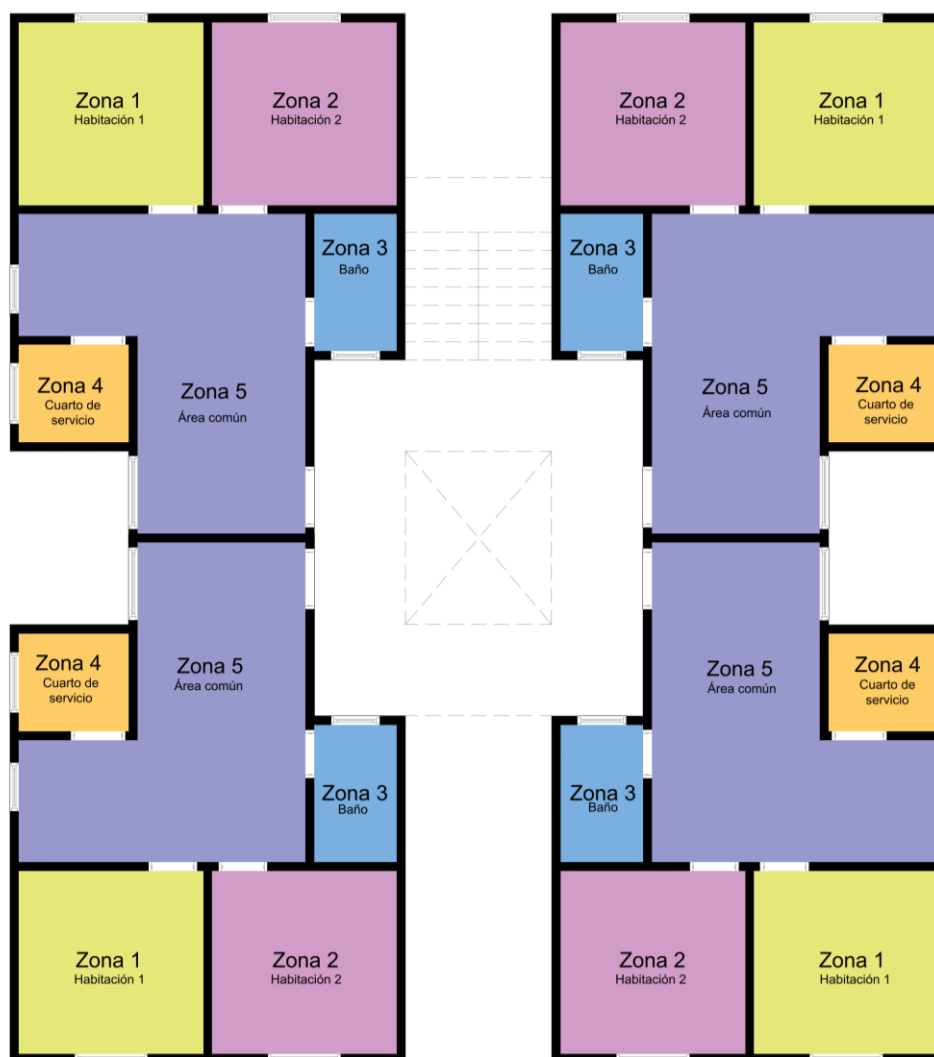
3.5.2. Configuración termoenergética

La configuración térmico-energética constituye la etapa final del modelo paramétrico urbano-arquitectónico. En esta fase se definieron los sistemas constructivos, los parámetros de operación, los calendarios de ocupación, los equipos HVAC y las propiedades térmicas de la envolvente. Dada la naturaleza incremental del modelo, la configuración energética se aplicó exclusivamente a las dos torres representativas previamente seleccionadas, las cuales funcionan como unidades experimentales dentro del proceso de optimización. El resto de las torres mantiene únicamente su función como contexto geométrico para efectos de sombreado, obstrucción solar y coherencia espacial del cañón urbano.

El proceso se organizó en tres etapas principales: i) definición de las características constructivas del edificio, ii) asignación de los parámetros operativos de ocupación, iluminación, equipos y ventilación, y iii) configuración de sistemas HVAC empelados en la simulación.

Un componente clave para asegurar la coherencia entre la geometría generativa y la simulación fue la definición y parametrización de las zonas térmicas. Se establecieron cinco zonas principales con base en la distribución programática de la planta tipo (véase Figura 47): Zona 1 (Habitación 1), Zona 2 (Habitación 2), Zona 3 (Baño), Zona 4 (Cuarto de servicio) y Zona 5 (Área común). A diferencia de los esquemas convencionales, donde cada nivel genera un conjunto independiente de zonas térmicas, el modelo propuesto emplea una lógica de zonas acumulativas. Bajo este enfoque, cada zona agrupa todos los espacios equivalentes de todas las unidades habitacionales, independientemente del número de niveles que el algoritmo determine para cada configuración.

Figura 47
Definición de zonas térmicas



Esta estructura fue posible gracias a la parametrización implementada en Grasshopper® y Honeybee®, la cual permite que cada zona ajuste su geometría de forma dinámica conforme el genoma asociado al número de pisos modifica la altura total del edificio. Por ejemplo, la Zona 1 agrupa simultáneamente todas las Habitaciones 1 del edificio; así, el número de espacios incorporados en dicha zona se incrementa o reduce automáticamente conforme el algoritmo evolutivo aumenta o disminuye la cantidad de niveles. Esta lógica de zonas acumulativas garantiza estabilidad geométrica en el modelo, eficiencia computacional durante la simulación y coherencia en la evaluación térmica-energética de todas las configuraciones generadas en el proceso de optimización.

3.5.2.1. Definición de sistemas constructivos

En esta primera etapa de la configuración térmica-energética se definieron los sistemas constructivos asociados a todos los elementos que integran la envolvente térmica de las dos torres representativas. La selección de materiales y parámetros físicos se basó en las prácticas constructivas predominantes de la vivienda multifamiliar en Ensenada, así como en criterios de representatividad para edificaciones de clima mediterráneo semiárido. Se especificaron las propiedades térmicas de suelos, entrepisos, cubierta, muros exteriores e interiores, puertas y ventanas, considerando para cada componente su conductividad térmica, transmitancia (U-value), densidad, capacidad calorífica y espesor.

Estas propiedades fueron integradas mediante Honeybee® para su procesamiento en EnergyPlus®, motor de simulación energética desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos y ampliamente validado en la literatura especializada (Crawley et al., 2001). La adopción de una envolvente constructiva homogénea garantiza que las diferencias observadas en el desempeño térmico-energético deriven exclusivamente de las variaciones morfológicas inducidas por los genomas del modelo (altura, relación vano-macizo y orientación), preservando así la comparabilidad entre soluciones.

La Tabla 31 presenta los valores de transmitancia térmica asociados a cada componente constructivo, mientras que la Tabla 32 resume las propiedades térmicas integrales de los materiales (conductividad, calor específico y densidad) empleados en la envolvente.

Tabla 31Valores U de construcción (W/m²-K)

Tipo de construcción	Valor U de construcción (W/m ² -K)
Muros exteriores	5,34
Muros interiores	7,28
Piso sobre terreno	0,49
Entrepiso	1,12
Techo	0,91
Puertas	1,13
Ventanas	7,01
Infiltración	0,0003 m ³ /s por m ² (edificio promedio)

Tabla 32

Propiedades físicas térmicas de los materiales de construcción

Material de construcción	Componente de la envolvente del edificio	Conductividad térmica (W/m-K)	Calor específico (K/kg-K)	Densidad (kg/m ³)
Estuco	Muros / Techos	0,78	1000	1600
Mortero/cemento/arena	Muros / Techos	1,00	1000	1800
Block de concreto hueco 15x40x20	Muros	1,06	837	1664
Block de concreto hueco 12x40x20	Muros interiores	1,31	837	2240
Piso cerámico	Losas de entrepiso	1,00	840	1920
Casetón vigueta y bovedilla	Techos	0,20	935	1209
Impermeabilizante reflectivo	Techos	0,05	1500	70
Concreto armado	Piso	2,50	1000	2500
Madera de pino	Puertas	0,11	2720	419

3.5.2.2. Definición de parámetros operativos

En la segunda etapa se definieron los parámetros operativos necesarios para la simulación termoenergética, incluyendo los calendarios de ocupación, equipos, iluminación y ventilación. Se adoptó un perfil representativo de una familia típica de cuatro integrantes (dos adultos y dos adolescentes), siguiendo patrones de uso residencial documentados para zonas urbanas de México.

El calendario refleja una ocupación reducida durante la mañana, dado que los habitantes se encuentran en actividades laborales y escolares. La vivienda permanece desocupada entre las

8:00 y las 14:00 h, periodo durante el cual las ganancias internas por ocupación, iluminación y equipos disminuyen significativamente.

Estos patrones fueron programados en Honeybee® para generar perfiles horarios dinámicos coherentes con la realidad sociohabitacional del caso de estudio. La Tabla 33 detalla las cargas internas asignadas a cada zona térmica, expresadas como densidades de potencia para ocupación, iluminación, equipos eléctricos y equipos de gas cuando aplica.

Tabla 33
Cargas internas

Espacio	Superficie (m ²)	Equipo (W/m ²)	Ocupación (W/m ²)	Iluminación (W/m ²)	Equipo de gas (W/m ²)
Recamara 1	9,5	21	0,21	0,95	
Recamara 2	9,5	8	0,21	0,95	
Área común	20,6	218	0,19	2,04	125
Cuarto de servicio	3,5	2,814	0,29	3,43	4,129
Baño	3,7	-	0,27	1,89	

3.5.2.3. Definición de sistema HVAC

La tercera etapa consistió en la especificación del sistema HVAC para las simulaciones energéticas. Se seleccionó una bomba de calor residencial tipo Heat Cool HVAC Residential Heat Pump. El sistema opera bajo coeficientes de rendimiento (COP) de 3,31 para enfriamiento y 3,40 para calefacción. Las estrategias de operación del sistema se definieron mediante calendarios diferenciados para calefacción y enfriamiento, basados en condiciones climáticas locales y referencias regulatorias. La calefacción opera del 1 de octubre al 30 de abril, mientras que el enfriamiento se activa entre el 1 de mayo y el 30 de septiembre. Los puntos de ajuste de operación corresponden a 24 °C para calefacción (conforme a NOM-020-ENER-2011) y 20 °C para enfriamiento (California Energy Code Comfort Model). Todos estos parámetros se integraron mediante componentes de Honeybee® para su ejecución en EnergyPlus®. La Tabla 34 resume la configuración del sistema HVAC utilizado en las simulaciones.

Tabla 34
Definición del sistema HVAC

Calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC)		
Tipo de sistema HVAC	Heat Cool HVAC Residential heat pump	
Coeficiente de rendimiento (COP)	3,31 refrigeración	3,40 calentamiento

Calefacción	Apagado 01 mayo – 31 de septiembre	Encendido 01 de octubre – 30 de abril
Refrigeración	Apagado 01 de noviembre – 30 de abril	Encendido 01 de mayo – 31 de octubre
Punto de ajuste de calefacción	24 °C	NOM-020-ENER-2011
Punto de ajuste de enfriamiento	20 °C	California Energy Code Comfort Model

3.5.3. Herramientas y software

El modelo se desarrolló en un entorno de diseño paramétrico construido sobre Rhinoceros 3D® y su interfaz visual Grasshopper®, plataformas ampliamente utilizadas en procesos de modelación generativa y optimización morfológica. En este entorno se estructuró el flujo de trabajo completo desde la definición geométrica del cañón urbano hasta la simulación térmica-energética de las torres representativas.

La optimización multiobjetivo se implementó mediante el motor evolutivo Wallacei, el cual opera sobre el algoritmo NSGA-II y permite gestionar poblaciones, evaluar el desempeño de las soluciones y analizar la convergencia hacia frentes de Pareto. Por su parte, la evaluación ambiental y térmica-energética se realizó mediante los plugins Ladybug y Honeybee, que funcionan como interfaz directa con los motores de cálculo Radiance, Daysim y EnergyPlus®.

La integración de estas herramientas permitió estructurar un sistema unificado de análisis prospectivo orientado a predecir el desempeño térmico de las configuraciones generadas por el modelo. Este enfoque garantiza que la optimización considere simultáneamente tanto el clima actual como los escenarios de cambio climático proyectados, fortaleciendo la robustez y aplicabilidad de los resultados (véase Tabla 35).

Tabla 35
Herramientas y software

Softwares	Gráfico descriptivo
Herramienta de interpolación de datos meteorológicos denominada Meteororm. Contiene datos de 8325 estaciones meteorológicas y cinco satélites geoestacionarios.	
Rhinoceros es un visualizador 3Dy Grasshopper es una interfaz gráfica de diseño computacional asistido por algoritmos.	

Ladybug es un complemento ambiental para *Grasshopper*, importa archivos EPW y proporciona una variedad de gráficos interactivos en 2D y 3D.



Honeybee es un complemento para el motor *Grasshopper* que permite crear y ejecutar modelos de energía mediante *OpenStudio* y *EnergyPlus*.



Wallacei es un Motor evolutivo complemento para *Grasshopper* que permite a los usuarios ejecutar simulaciones evolutivas.



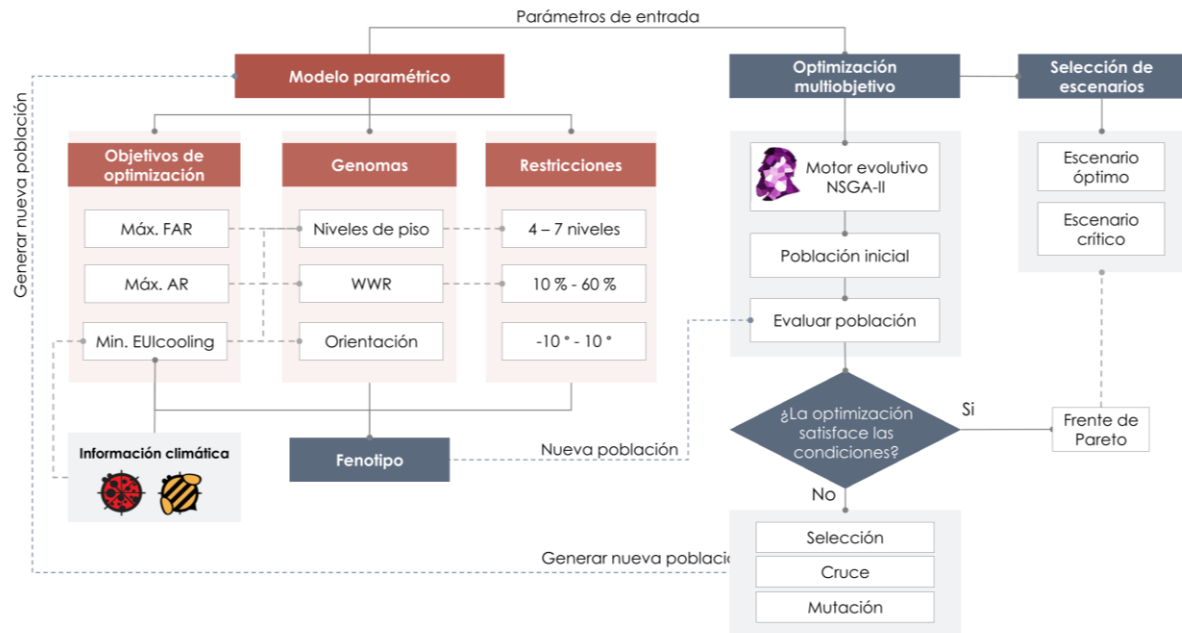
3.6. Optimización multiobjetivo

La fase de optimización multiobjetivo constituye el núcleo analítico del modelo paramétrico desarrollado, ya que permite explorar de manera sistemática el espacio de escenarios generado a partir de los genomas definidos en la etapa anterior y evaluar su desempeño morfológico y térmico-energético bajo criterios simultáneos de densificación urbana y eficiencia energética.

El proceso de optimización se implementó mediante el algoritmo evolutivo NSGA-II, ampliamente utilizado en estudios de diseño urbano y arquitectónico por su capacidad para manejar múltiples objetivos en conflicto, preservar la diversidad de soluciones y construir frentes de Pareto representativos del compromiso entre variables (Deb, 2001). A partir de una población inicial de soluciones, generada automáticamente por la combinación de los genomas del modelo paramétrico (niveles de piso, orientación y WWR) dentro de las restricciones normativas establecidas, cada individuo es evaluado en función de los objetivos de optimización definidos.

Como se ilustra en la Figura 48, el pseudocódigo del experimento sigue la siguiente lógica: generación de una población inicial, evaluación de la población y generación de nuevas poblaciones mediante operadores de selección, cruce y mutación. Este ciclo se repite hasta alcanzar la convergencia del sistema o el número máximo de generaciones establecido. El resultado del proceso es un conjunto de soluciones no dominadas que conforman el frente de Pareto, a partir del cual se seleccionan posteriormente los escenarios representativos (óptimo y crítico) para su análisis térmico-energético detallado y evaluación prospectiva.

Figura 48
Pseudocódigo del proceso de optimización



La fase metodológica se estructuró en tres etapas principales: i) definición de los objetivos de optimización, ii) configuración operativa del algoritmo evolutivo, y iii) selección de escenarios representativos a partir de los resultados obtenidos de la optimización multiobjetivo.

3.6.1. Definición de objetivos de optimización

Los objetivos de la optimización se establecieron en cumplimiento con la actual política de densificación urbana y los principios normativos, la necesidad de mantener una morfología viable para climas mediterráneos y las metas de reducción del consumo energético de las torres representativas. En este estudio se definieron tres objetivos de optimización (véase Tabla 36):

- i. Maximizar la relación de superficie promedio del cañón urbano (FAR):
Se calcula como la relación entre el área construida (AC) y el área del lote (AL). Un FAR alto incrementa la densificación vertical, proporcionando mayor sombra entre edificaciones, lo que contribuye a reducir la carga térmica sobre las fachadas.

- ii. Maximizar la relación de aspecto del cañón urbano (AR):
Se define como la razón entre la altura media de los edificios (H) y el ancho de la calle (W). Un valor de AR mayor a 1 favorece la generación de sombra en el espacio urbano, ayudando a mitigar las ganancias térmicas por radiación solar directa.
- iii. Minimizar la intensidad de uso de la energía de enfriamiento (EUIcooling):
correspondiente al mes más cálido. Este indicador representa la cantidad de energía destinada a refrigeración durante el mes más cálido, normalizada por unidad de superficie habitable, y se expresa en kWh/m²·mes. Este objetivo se definió de manera independiente para cada una de las torres representativas.

Tabla 36
Objetivos de optimización

Sigla	Descripción	Fórmula	Unidad de medida	Variables
FAR	Índice de aprovechamiento del suelo. Expresa la relación entre el área construida y el área del lote.	$AR = \frac{AC}{AL}$	Adimensional	AC: área construida total (m ²) AL: área del lote (m ²)
AR	Define la proporción entre la altura media de las edificaciones y el ancho del cañón urbano.	$AR = \frac{H}{W}$	Adimensional	H: altura media de las edificaciones (m) W: ancho del cañón urbano (m)
EUIcooling	Intensidad de uso energético para refrigeración. Cantidad de energía utilizada en el mes más cálido por unidad de superficie construida	$EUI = \frac{CER}{AC}$	kWh/m ² -año	CER: Consumo energético de refrigeración del mes más cálido AC: área construida considerada para el cálculo (m ²)

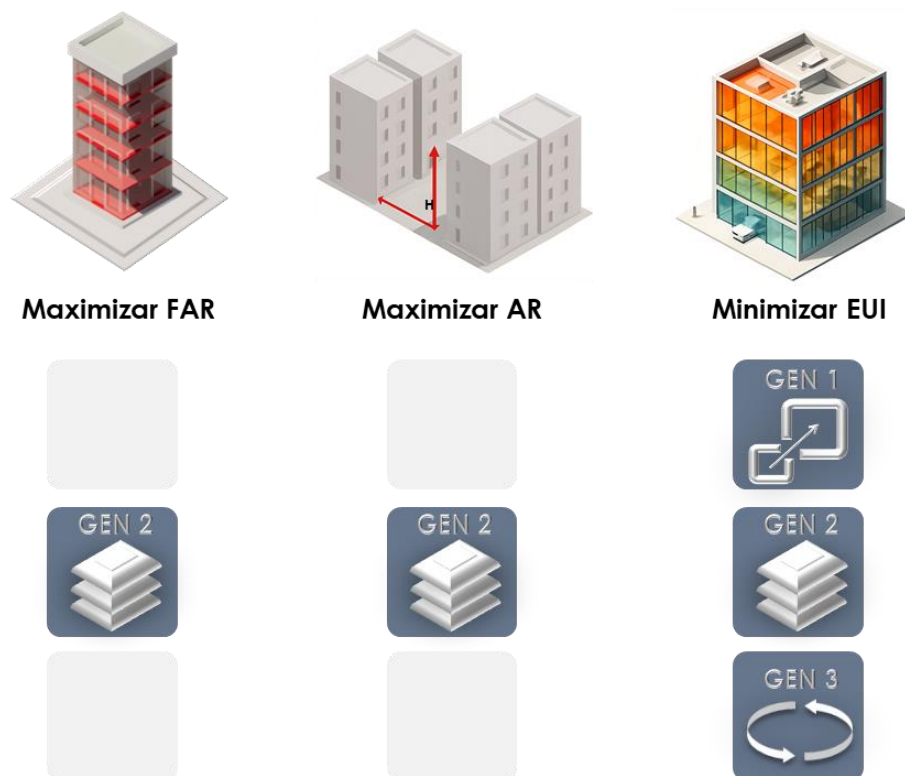
La relación entre los objetivos de optimización y los genomas del modelo paramétrico es directa y estructural, dado que cada genoma actúa como un modulador geométrico capaz de alterar de manera significativa el desempeño térmico-energético y las condiciones morfológicas del cañón urbano. El genoma asociado a los niveles de piso (GEN 2) incide simultáneamente en la densificación vertical y en la altura efectiva del cañón urbano, por lo que influye de manera determinante en los objetivos de maximizar FAR y maximizar AR, al modificar el volumen construido y la relación altura–ancho del espacio urbano. Por su parte, la relación vano–macizo (GEN 1) regula la ganancia solar y el comportamiento de la envolvente, constituyendo un

parámetro crítico para minimizar el EUI de enfriamiento, al influir en la demanda energética del edificio. Finalmente, la orientación de la huella edificatoria (GEN 3) condiciona la exposición solar, las sombras proyectadas y la distribución de cargas térmicas, por lo que también contribuye de manera directa al objetivo de reducción del EUI. En conjunto, los tres genomas conforman un sistema de control integrado que articula la morfología urbano-arquitectónica con los criterios de desempeño ambiental, permitiendo que el algoritmo evolutivo explore configuraciones que equilibren densificación, eficiencia energética y adecuación climática.

La articulación entre estos objetivos y los genomas se sintetiza en la Figura 49, donde se muestra cómo cada variable de diseño influye en uno o varios objetivos del proceso evolutivo, evidenciando su papel dentro de la lógica integral de optimización.

Figura 49

Relación entre los objetivos y los genomas del modelo



3.6.2. Configuración operativa del algoritmo NSGA-II

La configuración del algoritmo NSGA-II constituye un elemento crítico para garantizar la eficiencia y robustez del proceso evolutivo. Los parámetros que influyen de manera más significativa en su desempeño incluyen el tamaño de la población, el número de generaciones, la probabilidad de cruce y la probabilidad de mutación, además de los índices de distribución asociados a los operadores genéticos. La definición de estos parámetros debe considerar la naturaleza del problema, el número de variables de decisión, el alcance experimental, los tiempos de simulación y la capacidad computacional disponible.

Diversos autores han documentado rangos recomendables para estos parámetros. Lei et al. (2005) sugieren que la probabilidad de cruce oscile entre 40 % y 99 %, dado que valores reducidos pueden ralentizar la evolución y favorecer el estancamiento del algoritmo en regiones subóptimas del espacio de soluciones. En cuanto al tamaño de población, los mismos autores proponen emplear entre 10 y 200 individuos por generación; sin embargo, poblaciones demasiado pequeñas tienden a provocar convergencia prematura, mientras que poblaciones excesivamente grandes pueden incrementar de manera considerable el costo computacional. Ascione et al. (2016) recomiendan dimensionar el tamaño de la población entre dos y seis veces el número de variables de diseño, con el objetivo de asegurar una diversidad suficiente para explorar el espacio morfológico y energético con mayor estabilidad.

Respecto a la probabilidad de mutación, Deb et al. (2002) sugieren definirla como una función inversa del número de variables del problema ($1/n$). Esta formulación permite mantener una tasa adaptativa que evita una exploración excesiva (que podría comprometer la convergencia) y, al mismo tiempo, previene el estancamiento prematuro en óptimos locales. Los índices de distribución de cruce y mutación también desempeñan un papel esencial, puesto que controlan el grado de proximidad o dispersión entre padres y descendientes, modulando la exploración del espacio de soluciones.

Una adecuada definición de estos parámetros permite mejorar la estabilidad del algoritmo, reducir tiempos de cómputo y obtener soluciones no dominadas con mayor diversidad y calidad. La Tabla 37 presenta los parámetros definitivos empleados en esta investigación.

Tabla 37
Configuración del algoritmo NSGA-II

Indicador	Descripción	Valor
Tamaño de la población	Todos los individuos generados por la simulación evolutiva.	500
Número de individuos	Número de soluciones en cada generación	25
Número de la generación	Número de interacciones por ejecución de la simulación.	20
Probabilidad de cruce	Porcentaje de soluciones dentro de la generación que se reproducirá para la siguiente generación; es decir, es la probabilidad de que dos cromosomas intercambien segmentos específicos durante el proceso de recombinación. Una tasa del cruce del 100 % significa que todos los descendientes se generan por cruce.	90 %
Probabilidad de mutación	Porcentaje de mutaciones que toma lugar en la generación (Deb et. al. recomienda que la probabilidad de mutación sea $1/n$, donde n es el número de variables en el diseño del problema). De tal manera que el valor predeterminado es $1/n$.	$1/n$
Índice de distribución de cruce e índice de distribución de mutación	Un valor de índice de distribución grande da una mayor probabilidad de generar descendientes cercanos a las soluciones parentales, mientras que un valor de índice de distribución pequeño permite seleccionar soluciones distantes como soluciones secundarias.	20
Semilla aleatoria	Descendencia aleatoria a partir de la cual se efectúan las operaciones de selección, cruce y mutación.	1

3.6.3. Selección de escenarios

A partir de los resultados obtenidos en la optimización multiobjetivo, se seleccionaron dos escenarios representativos para su evaluación térmico-energética anual y la estimación del riesgo de pobreza energética, tanto bajo las condiciones climáticas actuales como bajo el escenario de cambio climático.

La selección de ambos individuos se realizó mediante el método de promedio de ranking de aptitud (*Average Fitness Ranking, AFR*), integrado en la plataforma Wallacei. Este método permite evaluar el desempeño global de cada individuo generado a partir de su posición relativa

dentro del conjunto de soluciones generadas, considerando simultáneamente todos los objetivos de optimización definidos (Makki et al., 2019).

El procedimiento consiste en ordenar a la población de individuos de acuerdo con su desempeño en cada objetivo de optimización (maximización de FAR, maximización de AR y minimización del EUI de enfriamiento). A cada individuo se le asigna un valor de ranking por objetivo, donde el valor cero representa el mejor desempeño relativo. Posteriormente, se calcula el promedio de los rankings obtenidos por cada individuo, generando un índice sintético (AFR) que resume su comportamiento global frente al conjunto de objetivos en conflicto. Con base en este indicador, se identificaron dos configuraciones clave:

- Individuo óptimo global: corresponde al individuo con el valor de AFR más bajo, lo que indica un desempeño consistentemente favorable en la mayoría de los objetivos de optimización. Esta solución representa la configuración morfológica más equilibrada del cañón urbano, al combinar altos niveles de densificación con un menor consumo energético por enfriamiento.
- Individuo crítico global: corresponde al individuo con el valor de AFR más alto, es decir, aquel que presenta el desempeño global más desfavorable. Esta configuración representa el escenario más vulnerable dentro del espacio de soluciones factibles, caracterizado por un comportamiento energético adverso.

La identificación del individuo óptimo y del individuo crítico constituye un paso metodológico clave para la evaluación prospectiva del sistema, ya que permite contrastar el mejor y el peor desempeño plausible del cañón urbano bajo las restricciones normativas, morfológicas y ambientales establecidas. Ambos escenarios se emplean posteriormente como casos de estudio para las simulaciones energéticas prospectivas hacia 2050, con el objetivo de analizar la sensibilidad del desempeño térmico-energético y del riesgo de pobreza energética frente a escenarios futuros de calentamiento climático.

3.7. Evaluación térmico energética y estimación del riesgo de pobreza energética

Una vez identificados los escenarios óptimos y críticos derivados del proceso de optimización multiobjetivo, se procedió a evaluar su desempeño térmico-energético y su implicación en el riesgo de pobreza energética bajo condiciones climáticas actuales y futuras.

Esta fase final del estudio tiene como objetivo analizar la sensibilidad de las tipologías densificadas frente al cambio climático proyectado y evaluar sus impactos potenciales sobre la demanda energética y la asequibilidad del consumo doméstico.

3.7.1.1. Evaluación térmico-energética bajo escenarios climáticos presente y futuro

La evaluación térmico-energética se llevó a cabo mediante simulaciones anuales aplicadas a las dos torres representativas seleccionadas, correspondientes al escenario óptimo y al escenario crítico, considerando, en una primera etapa, las condiciones climáticas actuales y, posteriormente, un escenario prospectivo de cambio climático hacia el año 2050. Para esta evaluación futura se empleó un archivo climático asociado al escenario de altas emisiones A2 del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (AR4), el cual describe una trayectoria caracterizada por un crecimiento poblacional sostenido, un bajo nivel de cooperación internacional y un desarrollo económico fragmentado, condiciones que derivan en un incremento significativo de las temperaturas globales y de la demanda energética (IPCC, 2007b).

Es importante precisar que, durante la evaluación prospectiva, no se ejecutó nuevamente el algoritmo evolutivo NSGA-II, ni se generaron nuevas configuraciones geométricas o escenarios morfológicos adicionales. En su lugar, se evaluó térmico-energéticamente las configuraciones morfológicas previamente optimizadas, con el objetivo de analizar exclusivamente el efecto del incremento térmico proyectado sobre su desempeño energético. Este enfoque permite estimar la respuesta futura de tipologías factibles en el presente frente a condiciones climáticas más severas, sin introducir variaciones adicionales en la geometría urbana ni en los parámetros de diseño. Durante esta fase, el resto de las edificaciones que conforman el cañón urbano se mantuvo como contexto morfológico del modelo, conservando su función de sombreado y obstrucción solar.

Las simulaciones anuales se realizaron mediante Honeybee®, a partir del cálculo de EUI que proporciona estimaciones de las cargas anuales de calefacción, refrigeración, iluminación y equipos por metro cuadrado. Posteriormente, estos valores fueron multiplicados por la superficie de cada condominio y con base en el esquema tarifario vigente en 2025 (véase Anexo A), lo que permitió estimar el consumo energético anual total por unidad habitacional.

3.7.1.2. Estimación del riesgo de pobreza energética

A partir de los resultados de la evaluación termoenergética, se estimó el riesgo de pobreza energética para ambas torres representativas, tanto bajo condiciones climáticas actuales como futuras de ambos escenarios (óptimo y crítico). Esta evaluación se fundamentó en un enfoque económico-energético que relaciona el costo anual del consumo doméstico de energía con la capacidad económica del hogar.

Para ello, se consideraron tres indicadores principales: i) el costo anual de energía eléctrica, calculado a partir del consumo obtenido en las simulaciones energéticas; ii) el costo anual de gas, estimado con base en un calendario de uso doméstico y el precio vigente del combustible; y iii) el ingreso anual del hogar, definido a partir de valores representativos del contexto socioeconómico del área de estudio. El estudio no consideró proyecciones económicas futuras.

El riesgo de pobreza energética se estimó mediante la relación entre el gasto energético anual total y el ingreso anual del hogar, permitiendo identificar incrementos en la vulnerabilidad económica asociados al aumento de las cargas de enfriamiento bajo escenarios de calentamiento climático. De acuerdo con el criterio clásico propuesto por Boardman (1991) y retomado por estudios posteriores (Bouzarovski, 2014), se considera que un hogar se encuentra en situación de pobreza energética cuando el gasto energético anual supera el 10 % de su ingreso total. Este enfoque posibilita evaluar de manera integrada cómo las decisiones de densificación urbana, aun optimizadas desde una perspectiva morfológica y energética, pueden amplificar o mitigar el riesgo de pobreza energética en contextos climáticos futuros.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.	Resultados.....	148
4.1.	Análisis espacial de la vulnerabilidad térmica-energética.....	148
4.2.	Caracterización del área de estudio	165
4.3.	Monitoreo microclimático	175
4.4.	Optimización multiobjetivo.....	189
4.5.	Evaluación térmico-energética de los escenarios	218
4.6.	Evaluación de la pobreza energética	231

4. Resultados

El presente capítulo expone de manera sistemática los resultados obtenidos a partir de la aplicación del marco metodológico propuesto, con el objetivo de evaluar la relación entre la vulnerabilidad térmica-energética, la morfología urbano-arquitectónica y el desempeño térmico-energético de los escenarios analizados. La presentación de los resultados se estructura de forma progresiva, iniciando con el análisis espacial de la vulnerabilidad térmica-energética del área de estudio, seguido de la caracterización de las condiciones microclimáticas locales a partir del monitoreo in situ. A partir de esta caracterización, los resultados se presentan de forma diferenciada para cada uno de los cañones urbanos analizados (Lomitas y Moderna), permitiendo contrastar sus comportamientos microclimáticos y energéticos. Posteriormente, se exponen los resultados del proceso de optimización multiobjetivo derivados de las variaciones morfológicas evaluadas y la identificación de los escenarios óptimo y crítico. A continuación, se desarrolla la evaluación térmico-energética de dichos escenarios bajo condiciones climáticas actuales y prospectivas. Finalmente, se presenta la evaluación del riesgo de pobreza energética asociada a los desempeños energéticos obtenidos.

4.1. Análisis espacial de la vulnerabilidad térmica-energética

El análisis espacial de la vulnerabilidad térmica-energética constituye la primera etapa del capítulo de resultados y se orienta a caracterizar, a escala urbana, las condiciones de exposición al calor, sensibilidad socioeconómica y consumo energético que inciden en el riesgo de sobrecalentamiento urbano y pobreza energética en la ciudad de Ensenada. Este análisis tiene como propósito identificar patrones territoriales de vulnerabilidad y establecer una base empírica sólida para la selección de las áreas de estudio y del cañón urbano analizado en las fases posteriores de modelación paramétrica y optimización multiobjetivo.

La vulnerabilidad térmica-energética se aborda desde un enfoque integral y multicriterio, reconociendo que el riesgo asociado al calor extremo y al incremento de la demanda energética no depende únicamente de las condiciones climáticas, sino de la interacción entre factores sociodemográficos, morfológicos, ambientales y económicos. En este sentido, el análisis se estructura en cuatro subapartados complementarios.

En primer lugar, se presenta el análisis de sensibilidad sociodemográfica, orientado a identificar los grupos poblacionales con mayor susceptibilidad al estrés térmico y a las limitaciones en la capacidad de adaptación, considerando variables como estructura etaria, grado de escolaridad, tasa de desempleo y condiciones de ocupación de la vivienda. En segundo término, se desarrolla el análisis de exposición, el cual evalúa la distribución espacial de las condiciones ambientales asociadas al sobrecalentamiento urbano, incluyendo indicadores relacionados con la temperatura superficial terrestre, cobertura construida, albedo y la ausencia de infraestructura verde y cuerpo de agua.

Posteriormente, ambos componentes se integran en el análisis de vulnerabilidad térmica-energética, donde se combinan los factores de sensibilidad y exposición mediante un enfoque multicriterio para generar un índice compuesto a nivel AGEB. Este índice permite clasificar el territorio según distintos niveles de vulnerabilidad y localizar los sectores urbanos con mayor riesgo potencial. Finalmente, se incorpora el análisis de consumos energéticos a partir de información de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el cual aporta evidencia empírica sobre los patrones reales de consumo eléctrico residencial, permitiendo contrastar los resultados del análisis de vulnerabilidad con el comportamiento energético observado.

En conjunto, estos cuatro subanálisis proporcionan una caracterización espacial detallada de la vulnerabilidad térmica-energética urbana, y constituyen el fundamento técnico para la selección del área de estudio y el posterior desarrollo de los escenarios de densificación y optimización morfológica evaluados en esta investigación.

4.1.1. Análisis de sensibilidad sociodemográfica

Este apartado presenta los resultados del análisis de sensibilidad sociodemográfica frente al fenómeno ICU en la ciudad de Ensenada, con el propósito de identificar aquellas áreas que, debido a sus características poblacionales y socioeconómicas, presentan una mayor susceptibilidad a los efectos adversos del incremento térmico. En este contexto, la sensibilidad se concibe como la predisposición de determinados grupos sociales a experimentar impactos negativos ante eventos de calor extremo, en función de variables demográficas, condiciones socioeconómicas y características de habitabilidad.

La Figura 50 muestra la distribución espacial del índice de sensibilidad sociodemográfica al calor, clasificado en cinco categorías: muy baja (0,25–0,62), baja (0,63–1,00), media (1,01–1,30), alta (1,31–1,69) y muy alta (1,70–2,88). En términos porcentuales, las AGEB se distribuyen de la siguiente manera: sensibilidad muy baja (18,61 %), baja (33,46 %), media (24,67 %), alta (22,94 %) y muy alta (1,29 %). Estos resultados indican que, a escala ciudad, predomina un nivel de sensibilidad bajo a medio; sin embargo, se identifican sectores específicos con valores elevados que concentran condiciones de mayor vulnerabilidad social frente al calor.

En particular, la Tabla 38 presenta el conjunto de AGEB clasificadas con sensibilidad muy alta, ordenadas de forma ascendente según el valor del índice, lo que permite delimitar con mayor precisión las áreas críticas dentro del territorio urbano. Aunque estas representan una proporción reducida del total, su localización y características sociodemográficas las convierten en puntos prioritarios para la intervención.

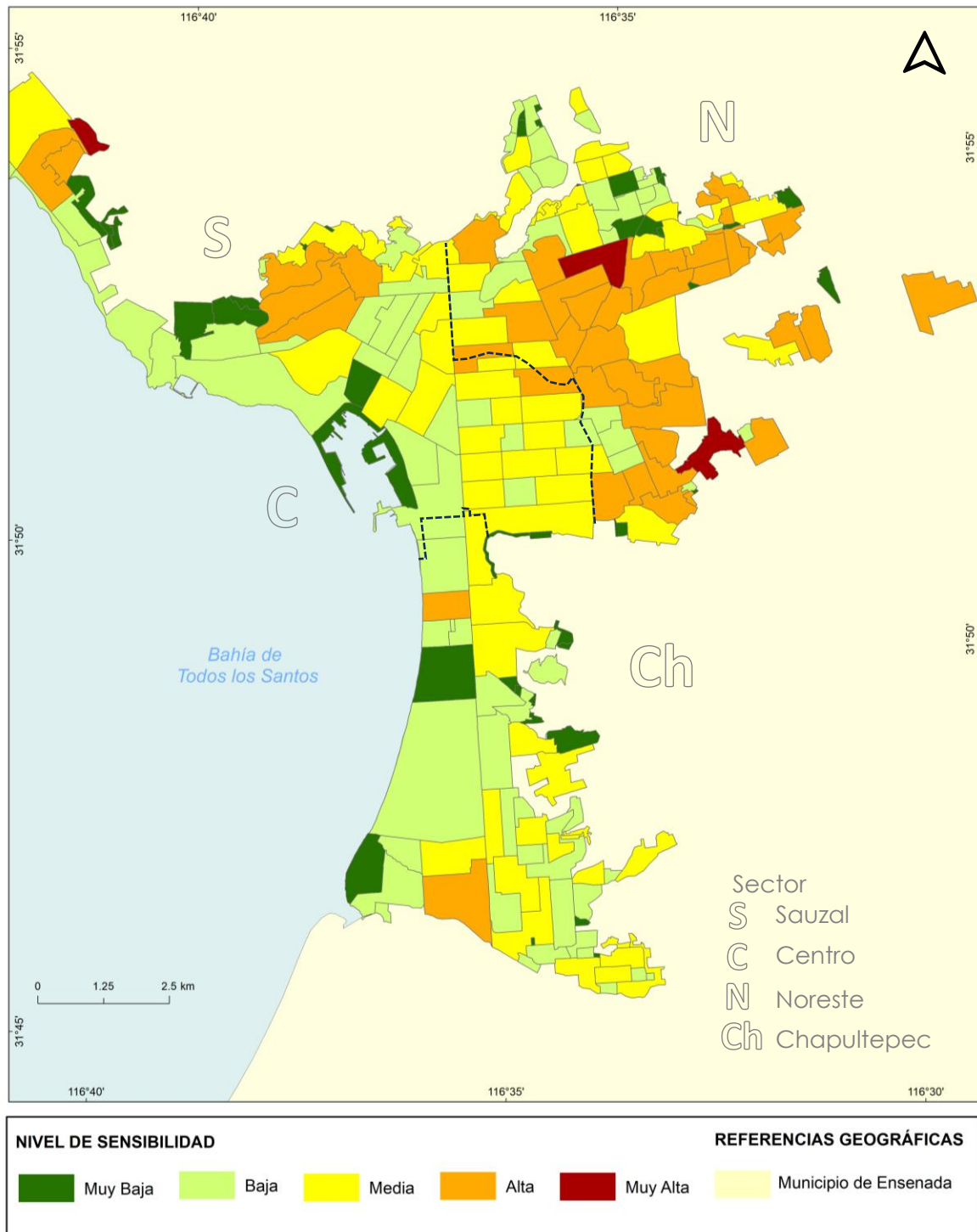
Tabla 38
AGEB con nivel de sensibilidad muy alto

AGEB	Colonia	Grado de sensibilidad
6006	Las Lomitas	Muy alto
158A	Ampliación el Roble	Muy alto
2215	Lomas de Sauzal	Muy alto

El análisis espacial evidencia patrones territoriales claramente diferenciados. Como se observa en la Figura 50, los niveles más altos de sensibilidad sociodemográfica se concentran en la región noreste de la ciudad, principalmente en zonas periféricas. Estos sectores se caracterizan por albergar población de bajos ingresos, cuya limitada capacidad económica restringe la adopción de medidas de adaptación y mitigación frente al calor, como el acceso a sistemas de climatización eficientes, el uso de materiales constructivos con mejor desempeño térmico o la implementación de estrategias pasivas de enfriamiento. A ello se suma un proceso de crecimiento urbano acelerado y, en muchos casos, poco planificado, que se traduce en una elevada densidad edificatoria y en una infraestructura urbana insuficiente para enfrentar episodios de calor extremo.

Figura 50

Distribución espacial de sensibilidad sociodemográfica al calor en la mancha urbana de Ensenada por AGEB



Elaborado con base en: SCITEL de INEGI, 2022.

En contraste, las áreas centrales de Ensenada presentan niveles intermedios de sensibilidad, asociados a una mayor heterogeneidad socioeconómica y a condiciones urbanas

mixtas. Por su parte, las zonas localizadas al oeste y al sur de la ciudad, especialmente aquellas próximas a la bahía y a los sectores turísticos, registran niveles de sensibilidad bajos y muy bajos. Estas áreas se benefician de una infraestructura urbana más consolidada y de mayores recursos económicos, lo que facilita la implementación de estrategias de adaptación y mitigación frente al calor y reduce, en consecuencia, la vulnerabilidad de sus habitantes.

En conjunto, la variabilidad espacial observada en los niveles de sensibilidad sociodemográfica pone de manifiesto el papel determinante de las desigualdades socioeconómicas en la capacidad de la población para afrontar los impactos de la isla de calor urbano. La concentración de valores altos y muy altos en sectores periféricos confirma que la vulnerabilidad térmica en Ensenada no se distribuye de manera homogénea, sino que responde a patrones de desigualdad socioespacial claramente identificables. Estos hallazgos subrayan la necesidad de incorporar criterios sociales y económicos en la evaluación del riesgo térmico urbano y en el diseño de políticas públicas diferenciadas orientadas a reducir la vulnerabilidad en los sectores más desfavorecidos.

No obstante, la sensibilidad sociodemográfica por sí sola no determina la magnitud del impacto del calor, ya que esta depende también del grado de exposición física al fenómeno. En este sentido, el siguiente apartado profundiza en el análisis de la exposición térmica, con el fin de complementar la caracterización de la vulnerabilidad urbano-climática a partir de la interacción entre condiciones sociodemográficas y factores ambientales.

4.1.2. Análisis de exposición térmica de la mancha urbana de Ensenada

Mientras que el análisis de sensibilidad sociodemográfica permite identificar a los grupos poblacionales con mayor susceptibilidad ante el incremento de temperaturas, la evaluación de la exposición térmica se centra en caracterizar las condiciones físicas y ambientales que determinan la intensidad de la isla de calor. En este sentido, la exposición constituye un componente clave de la vulnerabilidad climática, ya que condiciona el nivel de estrés térmico al que se encuentran sometidas las áreas urbanas, independientemente de las capacidades adaptativas de la población.

En este apartado se presentan los resultados del análisis espacial de la exposición térmica en la ciudad de Ensenada, a partir de indicadores ambientales y urbanos que permiten identificar

las áreas con mayor carga térmica. La integración de estos resultados con los niveles de sensibilidad sociodemográfica analizados previamente sienta las bases para la construcción del índice de vulnerabilidad térmico-energética, desarrollado en el apartado subsecuente.

4.1.2.1. Distribución espacial de la exposición térmica

La Figura 51 muestra la distribución espacial del grado de exposición térmica en la ciudad de Ensenada, clasificada en cinco categorías: muy bajo (1,57–2,14), bajo (2,15–2,43), medio (2,44–2,71), alto (2,72–3,14) y muy alto (3,15–3,71). La distribución porcentual de las AGEB dentro de cada categoría es la siguiente: muy baja (22,94 %), baja (30,30 %), media (18,18 %), alta (20,77 %) y muy alta (7,79 %).

Los resultados indican que, en términos generales, la ciudad presenta un nivel de exposición bajo. No obstante, se identifican AGEB con valores altos y muy altos de exposición térmica, localizadas principalmente en áreas periféricas. La Tabla 39 presenta el listado de las AGEB clasificadas con exposición muy alta, ordenadas de manera ascendente según su índice correspondiente.

Tabla 39

AGEB con nivel de exposición muy alto

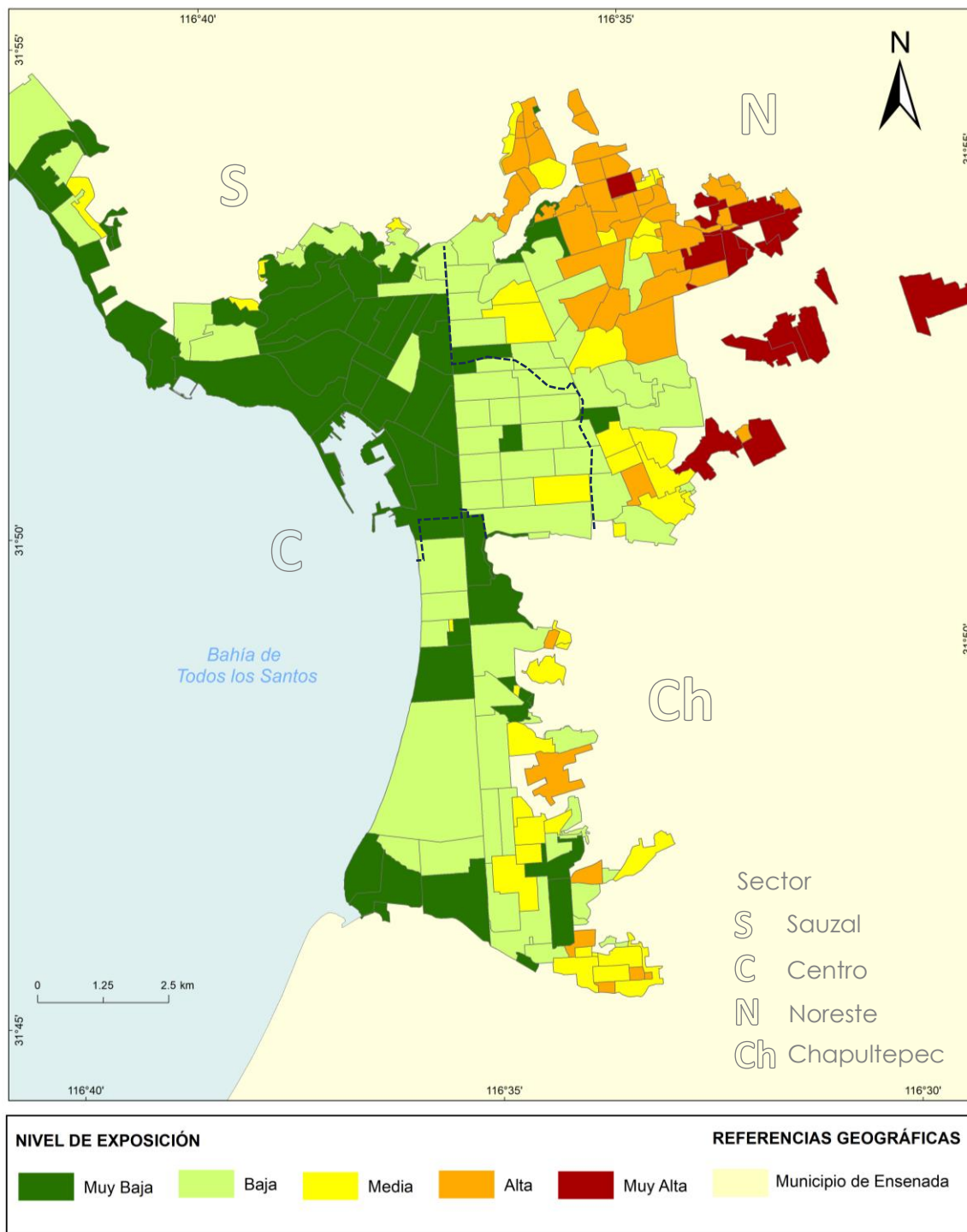
AGEB	Colonia	Exposición	AGEB	Colonia	Exposición
1397	Puesta del sol	Muy alto	1518	San Ramón	Muy alto
2431	San Gabriel	Muy alto	0153	Basachachil	Muy alto
0187	Ampliación Gómez Morín	Muy alto	158A	Ampliación el Roble	Muy alto
0168	Gómez Morín	Muy alto	9759	Popular 1989	Muy alto
0162	Gómez Morín	Muy alto	8110	Popular 1989	Muy alto
0134	Villa del roble	Muy alto	2179	Montemar	Muy alto
0115	Salvador Rosas Magallón	Muy alto	012A	Salvador Rosas Magallón	Muy alto
1876	Vista al sol	Muy alto	0191	Buenos Aires	Muy alto
959A	Vista al sol	Muy alto	0100	Salvador Rosas Magallón	Muy alto

El análisis espacial revela contrastes marcados entre las distintas zonas de la ciudad. En particular, el sector noreste concentra los niveles más elevados de exposición térmica, condición asociada a la escasa presencia de cuerpos de agua, la limitada cobertura vegetal y la predominancia de superficies impermeables. Este patrón es característico de áreas periféricas sujetas a procesos de crecimiento urbano acelerado y con carencias estructurales de planeación,

donde la ausencia de infraestructura verde incrementa la acumulación de calor y reduce la capacidad de regulación microclimática.

Figura 51

Distribución espacial de exposición térmica en la mancha urbana de Ensenada por AGEB



Elaborado con base en: SCITEL de INEGI, 2022.

En contraste, las zonas oeste, noroeste, suroeste y el centro urbano presentan niveles de exposición clasificados entre muy bajos y bajos. A pesar de que el centro de la ciudad presenta un mayor porcentaje de superficies impermeables, el grado de exposición es menor debido a la proximidad a cuerpos de agua, a la presencia significativa de vegetación y una mayor consolidación en términos de planificación urbana. Este contraste subraya la importancia de la planificación urbana y la integración de infraestructura verde y azul como herramientas clave para mitigar los efectos del calor en contextos urbanos densamente edificados.

En conjunto, la variabilidad espacial de la exposición térmica en Ensenada subraya la necesidad de enfoques de planeación diferenciados, orientados a reducir la carga térmica en las zonas más afectadas y a fortalecer la resiliencia climática del tejido urbano.

4.1.2.2. Análisis de indicadores espectrales

Con el fin de profundizar en los factores que explican los patrones observados, a continuación, se analizan los índices espectrales por AGEB que conforman el índice de exposición térmica (Figura 52). Para una visualización con mayor nivel de detalle, revisar se remite al Apéndice M, mientras que el Apéndice E presenta estos mismos indicadores a escala ciudad.

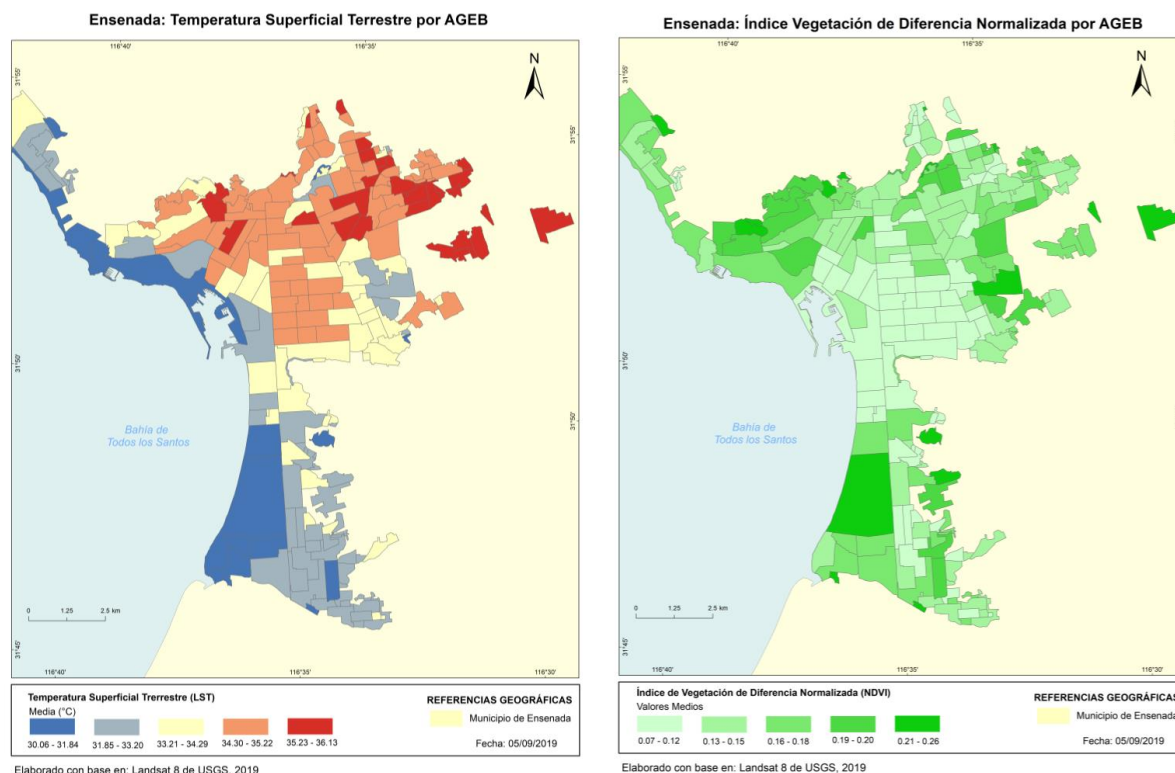
Temperatura superficial terrestre: el patrón espacial de la LST revela diferencias significativas entre las distintas zonas de la ciudad. Como se observa en la Figura 52 (a), los valores más elevados se concentran en el noreste, con registros entre 34,30 °C y 36,13 °C, asociados a una menor cobertura vegetal, escasa presencia de cuerpos de agua y alta densidad de superficies edificadas. En contraste, las zonas sur y noroeste presentan los valores más bajos (30,06 °C–33,20 °C), atribuibles a una mayor cobertura vegetal, menor densidad edificatoria y cercanía a la costa, lo que favorece la disipación térmica.

Índice de vegetación de diferencia normalizada: este índice varía entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 indican una mayor densidad de vegetación, valores cercanos a 0 reflejan superficies con escasa o nula vegetación, y valores negativos suelen asociarse a la presencia de cuerpos de agua. El NDVI (Figura 52b), muestra una clara diferenciación entre el centro urbano y las zonas periféricas. Las áreas centrales registran los valores más bajos (0,07–0,12), consistentes con una alta proporción de superficies impermeables. Por el contrario, las zonas

sur, noroeste y noreste presentan valores medios y altos (0,15–0,26), lo que sugiere una mayor presencia de vegetación. Este patrón confirma la relación inversa entre densidad urbana y cobertura vegetal, y refuerza la importancia de la infraestructura verde como mecanismo de mitigación térmica.

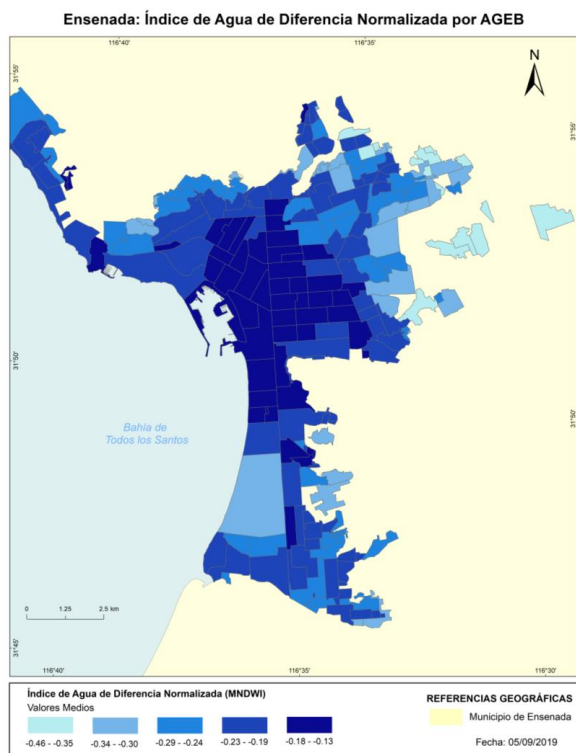
Índice de agua de diferencia normalizada: la Figura 52 (c) muestra los valores del MNDWI en la ciudad. Este índice oscila entre -1 y 1; valores positivos indican presencia de cuerpos de agua, mientras que los valores negativos reflejan superficies sin agua. El análisis muestra valores negativos del MNDWI en toda la ciudad, con rangos entre -0,46 y -0,13, lo que indica una presencia limitada de cuerpos de agua superficiales. Las áreas centrales presentan valores menos negativos (-0,18 a -0,13), asociados a la proximidad de la bahía y a infraestructura hídrica urbana, mientras que las zonas sur y noreste registran los valores más bajos, evidenciando una mayor carencia de recursos hídricos superficiales y, por ende, una menor capacidad de mitigación térmica.

Figura 52
Índices espectrales de la mancha urbana de Ensenada por AGEB

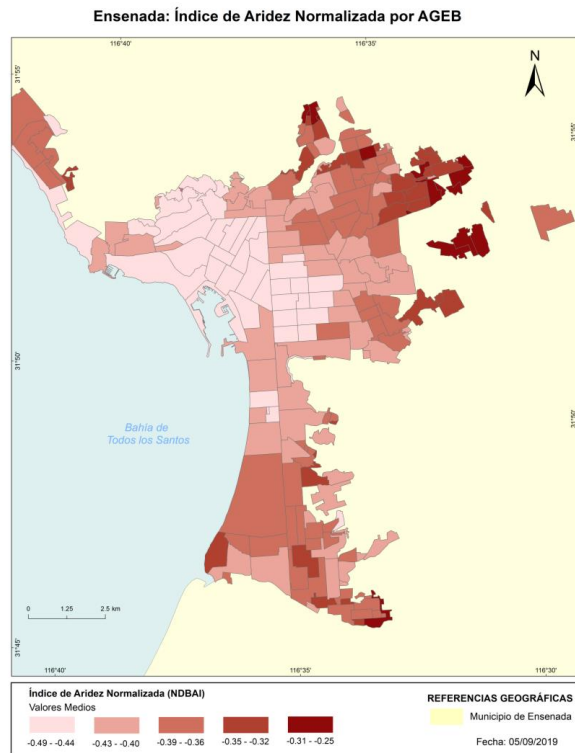


(a) LST

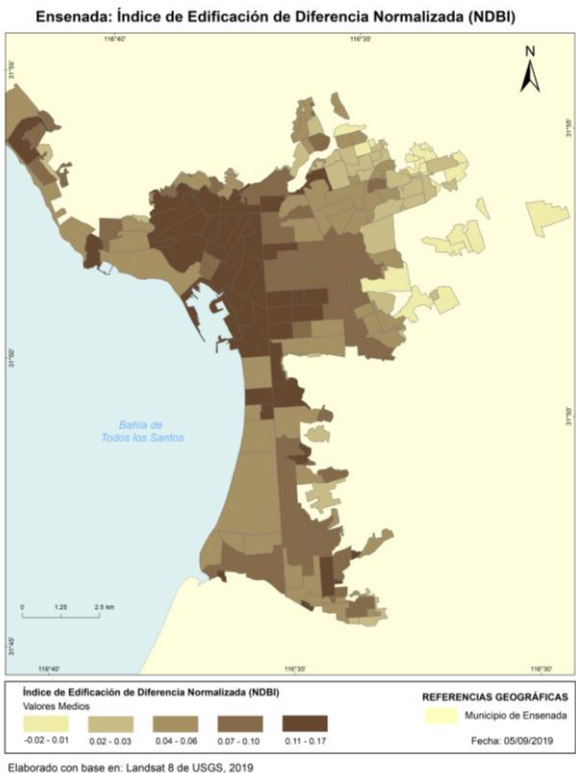
(b) NDVI



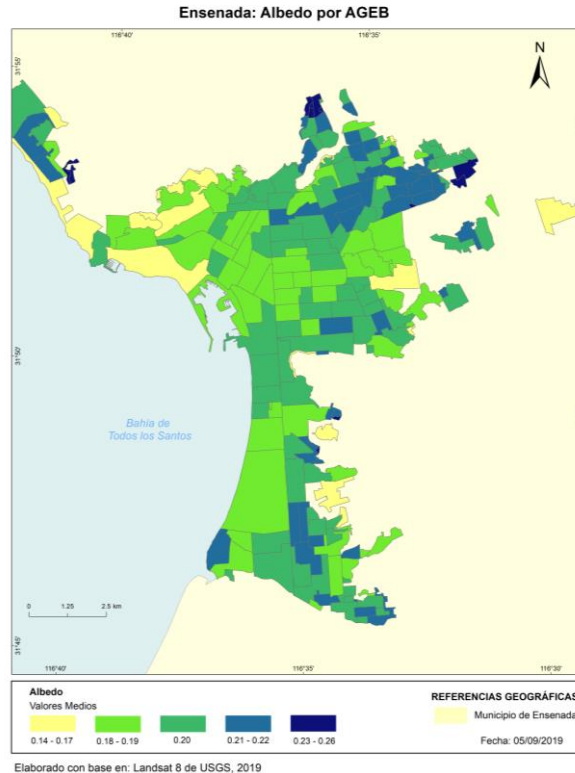
(c) MNDWI



(d) NDBAI



(e) NDBI



(f) Albedo

Índice de suelo desnudo: el análisis del NDBAI (Figura 52d) muestra valores predominantemente negativos, lo que sugiere una cobertura generalizada de vegetación o superficies no edificadas. La zona noroeste presenta los valores más bajos, con un rango de -0,49 a -0,40, lo que implica una menor proporción de suelo desnudo. Esta condición podría estar asociada a una mayor densidad de vegetación o a patrones de ocupación del suelo menos intensivos en términos de urbanización. En contraste, las zonas sur y noreste del área urbana registran valores que oscilan entre -0,39 y -0,25. Estos valores sugieren una mayor presencia relativa de superficies sin cobertura vegetal, posiblemente relacionadas con áreas en proceso de expansión urbana o con menor presencia de infraestructura verde.

Índice de edificación de diferencia normalizada: este índice resulta útil para evaluar la extensión y distribución de la infraestructura urbana. La Figura 52 (e) presenta la distribución espacial del NDBI en la ciudad. Los valores positivos del índice indican la presencia de superficies edificadas, mientras que los valores negativos se asocian con áreas vegetadas o con cuerpos de agua.

Los resultados muestran que las zonas centrales concentran los valores más altos del NDBI, con un rango que varía entre 0,07 y 0,17. Esta condición se atribuye a la elevada densidad de edificaciones, vías de comunicación y demás infraestructuras propias del entorno urbano consolidado. En contraste, las zonas sur, noroeste y noreste presentan valores que oscilan entre -0,02 y 0,06, lo cual sugiere una menor intensidad en la ocupación del suelo, ya sea por una menor densidad edificatoria, mayor presencia de vegetación o características topográficas que limitan el desarrollo urbano. Este patrón de distribución del NDBI permite identificar con claridad las zonas de mayor consolidación urbana, proporcionando información valiosa para el diagnóstico de la morfología urbana y su incidencia en los procesos ambientales locales.

Albedo: es un parámetro radiativo que expresa la fracción de radiación solar reflejada por una superficie. Sus valores oscilan entre 0 y 1, donde 0 representa una absorción total de la radiación (superficies oscuras o altamente absorbentes), mientras que 1 indica una reflexión total (superficies claras o altamente reflectantes). Este indicador es fundamental para comprender la dinámica térmica urbana, ya que influye directamente en la acumulación de calor en las superficies construidas.

En el presente análisis, los valores de albedo identificados oscilan entre 0,14 y 0,26, como se muestra en la Figura 52 (f). La distribución espacial del albedo muestra una variabilidad significativa entre zonas. La región noroeste presenta los valores más bajos (0,14 a 0,19), lo que indica una menor capacidad de reflexión de la radiación solar, probablemente asociada al predominio de materiales oscuros o de baja reflectancia en las superficies urbanas. En contraste, la zona central exhibe valores intermedios en torno a 0,20, mientras que las áreas noreste y sureste registran los valores más elevados, alcanzando hasta 0,26. Este patrón sugiere una mayor presencia de materiales o superficies con alta reflectancia, como pavimentos claros, techos reflectantes o superficies con menor densidad de vegetación oscura.

4.1.3. Análisis de vulnerabilidad térmica-energética de Ensenada

La vulnerabilidad térmica-energética se define como la susceptibilidad de una población y del entorno urbano construido a los efectos adversos del calor extremo, derivada de la interacción entre la exposición a temperaturas elevadas, la sensibilidad sociodemográfica de la población y las capacidades de adaptación disponibles. En contextos urbanos, esta condición tiene implicaciones directas sobre la salud pública, el bienestar social, la habitabilidad de las viviendas y el desempeño energético del parque edificado, particularmente en climas cálidos y semiáridos.

A partir de la integración de los componentes de sensibilidad sociodemográfica y exposición térmica analizados en los apartados anteriores, la Figura 53 presenta el grado de vulnerabilidad térmica-energética en la ciudad de Ensenada a escala AGEB. Los niveles de vulnerabilidad se clasifican en cinco categorías: muy bajo (0,82–1,25), bajo (1,26–1,51), medio (1,52–1,77), alto (1,78–2,07) y muy alto (2,08–3,03). La distribución porcentual de las AGEB dentro de cada categoría es la siguiente: muy baja (21,21 %), baja (33,76 %), media (31,16 %), alta (10,82 %) y muy alta (3,03 %).

En términos generales, el patrón de distribución espacial indica que la ciudad presenta un nivel de vulnerabilidad térmica-energética clasificado entre bajo y medio. No obstante, se identifican ocho AGEB con grados de vulnerabilidad muy alta, todas localizadas en áreas periféricas, como se detalla en la Tabla 40. La presencia de estos valores extremos pone de manifiesto la existencia de sectores urbanos que concentran condiciones estructurales desfavorables frente al calor extremo.

Tabla 40

AGEB con nivel de vulnerabilidad térmica

AGEB	Colonia	Vulnerabilidad térmica	AGEB	Colonia	Vulnerabilidad térmica
158A	Ampliación el Roble	Muy alto	959A	Vista al sol	Muy alto
0134	Villa del roble	Muy alto	1397	Puesta del sol	Muy alto
8445	Popular 1989	Muy alto	0115	Salvador Rosas Magallón	Muy alto
6006	Las Lomitas	Muy alto	2431	San Gabriel	Muy alto

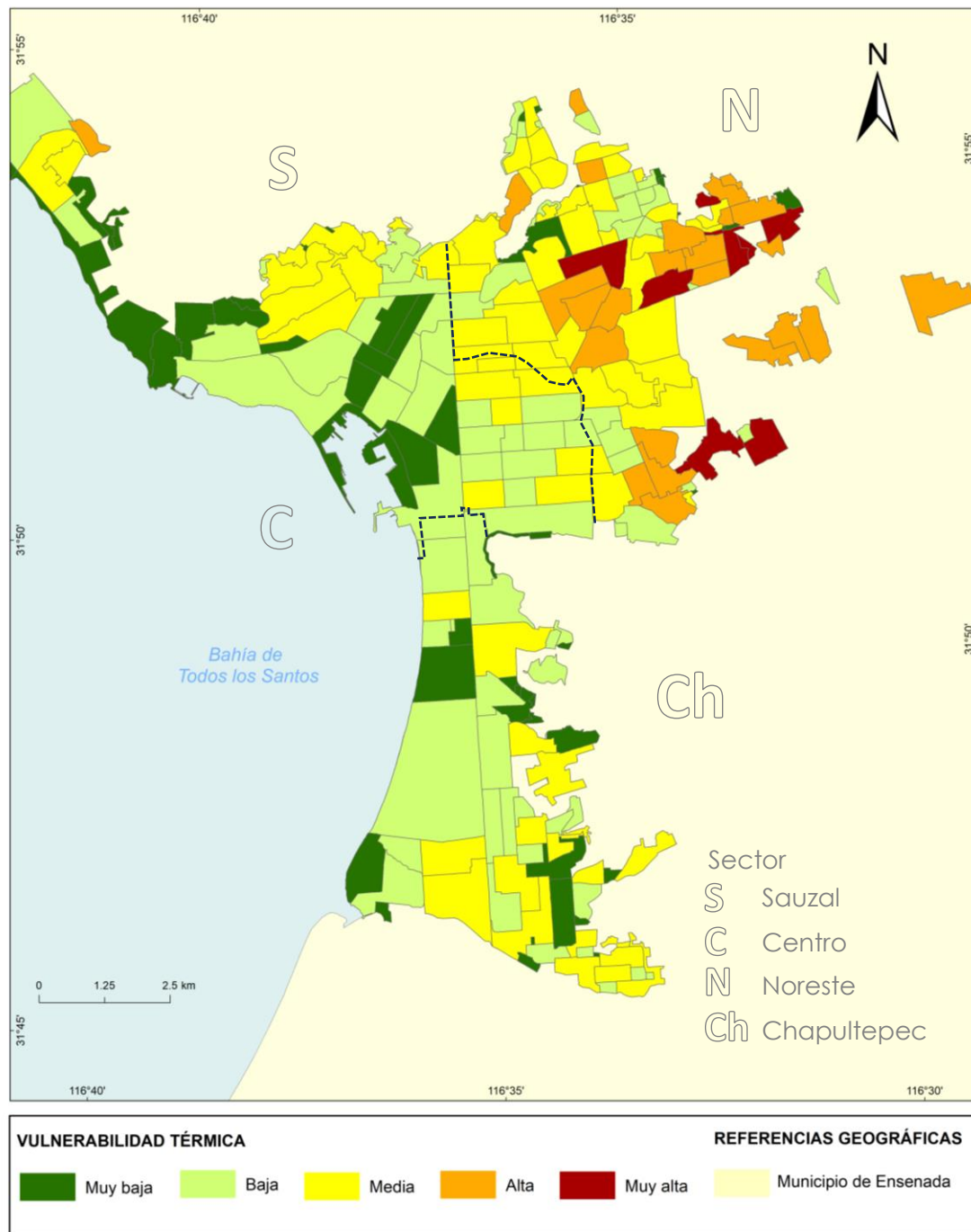
El análisis espacial revela diferencias marcadas entre las distintas zonas de la ciudad. En particular, el sector noreste presenta los niveles más elevados de vulnerabilidad térmica-energética, resultado de la superposición de altos niveles de sensibilidad sociodemográfica y elevada exposición térmica. Estas condiciones se encuentran asociadas tanto a factores sociales, como mayores densidades poblacionales, menores niveles de ingreso y acceso limitado a servicios urbanos, como a características del entorno construido, entre las que destacan la escasa cobertura vegetal, la alta proporción de superficies impermeables y la ausencia de cuerpos de agua. Este patrón es representativo de periferias urbanas sometidas a procesos de crecimiento acelerado y carentes de una planificación integral, lo que deriva en déficits de infraestructura, equipamiento y calidad ambiental.

En contraste, las zonas centrales y las áreas próximas a la costa, particularmente en los sectores oeste y sur de la ciudad, presentan niveles de vulnerabilidad bajos y muy bajos. Estas áreas combinan una menor sensibilidad sociodemográfica con condiciones ambientales más favorables, como una mayor presencia de infraestructura verde y azul, así como una mayor consolidación urbana, lo que contribuye a reducir la carga térmica y a mejorar la capacidad de adaptación frente a episodios de calor extremo.

En síntesis, el análisis de la vulnerabilidad térmica-energética en la ciudad de Ensenada evidencia una desigualdad espacial significativa en la distribución del riesgo asociado al calor extremo, resultado de la interacción entre factores sociodemográficos, ambientales y morfológicos. Las áreas periféricas, particularmente en el noreste de la ciudad, concentran los niveles más elevados de vulnerabilidad, lo que las posiciona como contextos críticos para el análisis prospectivo del desempeño térmico-energético del entorno construido.

Figura 53

Distribución espacial de vulnerabilidad térmica-energética de la mancha urbana de Ensenada por AGEB



Elaborado con base en: SCITEL de INEGI, 2022.

4.1.4. Patrones de consumo eléctrico residencial

En este apartado se examinan los patrones espaciales del consumo eléctrico residencial a partir de información oficial proporcionada por la Comisión Federal de Electricidad, agregada a escala territorial, con el objetivo de identificar contrastes en la intensidad del consumo y su relación con los niveles de sensibilidad, exposición y vulnerabilidad térmica previamente identificados. Este análisis permite reconocer tanto áreas donde el consumo energético es particularmente elevado como zonas donde, pese a condiciones climáticas adversas, el consumo se mantiene relativamente bajo, lo cual puede estar asociado a restricciones económicas y a situaciones potenciales de pobreza energética.

Para tal efecto, se solicitó a la CFE información correspondiente a consumos eléctricos promedio anuales y bimestrales por tarifa habitacional. Del análisis se excluyeron aquellas zonas cuyo uso del suelo no resulta pertinente para los objetivos de la investigación, tales como el aeropuerto, el palacio de gobierno, la ciudad deportiva, el malecón, la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), la Macroplaza y los parques industriales, incluida la zona cementera.

Con el fin de analizar la distribución espacial del consumo eléctrico residencial durante el periodo de mayor demanda térmica, se elaboró un mapa temático a partir de los datos proporcionados por la CFE, los cuales incluyen registros georreferenciados del consumo promedio anual y bimestral correspondientes a la tarifa habitacional. Para esta sección se tomó como referencia el consumo del bimestre agosto–septiembre bajo la tarifa 1 habitacional, correspondiente al periodo de verano. Los datos consisten en consumos puntuales por vivienda, los cuales fueron interpolados mediante el método de ponderación inversa a la distancia (Inverse Distance Weighting, IDW). Este método asume que los puntos más cercanos a una ubicación desconocida ejercen mayor influencia sobre el valor estimado que los puntos más alejados, lo que permite generar una superficie continua de valores representativos del consumo promedio dentro del polígono urbano de Ensenada.

La Figura 54 muestra la interpolación espacial del consumo eléctrico residencial mediante una escala cromática que varía del amarillo claro al rojo intenso, representando cinco rangos de

consumo bimestral promedio, que oscilan entre 247.34 kWh y 4,851.78 kWh. A partir de este análisis espacial se identifican los siguientes patrones:

- Consumo elevado (tonos rojos y naranjas intensos): se concentra principalmente en sectores periféricos ubicados al norte, suroeste y sureste del área urbana. Estas zonas se caracterizan por procesos de crecimiento urbano disperso, una mayor densidad habitacional, viviendas con baja eficiencia térmica y condiciones microclimáticas más cálidas, factores que incrementan la demanda de enfriamiento durante el verano.
- Consumo moderado (tonos intermedios): se observa en áreas centrales y semi-periféricas, donde la tipología constructiva y las condiciones urbanas permiten un equilibrio entre confort térmico y demanda energética.
- Consumo bajo (tonos amarillos claros): se presenta de manera más homogénea en el centro-norte de la ciudad y en sectores urbanos consolidados, caracterizados por viviendas más compactas y mejores condiciones de desempeño térmico, lo que reduce la necesidad de climatización artificial.

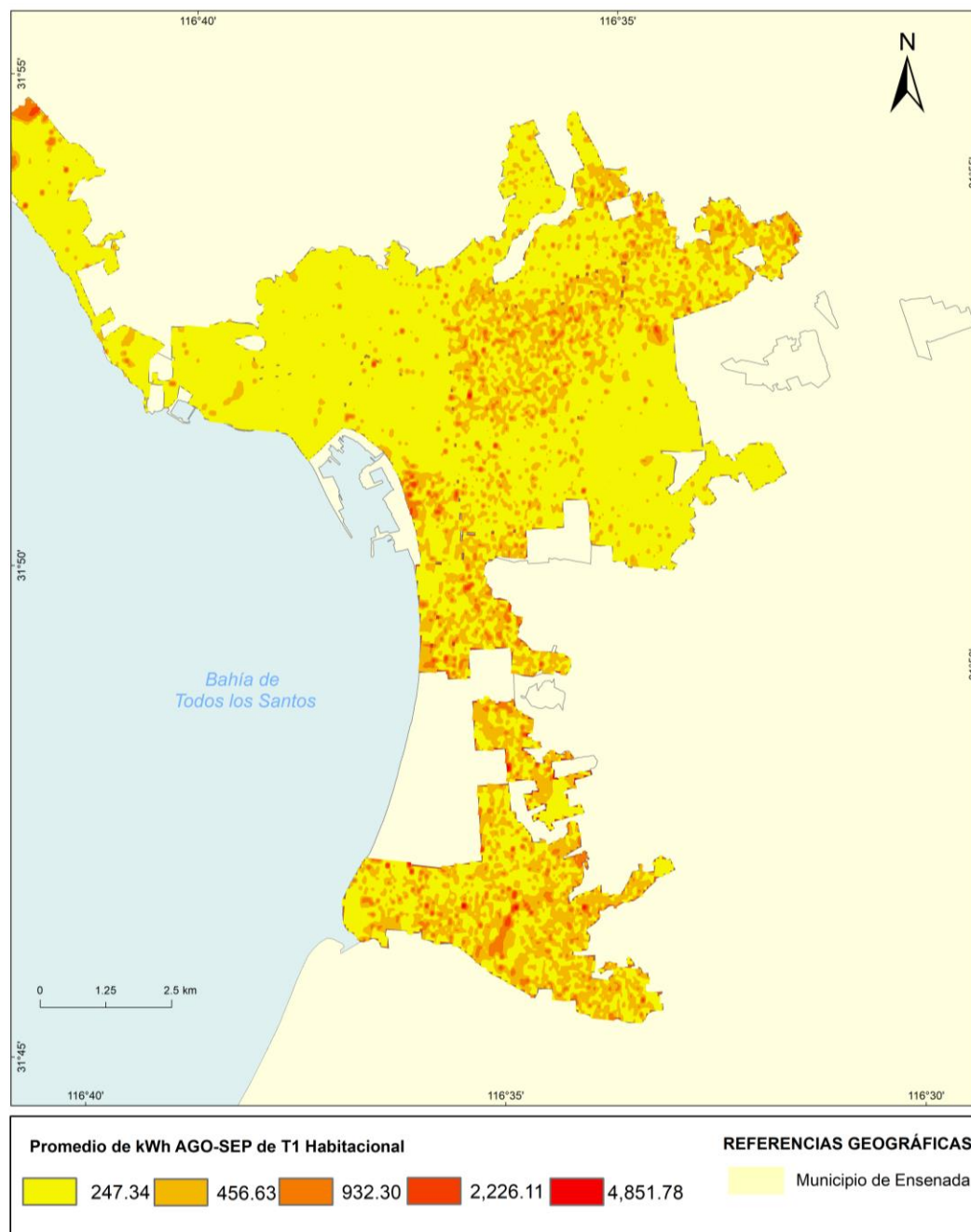
Este patrón espacial permite identificar una relación preliminar entre los niveles de consumo eléctrico residencial y la distribución territorial de la vulnerabilidad térmico-energética. De manera general, se observa que diversos sectores clasificados con vulnerabilidad alta y muy alta presentan consumos eléctricos medios y bajos. No obstante, estos resultados deben interpretarse con cautela, ya que el consumo energético observado puede estar influido por múltiples factores no evaluados directamente en este estudio, tales como los hábitos de uso, el número de ocupantes por vivienda, la eficiencia de los equipos disponibles o las estrategias de adaptación pasiva adoptadas por los hogares.

El análisis también evidencia la presencia de patrones heterogéneos dentro de áreas con niveles similares de vulnerabilidad térmica. Un caso representativo es el sector de Lomitas, clasificado con vulnerabilidad térmica muy alta, el cual registra niveles de consumo eléctrico superiores a los observados en zonas como La Moderna, caracterizadas por una baja vulnerabilidad térmica y una morfología residencial más consolidada. Este contraste pone de manifiesto que la relación entre consumo eléctrico, condiciones térmicas y características

urbanas no es lineal, y que existen dinámicas locales que no pueden explicarse únicamente a partir de indicadores morfológicos o ambientales.

Figura 54

Patrones promedio de kWh del bimestre agosto-septiembre para la tarifa 1 habitacional por vivienda



Elaborado con base en a datos de CFE

En el caso de Lomitas, el mayor consumo eléctrico observado podría estar asociado a una combinación de factores, entre los que se incluyen una mayor exposición al calor extremo, la tipología constructiva predominante y posibles diferencias en el uso de dispositivos de enfriamiento durante el periodo estival. Sin embargo, dado que este estudio no incorpora información directa sobre los patrones de comportamiento de los usuarios, el tipo y eficiencia de los equipos de climatización ni las decisiones económicas de los hogares, estas interpretaciones se plantean únicamente como hipótesis exploratorias. No obstante, los resultados evidencian contextos urbanos donde el consumo energético y la exposición térmica convergen, lo que subraya la necesidad de análisis integrados en etapas posteriores de la investigación.

4.2. Caracterización del área de estudio

Con base en los resultados del análisis espacial de la vulnerabilidad térmica-energética presentados en el apartado anterior, se procedió a la delimitación del área de estudio conforme a los criterios metodológicos establecidos (véase Figura 27). Esta etapa tuvo como propósito identificar sectores urbanos contrastantes en términos de vulnerabilidad al calor, con el fin de sustentar un análisis comparativo de morfologías urbano-arquitectónicas en contextos diferenciados de riesgo térmico-energético.

El procedimiento de selección consideró, en primera instancia, las AGEB clasificadas con un nivel de vulnerabilidad térmica-energética muy alto, de acuerdo con los resultados sintetizados en la Tabla 40. Sin embargo, se excluyeron aquellas AGEB localizadas en zonas periféricas alejadas de la mancha urbana consolidada, así como aquellas que carecen de una estructura urbana continua o de características morfológicas pertinentes para los objetivos de esta investigación.

De manera complementaria, se analizaron las AGEB clasificadas con niveles de vulnerabilidad muy baja, priorizando aquellas con uso de suelo habitacional o habitacional-mixto y con una elevada proporción de población adulta mayor, grupo reconocido por su mayor susceptibilidad ante eventos de calor extremo. La inclusión de este criterio permitió incorporar una dimensión demográfica relevante al proceso de selección, fortaleciendo el enfoque comparativo del estudio.

A partir de la aplicación conjunta de estos criterios, se seleccionaron dos áreas representativas para el desarrollo del análisis detallado: la colonia Lomitas (AGEB 6006), identificada como un sector de muy alta vulnerabilidad térmica-energética, y la colonia Moderna (AGEB 5005), clasificada con muy baja vulnerabilidad. Ambas áreas se presentan en la Figura 55 y constituyen los casos de estudio a partir de los cuales se desarrolla el análisis morfológico, térmico-energético y prospectivo de la presente investigación.

Figura 55

Delimitación del área de estudio



La colonia Lomitas se localiza en el sector noreste del área urbana de Ensenada y presenta un uso de suelo habitacional-mixto, de acuerdo con la actualización más reciente del PDUCEP-EN 2024–2036 (Gobierno Municipal, 2020). Esta colonia abarca una superficie de 64 km² y cuenta con una población de 4,685 habitantes, de los cuales 931 corresponden a población infantil (0-14 años) y 647 a personas adultas mayores. El tejido urbano predominante está conformado por viviendas unifamiliares de hasta dos niveles, las cuales, conforme a la

clasificación establecida en el Código de Edificación de Vivienda (2017), corresponden principalmente a tipologías de vivienda media y de interés social (véase Anexo E, Tabla 80). Esta configuración da lugar a una morfología urbana relativamente densa y homogénea, con una limitada diversidad tipológica.

De acuerdo con los resultados del análisis de LST, esta zona alcanza valores máximos de hasta 35,7 °C, lo que evidencia una elevada exposición térmica y respalda su clasificación como área de alta vulnerabilidad térmico-energética. En la Figura 56 se presenta una vista aérea de la colonia, junto con imágenes representativas de algunas de sus vialidades y tipologías residenciales, con el propósito de ilustrar las principales características físicas y morfológicas del entorno construido.

Figura 56

Área urbana con grado de vulnerabilidad muy alta: Lomitas



Nota. Adaptado de Google Earth y fotografías tomadas en campo.

En contraste, la colonia Moderna se ubica en el sector centro-noroeste de la ciudad y también presenta un uso de suelo habitacional-mixto, conforme a lo establecido en el PDUCP-EN 2024–2036 (Gobierno Municipal, 2020). Esta colonia tiene una extensión aproximada de 16 km² y alberga una población de 784 habitantes, de los cuales 75 son menores de 14 años y 213 corresponden a personas adultas mayores. El entorno edificado se caracteriza por una mayor

heterogeneidad tipológica, conformada por viviendas unifamiliares de hasta tres niveles, predominantemente de tipo residencial (véase Anexo E, Tabla 80), de acuerdo con la clasificación del Código de Edificación de Vivienda (2017), así como por la presencia de edificaciones multifamiliares, lo que refleja un grado más alto de consolidación urbana en comparación con la colonia Lomitas.

En términos térmicos, los resultados del análisis de LST indican que esta zona registra temperaturas máximas de hasta 34,9 °C, es decir, aproximadamente 0,8 °C por debajo de los valores observados en la colonia Lomitas. La Figura 57 muestra una vista aérea de la colonia, así como imágenes representativas de sus vialidades y tipologías residenciales, con el fin de evidenciar las diferencias morfológicas y ambientales respecto al caso de mayor vulnerabilidad.

Figura 57

Área urbana con grado de vulnerabilidad muy baja: Moderna



Nota. Adaptado de Google Earth y fotografías tomadas en campo.

4.2.1. Unidad de análisis

Una vez delimitada el área de estudio, se procedió a definir la unidad de análisis, centrada en la selección de dos cañones urbanos localizados en los sectores previamente identificados. La elección de estas unidades se restringió a aquellos cañones en los que se realizó monitoreo

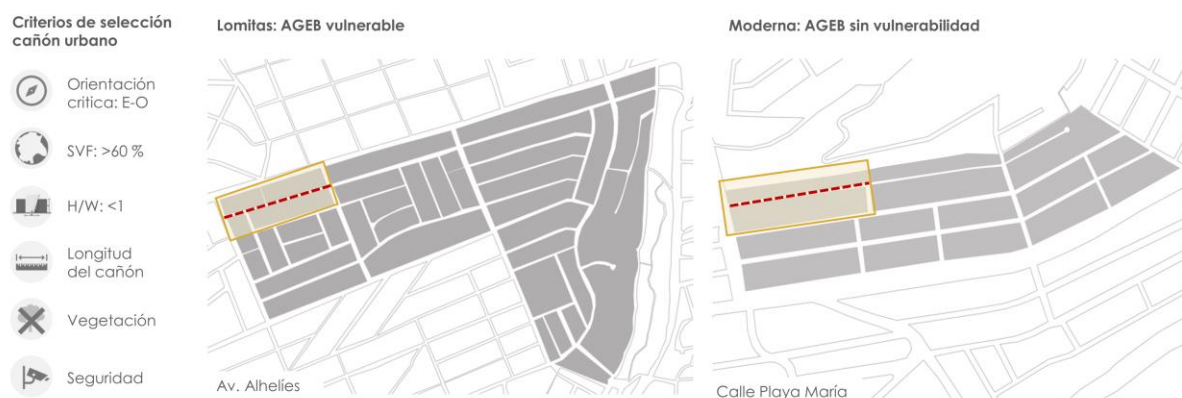
microclimático in situ, mediante la instalación de sensores de temperatura, descartándose los restantes conforme a los criterios técnicos establecidos (véase Figura 28).

Se priorizaron cañones urbanos con orientación oeste-este, dado que esta configuración se asocia con condiciones térmicas más adversas debido a una mayor exposición a la radiación solar directa a lo largo del día. Entre los criterios morfológicos específicos considerados para la selección se incluyeron una relación de aspecto menor a 1 ($H/W < 1$) y un factor de cielo visible superior al 60,0 %. De acuerdo con Srivanit y Jareemit (2020), los cañones urbanos que presentan estas características tienden a registrar mayores niveles de radiación solar incidente y temperaturas radiantes medias elevadas, lo que favorece la generación de condiciones térmicas más severas y persistentes.

Durante el proceso de selección también se identificaron cañones con valores de SVF incluso superiores a los seleccionados; no obstante, estos fueron descartados debido a su mayor cobertura vegetal. La presencia significativa de vegetación actúa como un moderador térmico al proporcionar sombra, promover procesos de evapotranspiración y reducir la acumulación de calor en el entorno urbano, lo que disminuye su representatividad como unidades de alta exposición térmica dentro del objetivo de este análisis.

Figura 58

Selección de la unidad de análisis



De manera complementaria, se consideraron otras variables morfológicas relevantes, tales como la longitud y el ancho del cañón, así como la pendiente de las vialidades, dado que estos factores influyen de forma directa en el comportamiento microclimático y en la dinámica

térmica local. Finalmente, la Figura 58 presenta la ubicación y configuración de los cañones urbanos seleccionados en las colonias Lomitas y Moderna, los cuales constituyen las unidades de análisis del presente estudio.

4.2.1.1. Cañón urbano Lomitas

El cañón urbano seleccionado en la colonia Lomitas presenta una orientación WSW-ENE, con una desviación de 22,0 ° hacia el norte respecto al eje de la vialidad, lo que incrementa la exposición a la radiación solar directa principalmente durante las horas de la mañana y el mediodía. La relación de aspecto (H/W) es de 0,24, lo que evidencia una configuración morfológica abierta, mientras que el SVF alcanza un valor de 73,0 %. Este tipo de geometría ha sido identificada por Srivani y Jaremit (2020) como particularmente propensa a generar condiciones térmicas adversas, debido al limitado sombreado durante las horas de mayor intensidad solar y a la elevada exposición al entorno radiativo.

En términos dimensionales, el cañón presenta un ancho promedio de 15,6 m, de los cuales 10,0 m corresponden a la vialidad y 5,6 m a las banquetas, así como una longitud aproximada de 308,0 m. La pendiente longitudinal de la calle es del 4,0°, lo que puede influir en la distribución de la radiación solar y en la ventilación local. Adicionalmente, se observa una cobertura vegetal mínima, tanto en las fachadas como en el espacio público, lo cual favorece una mayor absorción y almacenamiento de calor en las superficies expuestas.

Los resultados del análisis de LST indican que esta zona alcanza temperaturas máximas de hasta 35,7 °C, reforzando su clasificación como un sector de alta exposición térmica. En conjunto, estas características morfológicas y microclimáticas justifican la selección de este cañón urbano como unidad de análisis representativa para evaluar la influencia de la morfología urbano-arquitectónica sobre el desempeño térmico-energético y la vulnerabilidad energética en contextos urbanos sensibles al calor.

La Figura 59 presenta la planta de conjunto del cañón urbano. Para una descripción detallada de las dimensiones y de la pendiente de la vialidad, se remite al Apéndice G. por su parte, la Figura 60 muestra el modelo tridimensional de la geometría primitiva actual del cañón urbano, junto con una vista aérea de referencia del entorno construido. En dicha figura, las

subfiguras (a) y (b) corresponden a la vista aérea, mientras que las subfiguras (c) y (d) presentan las vistas laterales.

Figura 59

Planta del cañón urbano de Lomitas



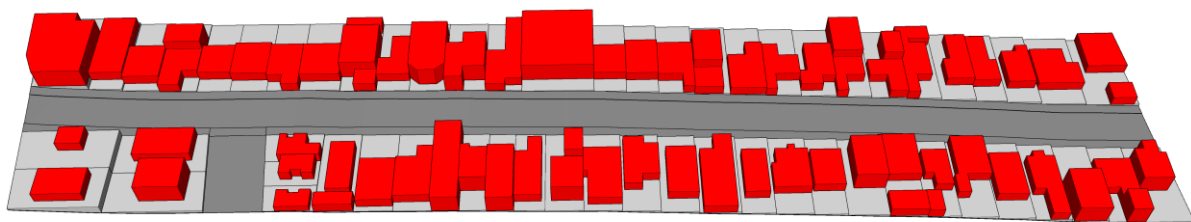
Nota. Para mayor detalle sobre las medidas y especificaciones de la pendiente, véase el *Apéndice F*.

Figura 60

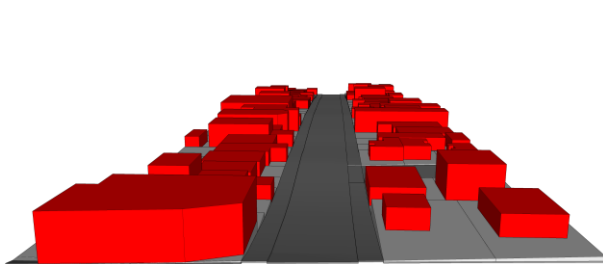
Modelo 3D de la geometría primitiva del cañón urbano de Lomitas



a) Vista aérea del cañón urbano (Google Earth)



b) Vista aérea del modelado 3D del cañón urbano



c) Vista lateral derecha



d) Vista lateral izquierda

4.2.1.2. *Cañón urbano Moderna*

El cañón urbano seleccionado en la colonia Moderna presenta una orientación predominante oeste–este, con una leve desviación de $14,0^\circ$ hacia el norte respecto al eje de la vialidad, condición que permite una exposición significativa a la radiación solar directa en transcurso del día. La relación de aspecto es de 0,5, lo que indica una configuración morfológica abierta, mientras que el SVF alcanza un valor de 64,0 %. Esta combinación geométrica sugiere condiciones térmicas potencialmente desfavorables, aunque ligeramente atenuadas en comparación con el cañón urbano de la colonia Lomitas, debido a una menor apertura geométrica y a una mayor obstrucción parcial del cielo.

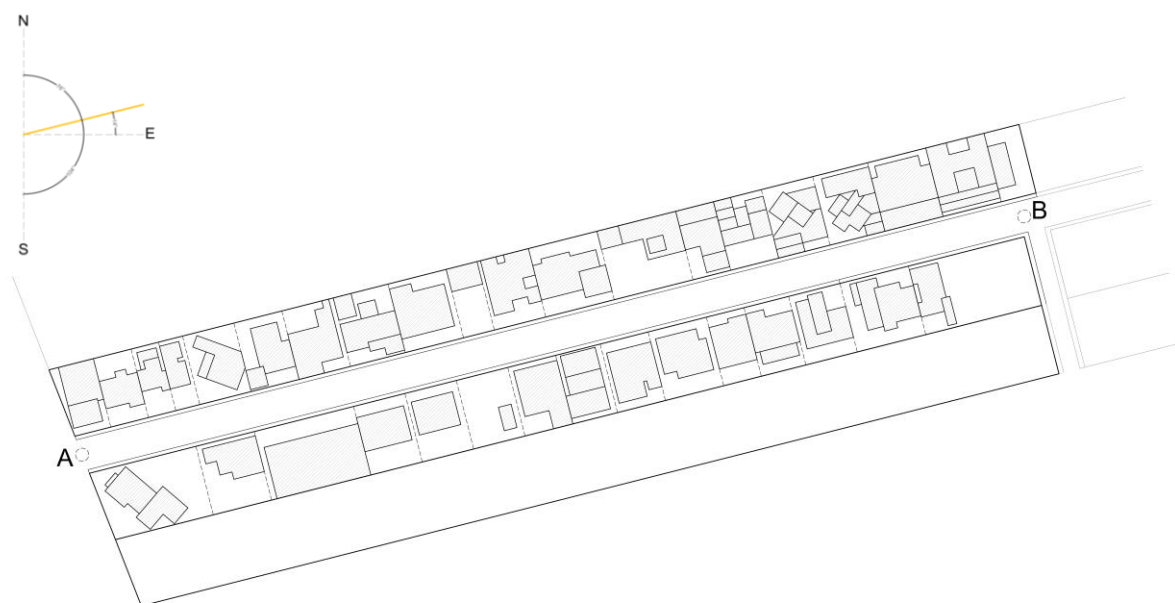
En términos dimensionales, el cañón presenta un ancho promedio de 11,2 m, de los cuales 9,0 m corresponden a la vialidad y 2,2 m a las banquetas, así como una longitud aproximada de 274,0 m. La pendiente longitudinal de la calle es del $4,0^\circ$. A diferencia del caso de Lomitas, se identifica una presencia moderada de vegetación tanto en fachadas como en el espacio público, lo que contribuye parcialmente a la reducción del estrés térmico mediante efectos de sombreado y evapotranspiración.

Los resultados del análisis de LST indican que esta zona alcanza temperaturas máximas de hasta 34,9 °C, es decir, aproximadamente 0,8 °C por debajo de los valores registrados en el cañón urbano de la colonia Lomitas. No obstante, su configuración morfológica y las condiciones microclimáticas asociadas lo convierten en un caso representativo para el análisis comparativo de la interacción entre forma urbana, cobertura vegetal y exposición térmica en contextos de baja vulnerabilidad térmico-energética relativa.

La Figura 61 presenta la planta del cañón urbano. Para una descripción detallada de las dimensiones y de la pendiente de la vialidad, se remite al Apéndice G. Por su parte, la Figura 62 muestra el modelo tridimensional de la geometría primitiva del cañón urbano, junto con una vista aérea de referencia del entorno construido. En dicha figura, las subfiguras (a) y (b) corresponden a la vista aérea, mientras que las subfiguras (c) y (d) presentan las vistas laterales.

Figura 61

Planta del cañón urbano de *Moderna*



Nota. Para mayor detalle sobre las medidas de lotes, banquetas y vialidades, así como las especificaciones de la pendiente, véase el *Apéndice G*.

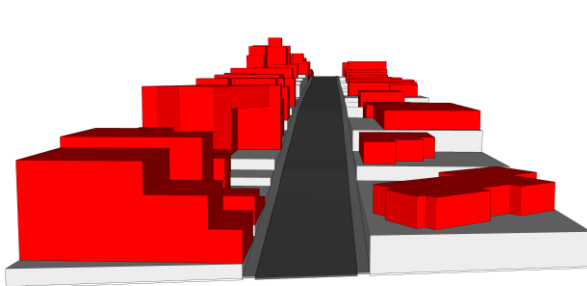
Figura 62
Modelo 3D de la geometría primitiva del cañón urbano de Moderna



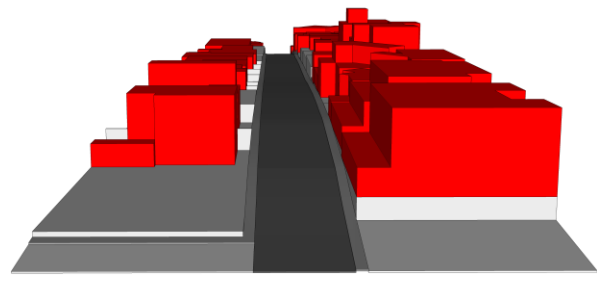
a) Vista aérea del cañón urbano (Google Earth)



b) Vista aérea del modelado 3D del cañón urbano



c) Vista lateral derecha



d) Vista lateral izquierda

4.3. Monitoreo microclimático

Con el fin de comprender las condiciones microclimáticas locales que influyen en el comportamiento térmico del entorno construido, y en cumplimiento del segundo objetivo de esta investigación, se llevó a cabo una campaña de monitoreo ambiental como parte del trabajo de campo. Esta sección presenta y analiza los resultados obtenidos durante el monitoreo in situ, el cual incluyó el registro sistemático de variables meteorológicas mediante estaciones fijas, la medición de la temperatura a nivel de cañón urbano mediante sensores distribuidos estratégicamente, así como el análisis de SVF. Estas actividades tuvieron como propósito caracterizar microclimáticamente el área de estudio, lo que permitió identificar patrones espaciales de temperatura y establecer relaciones con variables morfológicas clave.

4.3.1. Caracterización microclimática

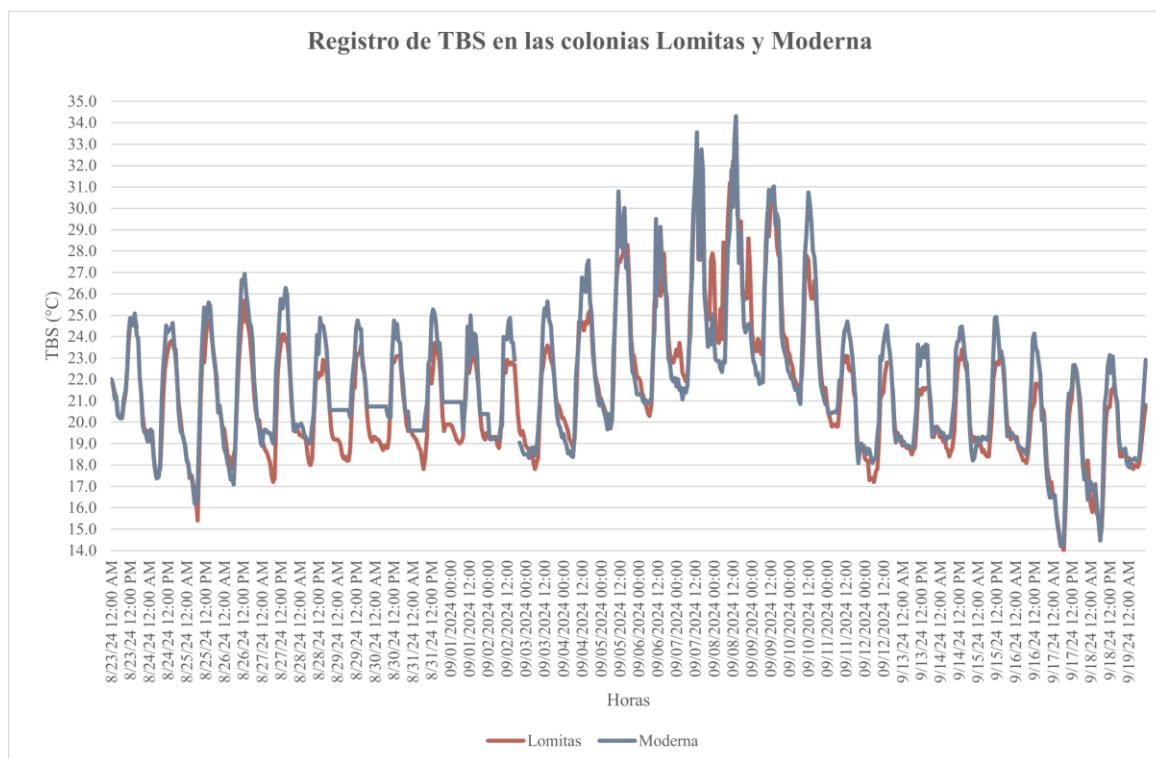
A partir de los datos registrados por las estaciones meteorológicas Davis y Acurite, se presentan a continuación los resultados del análisis microclimático correspondiente al periodo de monitoreo comprendido entre el 23 de agosto y el 19 de septiembre de 2024.

La Figura 63 muestra un gráfico de líneas en el que se representa la evolución temporal de la temperatura del bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$). El eje vertical (Y) corresponde a los valores de temperatura, mientras que el eje horizontal (X) representa la línea de tiempo del monitoreo. De acuerdo con los datos graficados, se observa que la colonia Moderna presenta temperaturas más elevadas que la colonia Lomitas, particularmente durante las horas pico. En determinados momentos, la diferencia térmica entre ambas zonas excede los 2°C .

Asimismo, se observa que las temperaturas registradas en Lomitas presentan una menor oscilación diaria, con una curva de comportamiento más atenuada a lo largo del día, en comparación con la curva de Moderna, que exhibe variaciones más abruptas. Ambos sitios registraron una temperatura máxima de $34,3^{\circ}\text{C}$ el día 8 de septiembre de 2024. En cuanto a las temperaturas mínimas, Moderna registró un valor de $14,2^{\circ}\text{C}$ el 17/09/24 a las 6:00 h, mientras que en Lomitas se registró una mínima ligeramente inferior, de 14°C , a las 7:00 h del mismo día. En términos de temperatura media, Lomitas reportó un valor de $21,4^{\circ}\text{C}$, mientras que Moderna alcanzó $21,8^{\circ}\text{C}$.

Figura 63

Temperatura de bulbo seco monitoreada por la estación meteorológica Davis y Acurite



Por su parte, la Figura 64 presenta una comparativa entre las temperaturas extremas de ambos cañones urbanos registradas el 8 de septiembre de 2024, fecha identificada como representativa de condiciones térmicas críticas durante el periodo de monitoreo. Se observa que, durante la madrugada (00:00–08:00 h), Lomitas reporta TBS más elevadas que Moderna, con valores que oscilan entre 25 °C y 27 °C, lo que sugiere una menor capacidad de enfriamiento nocturno en esa zona.

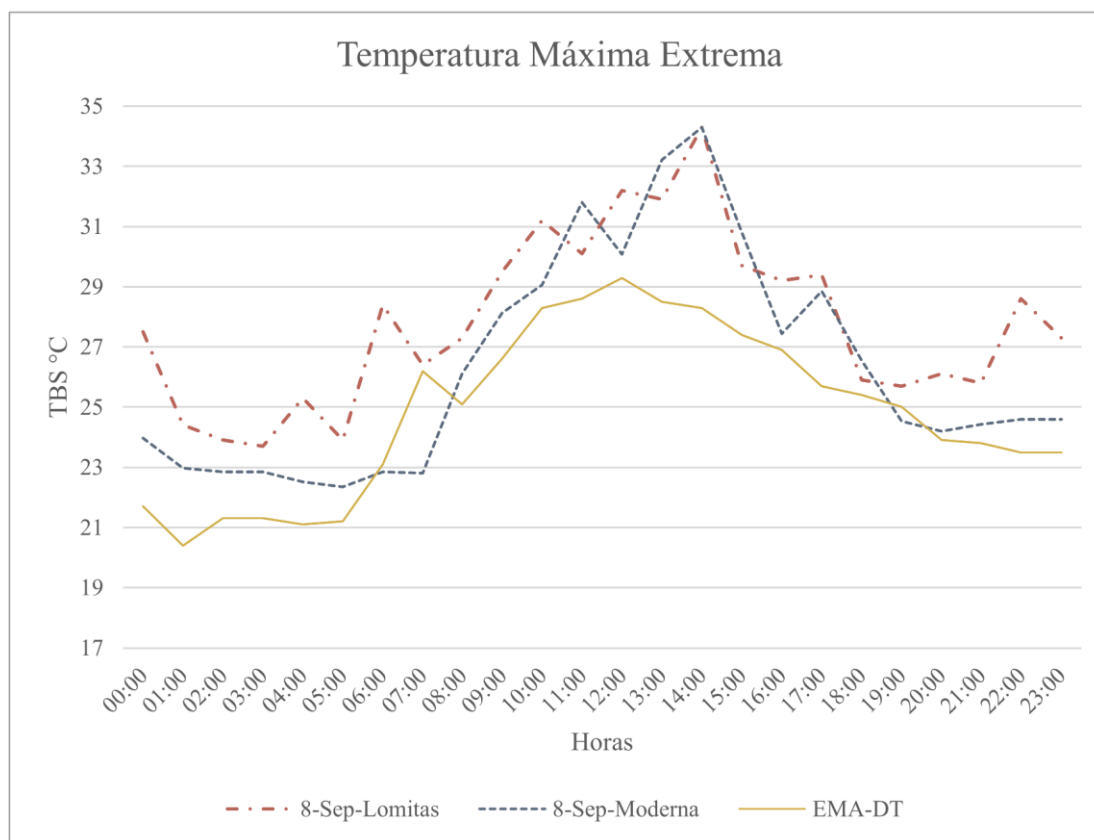
A partir de las 09:00 h, la temperatura en Lomitas asciende de manera más gradual que en Moderna, alcanzando un máximo de 34,3 °C entre las 13:00 y las 15:00 h. En contraste, aunque Moderna presenta temperaturas ligeramente inferiores a las de Lomitas durante la madrugada, su curva térmica se incrementa con mayor rapidez a partir de las 09:00 h, superando a Lomitas entre las 11:00 y 14:00 h y alcanzando también un pico de 34,3 °C.

Posteriormente, a partir de las 16:00 h, la temperatura en Moderna desciende de manera más marcada que en Lomitas, lo que indica una mayor pérdida de calor hacia el final del día. En conjunto, los datos muestran que Lomitas mantiene temperaturas más elevadas durante un

periodo más prolongado, especialmente en las horas nocturnas y de madrugada, lo cual refuerza la hipótesis sobre una mayor retención térmica en esa zona. La línea amarilla incluida en la figura corresponde al día típico definido con base en el análisis de la Estación Meteorológica Automatizada (EMA). En cuanto a las temperaturas mínimas registradas en dicho día, Moderna alcanzó un valor de 22,3 °C a las 05:00 h, mientras que en Lomitas se observó una mínima de 23,7 °C a las 03:00 h, es decir, 1,4 °C superior a la registrada en Moderna.

Figura 64

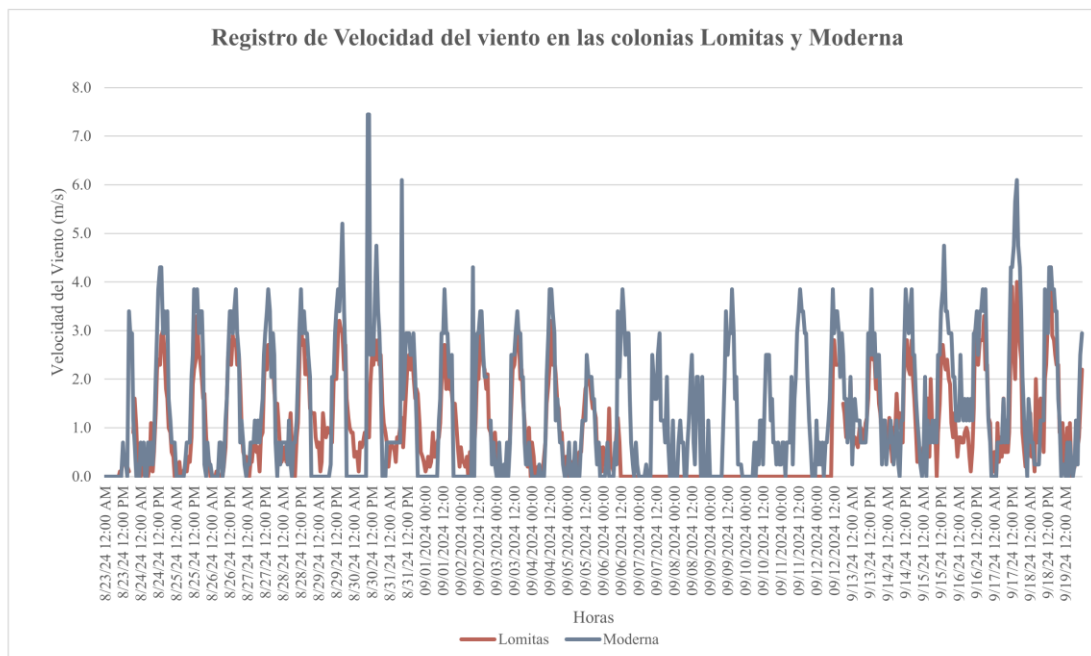
Temperatura de bulbo seco máximas extremas monitoreadas por las estaciones Davis y Acurite



La Figura 65 muestra los datos registrados de velocidad del viento durante el periodo de monitoreo. De acuerdo con los resultados, la zona Moderna presenta una velocidad media del viento de 1,3 m/s, con picos que alcanzan hasta 7,4 m/s, lo que sugiere una mayor exposición al flujo eólico o una configuración urbana que favorece la existencia de corredores de viento. En contraste, en Lomitas se registran velocidades del viento considerablemente más bajas y sostenidas, con valores frecuentemente cercanos a 0 m/s durante periodos prolongados. La velocidad promedio en esta zona fue de 0,9 m/s, con un valor máximo de 4,3 m/s.

Figura 65

Velocidad del viento monitoreadas por las estaciones Davis y Acurite



Cabe destacar que los periodos de menor velocidad del viento en Lomitas coinciden con los de mayor acumulación térmica, lo que incrementa el potencial de estrés térmico, a pesar de que las TBS sean en general inferiores a las de Moderna. Esta limitada ventilación contribuye a la ineficiencia en la disipación del calor acumulado, afectando negativamente el confort térmico en escenarios de calor extremo.

Las temperaturas más elevadas registradas en la colonia Moderna pueden atribuirse a una mayor retención de calor a escala de cañón urbano, asociada principalmente a su configuración morfológica. La mayor relación de aspecto y el menor factor de cielo visible limitan la liberación radiativa del calor acumulado, favoreciendo temperaturas del aire más altas, particularmente durante las horas vespertinas. A ello se suma una orientación predominante hacia el este, que incrementa la exposición solar durante las primeras horas del día y contribuye al almacenamiento térmico diurno en las superficies urbanas.

En contraste, la colonia Lomitas se localiza a una altura superior dentro del gradiente topográfico urbano, lo que favorece temperaturas del aire relativamente más bajas. Asimismo, presenta una menor proporción de superficies pavimentadas, condiciones que reducen la

acumulación de calor sensible a nivel del suelo y atenúan el calentamiento diurno del entorno urbano.

No obstante, las diferencias observadas en el consumo energético entre ambas colonias no responden de manera directa a las temperaturas exteriores registradas, sino al comportamiento térmico de las edificaciones y a las características sociohabitacionales de cada contexto. Aunque Moderna presenta temperaturas exteriores más elevadas, su carácter predominantemente residencial, junto con mejores condiciones constructivas y una mayor eficiencia de la envolvente, se traduce en menores demandas de enfriamiento. En contraste, Lomitas, al corresponder mayoritariamente a vivienda de interés social, presenta edificaciones con un menor desempeño térmico, lo que genera consumos energéticos más elevados, aun bajo condiciones microclimáticas exteriores ligeramente menos severas.

Tabla 41

Comparación microclimática entre Moderna y Lomitas (23/08/24-19/09/24)

Variable	Moderna	Lomitas	Observaciones clave
TBS media (°C)	21,8	21,4	Moderna presenta una TBS media levemente superior.
TBS máxima (°C)	34,3 (08/09/24, 13:00-15:00 h)	34,3 (08/09/24, 13:00-15:00 h)	Ambas zonas registran el mismo pico térmico.
TBS mínima (°C)	14,2 (17/09/24, 6:00 h)	14,0 (17/09/24, 7:00 h)	Diferencia mínima, con Lomitas ligeramente más baja.
Oscilación diaria	Alta	Baja	Moderna muestra mayores variaciones térmicas diarias.
Comportamiento térmico	Curva abrupta y variable	Curva atenuada y más estable	Lomitas presenta una curva más amortiguada.
Enfriamiento nocturno (08/09/24)	Mejor capacidad (mín.: 22,3 °C)	Menor capacidad (mín.: 23,7 °C)	Lomitas retiene más calor durante la madrugada.
Velocidad media del viento (m/s)	1,3	0,9	Moderna tiene mayor ventilación.
Velocidad máxima del viento (m/s)	7,4	4,3	Mayor dispersión térmica potencial en Moderna.
Períodos de viento nulo	Esporádicos	Frecuentes	Lomitas experimenta estancamiento térmico.
Disconfort térmico potencial	Alto en general	Muy alto en eventos extremos	La escasa ventilación en Lomitas intensifica la percepción térmica en escenarios críticos.

Por otro lado, si bien Moderna presenta, en términos generales, un perfil térmico promedio más elevado, es probable que Lomitas experimente mayores niveles de discomfort térmico durante eventos extremos. Esta condición se atribuye a una ventilación más limitada y a una menor capacidad para disipar el calor acumulado, lo que favorece la persistencia de temperaturas elevadas durante la noche. Este comportamiento contribuye a explicar por qué, en determinados intervalos del día analizado (8 de septiembre), Lomitas registró valores de temperatura superiores a los de Moderna, tal como se observa en la Figura 64, correspondiente a la temperatura máxima extrema. Lo anterior sugiere que, a pesar de que Moderna presenta temperaturas promedio más altas, las condiciones microclimáticas de Lomitas pueden resultar más críticas desde la perspectiva del confort térmico. La Tabla 41 presenta una síntesis de los principales hallazgos expuestos.

4.3.2. Análisis de TBS en la colonia Lomitas y moderna a nivel peatón

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento térmico a nivel peatón en las colonias Lomitas y Moderna, se analizaron los registros de TBS obtenidos mediante sensores distribuidos estratégicamente en ambas zonas durante el periodo comprendido entre el 23 de agosto y el 19 de septiembre de 2024. A continuación, se describen los patrones diarios, los valores extremos y promedios, así como las diferencias relevantes observadas entre ambas localidades.

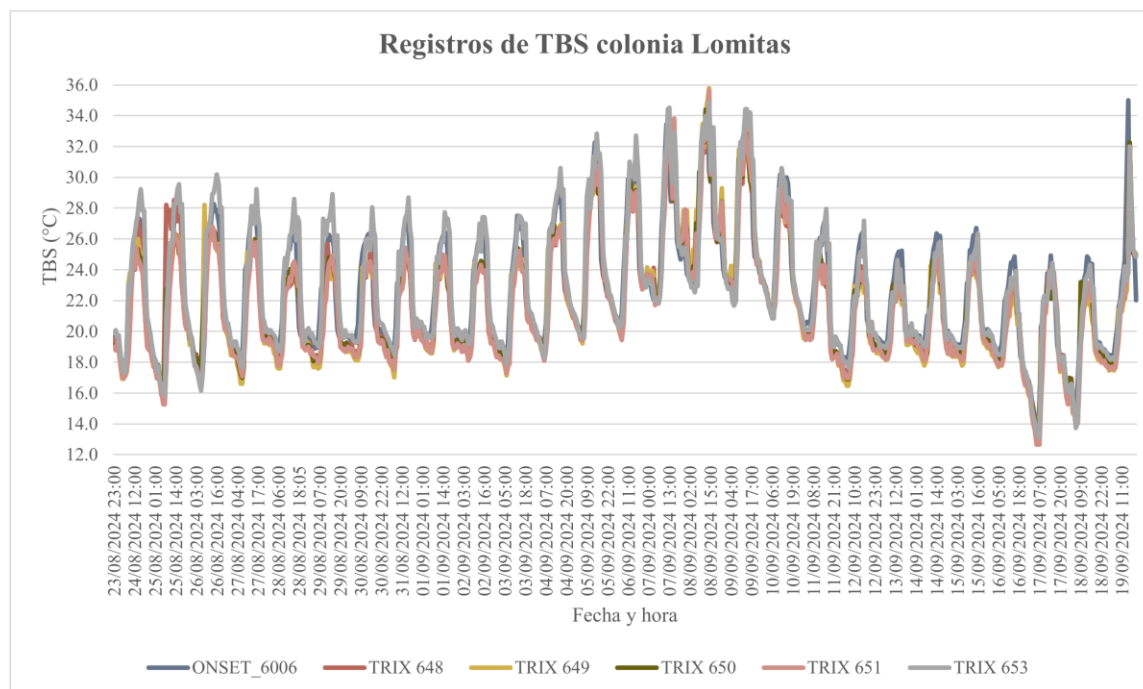
4.3.2.1. Registros térmicos en la colonia Lomitas

La Figura 66 presenta los registros horarios de TBS captados por seis sensores instalados en distintos puntos de la colonia Lomitas durante el periodo de monitoreo. Se observa un patrón térmico claramente definido, caracterizado por temperaturas máximas durante las horas diurnas y mínimos térmicos en la madrugada, usualmente entre las 05:00 y 07:00 horas, en consonancia con los datos reportados por las estaciones meteorológicas de referencia.

La temperatura más alta fue de 35,78 °C registrado por el sensor Trix 648 el 8 de septiembre de 2024 a las 14:00 horas, mientras que el mínimo fue de 12,66 °C, captado por el sensor Trix 651 el 17 de septiembre a las 05:00 horas. En cuanto a los valores promedio, la TBS media más elevada se observó en el sensor Trix 653, con 22,82 °C, mientras que la más baja correspondió al sensor Trix 651, con 21,65 °C.

Figura 66

Temperatura de bulbo seco monitoreada por los sensores en Lomitas



En términos generales, los sensores presentaron comportamientos térmicos similares, aunque se detectaron ligeras variaciones temporales. Particularmente, el sensor Trix 653 evidenció una mayor variabilidad térmica, especialmente en los picos máximos. Por otro lado, el sensor Onset 6006, ubicado en la unidad de análisis, registró la segunda TBS media más alta, con 22,58 °C, es decir, 0,24 °C por debajo del promedio registrado por Trix 653. No obstante, este sensor presentó valores más altos tanto en las temperaturas máximas como mínimas, lo cual sugiere una mayor estabilidad térmica local. Estos resultados se sintetizan en la Tabla 42.

Tabla 42

TBS monitoreada por los sensores (23/08/24-19/09/24) en Lomitas

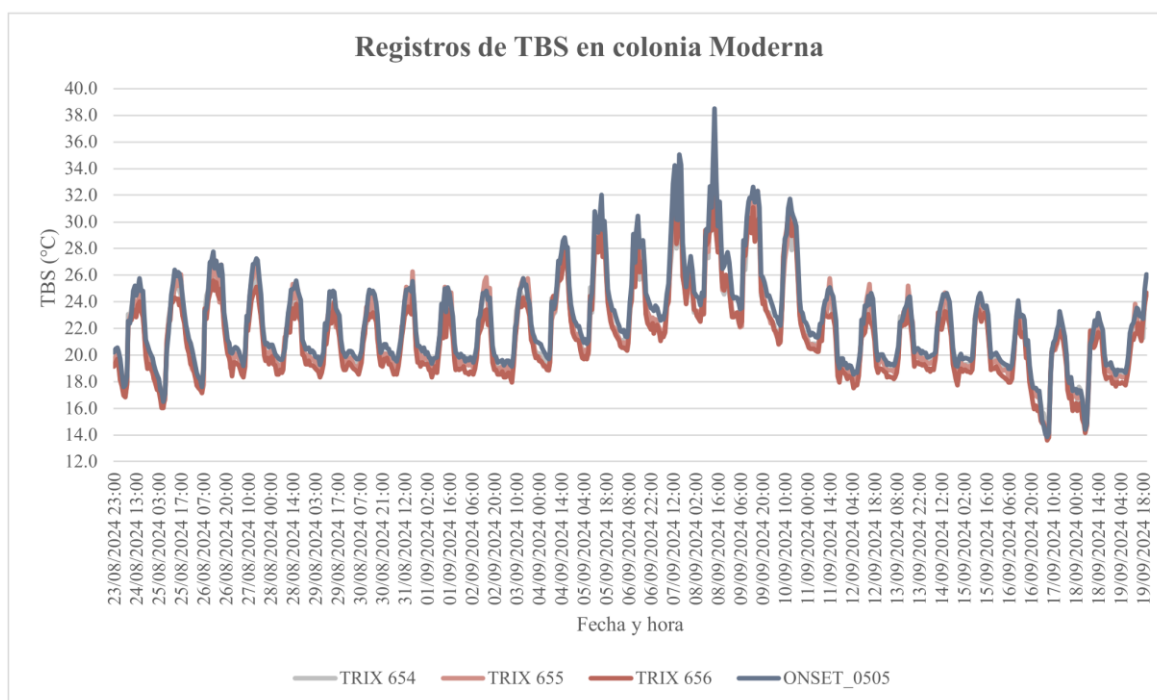
Sensor	TBS mínima (°C)	TBS máxima (°C)	TBS media (°C)
Onset 6006	13,64 (17/09, 06:00 h)	34,99 (19/09, 15:00 h)	22,58
Trix 648	13,70 (17/09, 05:00 h)	35,78 (08/09, 14:00 h)	22,01
Trix 649	13,30 (17/09, 06:00 h)	35,74 (08/09, 14:00 h)	21,90
Trix 650	13,68 (17/09, 05:00 h)	34,49 (08/09, 14:00 h)	21,97
Trix 651	12,66 (17/09, 05:00 h)	35,62 (08/09, 14:00 h)	21,65
Trix 653	13,08 (17/09, 07:00 h)	34,93 (08/09, 14:00 h)	22,82

4.3.2.2. Registros térmicos en la colonia Moderna

La Figura 67 muestra los registros horarios de TBS obtenidos por cuatro sensores distribuidos en la colonia Moderna, correspondientes al mismo periodo. Al igual que en Lomitas, se identifica un ciclo térmico diario, con máximos durante el día y mínimos entre las 05:00 y 07:00 horas, en concordancia con las condiciones climáticas regionales.

Figura 67

Temperatura de bulbo seco monitoreada por los sensores en Moderna



El valor máximo registrado fue de 38,49 °C, correspondiente al sensor Onset 0505 el 8 de septiembre de 2024 a las 14:00 horas. El valor mínimo, en tanto, fue de 13,57 °C, registrado por el sensor Trix 656 el 17 de septiembre a las 06:00 horas. Respecto a los promedios térmicos, el sensor Onset 0505 presentó la TBS media más alta, con 22,59 °C, mientras que la más baja fue detectada por el sensor Trix 656, con 21,44 °C. En conjunto, los sensores muestran comportamientos térmicos homogéneos, con leves fluctuaciones temporales, como se resume en la Tabla 43.

Cabe destacar que el sensor Trix 656 se encuentra ubicado en la unidad de análisis seleccionada para la colonia Moderna, desempeñando un papel clave en la evaluación térmica

local. La elección de este sensor como representativo se fundamenta en criterios morfológicos y microclimáticos. En particular, el cañón urbano en el que se encuentra el sensor Trix 656 presenta una mayor homogeneidad tipológica y geométrica en comparación con otros sectores de la colonia Moderna, lo cual permite establecer una base de comparación más precisa con la unidad de análisis de la colonia Lomitas, que comparte características similares en términos de dimensiones espaciales y pendiente del terreno. Esta selección garantiza una mayor coherencia metodológica al momento de contrastar las condiciones térmicas entre ambos contextos urbanos.

Tabla 43

TBS monitoreada por los sensores (23/08/24-19/09/24) en Moderna

Sensor	TBS mínima (°C)	TBS máxima (°C)	TBS media (°C)
Onset 0505	13,86 (17/09, 06:00 h)	38,49 (08/09, 14:00 h)	22,59
Trix 654	14,60 (17/09, 06:00 h)	34,86 (08/09, 14:00 h)	21,87
Trix 655	14,13 (17/09, 06:00 h)	35,79 (08/09, 14:00 h)	21,94
Trix 656	13,57 (17/09, 06:00 h)	36,18 (08/09, 14:00 h)	21,44

4.3.2.3. Comparación térmica entre colonias.

El análisis comparativo de los registros de TBS en ambas colonias permite identificar patrones térmicos consistentes con el comportamiento climático regional, caracterizado por máximos térmicos en las horas centrales del día y mínimos durante la madrugada. No obstante, se evidencian diferencias importantes en la magnitud de las temperaturas extremas y promedios entre ambos sitios. En términos de temperatura máxima, el valor más alto registrado en Moderna (38,49 °C) supera en 2,71 °C al máximo registrado en Lomitas (35,78 °C). Esta diferencia podría atribuirse a una mayor exposición a la radiación solar directa o a una acumulación térmica superficial más significativa en Moderna. En contraste, las diferencias en las temperaturas mínimas son menos marcadas, lo que sugiere que ambos sitios experimentan procesos de enfriamiento nocturno relativamente similares en ciertos periodos.

Sin embargo, la menor oscilación térmica registrada en Lomitas refuerza la hipótesis de una mayor inercia térmica y capacidad de retención de calor, posiblemente asociada con la baja

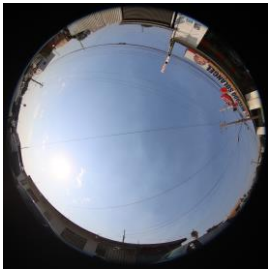
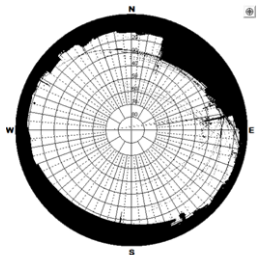
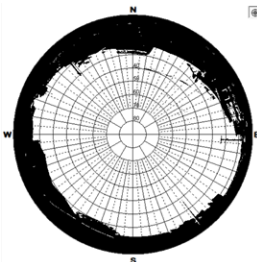
ventilación natural y características morfológicas particulares del entorno urbano, como la configuración en cañón urbano o la densidad edificatoria.

En cuanto a las temperaturas promedio, los valores muestran una variabilidad térmica moderada dentro de cada colonia. En Lomitas, el sensor Trix 653 alcanzó la TBS media más alta (22,82 °C), mientras que en Moderna, el sensor Onset 0505 reportó un valor similar (22,59 °C), lo que permite establecer una comparabilidad térmica entre ambos sectores, aunque con diferencias significativas en los extremos térmicos.

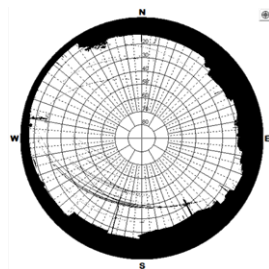
4.3.3. *Análisis del factor de cielo visible*

Como parte de la caracterización geométrica del cañón urbano y su influencia en el comportamiento térmico local, se capturaron imágenes hemisféricas desde el centro de cada uno de los segmentos seleccionados en ambas colonias. Estas fotografías permitieron estimar el factor de cielo visible, un índice que cuantifica la proporción del cielo observable desde un punto específico del espacio urbano. Este parámetro se encuentra estrechamente vinculado con el potencial de enfriamiento nocturno mediante radiación de onda larga y con la eficiencia de la ventilación natural, por lo que su análisis resulta fundamental para comprender los procesos de acumulación y disipación de calor en entornos urbanos densamente edificados. En la Tabla 44 se presentan las imágenes base utilizadas para el cálculo de este índice en la colonia Lomitas.

Tabla 44
Fotografías hemisféricas y cálculo de SVF de Lomitas

Ubicación	Fotografía hemisférica	SVF	TBS mínima
P1. Onset 0505			73 % 13,64 °C
P2. T-648			69 % 13,70 °C

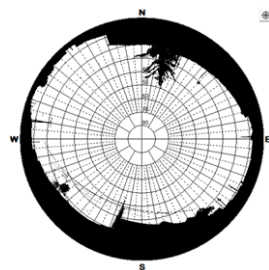
P3. T-649



74 %

13,30 °C

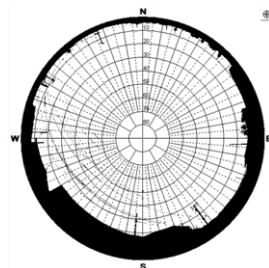
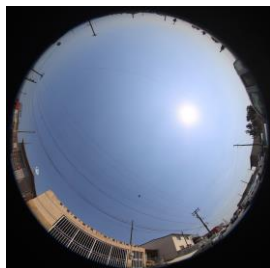
P4. T-650



71 %

13,68 °C

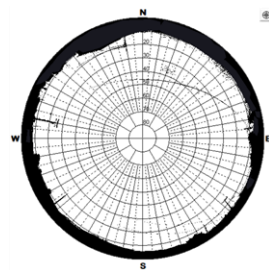
P5. T-651



79 %

12,66 °C

P6. T-653



82 %

13,08 °C

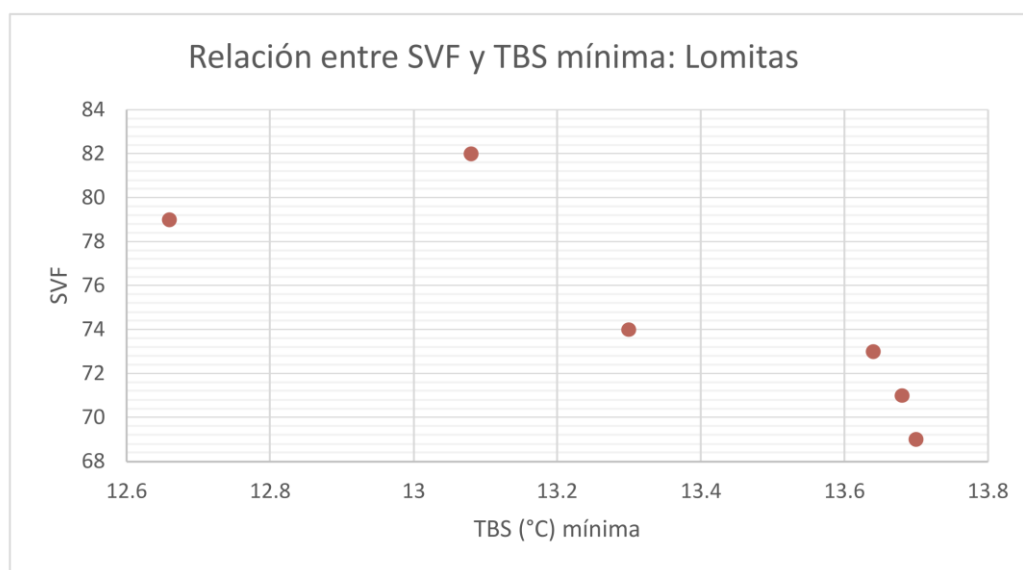
Nota. Un SVF del 100 % indica un cielo visible, mientras que un SVF del 0 % representa un cielo completamente obstruido. Véase la Figura 37 para el mapa de ubicación de las tomas hemisféricas.

Posteriormente, se procedió analizar la relación entre los valores de SVF obtenidos y la temperatura de bulbo seco mínima registrada entre las 05:00 y 07:00 h, periodo en el que manifiestan con mayor claridad los efectos del enfriamiento nocturno. Esta variable térmica fue seleccionada por su sensibilidad a las condiciones de pérdida de calor por radiación en ausencia de radiación solar directa, lo que la convierte en un indicador adecuado para evaluar la influencia de la geometría urbana sobre la retención térmica.

En la Figura 68 se presenta la gráfica de dispersión correspondiente a los datos de la colonia Lomitas, en la que se observa una tendencia inversa entre el SVF y la TBS mínima: conforme el SVF disminuye, las temperaturas mínimas tienden a aumentar. Este comportamiento sugiere que los espacios urbanos más confinados (con menor visibilidad del cielo) tienden a retener más calor durante la noche, reduciendo la capacidad del entorno para disipar el calor acumulado durante el día. En cambio, aquellos puntos con un SVF más alto (mayor apertura hacia el cielo) tienden a registrar temperaturas mínimas más bajas, favoreciendo la pérdida de calor nocturna a través de la radiación. Este comportamiento es coherente con lo reportado en la literatura, donde un mayor acceso al cielo favorece el balance radiativo negativo durante la noche.

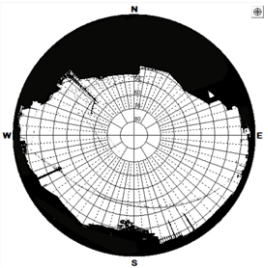
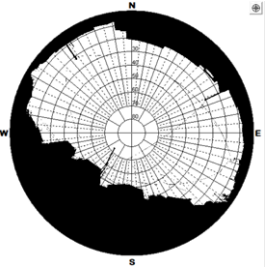
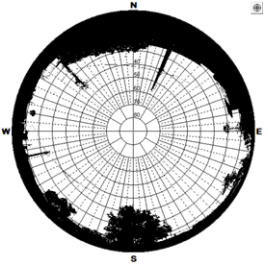
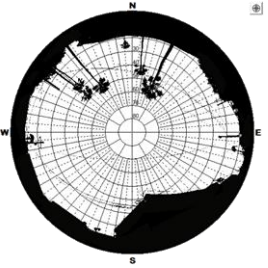
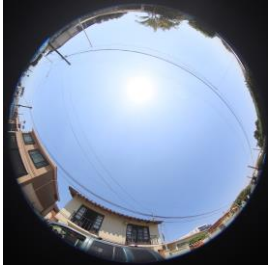
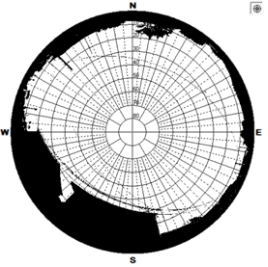
Figura 68

Relación entre SVF y TBS mínima en cañones urbanos de Lomitas

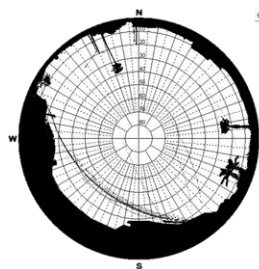
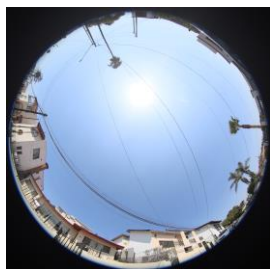


De forma complementaria, en la colonia Moderna también se capturaron imágenes hemisféricas desde el centro de los cañones urbanos seleccionados. Debido a la mayor longitud de las vialidades en comparación con Lomitas, se consideró necesario realizar dos capturas por segmento, con el fin de representar de manera más precisa las condiciones geométricas del entorno construido. Estas imágenes, procesadas igualmente mediante el software RayMan, permitieron estimar el SVF para cada punto de medición, considerando las obstrucciones visuales provocadas por edificaciones, vegetación o mobiliario urbano. En la Tabla 45 se presentan las fotografías hemisféricas correspondientes a la colonia Moderna.

Tabla 45
Fotografías hemisféricas y cálculo de SVF de Moderna

Ubicación	Fotografía hemisférica	SVF	TBS mínima
P1. T-656			64 % 13,57 °C
P2. T-656			59 % 13,57 °C
P3. T-655			71 % 14,13 °C
P4. T-654			66 % 14,60 °C
P5. T-654			73 % 14,60 °C

P6. Onset 0505



73 %

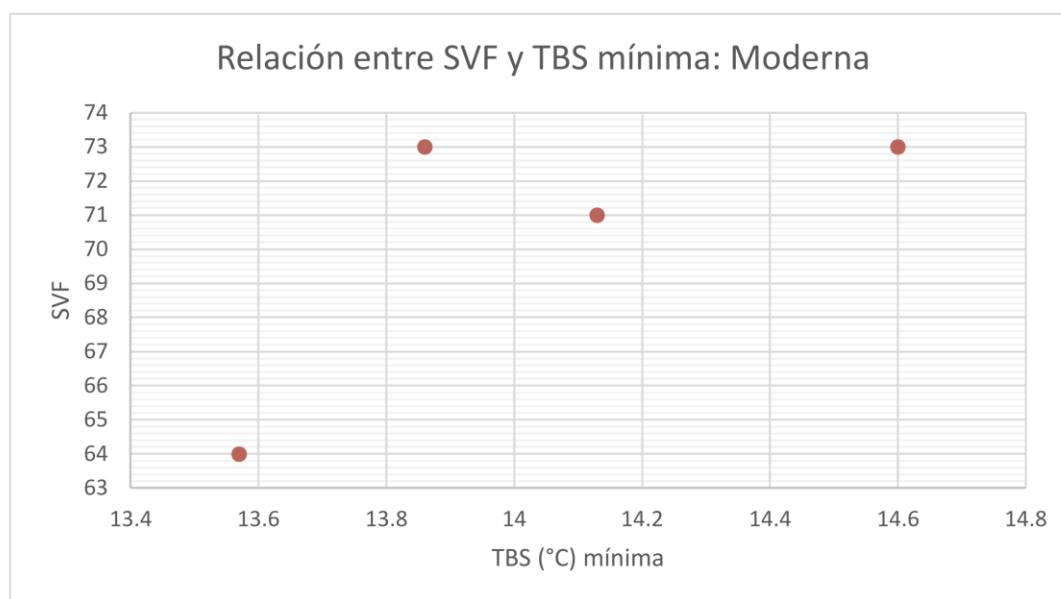
13,86 °C

Nota. Un SVF del 100 % indica un cielo visible, mientras que un SVF del 0 % representa un cielo completamente obstruido. Véase la Figura 38 para el mapa de ubicación de las tomas hemisféricas.

Una vez obtenidos los valores de SVF a partir de las imágenes hemisféricas procesadas, se procedió a analizar su relación con la temperatura del bulbo seco mínima (TBS mínima) registrada en los diferentes segmentos urbanos. En la Figura 69 se presenta la gráfica de dispersión correspondiente a la colonia Moderna, donde se observa una relación menos evidente entre SVF y TBS mínima en comparación con la colonia Lomitas.

Figura 69

Relación entre SVF y TBS mínima en cañones urbanos de Moderna



A pesar de que teóricamente un mayor SVF debería favorecer la disipación del calor acumulado durante el día, los datos muestran una distribución heterogénea: por ejemplo, el punto con el menor valor de SVF (64 %) presenta la TBS mínima más baja, mientras que otros

segmentos con mayor apertura al cielo ($SVF > 70\%$) muestran temperaturas mínimas más elevadas. Esta aparente contradicción sugiere que en la colonia Moderna intervienen factores adicionales que modulan la temperatura nocturna más allá del SVF, tales como la presencia de superficies pavimentadas, la orientación, la vegetación, las características térmicas de los materiales constructivos o las condiciones locales de ventilación. Este comportamiento refuerza la necesidad de adoptar una perspectiva multivariable en el análisis microclimático urbano, reconociendo que la morfología urbana no actúa de forma aislada, sino en interacción con elementos biofísicos y materiales específicos de cada contexto.

4.4. Optimización multiobjetivo

Esta sección presenta los resultados del proceso de optimización multiobjetivo aplicado a la morfología urbano-arquitectónica de los cañones urbanos seleccionados, cuyo objetivo fue identificar configuraciones densificadas capaces de maximizar el desempeño morfológico del cañón urbano y minimizar la demanda energética por enfriamiento, bajo el marco normativo vigente. La optimización se orientó a evaluar los compromisos entre densificación urbana y eficiencia térmico-energética en contextos contrastantes de vulnerabilidad térmica. En el Apéndice N, se presenta de manera sintetizada y legible el algoritmo desarrollado en el experimento debido a su complejidad.

El experimento de optimización consideró tres objetivos simultáneos: i) maximizar la relación de superficie promedio del cañón urbano (FAR), ii) maximizar la relación de aspecto del cañón urbano (AR), iii) minimizar EUI por enfriamiento (EUIcooling) correspondiente al mes más cálido de la torre con sobrecalentamiento y iv) minimizar EUI por enfriamiento correspondiente al mes más cálido de la torre con sobreenfriamiento. Estos objetivos fueron explorados mediante la variación controlada de tres genomas morfológicos del modelo paramétrico: la altura edificatoria expresada en número de niveles, la orientación de la huella edificada y la relación vano–macizo, todos ellos acotados por restricciones normativas y criterios de factibilidad arquitectónica.

La ejecución del algoritmo NSGA-II generó un total de 500 individuos o escenarios morfológicos, cada uno evaluado a partir de cuatro valores de aptitud, correspondientes a los objetivos de optimización definidos. Cabe señalar que la herramienta empleada contabiliza

generaciones e individuos a partir del índice cero; en consecuencia, el proceso evolutivo comprende 20 generaciones (0–19), con 25 individuos por generación (0–24), conformando una población total numerada del 0 al 499.

Los resultados del proceso de optimización se estructuran en dos secciones principales, correspondientes a cada una de las áreas de estudio. En cada sección, el análisis se desarrolla en tres niveles. En primer lugar, se evalúa el comportamiento global de las 500 soluciones generadas, con el fin de identificar patrones generales de desempeño y convergencia del algoritmo. Posteriormente, se analizan las soluciones que conforman el frente de Pareto, correspondientes a aquellas configuraciones no dominadas. Finalmente, mediante la aplicación del método de promedio de rangos de aptitud, se seleccionan el escenario óptimo, definido como la solución que presenta el mejor equilibrio entre los cuatro objetivos de optimización, y el escenario crítico, correspondiente a la configuración con el desempeño menos favorable dentro del conjunto analizado. Ambos escenarios constituyen la base para los análisis térmico-energéticos posteriores bajo condiciones climáticas actuales como futuras.

4.4.1. Optimización multiobjetivo del cañón urbano Lomitas

El presente apartado expone los resultados del proceso de optimización multiobjetivo aplicado al cañón urbano de la colonia Lomitas, seleccionado como caso representativo de un contexto de alta vulnerabilidad térmica-energética. Conforme a los análisis espaciales y microclimáticos desarrollados en las fases previas, este cañón se caracteriza por una elevada exposición térmica y una morfología abierta, condiciones que lo convierten en un escenario crítico para evaluar los compromisos entre densificación urbana y desempeño térmico-energético.

4.4.1.1. Comportamiento global del proceso de optimización

La Figura 70 presenta los gráficos de tendencia de la desviación estándar correspondientes a cada uno de los objetivos de optimización. En estos gráficos, cada curva representa la desviación estándar del valor de aptitud asociada a una generación, mientras que los segmentos que conforman la curva corresponden a los individuos que integran dicha generación. El ancho de la curva expresa el grado de dispersión intrapoblacional: curvas más

anchas indican una mayor variabilidad respecto al valor medio, mientras que curvas más estrechas reflejan una concentración creciente de soluciones alrededor de dicho valor.

Las curvas en color rojo corresponden a las primeras generaciones del proceso evolutivo, mientras que las curvas en color azul representan las generaciones finales, lo que permite visualizar la evolución del comportamiento de la población a lo largo de la optimización. El eje horizontal representa los valores de aptitud obtenidos para cada objetivo. En este marco, un desplazamiento progresivo de las curvas hacia la izquierda indica una mejora en el desempeño del objetivo analizado. En el caso de los objetivos de maximización (Figura 70a y 70b), dicha mejora se traduce en la obtención de valores de aptitud más elevados; en contraste, para los objetivos de minimización (Figura 70c y 70d), la mejora se manifiesta mediante una reducción progresiva de dichos valores.

En los objetivos de maximización del FAR y de la relación de aspecto (AR) del cañón urbano (Figura 70a y 70b), las primeras generaciones presentan curvas notablemente anchas, lo que indica una elevada dispersión de los valores de aptitud dentro de la población. Esta alta variabilidad es característica de la fase inicial de exploración del espacio de soluciones, en la cual coexisten configuraciones morfológicas con desempeños muy contrastantes. No obstante, incluso en estas etapas tempranas se identifican individuos aislados que alcanzan valores relativamente altos de FAR y AR, lo que evidencia la capacidad del algoritmo para generar soluciones con buen desempeño desde las primeras generaciones, aunque aún sin una convergencia colectiva clara.

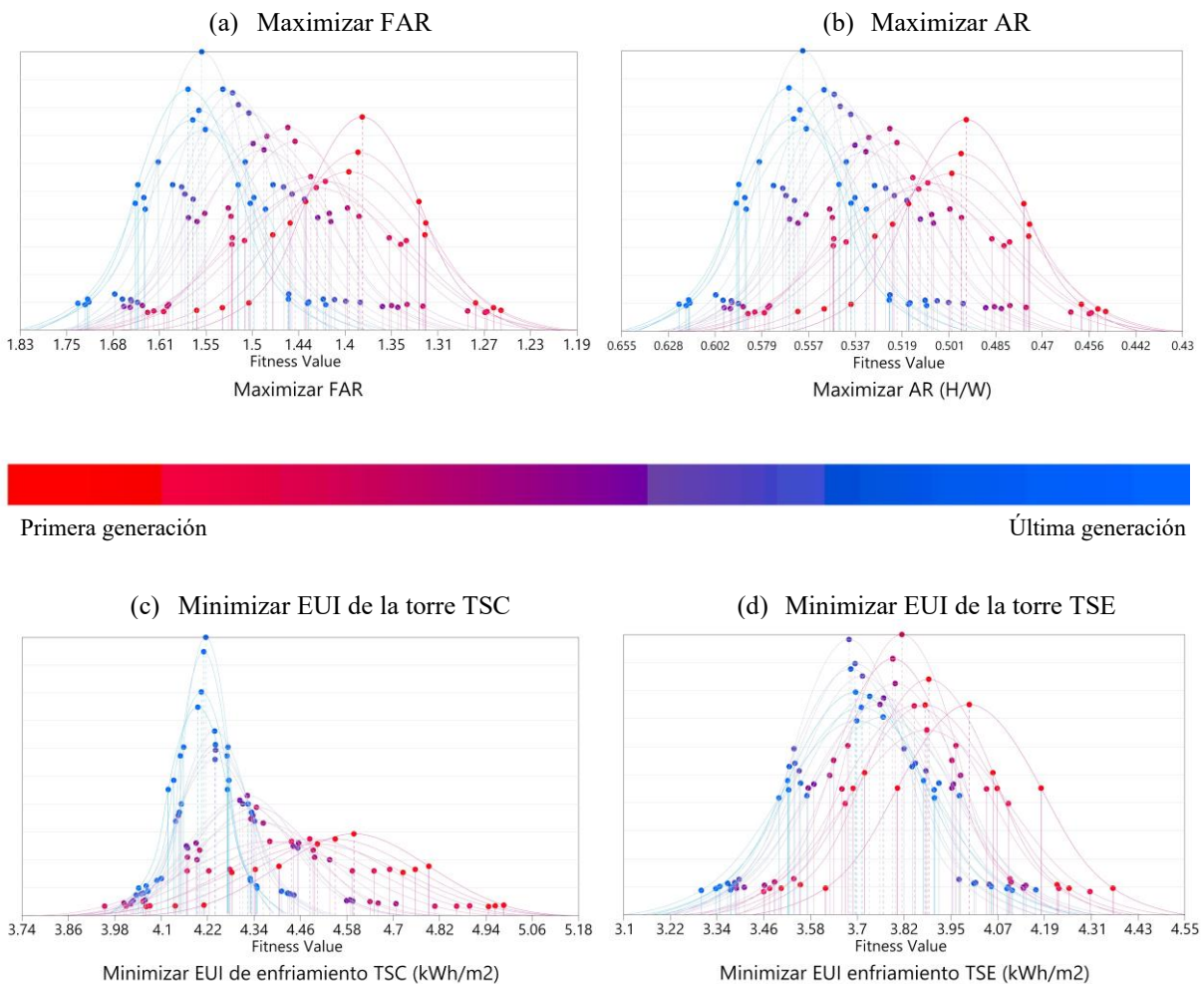
A medida que avanza el proceso evolutivo, las generaciones intermedias y finales muestran un desplazamiento progresivo de las curvas hacia la izquierda del eje de aptitud, lo que, en el caso de estos objetivos de maximización, implica un incremento de los valores promedio alcanzados. De forma paralela, se observa un estrechamiento gradual de las curvas, lo que indica una reducción de la dispersión intrapoblacional y una mayor concentración de soluciones en torno a valores elevados de aptitud. Sin embargo, las curvas finales no colapsan completamente en distribuciones extremadamente estrechas, lo que sugiere la persistencia de cierta variabilidad asociada a los compromisos establecidos con los objetivos energéticos.

En el objetivo de minimización del EUI de enfriamiento de la torre con sobrecalentamiento (TSC, Figura 70c), el comportamiento inicial se caracteriza por una

dispersión amplia y por distribuciones desplazadas hacia valores elevados de consumo energético, reflejadas en curvas anchas y heterogéneas. Conforme progresa la optimización, las curvas correspondientes a las generaciones finales se desplazan de manera clara hacia valores más bajos de aptitud, indicando una reducción sostenida del EUI, al tiempo que se estrechan de forma significativa. Este patrón sugiere que el algoritmo logra identificar, de manera relativamente consistente, configuraciones morfológicas que reducen la demanda de enfriamiento de la TSC, alcanzando un nivel de convergencia más marcado que en otros objetivos.

Figura 70

Gráficos de desviación estándar por objetivo de aptitud: Lomitas



En contraste, el objetivo de minimización del EUI de enfriamiento de la torre con sobreenfriamiento (TSE, Figura 70d) presenta un comportamiento más heterogéneo. Si bien las

primeras generaciones exhiben, al igual que en los demás objetivos, curvas anchas y una elevada dispersión, el desplazamiento hacia valores más bajos de aptitud en las generaciones finales resulta menos pronunciado. Aunque se identifica una tendencia general hacia la mejora, las curvas finales conservan un ancho considerable, lo que indica la persistencia de una variabilidad intrapoblacional significativa. Esta dispersión sugiere que el desempeño energético de la TSE es particularmente sensible a las variaciones morfológicas y que el algoritmo enfrenta mayores dificultades para estabilizar este objetivo sin comprometer los objetivos de densificación urbana.

En conjunto, el análisis de las curvas de desviación estándar muestra que el proceso de optimización evoluciona desde una fase inicial de exploración amplia del espacio de soluciones hacia una fase de explotación y refinamiento, caracterizada por una mejora progresiva del desempeño y una reducción general de la dispersión. No obstante, la persistencia de variabilidad en ciertos objetivos, especialmente en la minimización del EUI de la TSE, evidencia la naturaleza inherentemente conflictiva del problema.

La Figura 71 complementa este análisis al presentar los gráficos de valores de aptitud correspondientes a cada individuo de la población para los cuatro objetivos de optimización. A diferencia de los gráficos de desviación estándar, estos diagramas permiten analizar explícitamente el comportamiento individual de las soluciones, facilitando la identificación de tendencias de mejora, la persistencia de la variabilidad intrageneracional y la existencia de compromisos entre los distintos objetivos.

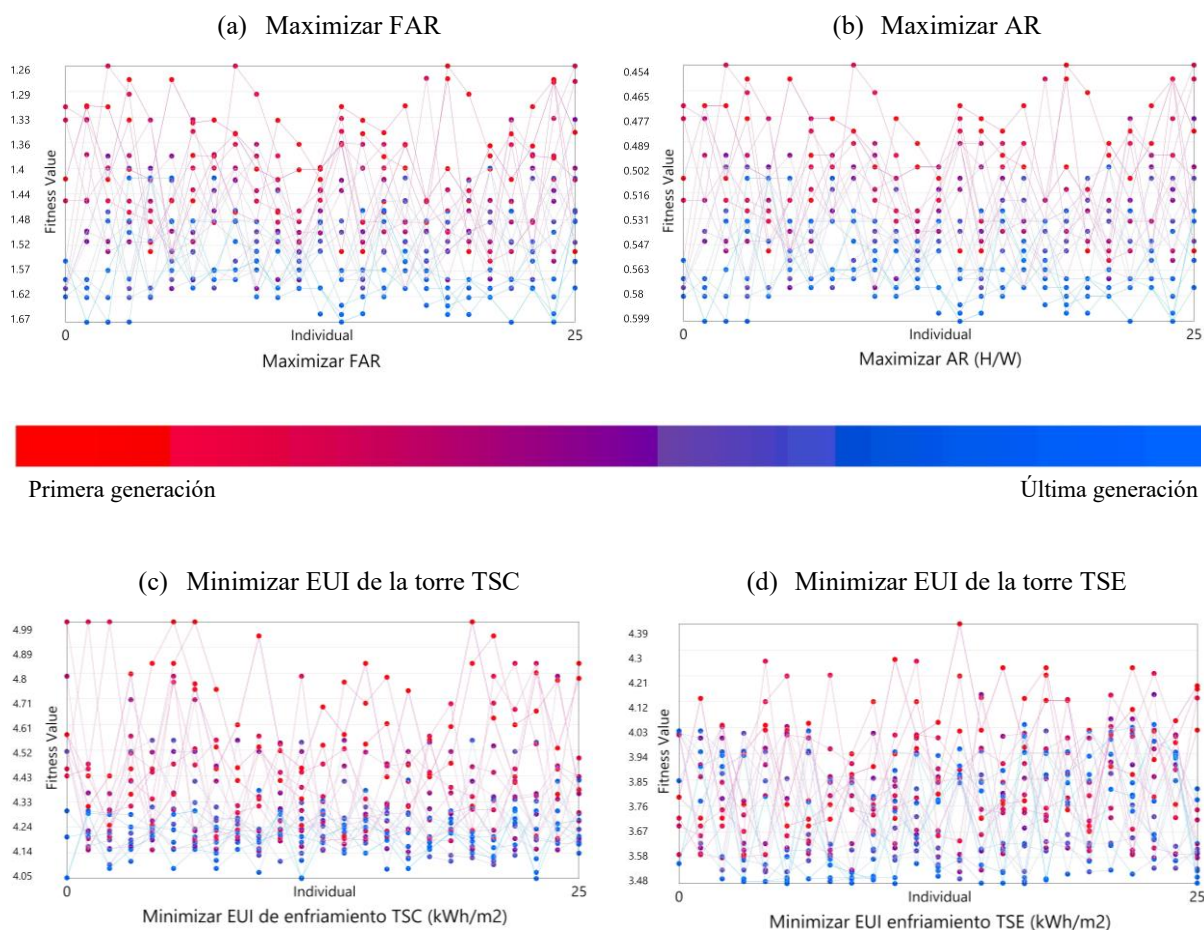
En estos gráficos, los individuos se disponen secuencialmente por generación a lo largo del eje horizontal, de izquierda a derecha, y cada conjunto de individuos perteneciente a una misma generación se vincula mediante una polilínea. Las polilíneas en color rojo representan las primeras generaciones, mientras que las azules corresponden a las generaciones finales, lo que permite visualizar la evolución colectiva del desempeño a lo largo del proceso evolutivo.

En el objetivo de maximización del FAR (Figura 71a), las primeras generaciones concentran valores predominantes entre 1,26 y 1,55, con una dispersión considerable entre individuos. Conforme avanza la optimización, las generaciones finales muestran un desplazamiento hacia valores más favorables, alcanzando rangos entre 1,50 y 1,67. Este patrón evidencia una mejora progresiva del desempeño del FAR y una mayor consistencia entre

individuos, aunque persiste cierta variabilidad asociada a los compromisos con los objetivos energéticos.

Figura 71

Gráficos de valores de aptitud por objetivo para cada individuo: Lomitas



Un patrón similar se observa con el objetivo de maximizar AR (Figura 71b). En las primeras generaciones, los valores de aptitud se distribuyen entre 0,45 y 0,52, con fluctuaciones notables entre individuos. En las generaciones finales, los valores tienden a concentrarse en rangos más altos, aproximadamente entre 0,54 y 0,59, evidenciando una mejora sostenida del desempeño geométrico del cañón. No obstante, la persistencia de variaciones intrageneracionales sugiere que el incremento del AR compite directamente con los objetivos de reducción del consumo energético.

En el objetivo de minimización del EUI de enfriamiento para la TSC (Figura 71c), los valores iniciales se concentran mayoritariamente entre 4,6 y 5,0 kWh/m²·mes, equivalentes a consumos mensuales de 215 a 234 kWh por condominio durante el mes de agosto, identificado como el periodo de máxima carga anual de enfriamiento, considerando una superficie habitable de 46,8 m². A lo largo del proceso evolutivo, las generaciones finales se concentran entre 4,05 y 4,30 kWh/m²·mes (190–201 kWh/mes), lo que evidencia una reducción progresiva del consumo energético y una mayor homogeneidad entre individuos.

En el caso del EUI de enfriamiento para la TSE (Figura 71d), se observa un comportamiento más disperso a lo largo del proceso evolutivo. En las primeras generaciones, los valores se distribuyen aproximadamente entre 3,6 y 4,3 kWh/m²·mes (168–201 kWh/mes en agosto), con picos aislados que alcanzan valores cercanos a 4,4 kWh/m²·mes (≈206 kWh/mes). Aunque las generaciones finales muestran una tendencia general hacia valores más bajos, concentrándose principalmente entre 3,5 y 3,8 kWh/m²·mes (≈164–178 kWh/mes), la dispersión persiste en mayor medida que en el caso de la TSC. Esta mayor variabilidad sugiere una sensibilidad más elevada del consumo energético de la TSE frente a las modificaciones morfológicas introducidas y pone de manifiesto compromisos más complejos entre la reducción de la demanda de enfriamiento y los objetivos de densificación urbana.

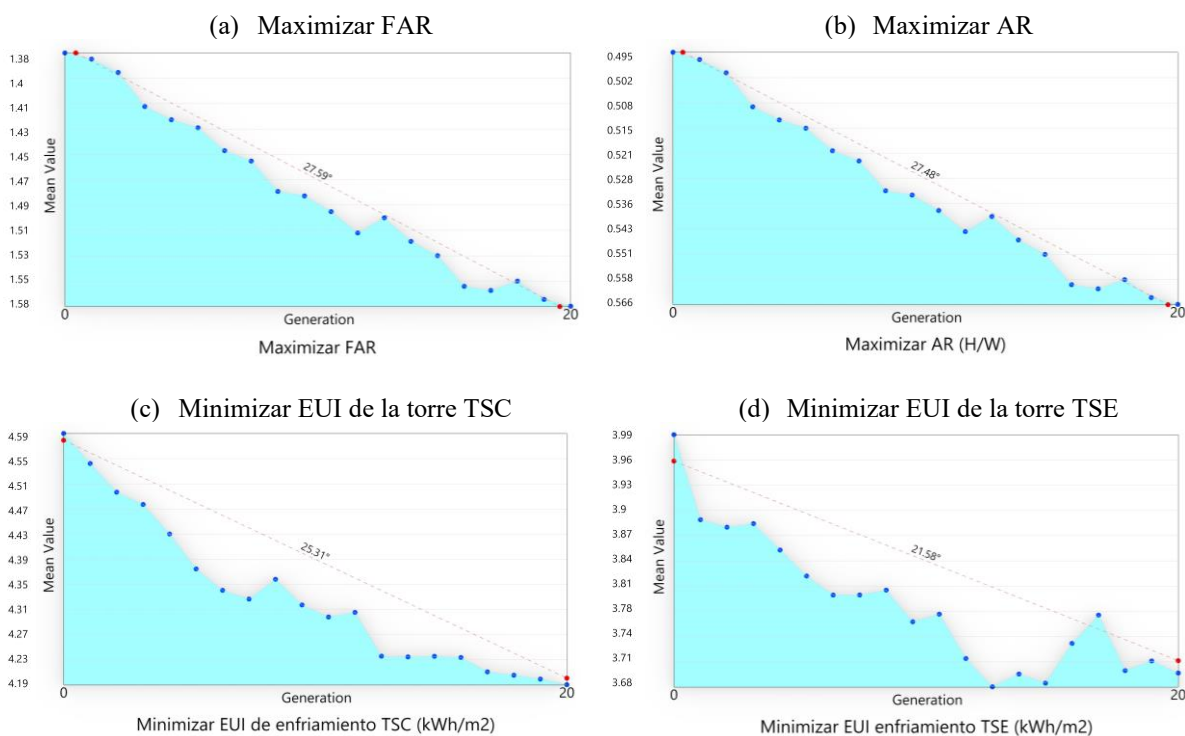
Finalmente, la Figura 72 presenta las tendencias del valor medio de aptitud por generación para cada uno de los objetivos de optimización. En el caso del FAR (Figura 72a), el valor medio evoluciona desde aproximadamente 1,38 en la generación inicial hasta valores cercanos a 1,58 en la generación final, con una tendencia estable que sugiere una convergencia consistente. Para el AR (Figura 72b), el valor medio aumenta de forma sostenida desde valores cercanos a 0,50 hasta aproximadamente 0,56–0,57, reflejando una mejora gradual condicionada por su interacción con los objetivos energéticos.

En cuanto al EUI de enfriamiento de la TSC (Figura 72c), el valor medio disminuye rápidamente durante las primeras generaciones (≈4,59 kWh/m²·mes) y se estabiliza a partir de la generación 10 en un rango estrecho cercano a 4,20–4,23 kWh/m²·mes, manteniéndose prácticamente constante hasta la generación final. En contraste, el EUI medio de la TSE (Figura 72d) presenta un comportamiento intergeneracional más irregular: aunque la tendencia general es descendente (≈3,99 a 3,68 kWh/m²·mes), algunas generaciones intermedias alcanzan valores

medios inferiores a los de la generación final, lo que evidencia una convergencia menos estable y una mayor complejidad en los compromisos morfológicos involucrados.

Figura 72

Gráficos de la línea de tendencia de aptitud media por objetivo: Lomitas



En conjunto, estos resultados confirman que el algoritmo NSGA-II mejora progresivamente el desempeño global de la población para los cuatro objetivos considerados, al tiempo que pone de manifiesto la naturaleza inherentemente conflictiva del problema, particularmente en los objetivos energéticos.

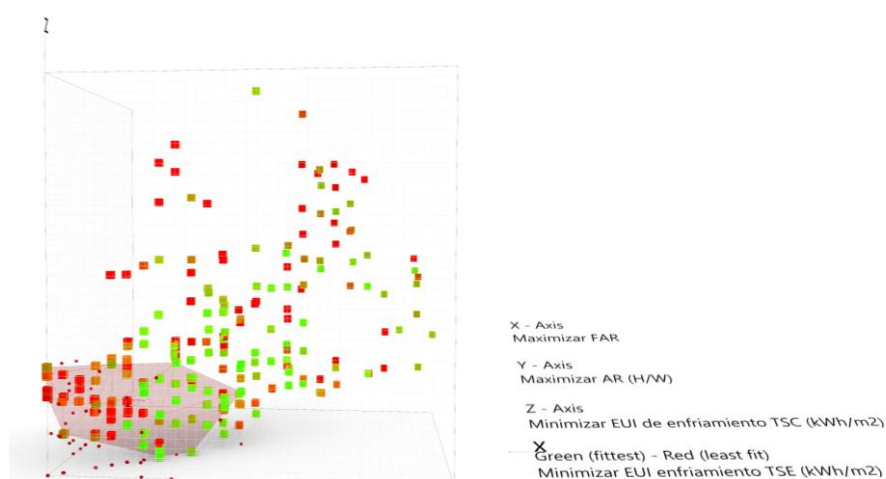
4.4.1.2. Análisis de soluciones óptimas

El análisis de soluciones óptimas se realizó a partir del frente de Pareto obtenido mediante el algoritmo NSGA-II, el cual agrupa configuraciones no dominadas que representan compromisos eficientes entre los objetivos morfológicos y energéticos definidos en el proceso de optimización. Este frente está conformado por 23 soluciones, localizadas principalmente entre las generaciones 13 y 19, lo que indica que el algoritmo alcanza una región estable de soluciones óptimas en la etapa intermedia-final del proceso evolutivo.

Con el propósito de visualizar la estructura de estos compromisos, la Figura 73 presenta la distribución de las soluciones en el espacio de objetivos mediante el gráfico del frente de Pareto. Esta representación permite identificar la región del espacio de soluciones donde se concentran las configuraciones no dominadas y distinguirlas del resto de la población generada durante el proceso evolutivo. La geometría del frente evidencia la naturaleza conflictiva del problema de optimización, mostrando que las mejoras en los indicadores morfológicos de densificación implican incrementos progresivos en la penalización energética, y viceversa.

Figura 73

Representación del frente de Pareto en el espacio de objetivos: Lomitas



A partir de este frente, se realizó un análisis detallado de las variables de decisión asociadas a las soluciones óptimas, con el fin de identificar patrones recurrentes en la configuración del cañón urbano. La matriz completa de genomas correspondiente a estas soluciones se presenta en el Apéndice H, como material de apoyo para la consulta exhaustiva de los valores individuales de cada variable. En el presente apartado se discuten únicamente las tendencias morfológicas y energéticas más relevantes derivadas de dicho conjunto de soluciones.

i. Orientación del cañón urbano

El análisis de la orientación asociada a las soluciones del frente de Pareto evidencia una concentración angular notable, lo que indica que este parámetro actúa como un factor de ajuste

fino dentro del espacio de soluciones óptimas. En particular, la orientación correspondiente a la torre TSC (T1) se concentra en un rango estrecho comprendido entre -10° y -8° , con un valor medio de $-9,6^{\circ}$. De forma análoga, la orientación asociada a la torre TSE (T6) presenta valores entre -6° y -4° , con una media de $-5,8^{\circ}$.

ii. Distribución de niveles

En cuanto a la altura edificatoria, las soluciones óptimas muestran patrones diferenciados entre torres. La TSC presenta una variación mínima, con valores comprendidos entre 6 y 7 niveles y una media de 7 niveles, lo que indica que el algoritmo tiende a estabilizar la altura de la torre TSC como una variable prácticamente fija dentro del frente de Pareto. Por el contrario, la TSE exhibe una mayor flexibilidad, con alturas que oscilan entre 4 y 7 niveles y una media de 5 niveles, sugiriendo que esta torre actúa como un elemento de ajuste morfológico para equilibrar densificación urbana y desempeño energético. A escala de sistema, el promedio de niveles en el conjunto de torres del cañón urbano se sitúa en 6 niveles.

iii. Relación vano-macizo por uso interior

Las áreas comunes (sala-comedor-cocina) concentran los valores más elevados de WWR, con medianas cercanas a 0,45 en la TSC y 0,43 en la TSE, lo que sugiere una preferencia por una mayor captación lumínica y visual en los espacios sociales. Los dormitorios presentan valores intermedios, con medianas de 0,37 (TSC) y 0,36 (TSE), compatibles con un equilibrio entre iluminación natural y control de cargas térmicas.

Por el contrario, los cuartos de servicio muestran valores consistentemente bajos y con escasa dispersión (medianas de 0,17 en TSC y 0,16 en TSE), mientras que los baños mantienen valores bajos a moderados (medianas de 0,21 y 0,20, respectivamente). Este patrón indica que el algoritmo restringe el acristalamiento en espacios secundarios, reduciendo ganancias térmicas no deseadas sin comprometer la funcionalidad del conjunto habitacional.

La Tabla 46 sintetiza los estadísticos descriptivos de los genomas correspondiente a las soluciones que integran el frente de Pareto del cañón urbano. En ella se presentan, para cada variable de decisión, el rango de variación (mín-máx), así como los valores medios y medianos, lo que permite caracterizar de manera compacta y comparativa los patrones morfológicos predominantes en el conjunto de soluciones óptimas.

Tabla 46

Estadísticos descriptivos del genoma de las soluciones del frente de Pareto: Lomitas

Variable del genoma	Rango (min–max)	Media	Mediana
Orientación TSC (OT1) [°]	–10,0 – –8,0	–9,6	–10,0
Orientación TSE (OT6) [°]	–6,0 – –4,0	–5,8	–6,0
Niveles TSC (PT1)	6,0 – 7,0	6,0	7,0
Niveles TSE (PT6)	4,0 – 7,0	5,57	7,0
WWR dormitorios – TSC	0,33 – 0,49	0,38	0,37
WWR dormitorios – TSE	0,33 – 0,45	0,36	0,36
WWR área común – TSC	0,39 – 0,52	0,45	0,45
WWR área común – TSE	0,36 – 0,52	0,43	0,43
WWR cuarto de servicio – TSC	0,12 – 0,27	0,17	0,17
WWR cuarto de servicio – TSE	0,15 – 0,19	0,16	0,16
WWR baño – TSC	0,19 – 0,25	0,21	0,21
WWR baño – TSE	0,18 – 0,26	0,20	0,20

4.4.1.3. Selección del escenario óptimo y del escenario crítico

A partir del conjunto de escenarios generados durante el proceso de optimización multiobjetivo, este apartado presenta la identificación y caracterización del escenario óptimo y del escenario crítico, los cuales constituyen los casos de referencia para los análisis térmicos-energéticos posteriores bajo condiciones climáticas actuales y futuras. Ambos escenarios fueron seleccionados mediante la aplicación del método de promedio de rangos de aptitud, con el propósito de identificar configuraciones contrastantes en términos de desempeño morfológico y energético dentro del espacio de soluciones explorado.

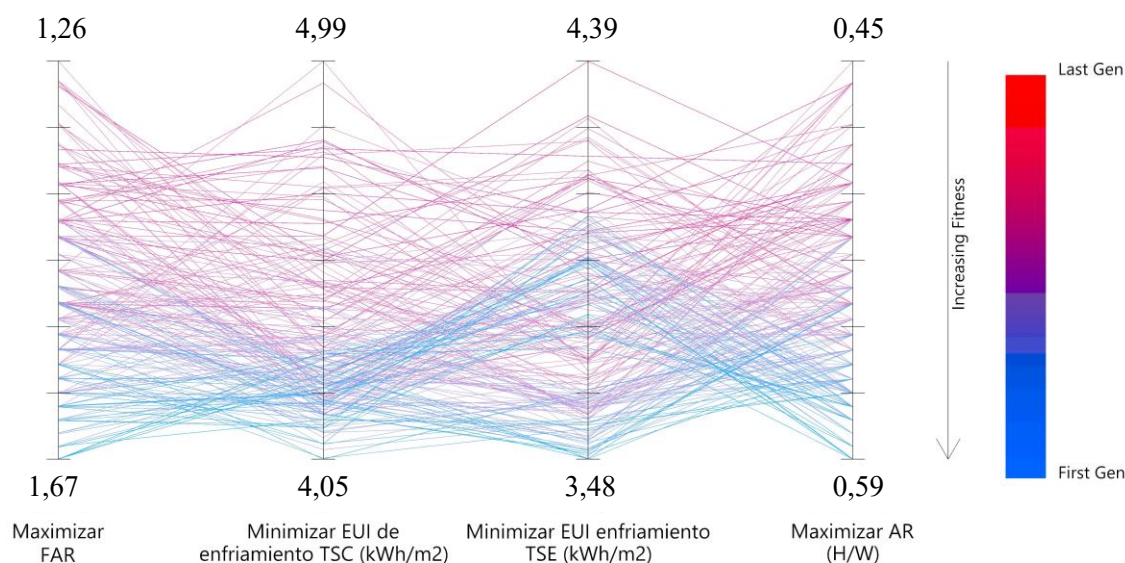
Con el fin de contextualizar esta selección, la Figura 74 presenta el gráfico de coordenadas paralelas, donde se representan simultáneamente los cuatro objetivos de optimización: maximización del FAR, minimización del EUI de enfriamiento de la TSC, minimización del EUI de enfriamiento de la TSE y maximización AR para el conjunto completo de soluciones evaluadas. En este gráfico, cada polilínea corresponde a un escenario individual, mientras que el gradiente cromático indica la progresión del desempeño global de aptitud.

La distribución de las polilíneas evidencia la naturaleza conflictiva del problema de optimización, particularmente entre los objetivos de densificación y los objetivos energéticos. Se observa que los escenarios con valores elevados de FAR y AR tienden a asociarse con

incrementos en el EUI de enfriamiento, mientras que las configuraciones con menor demanda energética presentan, en general, valores morfológicos más moderados. Esta visualización permite identificar no solo las soluciones no dominadas, sino también aquellas configuraciones que, aun sin pertenecer estrictamente al frente de Pareto, presentan combinaciones extremas o desfavorables de desempeño.

Figura 74

Gráfico de coordenadas paralelas de la optimización multiobjetivo de Lomitas

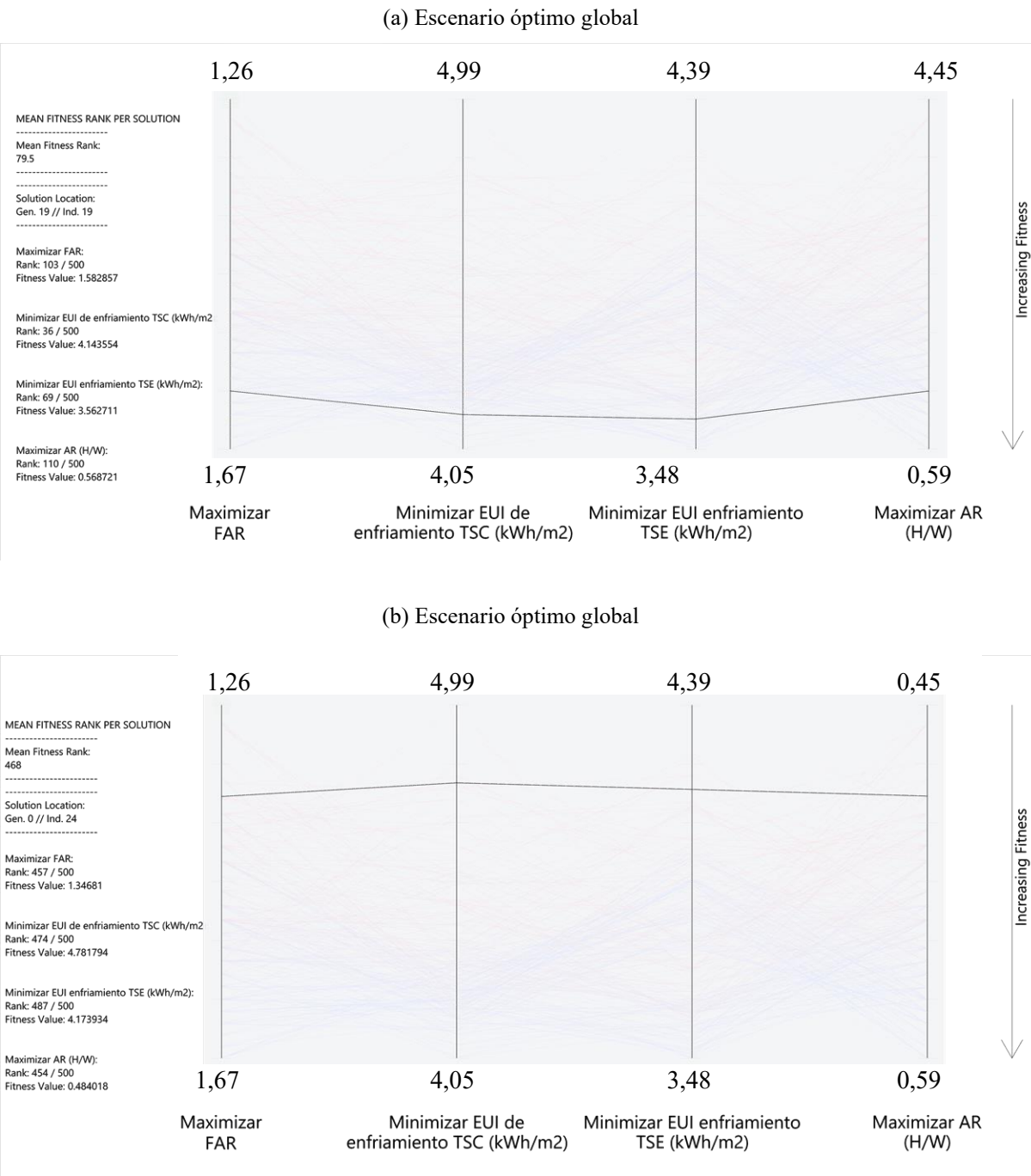


Sobre esta base, la selección del escenario óptimo y del escenario crítico no se realizó en función de la generación a la que pertenecen ni exclusivamente de su posición dentro del frente de Pareto, sino mediante el promedio de los rangos de aptitud asociados a cada objetivo. Este criterio permite integrar de forma equilibrada el desempeño relativo de cada solución respecto al conjunto total de escenarios, evitando sesgos hacia soluciones extremas optimizadas para un único objetivo.

La Figura 75a corresponde al escenario identificado como óptimo global, el cual presenta el menor promedio de rangos de aptitud entre las 500 soluciones evaluadas. Si bien este escenario coincide con una solución ubicada en el frente de Pareto, su selección responde al equilibrio global alcanzado entre densificación y reducción del consumo energético, más que a la optimización extrema de un objetivo específico. En contraste, la Figura 75b presenta el escenario crítico, correspondiente a la solución con el mayor promedio de rangos de aptitud.

Este escenario representa una combinación desfavorable de variables morfológicas y energéticas, caracterizada por valores elevados de EUI de enfriamiento y un desempeño morfológico limitado.

Figura 75
Identificación del escenario óptimo y crítico global de Lomitas



La Tabla 47 presenta una comparación directa de los valores correspondientes a los objetivos de aptitud considerados en el proceso de optimización multiobjetivo. El escenario óptimo se caracteriza por presentar valores más favorables en términos de desempeño térmico-energético, particularmente un menor EUI por enfriamiento, así como combinaciones morfológicas que maximizan la eficiencia del uso del suelo conforme a los criterios establecidos. En contraste, el escenario crítico presenta configuraciones morfológicas que, si bien cumplen con las restricciones del modelo, resultan menos eficientes desde el punto de vista energético, lo que justifica su selección como un caso representativo de comportamiento desfavorable dentro del conjunto de soluciones no dominadas.

Tabla 47

Comparación de los valores de los objetivos de aptitud para los escenarios óptimo y crítico de Lomitas

Objetivo de aptitud	Sentido de optimización	Escenario óptimo	Escenario crítico
FAR	Maximizar	1,58	1,34
Relación de aspecto		0,56	0,48
EUI TSC (kWh/m ² /mes)	Minimizar	4,14	4,78
EUI TSE (kWh/m ² /mes)		3,56	4,17

Nota: El valor de EUI corresponde al mes que presenta las condiciones climáticas más cálidas del periodo analizado.

Las representaciones tridimensionales de ambos escenarios (Figura 76 y Figura 81) permiten visualizar de manera explícita las diferencias morfológicas resultantes de estas configuraciones extremas, facilitando la interpretación espacial de los resultados derivados del proceso algorítmico. Asimismo, los diagrama tipo diamante asociado a cada escenario evidencian comportamientos diferenciados: mientras que el escenario óptimo presenta un desempeño balanceado sin penalizaciones severas en ninguno de los cuatro objetivos, el escenario crítico muestra una acumulación de penalizaciones, particularmente en los objetivos energéticos. Finalmente, los genomas morfológicos correspondientes a ambos escenarios se presentan en el Apéndice I.

Figura 76
Configuración morfológica 3D del escenario óptimo del cañón urbano Lomitas

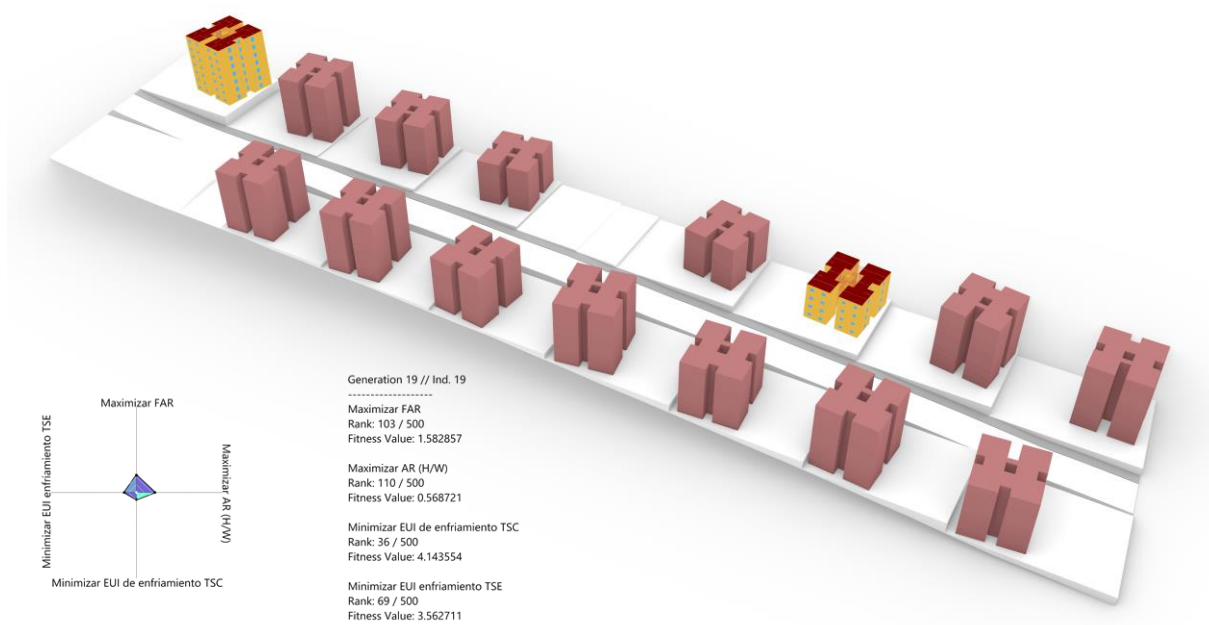
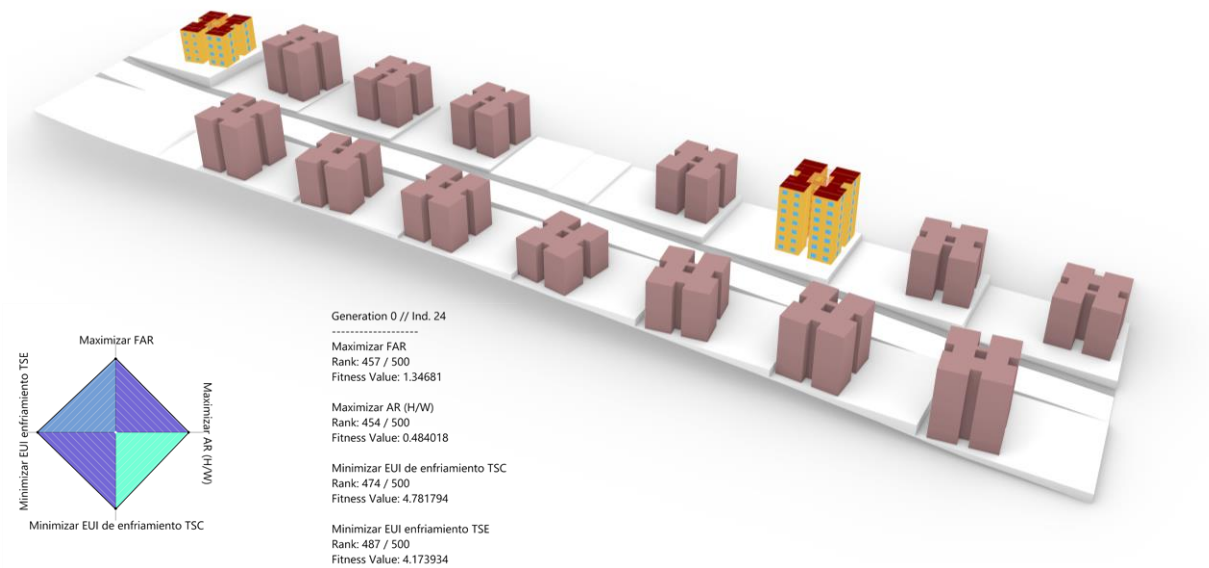


Figura 77
Configuración morfológica 3D del escenario crítico del cañón urbano Lomitas



4.4.2. Optimización multiobjetivo del cañón urbano Moderna

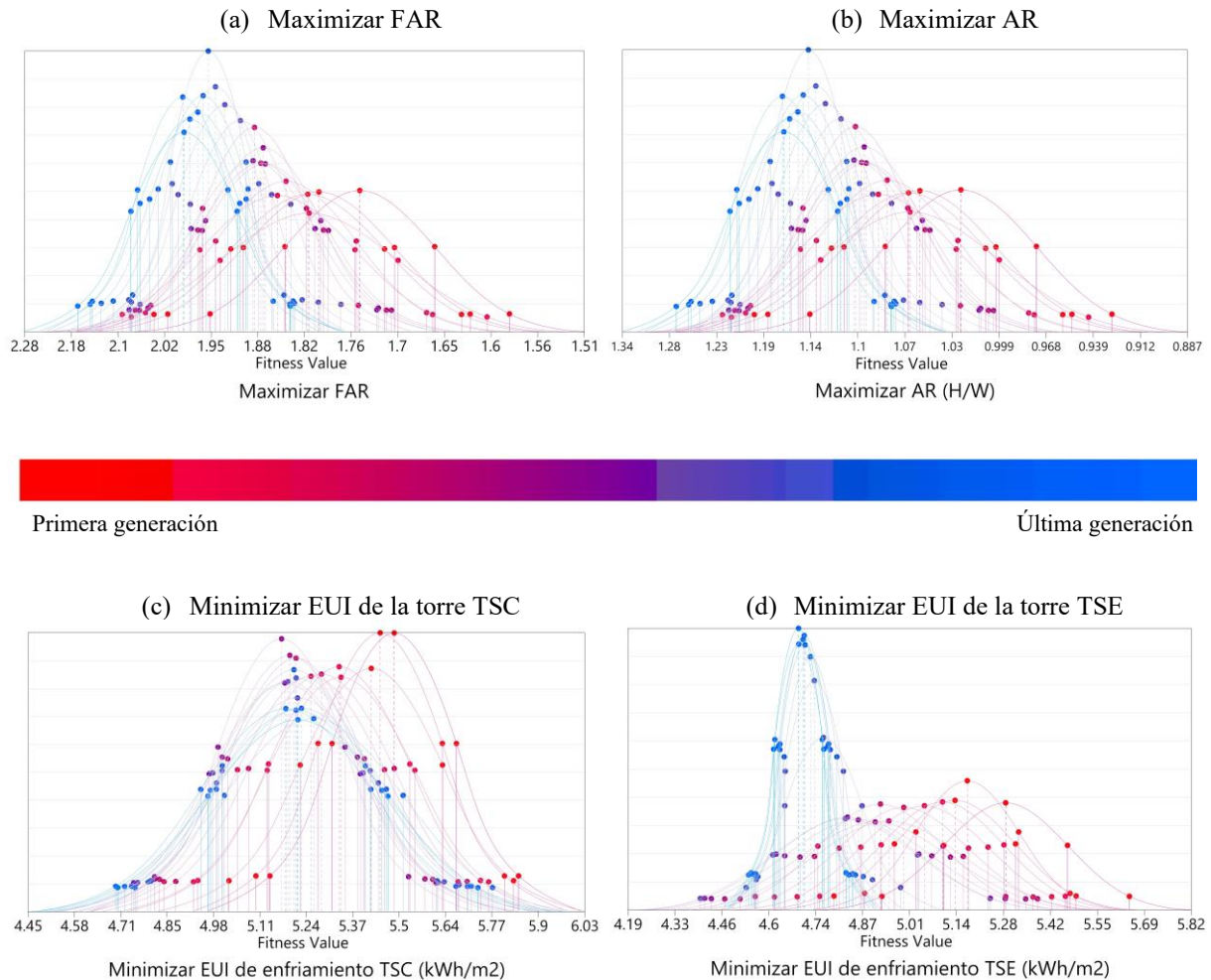
El presente apartado expone los resultados del proceso de optimización multiobjetivo aplicado al cañón urbano de la colonia Moderna, seleccionado como caso representativo de un contexto de baja vulnerabilidad térmica-energética. Al igual que en el caso del cañón Lomitas, el análisis se estructura en tres niveles: i) una síntesis del comportamiento global del proceso de optimización, con énfasis en la convergencia del algoritmo y la evolución general de la dispersión intrapoblacional; ii) el análisis de las configuraciones que conforman el frente de Pareto; y iii) la selección del escenario óptimo y del escenario crítico.

4.4.2.1. Comportamiento global del proceso de optimización

Las Figuras 76 a 78 sintetizan el comportamiento global del proceso de optimización multiobjetivo aplicado al cañón urbano Moderna, integrando la evolución de los valores individuales de aptitud, la dispersión intrapoblacional y la tendencia del valor medio para cada objetivo. En los objetivos morfológicos de maximización del FAR y de la relación de aspecto, las curvas de desviación estándar (Figura 78a–b) y los valores de aptitud de las soluciones individuales (Figura 79a–b) evidencian una fase inicial caracterizada por una dispersión amplia, con valores predominantemente comprendidos entre 1,60–1,95 para el FAR y 0,95–1,10 para el AR. Conforme avanza el proceso evolutivo, las soluciones se desplazan hacia rangos más favorables, estabilizándose en valores finales cercanos a 1,85–2,10 para el FAR y 1,08–1,20 para el AR, como se observa en las tendencias del valor medio (Figura 80a–b). No obstante, la persistencia de la variabilidad intrageneracional en las generaciones finales indica un conflicto sostenido entre los objetivos de densificación y los objetivos energéticos.

En cuanto a los objetivos de minimización del EUI de enfriamiento, los gráficos de valores individuales y de dispersión (Figura 78c–d y Figura 79c–d) muestran comportamientos diferenciados entre ambas torres. Para la TSC, los valores iniciales se concentran en rangos elevados, del orden de 5,10–5,70 kWh/m²·mes (239–267 kWh/mes en agosto), y mantienen una dispersión significativa a lo largo del proceso, con una reducción moderada hacia valores finales cercanos a 4,85–5,10 kWh/m²·mes (227–239 kWh/mes en agosto), tal como se refleja en la evolución del valor medio (Figura 80c).

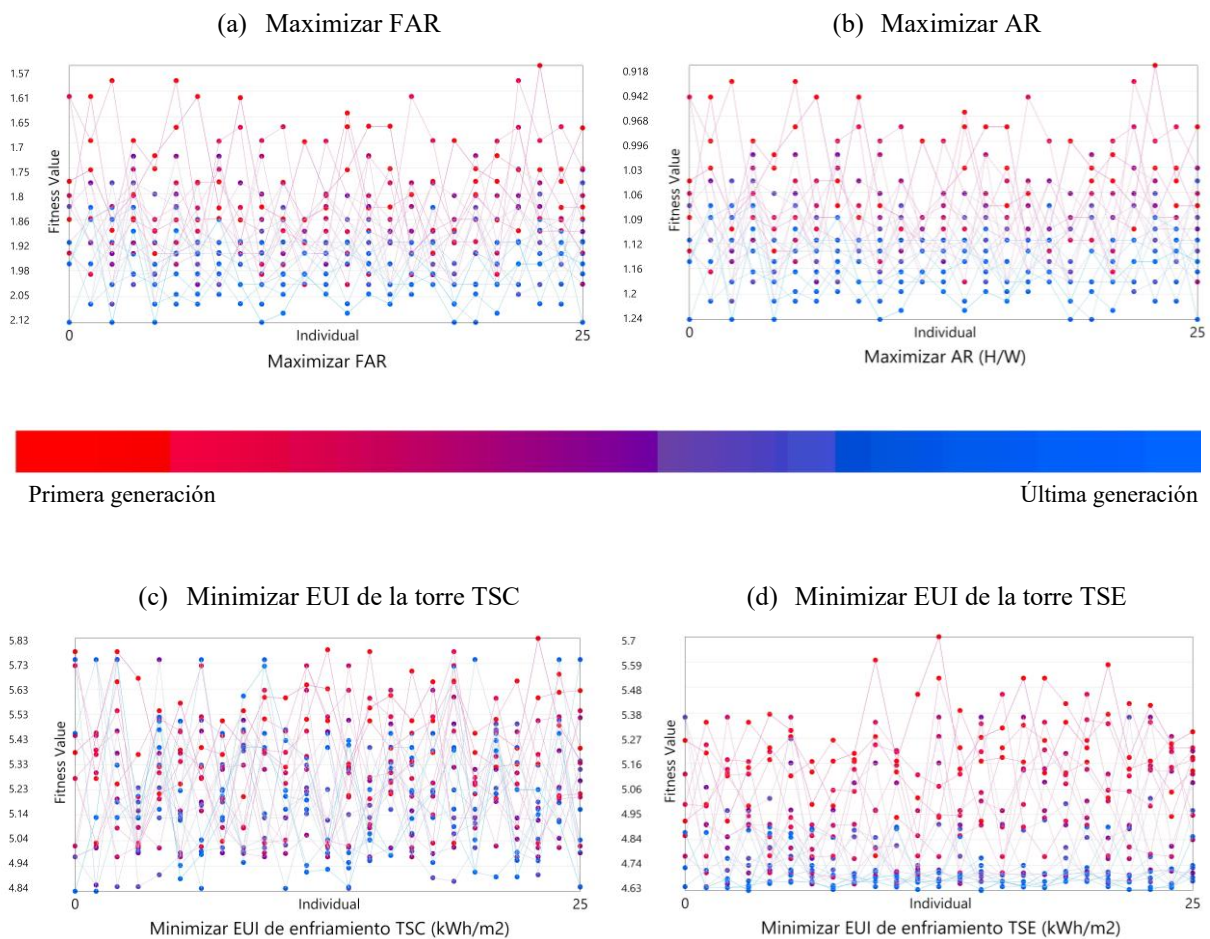
Figura 78
Gráficos de desviación estándar por objetivo de aptitud: Moderna



En contraste, el EUI asociado a la TSE presenta una evolución más estable, con una disminución progresiva del valor medio desde aproximadamente $5,30 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{mes}$ ($\approx 248 \text{ kWh/mes}$ en agosto) hasta valores cercanos a $4,70\text{--}4,75 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{mes}$ ($\approx 220\text{--}222 \text{ kWh/mes}$ en agosto), acompañada de una reducción clara de la dispersión en las generaciones finales (Figura 78d y Figura 80d). Estos patrones evidencian que, en el contexto morfológico del cañón Moderna, el proceso de optimización logra estabilizar con mayor eficacia el desempeño energético de la TSE, mientras que la TSC mantiene una mayor sensibilidad frente a las modificaciones morfológicas introducidas.

Figura 79

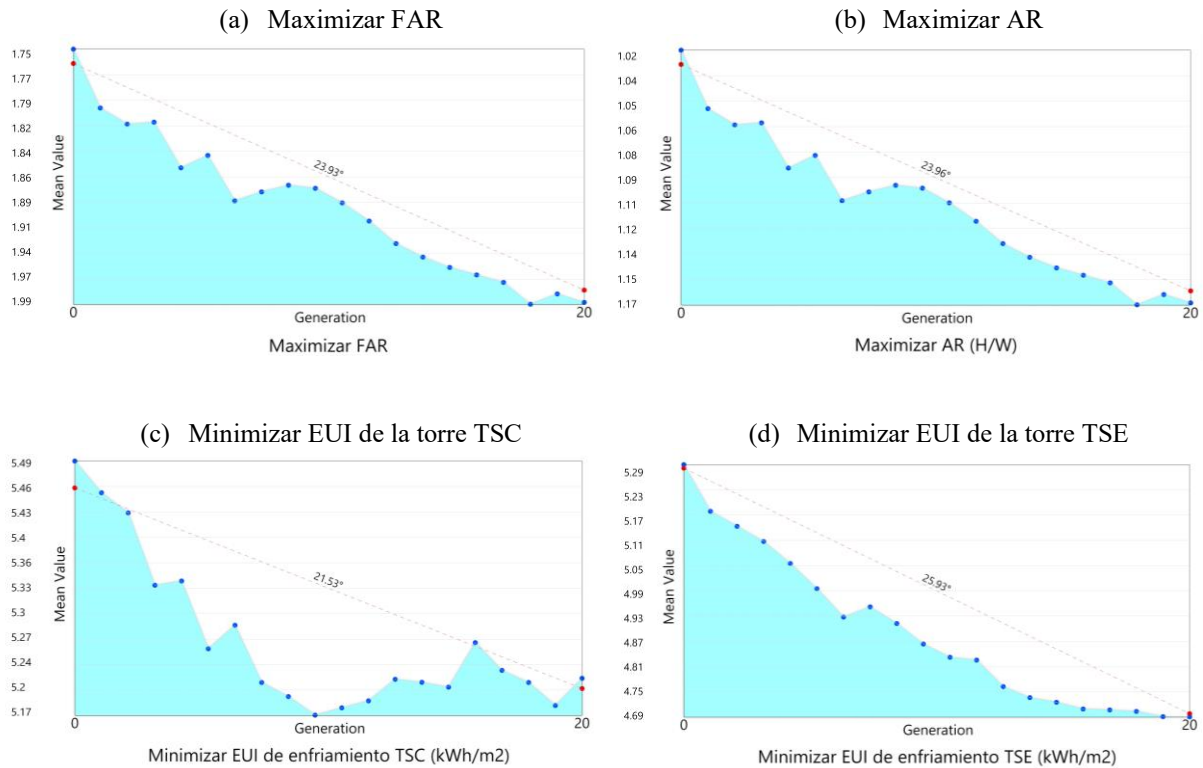
Gráficos de valores de aptitud por objetivo para cada individuo: Moderna



En conjunto, los gráficos de valores individuales, dispersión intrapoblacional y tendencia del valor medio confirman que el proceso de optimización en el cañón urbano Moderna alcanza una mejora progresiva de los objetivos definidos, aunque sin una homogeneización completa del espacio de soluciones. La coexistencia de convergencias estables y variabilidad residual es consistente con la naturaleza conflictiva del problema multiobjetivo abordado y valida el uso del frente de Pareto como una representación sintética de los compromisos geométrico-energéticos identificados.

Figura 80

Gráficos de la línea de tendencia de aptitud media por objetivo: Moderna



4.4.2.2. Análisis de soluciones óptimas

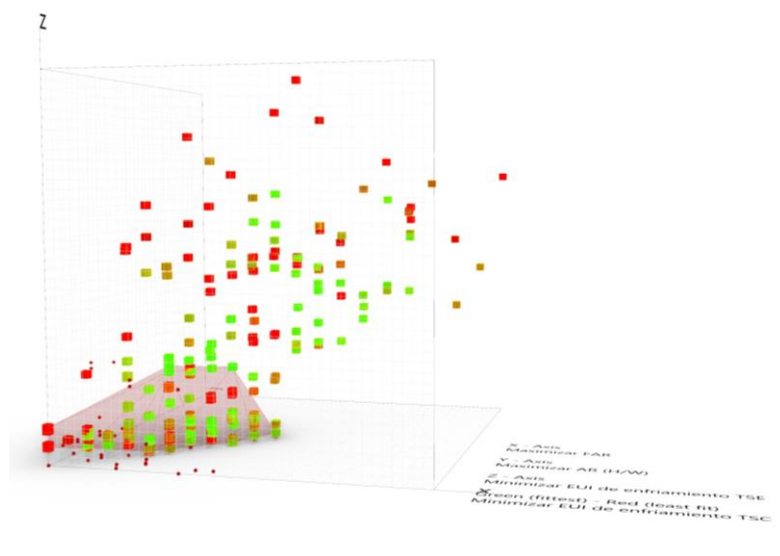
Al igual que en Lomitas, el análisis de soluciones óptimas se realizó a partir del frente de Pareto obtenido mediante el algoritmo NSGA-II. Este frente está conformado por 29 soluciones, localizadas principalmente entre las generaciones 16 y 19, lo que indica que el algoritmo alcanza una región estable de soluciones óptimas en la etapa intermedia-final del proceso evolutivo. En la Figura 81 presenta la distribución espacial de las soluciones del frente de Pareto.

A partir de este frente, se realizó un análisis detallado de las variables de decisión asociadas a las soluciones óptimas, con el fin de identificar patrones recurrentes en la configuración del cañón urbano. La matriz completa de genomas correspondiente a estas soluciones se presenta en el Apéndice K, como material de apoyo para la consulta exhaustiva de los valores individuales de cada variable. En el presente apartado se discuten únicamente las

tendencias morfológicas y energéticas más relevantes derivadas de dicho conjunto de soluciones.

Figura 81

Representación del frente de Pareto en el espacio de objetivos: Moderna



i. Orientación del cañón urbano

El análisis de la orientación asociada a las soluciones del frente de Pareto en el cañón urbano Moderna evidencia un comportamiento diferenciado entre la torre TSE y la torre TSC. En el caso de la TSE (OT2), los valores de orientación muestran una distribución más dispersa y de carácter bimodal, concentrándose principalmente en torno a valores positivos cercanos a $+6^\circ$, así como en un rango negativo comprendido aproximadamente entre -9° y -2° . Esta variabilidad indica que la orientación de la TSE presenta una mayor flexibilidad dentro del conjunto de soluciones óptimas, funcionando como una variable de ajuste capaz de absorber modificaciones angulares sin generar penalizaciones energéticas determinantes.

Por el contrario, la TSC (OT3) presenta una concentración angular mucho más marcada. Las soluciones del frente de Pareto se agrupan predominantemente en valores cercanos a $+10^\circ$, con presencia secundaria de orientaciones próximas a $+9^\circ$, mientras que los valores negativos aparecen de forma puntual. Este patrón sugiere que la orientación de la torre principal constituye un parámetro altamente sensible desde el punto de vista morfológico-energético, cuya

estabilización resulta necesaria para mantener el equilibrio entre densificación urbana y reducción del consumo de enfriamiento.

En conjunto, estos resultados evidencian una jerarquía funcional entre ambas torres, en la que la TSC fija la orientación dominante del cañón urbano, mientras que la TSE conserva un mayor grado de libertad geométrica.

ii. Distribución de niveles

En cuanto a la altura edificatoria, la torre TSE presenta un valor constante de 7 niveles en la totalidad de las soluciones no dominadas, lo que indica que el algoritmo identifica un único nivel óptimo de altura para esta edificación desde el punto de vista energético. Por su parte, la TSC muestra una variabilidad mínima con valores comprendidos entre 6 y 7 niveles y un predominio claro de configuraciones de 6 niveles. Esta distribución indica que la altura de la TSC actúa como un parámetro de ajuste secundario, permitiendo incrementos puntuales de altura únicamente cuando estos pueden ser compensados mediante ajustes en otras variables del genoma, tales como la orientación o la relación vano–macizo. A escala de sistema, el promedio de niveles en el conjunto de torres del cañón urbano se sitúa en 6 niveles.

iii. Relación vano-macizo por uso interior

Asimismo, se observa una asimetría controlada entre ambas torres en la magnitud y la variabilidad del acristalamiento. Si bien la TSE presenta un patrón funcional análogo al de la TSC, los valores de WWR asociados a esta torre tienden a ser ligeramente más conservadores y con menor dispersión. En particular, los dormitorios de la TSE se concentran mayoritariamente en rangos de 0,30 a 0,34, frente a los 0,35 a 0,56 observados en la TSC, mientras que en las áreas comunes los valores de la TSE se sitúan predominantemente entre 0,40 y 0,47, sin alcanzar de forma recurrente los máximos cercanos a 0,50 registrados en la TSC.

Este comportamiento sugiere que el algoritmo no incrementa el acristalamiento en la TSE como mecanismo de compensación del sombreado urbano, sino que utiliza el control del WWR como una estrategia de ajuste fino del desempeño energético, particularmente relevante en una torre que concentra un mayor número de niveles y, por ende, una mayor superficie de envolvente vertical. De este modo, aun bajo condiciones de mayor sombreado, la restricción del acristalamiento en la TSE contribuye a limitar las ganancias térmicas acumuladas y a estabilizar las cargas de enfriamiento dentro del frente de Pareto.

La Tabla 48 sintetiza los estadísticos descriptivos de los genomas correspondiente a las soluciones que integran el frente de Pareto del cañón urbano. En ella se presentan, para cada variable de decisión, el rango de variación (mín–máx), así como los valores medios y medianos, lo que permite caracterizar de manera compacta y comparativa los patrones morfológicos predominantes en el conjunto de soluciones óptimas.

Tabla 48

Estadísticos descriptivos del genoma de las soluciones del frente de Pareto: Moderna

Variable del genoma	Rango (mín–máx)	Media	Mediana
Orientación TSC (OT3) [°]	-10,0 – 10,0	8,9	10,0
Orientación TSE (OT2) [°]	-9,0 – 6,0	-1,8	-2,0
Niveles TSC (PT3)	6 – 7	6,3	6,0
Niveles TSE (PT2)	7,0 – 7,0	7,0	7,0
WWR dormitorios – TSC	0,30 – 0,56	0,41	0,39
WWR dormitorios – TSE	0,30 – 0,49	0,32	0,30
WWR área común – TSC	0,30 – 0,47	0,33	0,32
WWR área común – TSE	0,39 – 0,50	0,43	0,42
WWR cuarto de servicio – TSC	0,12 – 0,30	0,25	0,26
WWR cuarto de servicio – TSE	0,16 – 0,28	0,23	0,23
WWR baño – TSC	0,14 – 0,24	0,20	0,19
WWR baño – TSE	0,11 – 0,30	0,15	0,13

4.4.2.3. Selección del escenario óptimo y del escenario crítico

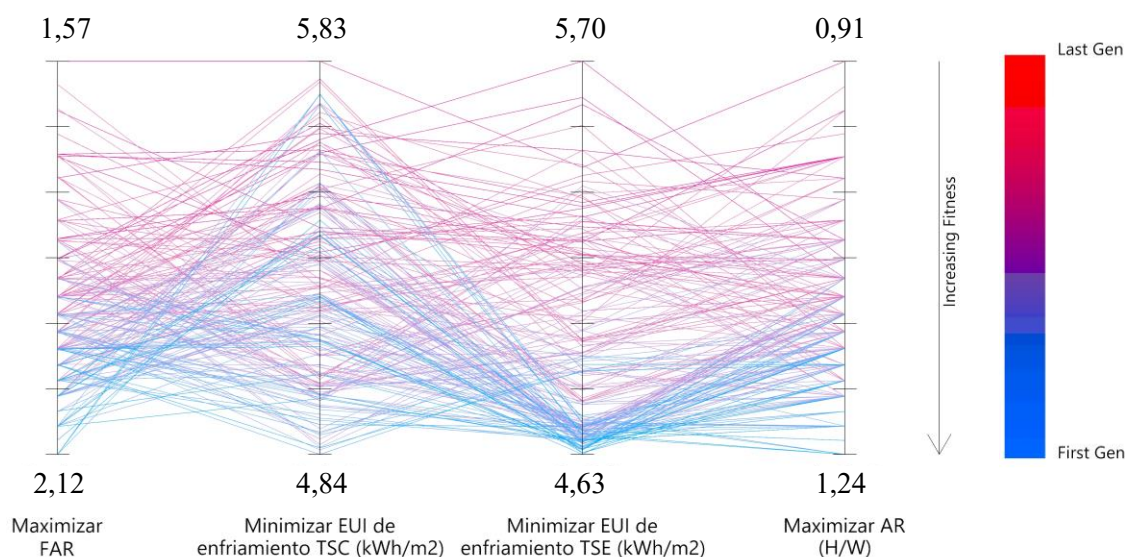
A partir del conjunto de escenarios generados durante el proceso de optimización multiobjetivo aplicado al cañón urbano Moderna, este apartado presenta la identificación del escenario óptimo y del escenario crítico, los cuales se emplean como casos de contraste para los análisis térmicos-energéticos posteriores bajo condiciones climáticas actuales y futuras. Al igual que en el caso de Lomitas, ambos escenarios se seleccionaron mediante la aplicación del método de promedio de rangos de aptitud, lo que permite evaluar configuraciones con desempeños contrastantes dentro del espacio total de soluciones explorado.

Con el fin de contextualizar esta selección, la Figura 82 muestra el gráfico de coordenadas paralelas correspondiente al conjunto completo de soluciones evaluadas para el cañón urbano Moderna. En esta representación, cada polilínea corresponde a una solución individual y el gradiente cromático indica la progresión del desempeño global de aptitud. La

distribución de las trayectorias confirma el carácter conflictivo del problema de optimización, evidenciando que las configuraciones con mayores valores de densificación tienden a asociarse con incrementos en la demanda energética por enfriamiento, mientras que las soluciones con menores consumos energéticos presentan, en general, valores morfológicos más moderados.

Figura 82

Gráfico de coordenadas paralelas de la optimización multiobjetivo de Moderna



En este contexto, la selección del escenario óptimo y del escenario crítico no responde a una lógica generacional ni a la optimización extrema de un único objetivo, sino al desempeño relativo agregado de cada solución respecto al conjunto completo de escenarios. Este criterio permite identificar, por un lado, configuraciones balanceadas que logran conciliar densificación y eficiencia energética, y por otro, combinaciones morfológicas y energéticas claramente desfavorables.

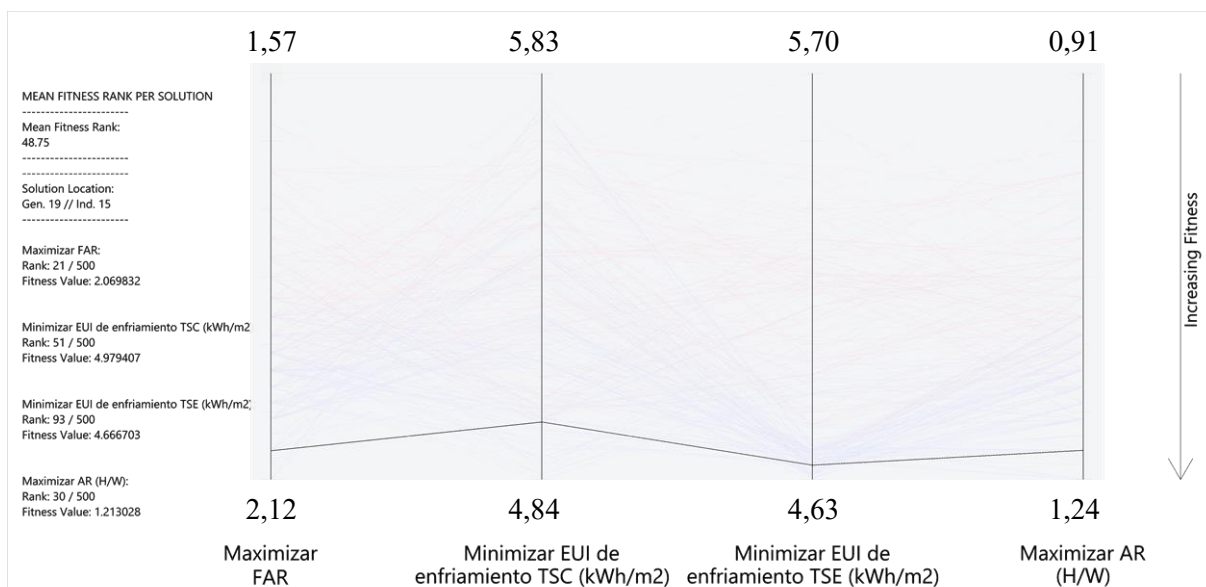
La Figura 83a presenta el escenario identificado como óptimo global para el cañón urbana Moderna, correspondiente a la solución con el menor promedio de rangos de aptitud. Aunque esta solución pertenece al frente de Pareto, su selección se debe al equilibrio alcanzado entre los objetivos morfológicos y energéticos, más que a una optimización extrema de alguno de ellos. En contraste, la Figura 83b muestra el escenario crítico, correspondiente a la solución

con el mayor promedio de rangos de aptitud, la cual no forma parte del frente de Pareto y se caracteriza por una acumulación de penalizaciones en los objetivos energéticos.

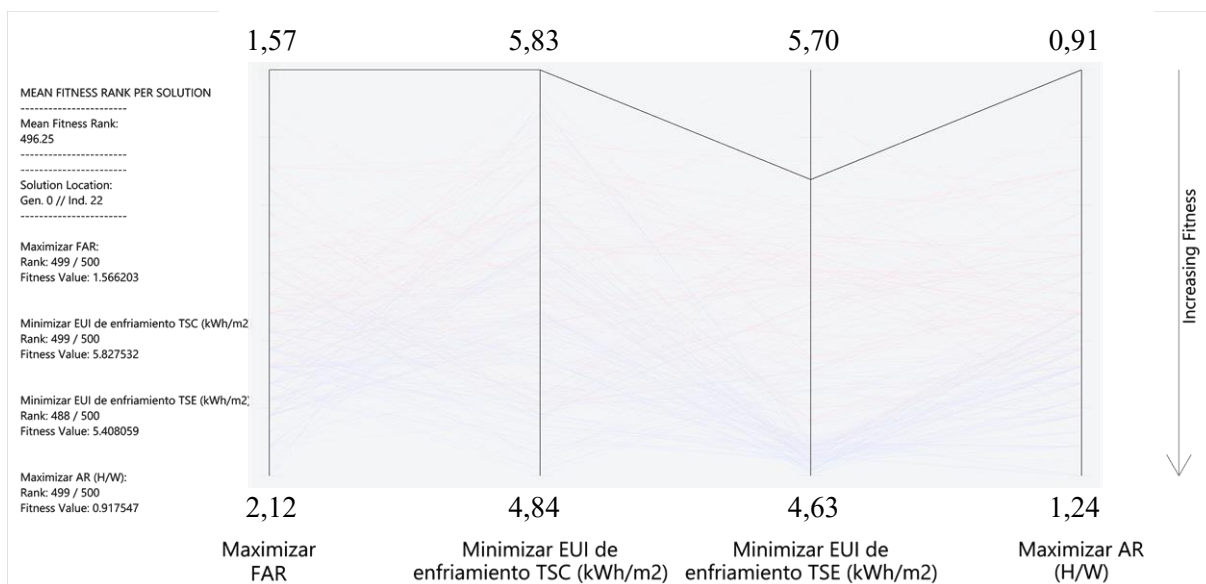
Figura 83

Identificación del escenario óptimo y crítico global de Moderna

(a) Escenario óptimo global



(b) Escenario óptimo global



La Tabla 49 presenta una comparación directa de los valores correspondientes a los objetivos de aptitud considerados en el proceso de optimización multiobjetivo. El escenario óptimo se caracteriza por presentar valores más favorables en términos de desempeño térmico-energético, particularmente un menor EUI por enfriamiento, así como combinaciones morfológicas que maximizan la eficiencia del uso del suelo conforme a los criterios establecidos. En contraste, el escenario crítico presenta configuraciones morfológicas que, si bien cumplen con las restricciones del modelo, resultan menos eficientes desde el punto de vista energético, lo que justifica su selección como un caso representativo de comportamiento desfavorable dentro del conjunto de soluciones no dominadas.

Tabla 49

Comparación de los valores de los objetivos de aptitud para los escenarios óptimo y crítico de Lomitas

Objetivo de aptitud	Sentido de optimización	Escenario óptimo	Escenario crítico
FAR	Maximizar	2,06	1,56
Relación de aspecto		1,21	0,91
EUI TSC (kWh/m ² /mes)	Minimizar	4,66	5,4
EUI TSE (kWh/m ² /mes)		4,97	5,82

Nota: El valor de EUI corresponde al mes que presenta las condiciones climáticas más cálidas del periodo analizado.

Las representaciones tridimensionales de ambos escenarios (Figura 84 y Figura 85) permiten visualizar de manera explícita las diferencias morfológicas resultantes de estas configuraciones extremas, facilitando la interpretación espacial de los resultados derivados del proceso algorítmico. Asimismo, los diagrama tipo diamante asociado a cada escenario evidencian comportamientos diferenciados: mientras que el escenario óptimo presenta un desempeño balanceado sin penalizaciones severas en ninguno de los cuatro objetivos, el escenario crítico muestra una acumulación de penalizaciones, particularmente en los objetivos energéticos. Finalmente, los genomas morfológicos correspondientes a ambos escenarios se presentan en el Apéndice J.

Figura 84

Configuración morfológica 3D del escenario óptimo del cañón urbano Moderna

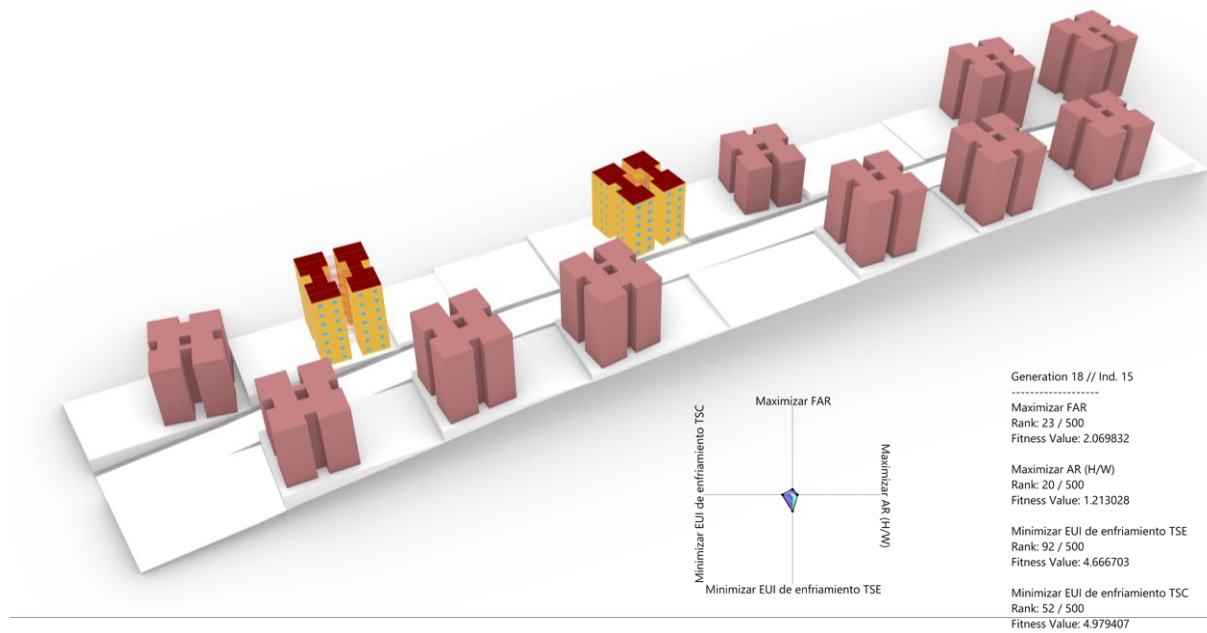
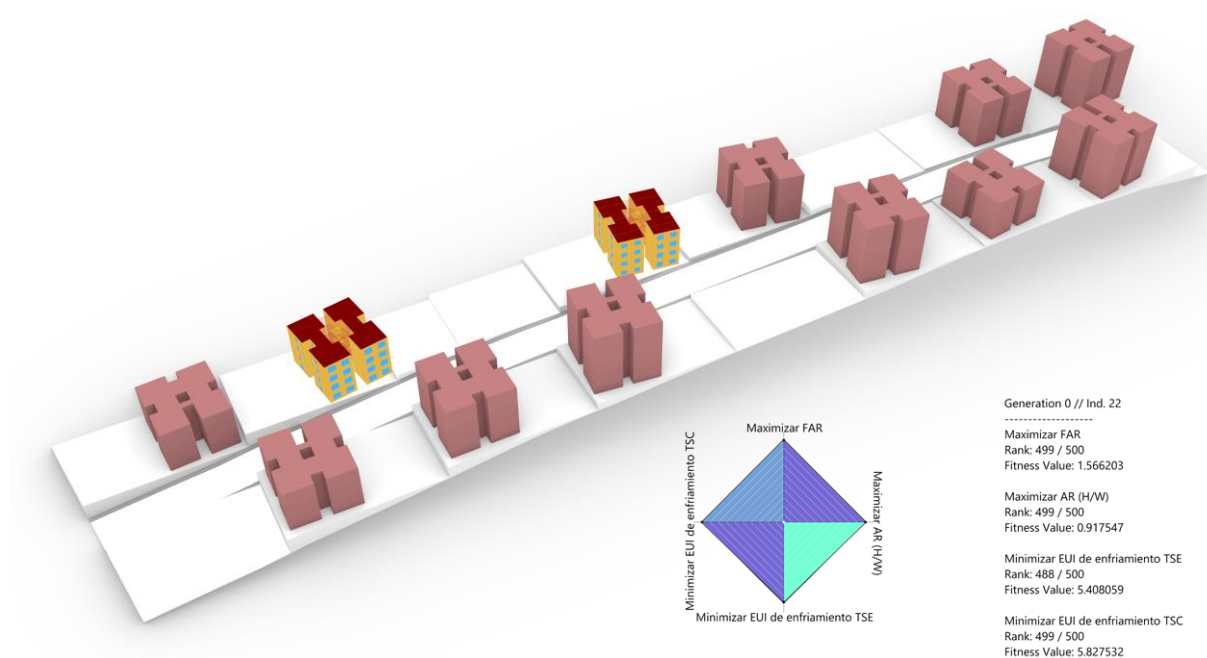


Figura 85

Configuración morfológica 3D del escenario crítico del cañón urbano Moderna



4.4.3. Análisis comparativo del proceso de optimización multiobjetivo entre Lomitas y Moderna

El análisis comparativo del proceso de optimización multiobjetivo entre los cañones urbanos de Lomitas y Moderna permite identificar cómo un mismo sistema algorítmico, basado en NSGA-II y aplicado a una tipología edificatoria equivalente, genera dinámicas evolutivas y configuraciones morfológicas diferenciadas en función del contexto urbano específico de cada caso de estudio. Esta comparación resulta especialmente relevante, dado que ambos cañones parten de una estructura morfológica de base común, pero difieren en su orientación, ancho de sección vial y parcelación, factores que condicionan la exposición solar y los procesos de intercambio térmico.

4.4.3.1. Comparación del comportamiento global del proceso de optimización

Los resultados evidencian que el comportamiento global del proceso evolutivo difiere de manera sistemática entre ambos cañones urbanos. En Lomitas, el algoritmo presenta una convergencia más temprana y una reducción progresiva de la dispersión intrapoblacional, particularmente en el objetivo energético asociado a la torre principal, lo que indica una estabilización relativamente eficiente del espacio de soluciones. En contraste, en Moderna la convergencia resulta más gradual y se acompaña de una mayor persistencia de la variabilidad, reflejando un espacio de compromisos más complejo entre densificación y desempeño térmico, como se sintetiza en la comparación de los valores iniciales y finales de los objetivos de optimización presentada en la Tabla 50.

No obstante, en ambos casos el algoritmo logra estabilizar un frente de Pareto coherente y consistente, lo que valida el proceso de optimización como una herramienta robusta para la identificación de soluciones no dominadas. En este sentido, el interés principal de la optimización no reside en la dinámica evolutiva en sí misma, sino en su capacidad para generar escenarios morfológicos representativos y comparables, que constituyen la base para los análisis térmicos-energéticos y la evaluación posterior del riesgo de pobreza energética.

Tabla 50
Comparativa del comportamiento global del proceso de optimización

Indicador	Lomitas	Lomitas	Moderna	Moderna
	Valores iniciales	Valores finales	Valores iniciales	Valores finales
FAR	1,26 – 1,55	1,50 – 1,67	1,60 – 1,95	1,85 – 2,10
Relación de aspecto (AR)	0,45 – 0,52	0,54 – 0,59	0,95 – 1,10	1,08 – 1,20
EUI enfriamiento TSC (kWh/m ² ·mes)	4,60 – 5,00	4,05 – 4,30	5,10 – 5,70	4,85 – 5,10
EUI enfriamiento TSC (kWh/mes)*	215 – 234	190 – 201	239 – 267	227 – 239
EUI enfriamiento TSE (kWh/m ² ·mes)	3,60 – 4,30	3,50 – 3,80	4,90 – 5,50	4,60 – 4,90
EUI enfriamiento TSE (kWh/mes)*	168 – 201	164 – 178	229 – 257	215 – 229
Dispersión intrageneracional final	Baja–media	Baja	Media–alta	Media
Objetivo con mayor conflicto	EUI TSE	—	EUI TSC	—

*Nota: * Conversión a kWh/mes considerando una superficie habitable de 46,8 m² y el mes de agosto como periodo de máxima carga de enfriamiento.*

4.4.3.2. Comparación morfológica de las soluciones óptimas

Más allá de las diferencias observadas en la dinámica evolutiva del algoritmo, resulta relevante analizar cómo estas se traducen en configuraciones morfológicas concretas dentro del frente de Pareto y cómo dichas configuraciones condicionan el desempeño energético de los escenarios seleccionados. Para ello, se compararon los estadísticos descriptivos del genoma de las soluciones no dominadas correspondientes a ambos cañones urbanos, considerando variables estructurales (orientación y altura) y variables de ajuste fino (relación vano–macizo). La Tabla 51 sintetiza esta comparación mediante la mediana y el rango, permitiendo identificar diferencias sistemáticas en el comportamiento morfológico del conjunto óptimo.

Las diferencias observadas entre Lomitas y Moderna responden principalmente a la interacción entre la geometría específica del cañón urbano y las condiciones climáticas del contexto mediterráneo semiárido, caracterizado por una elevada carga radiativa. En Lomitas, la mayor apertura del cañón y un ancho de calle relativamente mayor otorgan a la orientación un papel estructural en el control de la exposición solar, lo que explica la concentración de esta variable dentro del frente de Pareto y una mayor flexibilidad simultánea en la altura y el

acristalamiento. Esta configuración permite conciliar incrementos moderados de densificación con reducciones del consumo energético sin recurrir a restricciones severas del WWR.

Tabla 51

Comparación de los estadísticos descriptivos de los genomas de las soluciones del frente de Pareto

Variable del genoma	Lomitas – Mediana (Rango)	Moderna – Mediana (Rango)	Tendencia comparativa
Orientación TSC [°]	–9,6 (–10 – –8)	10 (–10 – 10)	Mayor estabilización angular en Lomitas
Orientación TSE [°]	–5,8 (–6 – –4)	–2 (–9 – 6)	Mayor dispersión en Moderna
Niveles TSC (PT3)	7 (6 – 7)	6 (6 – 7)	Altura similar con ligera reducción en Moderna
Niveles TSE (PT2)	5 (4 – 7)	7 (7 – 7)	Estabilización estructural en Moderna
WWR dormitorios – TSC	0,37 (0,31 – 0,45)	0,39 (0,30 – 0,56)	Mayor flexibilidad en Moderna
WWR dormitorios – TSE	0,36 (0,30 – 0,44)	0,30 (0,30 – 0,49)	Restricción más clara en Moderna
WWR área común – TSC	0,45 (0,33 – 0,47)	0,32 (0,30 – 0,47)	Mayor apertura en Lomitas
WWR área común – TSE	0,42 (0,39 – 0,47)	0,42 (0,39 – 0,50)	Comportamiento similar
WWR servicio – TSC	0,18 (0,15 – 0,28)	0,26 (0,12 – 0,30)	Mayor restricción en Lomitas
WWR servicio – TSE	0,16 (0,15 – 0,23)	0,23 (0,16 – 0,28)	Mayor flexibilidad en Moderna
WWR baño – TSC	0,19 (0,16 – 0,24)	0,19 (0,14 – 0,24)	Comportamiento equivalente
WWR baño – TSE	0,20 (0,17 – 0,23)	0,13 (0,11 – 0,30)	Restricción más marcada en Moderna

En contraste, en Moderna, caracterizado por una mayor compacidad y una relación altura–ancho más elevada, el impacto de la orientación sobre el balance radiativo se atenúa debido al predominio del sombreado urbano. En este contexto, el proceso de optimización tiende a estabilizar tempranamente variables estructurales, como la altura de la TSE, y a utilizar el control del WWR como principal mecanismo de ajuste energético fino para limitar las ganancias térmicas, lo que se traduce en configuraciones más rígidas dentro del frente de Pareto. En síntesis, la comparación morfológica de las soluciones óptimas evidencia que la influencia de las variables urbano-arquitectónicas sobre el consumo energético es altamente dependiente del contexto geométrico del cañón urbano.

4.5. Evaluación térmico-energética de los escenarios

En este apartado se evalúa el desempeño térmico-energético de los escenarios morfológicos seleccionados (óptimo y crítico) derivados del proceso de optimización multiobjetivo, con el fin de analizar cómo las configuraciones urbano-arquitectónicas influyen en el consumo energético y en el gasto económico asociado a la climatización de las edificaciones. La evaluación se realiza para las dos unidades de análisis consideradas (Lomitas y Moderna), así como para las dos torres representativas (TSC y TSE), bajo condiciones climáticas actuales y bajo un escenario prospectivo de cambio climático hacia 2050 (escenario crítico A2 del IPCC).

Los resultados se expresan en términos de EUI anual desagregada por uso final, consumo energético total y gasto económico estimado conforme al esquema tarifario doméstico vigente de la Comisión Federal de Electricidad (véase Anexo A). Este análisis permite establecer una relación directa entre la morfología urbana optimizada, el desempeño energético resultante y sus implicaciones económicas, sentando la base cuantitativa para la evaluación posterior del riesgo de pobreza energética.

4.5.1. *Desempeño térmico-energético bajo condiciones climáticas actuales*

La Figura 86 presenta el balance energético mensual del cañón urbano Lomitas para las torres representativas bajo los escenarios óptimo y crítico. En conjunto, los resultados evidencian una marcada estacionalidad, con los mayores requerimientos energéticos concentrados durante el periodo cálido, particularmente entre los meses de junio y septiembre, cuando las cargas de enfriamiento dominan el balance energético mensual.

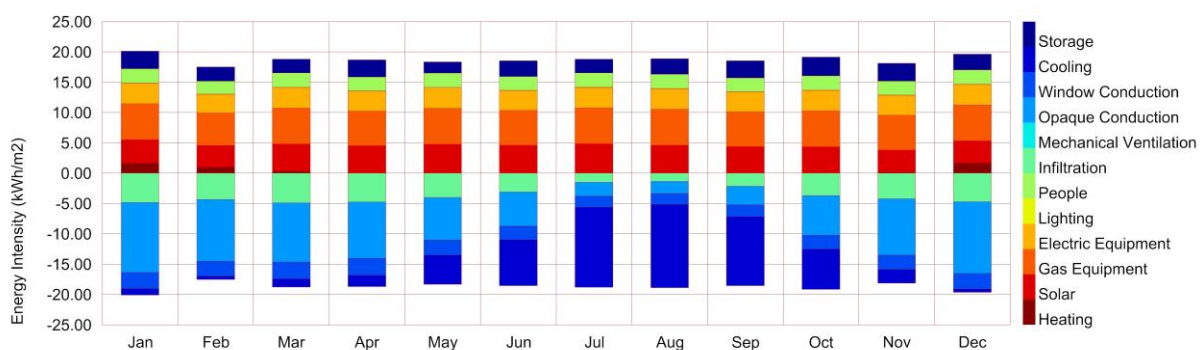
Al comparar ambos escenarios, se observa que las configuraciones óptimas reducen de manera consistente la magnitud de las cargas de enfriamiento respecto al escenario crítico, especialmente en la torre TSC, donde las diferencias entre escenarios se acentúan durante los meses de verano (Figura 86a-b). En contraste, la torre TSE presenta un comportamiento más estable a lo largo del año, con variaciones estacionales más moderadas (Figura 86c-d). En ambos casos, las cargas internas asociadas a equipos e iluminación permanecen prácticamente constantes, lo que confirma que las diferencias observadas en el consumo energético están

dominadas por la modulación de las cargas térmicas de acondicionamiento y no por variaciones en los patrones de uso interno.

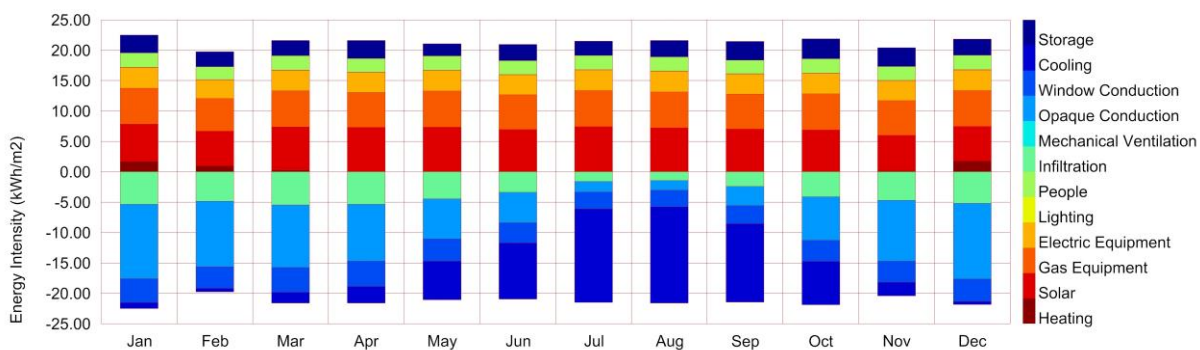
Figura 86

Balance energético mensual: cañón urbano Lomitas

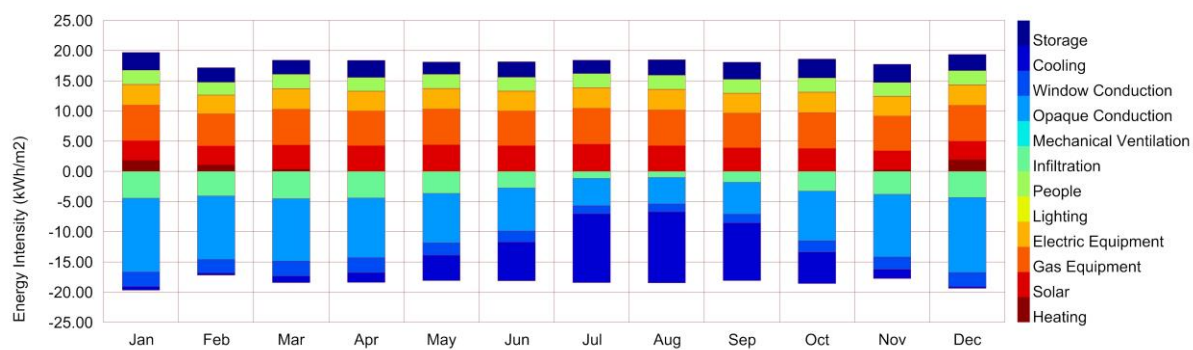
(a) TSC escenario óptimo



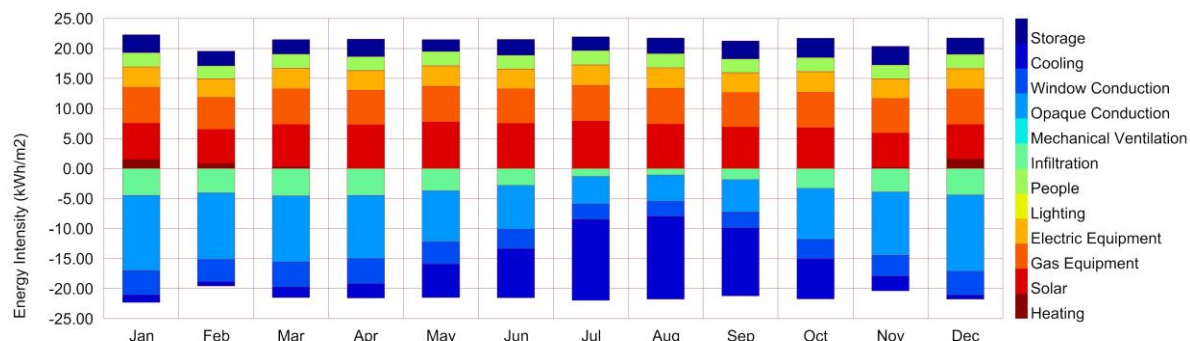
(b) TSC escenario crítico



(c) TSE escenario óptimo



(d) TSE escenario crítico



La Figura 87 presenta el balance energético mensual del cañón urbano Moderna para las torres representativas bajo los escenarios óptimo y crítico. En comparación con Lomitas, los resultados muestran cargas de enfriamiento de mayor magnitud, particularmente durante el periodo cálido, lo que indica un requerimiento energético más elevado asociado al acondicionamiento térmico. Esta condición es especialmente evidente en el escenario crítico, donde se observa un incremento sostenido de las cargas de enfriamiento tanto en la TSC (Figura 87b) como en la TSE (Figura 87d), reflejando una mayor demanda energética bajo configuraciones morfológicas menos favorables.

Si bien las configuraciones óptimas permiten atenuar parcialmente las cargas de enfriamiento en Moderna, la reducción relativa es menos pronunciada que la observada en Lomitas. Este comportamiento sugiere que, en este cañón urbano, las estrategias morfológicas optimizadas presentan una capacidad limitada para compensar las condiciones térmicas de base, resultando en consumos de enfriamiento globalmente más elevados. De manera consistente, las cargas internas se mantienen prácticamente constantes entre escenarios y a lo largo del año, reafirmando el papel dominante del acondicionamiento térmico en el desempeño energético observado.

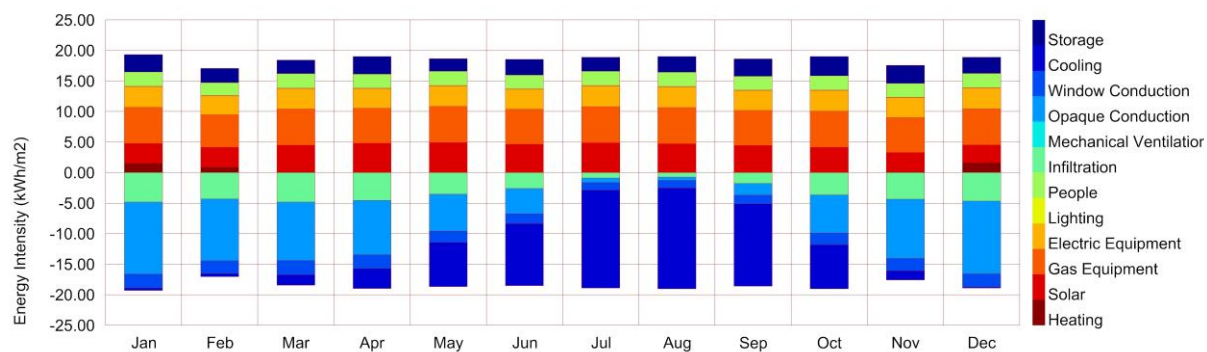
En la Tabla 52 presenta una síntesis del consumo eléctrico promedio y del costo anual estimado para un condominio tipo representativo de cada torre del cañón urbano Lomitas. Estos valores se obtuvieron a partir del desempeño térmico-energético simulado de la torre completa, expresado por metro cuadrado y posteriormente normalizado según la superficie de una unidad habitacional. El análisis se centra en el consumo eléctrico promedio mensual, su media anual y

el costo económico asociado, por ser variables que inciden directamente en la estimación del riesgo de pobreza energética.

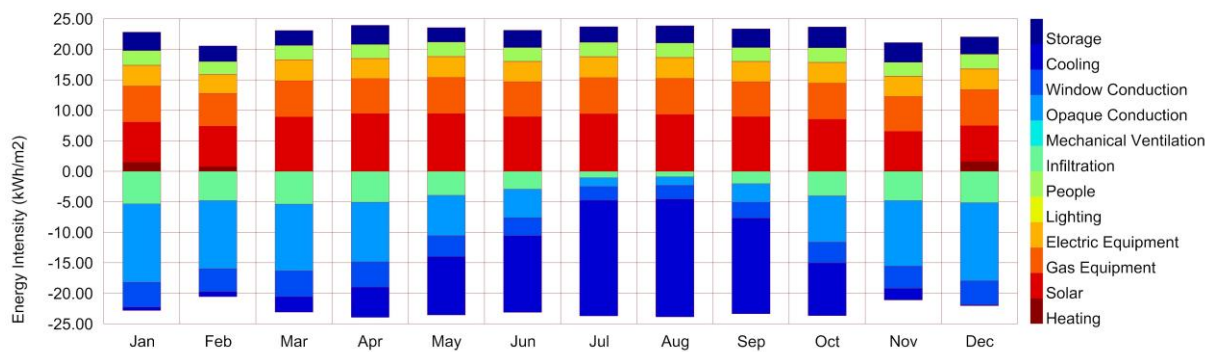
Figura 87

Balance energético mensual: cañón urbano Moderna

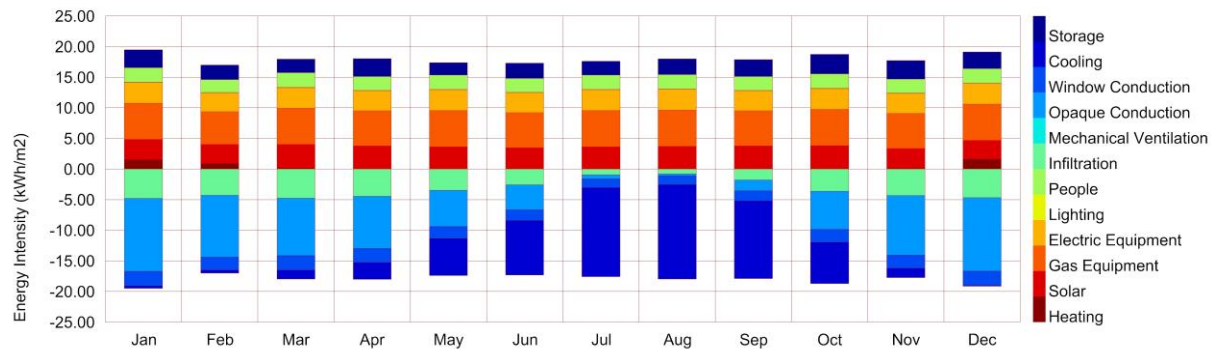
(a) TSC escenario óptimo



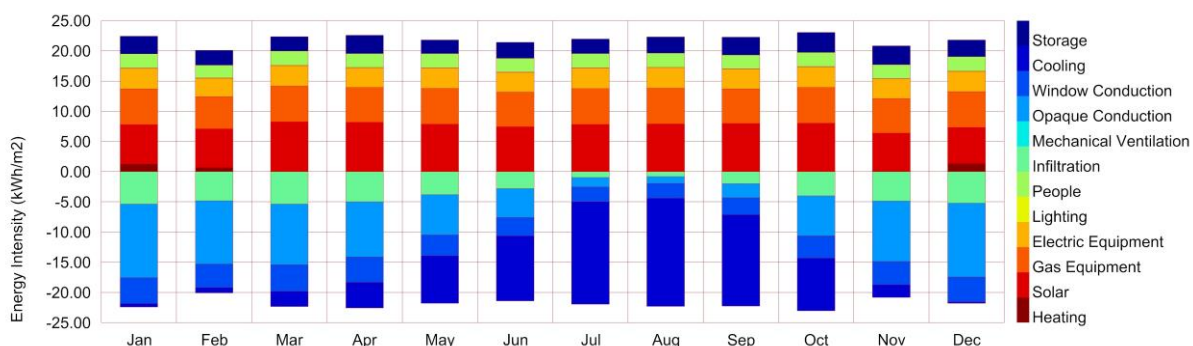
(b) TSC escenario crítico



(c) TSE escenario óptimo



(d) TSE escenario crítico



En el caso de la TSC, el escenario óptimo presenta un consumo promedio mensual de 241 kWh, mientras que el escenario crítico incrementa este valor a 253 kWh, superando el umbral anual que conduce a la transición a la tarifa doméstica de alto consumo (DAC). Este cambio tarifario se traduce en un incremento abrupto del costo anual, que pasa de 8,176 MXN en el escenario óptimo a 24,797 MXN en el escenario crítico, es decir, un aumento superior al 200 %, pese a que el incremento en el consumo energético es relativamente moderado.

Tabla 52

Consumo eléctrico mensual promedio y costo anual estimado por condominio tipo de los escenarios óptimos y críticos del cañón urbano Lomitas

Indicador	TSC-EO ¹	TSC-EC ²	TSE-EO ³	TSE-EC ⁴
kWh/año torre	80,920	48,624	43,904	82,152
kWh/año condominio	2,890	3,039	2,744	2,934
kWh/mes por condominio				
Enero	199,80	199,32	195,75	200,97
Febrero	167,94	167,53	166,02	169,13
Marzo	186,07	190,36	182,39	190,58
Abril	183,21	195,08	180,10	190,60
Mayo	230,08	251,49	220,84	240,87
Junio	263,69	287,24	247,48	271,72
Julio	348,32	378,89	322,36	352,35
Agosto	355,48	385,35	328,30	356,90
Septiembre	317,52	338,46	291,01	316,90
Octubre	254,97	262,35	235,17	255,95
Noviembre	190,57	190,21	181,54	193,61
Diciembre	192,70	192,77	192,97	194,41
kWh/anual por uso final				
Refrigeración	920,49	1068,41	763,21	967,36
Calentamiento	67,60	68,39	78,47	64,36
Equipo	1,858,73	1,858,73	1,858,73	1,858,73
Iluminación	43,52	43,52	43,52	43,52
Media (kWh/mes)	241	253	229	244
Costo anual (MXN)	8,176	24,797	7,564	8,357

Nota: ¹ TSC en el escenario óptimo, ² TSC en el escenario crítico, ³ TSE en el escenario óptimo, ⁴ TSE en el escenario crítico. Los costos anuales se estiman con base en el esquema tarifario doméstico de la CFE vigente, considerando el umbral anual de 250 kWh/mes para la transición a la tarifa DAC (véase Anexo A).

En la TSE, si bien se observan incrementos de consumo entre el escenario óptimo y el crítico, estos no alcanzan el umbral de transición a la tarifa DAC, manteniendo costos anuales relativamente estables (7,564–8,357 MXN). Este comportamiento confirma que las tipologías con mayor propensión al sobrecalentamiento resultan particularmente críticas en contextos de vulnerabilidad térmica, al amplificar el impacto económico del consumo energético bajo configuraciones morfológicas desfavorables.

Con el fin de profundizar en el origen de los consumos energéticos observados, las Figura 88a y 89b presentan la desagregación mensual del consumo eléctrico de refrigeración y calentamiento para las torres TSC y TSE bajo los escenarios óptimo y crítico de Lomitas.

De acuerdo con la Figura 88a, el consumo eléctrico de la torre TSC muestra una dominancia clara de las cargas de enfriamiento durante el verano, particularmente bajo el escenario crítico. Esta condición se asocia a una mayor acumulación de calor en la edificación, derivada de configuraciones morfológicas menos favorables que intensifican las ganancias térmicas. En contraste, el escenario óptimo presenta consumos menores en este periodo, reflejando una mayor capacidad de atenuación del sobrecalentamiento. Durante el invierno, los consumos asociados a refrigeración y calentamiento tienden a converger entre ambos escenarios, debido a la baja demanda térmica del sitio y a una menor sensibilidad del consumo energético frente a la morfología urbana. Por el contrario, durante el verano el sistema energético entra en un régimen controlado por las cargas de enfriamiento, altamente sensibles a la exposición solar, la capacidad de disipación del calor y la configuración urbano-arquitectónica.

En síntesis, los escenarios óptimos tienden a presentar mayores consumos eléctricos en invierno y menores en verano, mientras que los escenarios críticos concentran los consumos más elevados durante el periodo cálido y reducciones relativas en invierno, evidenciando la influencia de la morfología urbana en la modulación estacional del desempeño térmico-energético de la torre TSC.

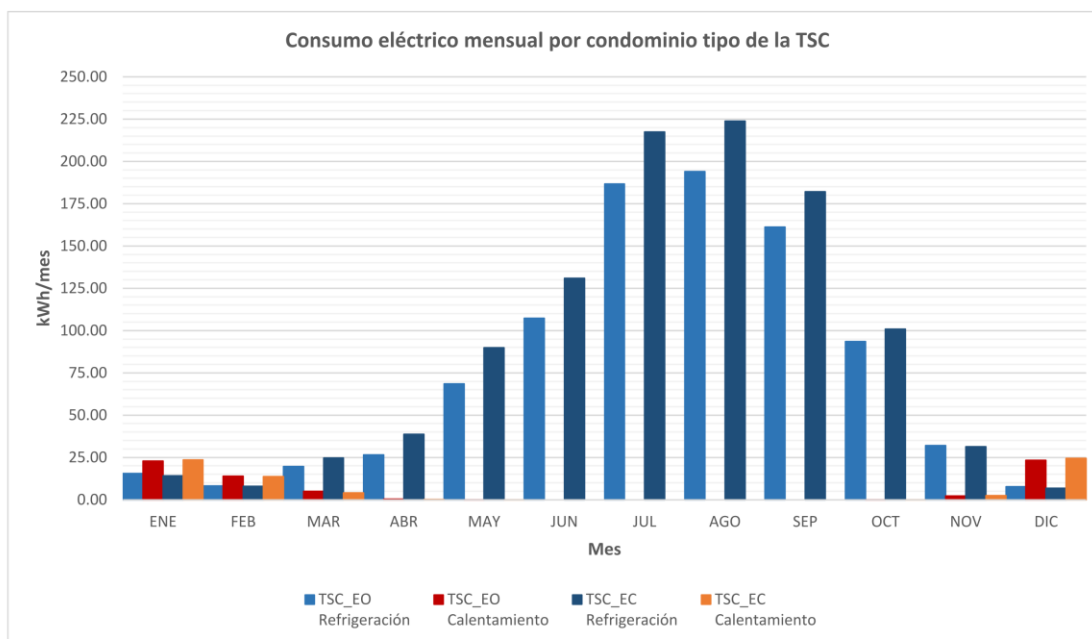
En el caso de la TSE (ver Figura 88b), la mayor proporción de sombras se traduce en menores consumos por refrigeración y una mayor contribución relativa del calentamiento, aunque el patrón estacional general es similar al observado en la TSC. En conjunto, los resultados confirman que la morfología urbano-arquitectónica desempeña un papel determinante en la modulación estacional del consumo eléctrico, y que las configuraciones

óptimas permiten reducir la intensidad del sobrecalentamiento, aunque sin eliminarlo completamente en contextos de densificación urbana.

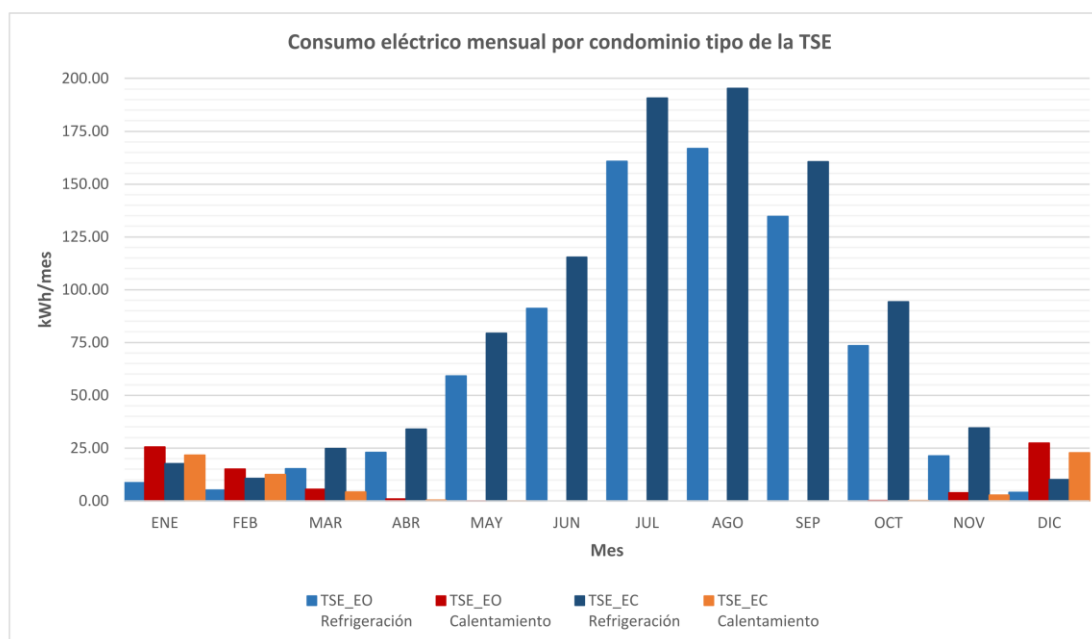
Figura 88

Consumo eléctrico mensual por condominio tipo de la TSC y TSE de Lomitas

(a) Consumo eléctrico mensual por condominio tipo de la TSC



(b) Consumo eléctrico mensual por condominio tipo de la TSE



La Tabla 53 sintetiza el consumo energético anual y el costo económico estimado para un condominio tipo representativo del cañón urbano Moderna, considerando las torres representativas evaluadas bajo los escenarios óptimo y crítico. A diferencia de lo observado en el cañón urbano Lomitas, los resultados evidencian consumos energéticos mensuales promedio persistentemente elevados en todos los escenarios analizados, superando en la mayoría de los casos el umbral de 250 kWh/mes, lo que sugiere un mayor nivel de presión energética sobre los hogares.

En particular, la TSC en el escenario óptimo registra un consumo medio de 256 kWh/mes, mientras que en el escenario crítico este valor se incrementa a 276 kWh/mes, consolidando la transición a la tarifa DAC en ambos casos. Como consecuencia, el costo anual asociado alcanza 24,988 MXN en el escenario óptimo y 26,656 MXN en el escenario crítico, evidenciando que, en este sector, incluso las configuraciones morfológicas optimizadas no logran evitar el régimen tarifario de alto consumo.

Un comportamiento similar se observa en la TSE, donde el consumo medio mensual asciende a 248 kWh/mes en el escenario óptimo (muy cercano al umbral DAC) y se incrementa a 266 kWh/mes en el escenario crítico, con un costo anual que pasa de 8,519 MXN a 25,864 MXN. Este incremento pone de manifiesto la alta sensibilidad económica del sistema tarifario ante variaciones relativamente acotadas en el consumo energético.

El análisis mensual revela que los mayores consumos se concentran de manera sistemática durante el periodo cálido, particularmente entre junio y septiembre, cuando los valores por condominio alcanzan máximos del orden de 429–434 kWh/mes en la TSC del escenario crítico y 401–415 kWh/mes en la TSE. Estas diferencias están dominadas por el incremento en la demanda de refrigeración, que alcanza valores anuales de hasta 1,352 kWh en la TSC y 1,244 kWh en la TSE bajo el escenario crítico. Al igual que en Lomitas, las cargas internas asociadas a equipos e iluminación permanecen constantes entre escenarios, con consumos anuales de 1,859 kWh y 44 kWh, respectivamente. Esto confirma que las variaciones observadas en el consumo total y en el costo económico están determinadas principalmente por la demanda de acondicionamiento térmico y no por diferencias en los patrones de uso interno.

Tabla 53

Consumo eléctrico mensual promedio y costo anual estimado por condominio tipo de los escenarios óptimos y críticos del cañón urbano Moderna

Indicador	TSC-EO¹	TSC-EC²	TSE-EO³	TSE-EC⁴
kWh/año torre	73,608	52,976	83,216	51,120
kWh/año condominio	3,067	3,311	2,972	3,195
kWh/mes por condominio				
Enero	188,36	189,37	189,06	187,84
Febrero	165,91	168,32	165,92	168,38
Marzo	187,59	198,59	184,42	198,83
Abril	202,51	226,17	195,44	216,22
Mayo	264,15	297,14	247,28	272,69
Junio	300,37	334,21	282,12	308,70
Julio	388,29	429,52	367,51	401,78
Agosto	394,69	434,33	379,99	414,69
Septiembre	346,95	378,53	336,37	370,40
Octubre	263,12	283,43	257,68	284,79
Noviembre	179,34	185,26	179,83	187,56
Diciembre	186,16	186,01	186,39	183,46
kWh/anual por uso final				
Refrigeración	1,105,24	1,351,68	1,008,97	1,244,07
Calentamiento	59,94	56,94	60,79	49,03
Equipo	1,858,73	1,858,73	1,858,73	1,858,73
Iluminación	43,52	43,52	43,52	43,52
Media (kWh/mes)	256	276	248	266
Costo anual (MXN)	24,988	26,656	8,519	25,864

Nota: ¹ TSC en el escenario óptimo, ² TSC en el escenario crítico, ³ TSE en el escenario óptimo, ⁴ TSE en el escenario crítico.

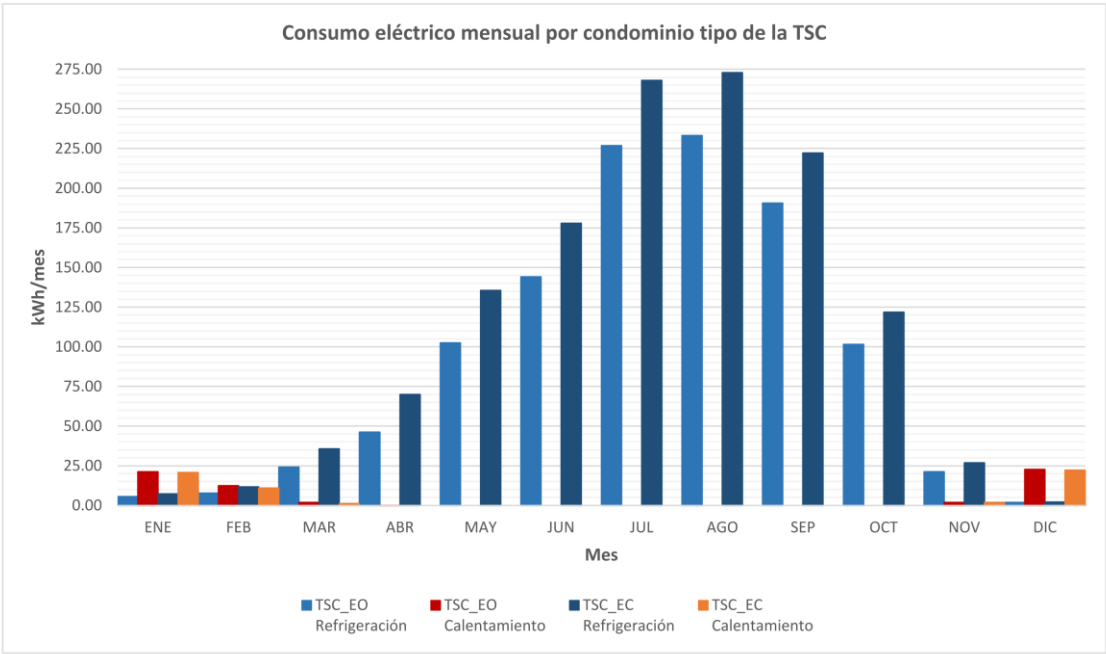
Los costos anuales se estiman con base en el esquema tarifario doméstico de la CFE vigente, considerando el umbral anual de 250 kWh/mes para la transición a la tarifa DAC (véase Anexo A).

Con el fin de contrastar el comportamiento térmico-energético del cañón urbano Moderna respecto a Lomitas, las Figura 89a y 89b presentan el consumo eléctrico mensual desagregado por refrigeración y calentamiento para las torres TSC y TSE bajos los escenarios óptimo y crítico. En comparación con lo observado en Lomitas (Figura 88), los resultados de Moderna evidencian un patrón de consumo más intensivo y persistente durante el periodo cálido, con una mayor separación entre escenarios y una dominancia más marcada de las cargas de enfriamiento. Como se identificó en el análisis microclimático, Moderna presenta temperaturas de bulbo seco superiores a las registradas en Lomitas, condición que se traduce en mayores ganancias térmicas y, por ende, en una mayor demanda de refrigeración. En contraste, durante el periodo invernal se observan menores consumos eléctricos por calentamiento, lo que

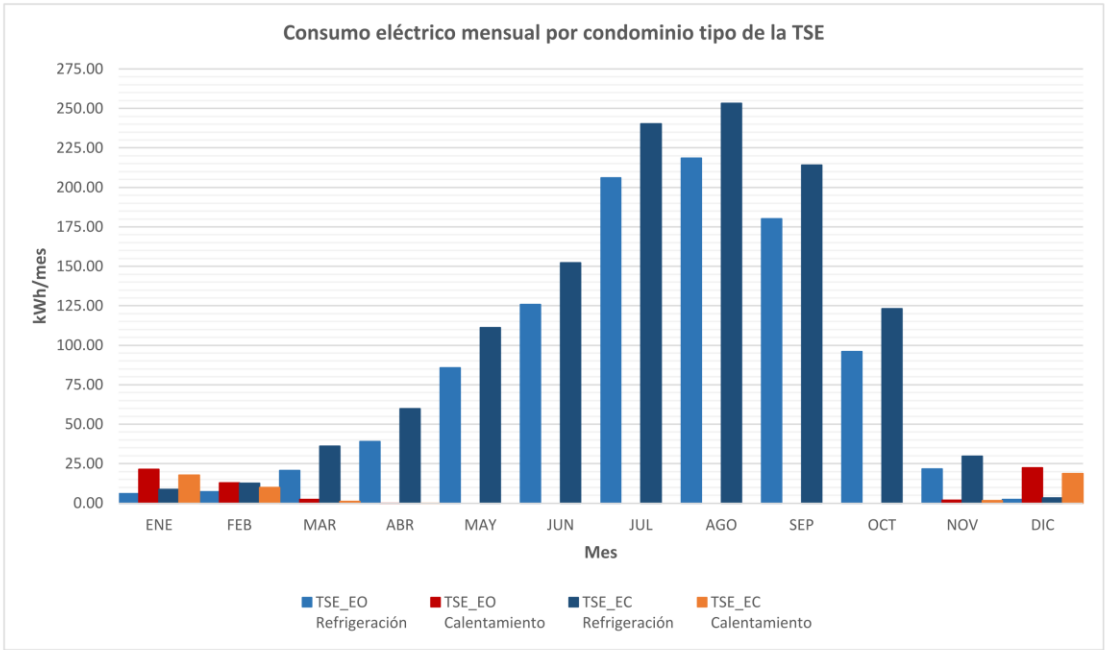
puede asociarse a una mayor exposición de la envolvente edificatoria a la radiación solar, favorecida por la configuración y zonificación del cañón urbano.

Figura 89
Consumo eléctrico mensual por condominio tipo de la TSC y TSE de Moderna

(a) Consumo eléctrico mensual por condominio tipo de la TSC



(b) Consumo eléctrico mensual por condominio tipo de la TSE



En el caso de la torre TSC, el escenario crítico presenta valores significativamente más elevados de consumo por refrigeración durante los meses de verano, reflejando una mayor acumulación de calor y una menor capacidad de atenuación pasiva respecto a Lomitas. Un comportamiento similar se observa en la torre TSE, donde, si bien la presencia de mayores áreas sombreadas contribuye a moderar parcialmente las cargas de enfriamiento, los consumos energéticos asociados a la refrigeración continúan siendo elevados en ambos escenarios. En comparación con Lomitas, la TSE de Moderna presenta una menor capacidad de amortiguamiento estacional, lo que se traduce en consumos sostenidos durante todo el periodo cálido y en una reducción menos pronunciada de las diferencias entre los escenarios óptimo y crítico.

En conjunto, la comparación entre ambos cañones urbanos confirma que, mientras en Lomitas la morfología optimizada permite atenuar de forma más clara el sobrecalentamiento estival, en Moderna las condiciones microclimáticas y urbanas amplifican la demanda de refrigeración, reduciendo el margen de mejora alcanzable mediante la optimización morfológica. Este comportamiento explica los mayores niveles de consumo eléctrico y la persistencia del régimen tarifario de alto consumo observados en Moderna, aun bajo configuraciones formalmente óptimas.

4.5.2. Impacto del cambio climático en el desempeño térmico-energético (2050)

Bajo condiciones climáticas prospectivas hacia 2050, los resultados evidencian una intensificación generalizada del requerimiento de enfriamiento y una reducción consistente de las cargas de calentamiento, desplazando el balance térmico anual hacia una clara dominancia del periodo cálido. En relación con las condiciones climáticas actuales, este escenario se caracteriza por incrementos sistemáticos del consumo por enfriamiento, una contracción del calentamiento a valores residuales y una mayor frecuencia de superación del umbral tarifario, lo que refleja un agravamiento progresivo del desempeño térmico-energético bajo cambio climático, tanto en los escenarios óptimos como críticos y en ambas torres representativas

En el caso del cañón urbano Lomitas, los consumos anuales por refrigeración aumentan en todos los escenarios respecto a las condiciones climáticas actuales, alcanzando valores de 1,224,08 kWh/año en la TSC-EO, 1,369,55 kWh/año en la TSC-EC, 1,025,56 kWh/año en la

TSE-EO y 1,247,15 kWh/año en la TSE-EC (Tabla 54). En contraste, las cargas anuales por calentamiento se reducen de forma notable, situándose en rangos del orden de 40–44 kWh/año, lo que confirma la pérdida de peso relativo del periodo frío en el desempeño térmico-energético del conjunto habitacional.

A escala mensual, la estacionalidad del consumo se concentra con mayor claridad entre los meses de junio y septiembre, cuando el enfriamiento domina el balance energético. En agosto se registran máximos de 418,49 kWh/mes en la TSC-EO y 447,48 kWh/mes en la TSC-EC, mientras que en julio los consumos alcanzan 403,61 kWh/mes y 430,93 kWh/mes, respectivamente. Este patrón evidencia que, bajo clima futuro, los meses cálidos incrementan su contribución al consumo anual y amplifican las diferencias entre configuraciones morfológicas.

Tabla 54

Consumo eléctrico mensual promedio y costo anual estimado por condominio tipo es los escenarios óptimos y críticos del cañón urbano Lomitas bajo condiciones climáticas prospectivas (2050)

Indicador	TSC-EO ¹	TSC-EC ²	TSE-EO ³	TSE-EC ⁴
kWh/año torre	88,760	53,056	47,648	89,348
kWh/año condominio	3,170	3,316	2,978	3,191
kWh/mes por condominio				
Enero	190,96	190,55	188,31	192,50
Febrero	167,49	168,36	164,45	169,90
Marzo	193,06	199,42	187,97	199,32
Abril	218,75	237,23	210,67	228,43
Mayo	256,17	275,81	242,02	263,95
Junio	291,26	309,26	269,14	292,82
Julio	403,61	430,93	370,83	401,12
Agosto	418,49	447,48	384,02	414,08
Septiembre	355,22	374,61	324,63	351,37
Octubre	288,58	296,84	263,71	286,17
Noviembre	198,66	198,90	188,05	201,13
Diciembre	187,45	186,59	184,48	189,72
kWh/anual por uso final				
Refrigeración	1,224,08	1,369,55	1,025,56	1,247,15
Calentamiento	43,37	44,16	40,48	41,10
Equipo	1,858,73	1,858,73	1,858,73	1,858,73
Iluminación	46,52	43,52	43,52	43,52
Media (kWh/mes)	264	276	248	266
Costo anual (MXN)	25,680	26,682	8,545	25,836

Nota: ¹ TSC en el escenario óptimo, ² TSC en el escenario crítico, ³ TSE en el escenario óptimo, ⁴ TSE en el escenario crítico.

Los costos anuales se estiman con base en el esquema tarifario doméstico de la CFE vigente, considerando el umbral anual de 250 kWh/mes para la transición a la tarifa DAC (véase Anexo A).

Desde una perspectiva económica, el impacto del cambio climático se vuelve especialmente sensible al esquema tarifario. En Lomitas, la TSC en escenario crítico presenta una media mensual de 276 kWh/mes, superando el umbral de 250 kWh/mes asociado a la transición hacia la tarifa doméstica de alto consumo (DAC). Como consecuencia, el costo anual estimado se incrementa de forma sustancial, alcanzando \$26,682 MXN en la TSC-EC y \$25,836 MXN en la TSE-EC. En contraste, las configuraciones que permanecen por debajo o cercanas al umbral, como la TSE-EO con 248 kWh/mes, presentan costos anuales considerablemente menores, del orden de \$8,545 MXN.

En el cañón urbano Moderna, el escenario prospectivo hacia 2050 confirma una escalada aún más marcada del consumo por enfriamiento, con valores anuales de 1,235,17 kWh/año en la TSC-EO, 1,466,25 kWh/año en la TSC-EC, 1,155,00 kWh/año en la TSE-EO y 1,383,46 kWh/año en la TSE-EC (Tabla 55). De manera paralela, las cargas de calentamiento se reducen a valores residuales comprendidos entre 34,28 y 42,14 kWh/año, reforzando la dominancia del enfriamiento en el balance energético anual.

Los consumos mensuales máximos en Moderna se concentran igualmente en verano, con valores particularmente elevados. En agosto se alcanzan 424,37 kWh/mes en la TSC-EO y 461,89 kWh/mes en la TSC-EC, mientras que en julio se registran 401,36 kWh/mes y 436,28 kWh/mes, respectivamente. Este comportamiento confirma que el clima futuro amplifica de forma consistente la carga estival y que el escenario crítico produce sistemáticamente los mayores consumos en ambas torres representativas.

Adiferencia de Lomitas, en Moderna los valores medios mensuales se mantienen mayoritariamente por encima del umbral de 250 kWh/mes incluso en los escenarios óptimos, con promedios de 265 kWh/mes (TSC-EO), 284 kWh/mes (TSC-EC), 258 kWh/mes (TSE-EO) y 277 kWh/mes (TSE-EC). En consecuencia, el costo anual estimado se ubica en rangos elevados y relativamente homogéneos, entre \$25,199 y \$27,322 MXN/año, comportamiento coherente con la aplicación del esquema tarifario DAC cuando el consumo promedio supera el umbral de referencia.

En conjunto, los resultados prospectivos hacia 2050 confirman que el cambio climático intensifica de manera significativa la demanda de enfriamiento, reduce el peso del calentamiento a valores marginales y amplifica la exposición económica asociada al consumo energético

residencial. Si bien las configuraciones óptimas continúan mostrando un mejor desempeño relativo que los escenarios críticos, su capacidad de atenuación se ve parcialmente limitada bajo condiciones climáticas futuras, particularmente en contextos urbanos con consumos estructuralmente elevados.

Tabla 55

Consumo eléctrico mensual promedio y costo anual estimado por condominio tipo es los escenarios óptimos y críticos del cañón urbano Moderna bajo condiciones climáticas prospectivas (2050)

Indicador	TSC-EO	TSC-EC	TSE-EO	TSE-EC
kWh/año torre	76,296	54,528	86,772	53,120
kWh/año condominio	3,179	3,408	3,099	3,320
kWh/mes por condominio				
Enero	184,92	185,43	185,37	183,96
Febrero	162,79	166,41	162,54	167,10
Marzo	195,61	210,01	191,67	210,46
Abril	232,94	260,97	223,98	250,07
Mayo	265,00	292,15	253,09	275,19
Junio	298,71	325,32	285,30	307,28
Julio	401,36	436,28	386,31	416,40
Agosto	424,37	461,89	410,62	444,63
Septiembre	360,73	389,23	351,95	382,72
Octubre	287,61	307,62	282,53	307,38
Noviembre	185,54	192,64	185,86	195,30
Diciembre	179,61	180,41	180,17	179,48
kWh/anual por uso final				
Refrigeración	1,235,17	1,466,25	1,155,00	1,383,46
Calentamiento	41,79	39,85	42,14	34,28
Equipo	1,858,73	1,858,73	1,858,73	1,858,73
Iluminación	43,52	43,52	43,52	43,52
Media (kWh/mes)	265	284	258	277
Costo anual (MXN)	25,747	27,322	25,199	26,717

Nota: ¹ TSC en el escenario óptimo, ² TSC en el escenario crítico, ³ TSE en el escenario óptimo, ⁴ TSE en el escenario crítico. Los costos anuales se estiman con base en el esquema tarifario doméstico de la CFE vigente, considerando el umbral anual de 250 kWh/mes para la transición a la tarifa DAC (véase Anexo A).

4.6. Evaluación de la pobreza energética

La evaluación de la pobreza energética constituye una etapa clave para interpretar los resultados del desempeño térmico-energético desde una perspectiva socioeconómica, particularmente en contextos urbanos expuestos al sobrecalentamiento y al incremento progresivo de las demandas de enfriamiento. En este sentido, el análisis desarrollado en el apartado anterior se amplía para estimar en qué medida los consumos energéticos asociados al

acondicionamiento térmico pueden traducirse en una carga económica desproporcionada para los hogares, bajo condiciones climáticas actuales y prospectivas de cambio climático.

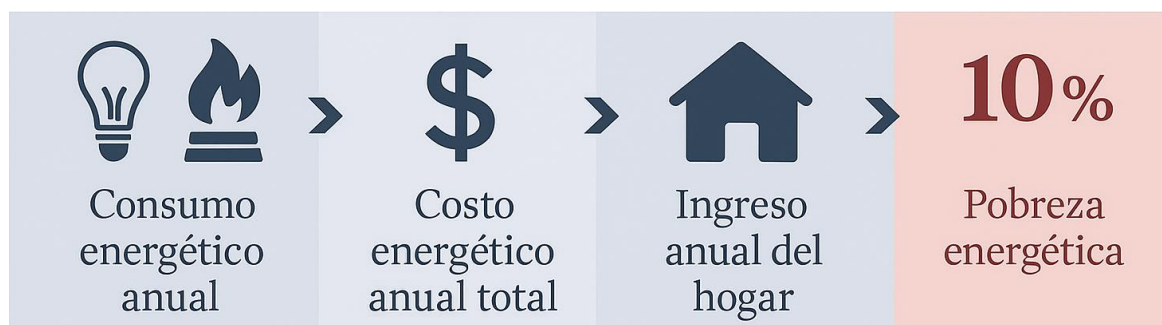
En esta investigación, la pobreza energética se evalúa a partir de un enfoque basado en el costo energético del hogar, considerando la relación entre el gasto energético anual total y el ingreso anual del hogar. El gasto energético total se define como la suma del consumo anual de energía eléctrica y el gasto anual asociado al consumo de gas, incorporando así los principales vectores energéticos utilizados en el ámbito residencial. Este enfoque permite capturar de manera más integral la carga económica real asociada al uso de energía en las viviendas analizadas.

Con el fin de facilitar la comprensión del procedimiento de estimación, la Figura 90 presenta un esquema conceptual del cálculo de la pobreza energética utilizado en esta investigación. El indicador se construye a partir de la relación entre el costo energético anual total del hogar (electricidad y gas) y el ingreso anual estimado, permitiendo evaluar el riesgo de pobreza energética bajo condiciones climáticas actuales y prospectivas de cambio climático.

El indicador de pobreza energética se expresa como el porcentaje del ingreso anual del hogar destinado al pago de energía, adoptando como umbral de referencia el valor comúnmente utilizado en la literatura especializada, en el cual una relación superior al 10 % se asocia a una condición de riesgo de pobreza energética (Boardman, 1991; García Ochoa, 2014; García & Graizbord, 2016). Este umbral se emplea con fines comparativos, permitiendo identificar diferencias relativas entre escenarios, tipologías edificatorias y contextos urbanos, más que establecer una clasificación absoluta de pobreza energética a nivel individual.

Figura 90

Esquema conceptual para la estimación de la pobreza energética del hogar



Nota. Se considera condición de pobreza energética cuando el gasto energético anual supera el 10 % del ingreso anual (Boardman, 1991; García Ochoa, 2014; García & Graizbord, 2016).

La evaluación se realiza para los escenarios óptimo y crítico identificados mediante el proceso de optimización multiobjetivo, considerando ambas torres representativas y los dos cañones urbanos de estudio. Asimismo, el análisis se desarrolla bajo condiciones climáticas actuales y bajo un escenario prospectivo hacia 2050, con el fin de examinar cómo el cambio climático puede amplificar las presiones económicas asociadas al consumo energético residencial y modificar el riesgo de pobreza energética en contextos urbanos con características socioespaciales contrastantes.

De este modo, el presente apartado integra el desempeño morfológico, térmico-energético y económico en un marco analítico común, proporcionando una base sólida para evaluar en qué medida las estrategias de densificación urbana y optimización morfológica, aun cuando se desarrollan bajo marcos normativos vigentes, pueden contribuir o, en ciertos casos, limitar la reducción del riesgo de pobreza energética frente a escenarios actuales y futuros de cambio climático.

4.6.1. Estimación del gasto energético e ingreso anual del hogar

El costo anual de la energía eléctrica se estimó a partir de los resultados de las simulaciones termoenergéticas desarrolladas en el apartado 4.5, normalizadas a un departamento tipo promedio dentro de cada torre representativa, y evaluadas conforme al esquema tarifario doméstico vigente de la Comisión Federal de Electricidad, considerando el umbral de 250 kWh/mes para la transición a la tarifa DAC.

Por su parte, el consumo de gas LP se estimó mediante la definición de patrones de uso representativos de un hogar tipo de cuatro integrantes, incorporando los principales equipos domésticos: estufa, calentador de agua y secadora de ropa. Los tiempos de uso, potencias y consumos específicos se establecieron con base en información oficial de la Secretaría de Energía (SENER) y la CFE, particularmente a partir del estudio Patrones de consumo energético en el sector residencial de México (SECIHTI et al., 2022) (véase Anexo F).

La Tabla 56 presenta la estimación del consumo de gas LP a escala semanal, mensual y anual para un departamento tipo. La estimación se realizó a partir de la definición de patrones de uso doméstico, en los que las horas de operación diaria, semanal, mensual y anual de cada equipo se multiplicaron por un factor específico de consumo de gas por hora, obtenido a partir

de fichas técnicas y referencias especializadas. En particular, se consideró un consumo de 0,18 kg/h para el piloto de la estufa, 0,47 kg por ciclo para la secadora de ropa (con una duración aproximada de 45–60 minutos por ciclo) y 0,58 kg/h para el calentador de agua (boiler). Estos valores permiten estimar de manera desagregada el consumo de gas asociado a los principales usos finales domésticos, y posteriormente integrarlos en un consumo total anual por vivienda.

Tabla 56
Estimación del consumo de combustible por condominio tipo

Tiempo	Estufa	Unidad	Secado	Unidad	Boiler	Unidad	Kg totales
Día	1,50	Horas	-	-	0,50	Horas	-
	0,27	Kg/h	-	-	0,29	Kg/h	
Semana	10,50	Horas	4	Ciclos	3,50	Horas	5,80
	1,89	Kg/semana	1,88	Ciclos/semana	2,03	Kg/semana	
Mes	45,60	Horas	16	Ciclos	15,20	Horas	24,54
	8,20	Kg/mes	7,52	Ciclos/mes	8,81	Kg/mes	
Año	547,5	Horas	208	Ciclos	182,5	Horas	302,16
	98,55	Kg/año	97,76	Ciclos/año	105,85	Kg/año	
Costo anual de gas							5,943,49
Tanques de 45 kg							6,7 ≈7

El costo anual del gas se calculó mediante la multiplicación del consumo total anual estimado (en kilogramos) por el precio unitario vigente del gas LP, correspondiente a 19,67 MXN/kg, equivalente a 884,25 MXN por tanque de 45 kg, de acuerdo con información de la Secretaría de Energía y la Comisión Nacional de Energía. A partir de este procedimiento, se estimó tanto el costo anual del gas como el número equivalente de tanques de gas consumidos por año.

El ingreso anual del hogar se estimó a partir del salario mínimo y de los deciles de ingreso reportados por la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH 2024), los cuales clasifican a los hogares en diez grupos de igual tamaño ordenados de menor a mayor ingreso (INEGI, 2025). En este marco, el cañón urbano Lomitas, caracterizado por vivienda de interés social y mayores niveles de rezago socioeconómico, y se asoció a los deciles bajos de ingreso (III), adoptando un ingreso anual representativo de \$147,380,00 MXN por hogar. En contraste, el cañón urbano Moderna, correspondiente a vivienda de nivel medio–residencial, se vinculó con deciles medios (VII), considerando un ingreso anual representativo de \$309,804,00 MXN por hogar. Estos valores se mantuvieron constantes en los escenarios

climáticos actuales y prospectivos, con el fin de aislar el efecto del desempeño energético y del esquema tarifario sobre el riesgo de pobreza energética

4.6.2. Pobreza energética bajo condiciones climáticas actuales

Bajo condiciones climáticas actuales, la Tabla 57 evidencia que el riesgo de pobreza energética (umbral $>10\%$ del ingreso anual destinado a energía) no depende únicamente del nivel absoluto de consumo eléctrico, sino de la interacción entre: i) el desempeño térmico-energético asociado a la configuración morfológica (escenarios óptimo vs. crítico y tipologías TSC vs. TSE), ii) la penalización económica inducida por el esquema tarifario cuando se incrementa el consumo eléctrico, y iii) la capacidad de pago del hogar (ingreso anual). En conjunto, tres de los ocho escenarios (37,5%) superan el umbral del 10% (L-TSC-EC, M-TSC-EC y M-TSE-EC), mientras que cinco escenarios (62,5%) se mantienen por debajo. No obstante, en la mayoría de estos últimos, el margen respecto al umbral resulta reducido, lo que evidencia una condición de alta vulnerabilidad económica ante incrementos marginales del consumo o cambios tarifarios.

En Lomitas (ingreso anual \$147,380 MXN), se observa una marcada diferencia entre tipologías edificatorias. El escenario L-TSC-EC alcanza un valor de 20,86 % del ingreso anual destinado a energía, duplicando el umbral de referencia y evidenciando una situación clara de pobreza energética. Este incremento se explica por la elevada demanda de enfriamiento asociada a la tipología con sobrecalentamiento bajo una configuración morfológica crítica, lo que intensifica el consumo eléctrico y activas penalizaciones tarifarias. En términos absolutos, el gasto energético anual total en este escenario excede el umbral del 10 % en aproximadamente \$16,000 MXN/año, lo que refleja una carga económica desproporcionada para los hogares representativos de este contexto.

En contraste, los escenarios asociados a la tipología TSE en Lomitas se mantienen por debajo del umbral, con valores de 9,17 % en el escenario óptimo y 9,70 % en el escenario crítico. Esta diferencia sugiere que la configuración geométrica y la posición urbana de la TSE (caracterizada por una menor exposición térmica) contribuyen de manera estructural a la reducción de la demanda de enfriamiento y, por ende, del gasto energético. Sin embargo, esta condición no implica una situación de seguridad energética: el escenario L-TSE-EC se sitúa a tan solo 0,30 puntos porcentuales del umbral, lo que equivale a un margen económico inferior

a \$500 MXN/año, indicando que pequeñas variaciones en el consumo o en las tarifas podrían inducir una transición inmediata hacia pobreza energética. De manera similar, el escenario L-TSC-EO presenta un valor de 9,58 %, confirmando que, incluso bajo configuraciones optimizadas, el margen de maniobra económica en contextos de vivienda social resulta limitado.

Tabla 57

Estimación del riesgo de pobreza energética bajo condiciones climáticas actuales

Escenario	Costo electricidad anual (MXN)	Costo gas anual (MXN)	Costo energético anual total (MXN)	Ingreso anual estimado (MXN)	Ingreso destinado a energía (%)	Pobreza energética (>10%)
L-TSC-EO	8,176	5,943	14,119	147,380,00	9,58	No
L-TSC-EC	24,797	5,943	30,740	147,380,00	20,86	Sí
L-TSE-EO	7,564	5,943	13,507	147,380,00	9,17	No
L-TSE-EC	8,357	5,943	14,300	147,380,00	9,70	No
M-TSC-EO	24,988	5,943	30,931	309,804,00	9,98	No
M-TSC-EC	26,656	5,943	32,599	309,804,00	10,52	Sí
M-TSE-EO	8,519	5,943	14,462	309,804,00	4,67	No
M-TSE-EC	25,864	5,943	31,807	309,804,00	10,27	Sí

Nota:

L = Lomitas; M = Moderna

TSC = Torre con sobrecalentamiento; TSE = Torre con sobreenfriamiento

EO = Escenario óptimo; EC = Escenario crítico

El umbral de pobreza energética se establece en una relación gasto energético/ingreso anual superior al 10 %.

En el cañón urbano Moderna, asociado a vivienda de nivel medio–residencial y un ingreso anual estimado de \$309,804 MXN, el mayor poder adquisitivo atenúa parcialmente el riesgo de pobreza energética, aunque no lo elimina. El escenario M-TSC-EO registra un valor de 9,98 %, ubicándose prácticamente en el umbral, con una diferencia marginal inferior a \$50 MXN/año respecto al 10 %. Este resultado es particularmente relevante, ya que evidencia que incluso bajo una configuración morfológica óptima, los consumos energéticos asociados a la tipología con sobrecalentamiento generan una condición de borde, altamente sensible a incrementos estacionales del consumo o ajustes tarifarios. En el escenario crítico, M-TSC-EC supera el umbral con un valor de 10,52 %, mientras que M-TSE-EC alcanza 10,27 %, confirmando que la degradación del desempeño morfológico incrementa de manera sistemática el riesgo de pobreza energética, aun en contextos con mayores ingresos.

En términos generales, los resultados confirman que la tipología TSC presenta una mayor sensibilidad a las configuraciones morfológicas críticas, transitando de valores cercanos al umbral hacia condiciones claras de pobreza energética. En contraste, la tipología TSE tiende a mantener valores porcentuales más bajos, aunque en escenarios críticos y contextos de consumo elevado puede igualmente superar el umbral del 10 %. En conjunto, la pobreza energética emerge como un fenómeno fuertemente condicionado por la morfología urbano-arquitectónica, no solo a través del consumo energético absoluto, sino mediante su interacción con el esquema tarifario y la capacidad económica del hogar, reforzando la relevancia de estrategias de diseño y regulación urbana orientadas a mitigar el riesgo energético en contextos de vulnerabilidad socioeconómica.

4.6.3. Impacto del cambio climático en la pobreza energética hacia 2050

En este apartado, los resultados presentados deben interpretarse como una estimación del riesgo de pobreza energética, derivada del análisis prospectivo del desempeño térmico-energético de las edificaciones y de la relación entre el costo energético y el ingreso del hogar bajo escenarios de cambio climático hacia 2050. Es importante señalar que este análisis no constituye una medición directa de las condiciones reales de los hogares, sino una aproximación analítica basada en simulaciones energéticas, proyecciones climáticas y supuestos socioeconómicos representativos. En este sentido, los resultados permiten evaluar de manera comparativa cómo distintos escenarios morfológicos y climáticos pueden amplificar o mitigar el riesgo de pobreza energética, sin pretender caracterizar de forma exhaustiva la situación individual de los hogares.

Los resultados presentados en la Tabla 58 evidencian un agravamiento sustancial del riesgo de pobreza energética bajo condiciones climáticas prospectivas hacia 2050, como consecuencia directa del incremento en las cargas de enfriamiento, la intensificación del consumo eléctrico anual y la mayor frecuencia de superación del umbral tarifario asociado a alto consumo. A diferencia del escenario climático actual, en el que una parte relevante de los casos se mantenía por debajo del umbral del 10 %, bajo el escenario prospectivo siete de los ocho escenarios analizados (87,5 %) superan el umbral de pobreza energética, confirmando un desplazamiento generalizado hacia condiciones de vulnerabilidad económica.

En el cañón urbano Lomitas, el impacto del cambio climático resulta particularmente crítico debido a la combinación de altas demandas de enfriamiento y bajos niveles de ingreso. En este contexto, los escenarios L-TSC-EO y L-TSC-EC registran valores de 21,46 % y 22,14 % del ingreso anual destinados al gasto energético, respectivamente, más del doble del umbral de referencia. Este comportamiento indica que, aun bajo configuraciones morfológicas optimizadas, la tipología con sobrecalentamiento presenta una incapacidad estructural para contener el incremento del consumo energético bajo clima futuro, traducándose en una carga económica severa para los hogares representativos de vivienda de interés social.

Tabla 58

Estimación de riesgo de pobreza energética bajo el impacto del cambio climático

Escenario	Costo electricidad anual (MXN)	Costo gas anual (MXN)	Costo energético anual total (MXN)	Ingreso anual estimado (MXN)	Ingreso destinado a energía (%)	Pobreza energética (>10%)
L-TSC-EO	25,680,00	5,943	14,119	147,380,00	21,46	Sí
L-TSC-EC	26,682,00	5,943	30,740	147,380,00	22,14	Sí
L-TSE-EO	8,545,00	5,943	13,507	147,380,00	9,83	No
L-TSE-EC	25,836,00	5,943	14,300	147,380,00	21,56	Sí
M-TSC-EO	25,747,00	5,943	30,931	309,804,00	10,23	Sí
M-TSC-EC	27,322,00	5,943	32,599	309,804,00	10,74	Sí
M-TSE-EO	25,199,00	5,943	14,462	309,804,00	10,05	Sí
M-TSE-EC	26,717,00	5,943	31,807	309,804,00	10,54	Sí

Nota: L = Lomitas; M = Moderna

TSC = Torre con sobrecalentamiento; TSE = Torre con sobreenfriamiento

EO = Escenario óptimo; EC = Escenario crítico

El umbral de pobreza energética se establece en una relación gasto energético/ingreso anual superior al 10 %.

Asimismo, el escenario L-TSE-EC alcanza un valor de 21,56 %, lo que evidencia que incluso tipologías con menor exposición térmica pueden transitar hacia pobreza energética cuando se combinan configuraciones morfológicas críticas con un contexto climático más extremo. En contraste, L-TSE-EO constituye el único caso en Lomitas que permanece por debajo del umbral (9,83 %); sin embargo, este valor se sitúa a menos de 0,2 puntos porcentuales del límite, lo que indica una condición de vulnerabilidad latente altamente sensible a variaciones marginales del consumo o del esquema tarifario. En términos económicos, esta proximidad al umbral equivale a una diferencia inferior a \$300 MXN anuales, reforzando la fragilidad del balance energético-hogar bajo cambio climático.

En el cañón urbano Moderna, si bien el mayor ingreso anual (\$309,804 MXN) atenúa parcialmente la presión económica relativa, los resultados muestran que el cambio climático induce una generalización del riesgo de pobreza energética. Todos los escenarios superan el umbral del 10 %, con valores que oscilan entre 10,05 % (M-TSE-EO) y 10,74 % (M-TSC-EC). Este comportamiento confirma que, bajo condiciones climáticas futuras, el incremento del consumo por enfriamiento es suficiente para anular el efecto protector del mayor poder adquisitivo, especialmente cuando se activa el esquema tarifario DAC.

Resulta particularmente relevante que incluso el escenario M-TSE-EO, asociado a una tipología con menor sobrecalentamiento y una configuración morfológica optimizada, alcance un valor de 10,05 %, superando marginalmente el umbral. Este resultado sugiere que, bajo clima futuro, las estrategias morfológicas por sí solas resultan insuficientes para garantizar la seguridad energética económica, aun en contextos urbanos de nivel socioeconómico medio-residencial. En los escenarios críticos (M-TSC-EC y M-TSE-EC), los valores de 10,74 % y 10,54 % confirman una intensificación sistemática del riesgo, asociada a mayores consumos estivales y a una estructura de costos dominada por el régimen tarifario de alto consumo.

En términos comparativos, el escenario prospectivo hacia 2050 transforma la pobreza energética de un fenómeno selectivo y condicionado (limitado principalmente a tipologías con sobrecalentamiento bajo configuraciones críticas) en un riesgo estructural generalizado, que afecta a prácticamente todas las combinaciones morfológicas y tipológicas evaluadas. La diferencia entre escenarios óptimos y críticos se mantiene, pero se reduce en términos relativos, ya que ambos convergen hacia valores superiores al umbral del 10 %, especialmente en contextos de ingreso bajo.

En síntesis, la evaluación evidencia que el riesgo de pobreza energética no depende exclusivamente del nivel absoluto de consumo energético, sino de la interacción entre desempeño térmico, tipología edificatoria y capacidad económica del hogar. Bajo condiciones climáticas actuales, Lomitas presenta una mayor vulnerabilidad relativa debido a su menor ingreso, mientras que Moderna, aun con consumos más elevados, mantiene márgenes de seguridad económica más amplios. No obstante, en ambos cañones urbanos, los escenarios críticos reducen de forma significativa dichos márgenes, anticipando un incremento del riesgo bajo condiciones climáticas futuras.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación son consistentes con la evidencia internacional que señala que la morfología urbana ejerce una influencia significativa sobre el desempeño térmico-energético de los edificios, particularmente en climas cálidos y semiáridos (R. Li et al., 2024; M. Wang et al., 2022). En concordancia con estos estudios, los escenarios óptimos derivados del proceso de optimización multiobjetivo lograron reducciones del consumo anual por enfriamiento del 10–18 % respecto a las configuraciones críticas bajo condiciones climáticas actuales, confirmando que variables como la altura edificatoria, la relación de aspecto del cañón y la proporción de área acristalada son determinantes en la modulación de las cargas térmicas.

No obstante, uno de los hallazgos principales de esta investigación es que dichas mejoras morfológicas presentan una capacidad de mitigación limitada frente a escenarios de cambio climático. A diferencia de estudios que evalúan el desempeño energético bajo condiciones climáticas estacionarias (Costa et al., 2020; Quan et al., 2016), los resultados prospectivos muestran que, bajo condiciones climáticas hacia 2050, el consumo energético por enfriamiento se incrementa de manera sistemática en todos los escenarios analizados, con aumentos acumulados cercanos al 15–25 %. Este comportamiento evidencia que el cambio climático actúa como un amplificador del consumo energético, erosionando progresivamente los beneficios asociados a la optimización morfológica y superando, en términos relativos, su capacidad de mitigación.

Este efecto amplificador se ve reforzado por el desplazamiento del balance térmico anual hacia una dominancia casi absoluta del periodo cálido. En particular, la reducción de las cargas de calentamiento, que bajo el escenario 2050 se sitúan por debajo de 45 kWh/año, coincide con lo reportado en estudios recientes para climas mediterráneos y semiáridos (Zhang et al., 2024). Este desplazamiento confirma que, en contextos de cambio climático, las estrategias de eficiencia energética deberán centrarse crecientemente en la mitigación del sobrecalentamiento y no en la reducción de cargas invernales.

Desde una perspectiva socioeconómica, los resultados amplían la discusión planteada por Boardman (1991) y García y Graizbord (2016), al evidenciar que el riesgo de pobreza energética no depende exclusivamente del consumo energético absoluto, sino de su interacción con el ingreso del hogar y el esquema tarifario. Bajo condiciones climáticas actuales, solo 3 de

los 8 escenarios evaluados superan el umbral del 10 % del ingreso anual destinado a energía; sin embargo, bajo el escenario 2050 esta proporción aumenta a 7 de 8 escenarios, incluyendo configuraciones morfológicamente optimizadas. Este resultado es consistente con lo reportado por Middlemiss y Gillard (2015), quienes advierten que el cambio climático puede convertir hogares energéticamente eficientes en hogares energéticamente vulnerables.

El papel del esquema tarifario doméstico emerge como un factor crítico. En línea con estudios realizados en el contexto mexicano (García & Graizbord, 2016; SENER, 2022), la superación del umbral de 250 kWh/mes provoca la transición a la tarifa DAC, generando incrementos desproporcionados del costo energético anual. En Lomitas, por ejemplo, escenarios críticos alcanzan costos superiores a 30,000 MXN/año, duplicando prácticamente los valores observados en escenarios que permanecen bajo el umbral tarifario. Este efecto escalonado de la tarifa refuerza la noción de que la pobreza energética no es un fenómeno lineal, sino altamente sensible a puntos de inflexión normativos.

Asimismo, los resultados muestran que las torres con sobreenfriamiento, asociadas a configuraciones más compactas y mayor protección mutua entre edificaciones, mantienen sistemáticamente valores más bajos de gasto energético respecto al ingreso (Li et al., 2025). Sin embargo, incluso estas configuraciones presentan un deterioro significativo bajo escenarios futuros, lo que sugiere que la morfología por sí sola no es suficiente para neutralizar el impacto del cambio climático.

Finalmente, estos resultados adquieren una relevancia particular al contextualizarse en la estructura socioeconómica de Ensenada, donde solo el 31,3 % de la población se clasifica como no pobre ni vulnerable, mientras que más del 60 % presenta algún grado de pobreza o vulnerabilidad social (Gobierno del Estado de Baja California, 2024). En este contexto, los márgenes de adaptación económica frente al incremento del gasto energético son limitados, lo que explica por qué incluso escenarios óptimos pueden derivar en condiciones de pobreza energética bajo condiciones climáticas futuras. Este hallazgo refuerza los planteamientos de Bouzarovski y Simcock (2017) sobre la necesidad de integrar la pobreza energética como un eje central de la planificación urbana y no únicamente como un efecto colateral del consumo energético.

CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

Conclusión

La presente investigación evaluó de manera prospectiva la influencia de la morfología urbano-arquitectónica en el desempeño térmico-energético y en el riesgo de pobreza energética de sectores urbanos vulnerables al calor, considerando escenarios de densificación y cambio climático. Mediante un enfoque integral que articuló análisis espacial, monitoreo microclimático, simulación energética y optimización multiobjetivo, fue posible generar y analizar configuraciones urbanas alternativas en un contexto mediterráneo semiárido.

Se concluye que el cumplimiento normativo y la optimización geométrica, si bien constituyen condiciones necesarias para avanzar hacia un desarrollo urbano más eficiente, resultan insuficientes para asegurar resiliencia energética y equidad social bajo escenarios climáticos futuros. El incremento proyectado de las cargas de enfriamiento, asociado al calentamiento urbano y al cambio climático, amplifica la presión económica sobre los hogares, especialmente cuando se combinan consumos elevados con esquemas tarifarios progresivos como la tarifa DAC.

En este contexto, la planificación urbana orientada a la densificación debe trascender a una visión exclusivamente morfológica y energética, incorporando de manera explícita criterios de pobreza energética, considerando la estructura tarifaria vigente y articulándose con políticas complementarias de eficiencia energética, subsidios focalizados y estrategias de adaptación climática. La omisión de estas dimensiones puede conducir a escenarios formalmente óptimos desde el punto de vista técnico, pero socialmente insostenibles en el mediano y largo plazo.

A nivel de tipología edificatoria, los resultados muestran que la respuesta térmico-energética no depende únicamente de las condiciones del cañón urbano, sino también de la configuración morfológica específica de cada torre. En este sentido, la torre TSC presenta una mayor propensión al sobrecalentamiento estival, asociada a una mayor exposición solar y acumulación térmica en la envolvente, lo que se traduce en demandas de refrigeración más elevadas, especialmente bajo escenarios críticos. Por el contrario, la torre TSE exhibe un comportamiento térmico más amortiguado, con menores niveles de sobrecalentamiento en verano, pero una mayor susceptibilidad al sobreenfriamiento relativo durante el invierno, debido a la reducción de las ganancias solares pasivas. Este hallazgo confirma que la morfología urbano-arquitectónica a escala de torre desempeña un papel determinante en la modulación

estacional del consumo energético y en la expresión de la vulnerabilidad térmica, incluso dentro de un mismo cañón urbano.

Desde el punto de vista metodológico, la principal aportación de esta tesis radica en el desarrollo de un sistema integrado de evaluación prospectiva, que combina análisis espacial de vulnerabilidad térmica-energética, monitoreo microclimático in situ, simulación térmico-energética y optimización multiobjetivo aplicada a la morfología urbano-arquitectónica. Este enfoque permitió vincular de manera sistemática variables urbanas, energéticas y socioeconómicas, superando aproximaciones fragmentadas y facilitando la evaluación comparativa de escenarios de densificación bajo condiciones climáticas actuales y futuras. La metodología propuesta constituye una herramienta replicable y adaptable a otros contextos urbanos para el análisis de escenarios de densificación urbana bajo cambio climático.

Respecto a los objetivos de esta investigación, se logró caracterizar la vulnerabilidad térmica-energética del área de estudio, identificar unidades de análisis con condiciones contrastantes, evaluar el comportamiento microclimático local, y generar escenarios morfológicos alternativos mediante optimización multiobjetivo. Asimismo, fue posible estimar el impacto del cambio climático en el consumo energético y en el riesgo de pobreza energética hacia 2050, cumpliendo con el propósito de aportar evidencia científica que apoye la formulación de estrategias de densificación urbana más resilientes y socialmente equitativas.

En conjunto, las conclusiones de esta investigación aportan evidencia para la formulación de estrategias de planeación urbana orientadas a la resiliencia climática, al demostrar que la optimización morfológica es una herramienta relevante para mejorar el desempeño energético, pero insuficiente por sí sola para contrarrestar los efectos del cambio climático, lo que refuerza la necesidad de enfoques integrales y prospectivos en la toma de decisiones urbanas.

Desde una perspectiva más amplia, los hallazgos de esta investigación se vinculan de manera directa con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente con el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), al aportar evidencia sobre los efectos de la densificación urbana en el desempeño térmico-energético; con el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), al analizar cómo la forma urbano-arquitectónica incide en la demanda energética y en el riesgo de pobreza energética; y con el ODS 13 (Acción por el clima), al evaluar de

manera prospectiva el impacto del cambio climático en el consumo energético hacia 2050. En este sentido, la investigación contribuye a la discusión sobre la necesidad de alinear las políticas de densificación urbana vigentes con los objetivos globales de sostenibilidad, a fin de evitar que, bajo escenarios climáticos futuros, se profundicen las desigualdades energéticas y las condiciones de vulnerabilidad urbana.

Síntesis de hallazgos principales

Los principales hallazgos de la investigación pueden sintetizarse de la siguiente manera:

1. El cambio climático incrementa de forma sistemática el consumo energético, reduciendo la efectividad relativa de las estrategias morfológicas optimizadas.
2. Los escenarios óptimos reducen el consumo energético anual por enfriamiento entre 10 y 18 % respecto a escenarios críticos, siendo las torres con sobrecalentamiento (TSC) las más sensibles a los ajustes geométricos.
3. Bajo condiciones climáticas prospectivas, el consumo mensual promedio por condominio supera los 250 kWh/mes en la mayoría de los escenarios, activando la tarifa DAC y elevando el costo energético anual hasta valores de 25,000–32,000 MXN.
4. La pobreza energética, definida como un gasto energético superior al 10 % del ingreso anual, afecta a 37,5 % de los escenarios bajo condiciones actuales y a 87,5 % bajo el escenario 2050.
5. En Lomitas, los escenarios críticos alcanzan proporciones de gasto energético del 20–22 % del ingreso anual, duplicando el umbral de pobreza energética, mientras que en Moderna los valores oscilan entre 10 y 11 % bajo clima futuro.
6. La localización y configuración morfológica de las torres con sobreenfriamiento contribuye a mantener valores más bajos de pobreza energética, aunque su efecto se ve limitado frente al impacto del cambio climático.

Futuras investigaciones

Si bien la presente investigación aporta evidencia robusta sobre la influencia de la optimización multiobjetivo de la morfología urbano–arquitectónica en el desempeño térmico-energético y el riesgo de pobreza energética bajo condiciones actuales y futuras de cambio

climático, los resultados obtenidos abren diversas líneas de investigación que permitirían profundizar y ampliar el alcance del enfoque propuesto.

En primer lugar, una línea de investigación prioritaria consiste en extender el marco metodológico hacia la generación directa de morfologías urbano-arquitectónicas bajo condiciones climáticas futuras, en lugar de evaluar escenarios optimizados a partir de un clima base actual. En el presente estudio, el proceso de optimización se desarrolló considerando condiciones climáticas presentes y, posteriormente, las configuraciones resultantes fueron evaluadas bajo escenarios prospectivos hacia 2050. No obstante, futuras investigaciones podrían ampliar y profundizar este enfoque mediante la integración, desde las etapas iniciales del proceso evolutivo, de archivos climáticos proyectados, de modo que las geometrías se generen y seleccionen directamente en función de su desempeño térmico-energético esperado bajo condiciones de calentamiento climático. Este refinamiento metodológico permitiría identificar configuraciones morfológicas inherentemente más resilientes y reducir la probabilidad de que escenarios óptimos bajo condiciones actuales presenten desempeños energéticos desfavorables o mayores niveles de vulnerabilidad socioenergética en el largo plazo.

En segundo término, se identifica la oportunidad de desarrollar análisis más detallados del comportamiento energético a escala de condominio individual. En esta investigación, el desempeño energético se evaluó a partir de unidades representativas dentro de cada torre, lo que permitió caracterizar tendencias generales entre escenarios óptimos y críticos. Sin embargo, estudios futuros podrían profundizar en la variabilidad intratorre, analizando de manera individual el consumo energético, la exposición térmica y el costo económico asociado de cada condominio, considerando su posición vertical, orientación, condiciones de asoleamiento y sombreado mutuo. Este nivel de desagregación permitiría caracterizar con mayor precisión las diferencias intraedificatorias y su incidencia en el riesgo de pobreza energética.

Asimismo, futuras investigaciones podrían incorporar de manera más explícita variables socioeconómicas dinámicas, tales como la evolución de los ingresos del hogar, cambios en los esquemas tarifarios o la incorporación de tecnologías de eficiencia energética y energías renovables a escala residencial. La integración de estos factores permitiría evaluar escenarios más complejos y realistas, fortaleciendo la capacidad predictiva del modelo frente a contextos urbanos y climáticos en constante transformación.

Finalmente, la aplicación del marco metodológico propuesto a otros contextos climáticos, tipologías urbanas y escalas de análisis representa una línea de investigación relevante para evaluar la transferibilidad y robustez del enfoque. La comparación entre ciudades con distintos regímenes climáticos, patrones de densificación y estructuras socioeconómicas permitiría enriquecer la comprensión del papel de la morfología urbana en la mitigación del consumo energético y del riesgo de pobreza energética bajo escenarios de cambio climático.

REFERENCIAS

- Abdollahzadeh, N., & Biloría, N. (2021). Outdoor thermal comfort : Analyzing the impact of urban configurations on the thermal performance of street canyons in the humid subtropical climate of Sydney. *Frontiers of Architectural Research*, 10(2), 394–409. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.11.006>
- Abdollahzadeh, N., & Biloría, N. (2022). Urban microclimate and energy consumption : A multi-objective parametric urban design approach for dense subtropical cities. *Frontiers of Architectural Research*, 11(3), 453–465. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.02.001>
- Aleksandrowicz, O., Vuckovic, M., Kiesel, K., & Mahdavi, A. (2017). Current trends in urban heat island mitigation research: Observations based on a comprehensive research repository. *Urban Climate*, 21(February), 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.04.002>
- Alexakis, K., Benekis, V., Kokkinakos, P., & Askounis, D. (2025). Genetic algorithm-based multi-objective optimisation for energy-efficient building retrofitting: A systematic review. *Energy and Buildings*, 328(October 2024), 115216. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115216>
- Alexander, P. A. (2003). The Development of Expertise: The Journey from Acclimation to Proficiency. *Educational Researcher*, 32(8), 10–14. <http://www.jstor.org/stable/3700080>
- Alvarado, C., Herazo, I., Ardila Castro, C., & Donoso Meisel, Y. (2005). Aplicación de NSGA-II y SPEA-II para la optimización multiobjetivo de redes multicast. *Ingeniería y Desarrollo: Revista de La División de Ingeniería de La Universidad Del Norte*, 17, 28–53.
- Arlette, D., Devesa, C., & Cruz, V. M. (2018). Mapas de riesgo por temperaturas máximas. *Sistema Nacional de Protección Civil Centro Nacional de Prevención de Desastres*.
- Ascione, F., Bianco, N., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2019). A new comprehensive framework for the multi-objective optimization of building energy design: Harlequin. *Applied Energy*, 241(March), 331–361. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.028>
- Ascione, F., Bianco, N., Stasio, C. De, Maria, G., & Peter, G. (2016). Multi-stage and multi-objective optimization for energy retrofitting a developed hospital reference building : A new approach to assess. *Applied Energy*, 174, 37–68. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.078>
- Ayuntamiento Ensenada. (2007). *Reglamento de la Ley de Edificaciones para el municipio de Ensenada, Baja California*. 51, 1–94. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Estatal/wo19132.pdf>
- Bagheri-Esfah, H., & Dehghan, M. R. (2022). Multi-objective optimization of setpoint temperature of thermostats in residential buildings. *Energy and Buildings*, 261, 111955. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111955>
- Bahgat, R., Reffat, R. M., & Elkady, S. L. (2020). Analyzing the impact of design configurations of urban features on reducing solar radiation. *Journal of Building Engineering*, 32(July), 101664. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101664>
- Banerjee, S., Y, G. C. N., Kang, S., Dzyuban, Y., Crank, P. J., Pek, R., Yi, X., & Chow, W. T. L. (2022). Analysing impacts of urban morphological variables and density on outdoor microclimate for tropical cities : A review and a framework proposal for future research directions. *Building and Environment*, 225(October), 109646. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109646>
- Barnes, D. (2018). *The Concept of Energy Poverty*. <https://www.energyfordevelopment.com/2010/06/energy-poverty.html>
- Battista, G., de Lieto Vollaro, R., & Zinzi, M. (2019). Assessment of urban overheating mitigation strategies in a square in Rome, Italy. *Solar Energy*, 180(January), 608–621. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.074>
- Benincá, L., Crespo Sánchez, E., Passuello, A., Karini Leitzke, R., Grala da Cunha, E., & Maria González Barroso, J. (2023). Multi-objective optimization of the solar orientation of two residential multifamily buildings in south Brazil. *Energy and Buildings*, 285, 24. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112838>
- Bern, C.-. (2024). Meteorological Data. *Solar Energy Engineering*, July, 829–834. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-99350-0.15007-0>
- Betti, G., Tartarini, F., Nguyen, C., & Schiavon, S. (2024). CBE Clima Tool: A free and open-source web application for climate analysis tailored to sustainable building design. *Building Simulation*, 17(3), 493–508. <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1090-5>
- Biljecki, F., & Chow, Y. S. (2022). Global Building Morphology Indicators. *Computers, Environment and Urban Systems*, 95(May), 101809. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101809>
- Blender, M. (2015). *Isla de calor urbana*. Arquitectura & Energía. <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/isla-de-calor-urbana/>
- Boardman, B. (1991). *Fuel Poverty: From Cold Homes to Affordable Warmth* (Bekhaven Press (ed.)).
- Bouzarovski, S. (2014). Energy poverty in the European Union: Landscapes of vulnerability. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 3(3), 276–289. <https://doi.org/10.1002/wene.89>
- Bouzarovski, S., & Petrova, S. (2015). A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the

- energy poverty-fuel poverty binary. *Energy Research and Social Science*, 10, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.06.007>
- Bouzarovski, S., & Simcock, N. (2017). Spatializing energy justice. *Energy Policy*, 107(October 2016), 640–648. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.03.064>
- Camporeale, P. (2017). *El uso de algoritmos genéticos aplicados al diseño ambiental paramétrico*. 295.
- Carlucci, S., Cattarin, G., Causone, F., & Pagliano, L. (2015). Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). *Energy and Buildings*, 104(2015), 378–394. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.064>
- CENAPRED, & SEGOB. (2015). Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social. In *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015* (Vol. 1).
- Chakraborty, T., Hsu, A., Many, D., & Sheriff, G. (2020). A spatially explicit surface urban heat island database for the United States: Characterization, uncertainties, and possible applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 168(April), 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.07.021>
- Chi, D. A., González, M. E., Valdivia, R., & Gutiérrez, J. E. (2021). Parametric design and comfort optimization of dynamic shading structures. *Sustainability*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/su13147670>
- Chokhachian, A., Perini, K., Giulini, S., & Auer, T. (2017). Mathematical Generative Approach on Performance Based Urban Form Design. *International Conference on Urban Comfort and Environmental Quality*, September, 1–5.
- Ciardiello, A., Rosso, F., Dell’Olmo, J., Ciancio, V., Ferrero, M., & Salata, F. (2020a). Multi-objective approach to the optimization of shape and envelope in building energy design. *Applied Energy*, 280(May), 115984. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115984>
- Ciardiello, A., Rosso, F., Dell’Olmo, J., Ciancio, V., Ferrero, M., & Salata, F. (2020b). Multi-objective approach to the optimization of shape and envelope in building energy design. *Applied Energy*, 280(August), 115984. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115984>
- CONARED, & SEDATU. (2024). El pulso y el impulso del Desarrollo Urbano en México. In *Consejo Nacional del Desarrollo Urbano*. <https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevelopment/overview#1>
- CONUEE. (2021). *Balance Nacional de Energía*. <https://www.gob.mx/conuee>
- COPLADE. (2017). Ensenada. *Investigación y Ciencia*, 484, 98. <http://www.copladebc.gob.mx/publicaciones/2013/Apunte Poblacion de los municipios de Baja California 2010-2030.pdf>
- Correa, C., Bolaños, R., & Molina, A. (2008). Algoritmo Multiobjetivo Nsga-Ii Aplicado Al Problema De La Mochila. *Scientia Et Technica*, XIV(39), 206–211. <https://doi.org/10.22517/23447214.3205>
- Costa-Carrapiço, I., Raslan, R., & González, J. N. (2020). A systematic review of genetic algorithm-based multi-objective optimisation for building retrofitting strategies towards energy efficiency. *Energy and Buildings*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109690>
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., & Jason, G. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319–331. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)
- Das, S., Ghosh, A., Hazra, S., Ghosh, T., Safra, R., & Samanta, S. (2020). Progress in Disaster Science Linking IPCC AR4 & AR5 frameworks for assessing vulnerability and risk to climate change in the Indian Bengal Delta. *Progress in Disaster Science*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2020.100110>
- Das, S., Hazra, S., Haque, A., Rahman, M., Nicholls, R. J., Ghosh, A., Ghosh, T., Salehin, M., & Safra de Campos, R. (2021). Social vulnerability to environmental hazards in the Ganges-Brahmaputra-Meghna delta, India and Bangladesh. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 53(July 2020), 101983. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101983>
- Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms* (John Wiley & Sons (ed.); 1st Editio). John Wiley & Sons. <https://www.wiley.com/en-ca/Multi-Objective+Optimization+using+Evolutionary+Algorithms-p-9780471873396>
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Deb, K., Schoenauer, M., Yao, X., Lutton, E., Merelo, J., & Schwefel, H. (2000). Parellel problem solving from nature. In Springer (Ed.), *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial*

- Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics*) (Vol. 1917). https://doi.org/doi:10.1007/3-540-45356-3_83
- Deng, J. Y., & Wong, N. H. (2020). Impact of urban canyon geometries on outdoor thermal comfort in central business districts. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101966. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101966>
- Díaz, J., Carmona, R., Mirón, I. J., Luna, M. Y., & Linares, C. (2018). Time trend in the impact of heat waves on daily mortality in Spain for a period of over thirty years (1983 – 2013). *Environment International*, 116(April), 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.001>
- Dörterler, M., Bay, Ö. F., & Akcayol, M. A. (2017). A modified genetic algorithm for a special case of the generalized assignment problem. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 25(2), 794–805. <https://doi.org/10.3906/elk-1504-250>
- Du, L., Wang, H., Bian, C., & Chen, X. (2025). Impact of block form on building energy consumption , urban microclimate and solar potential : A case study of Wuhan , China. *Energy & Buildings*, 328(November 2024), 115224. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115224>
- Ebi, K. L., Capon, A., Berry, P., Broderick, C., de Dear, R., Havenith, G., Honda, Y., Kovats, R. S., Ma, W., Malik, A., Morris, N. B., Nybo, L., Seneviratne, S. I., Vanos, J., & Jay, O. (2021). Hot weather and heat extremes: health risks. *The Lancet*, 398(10301), 698–708. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01208-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01208-3)
- Ellena, M., Breil, M., & Soriani, S. (2020). The heat-health nexus in the urban context: A systematic literature review exploring the socio-economic vulnerabilities and built environment characteristics. *Urban Climate*, 34(April), 100676. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100676>
- Evola, G., Costanzo, V., Magri, C., Margani, G., Marletta, L., & Naboni, E. (2020). A novel comprehensive workflow for modelling outdoor thermal comfort and energy demand in urban canyons: Results and critical issues. *Energy and Buildings*, 216, 109946. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109946>
- García Ochoa, R. (2014). Pobreza energética en América Latina. *Comisión Económica Para América Latina y El Caribe (CEPAL)*, 36. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36661/1/S2014039_es.pdf
- García, R., & Graizbord, B. (2016). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional. *Economía Sociedad y Territorio*, 289. <https://doi.org/10.22136/est002016465>
- Garshasbi, S., & Santamouris, M. (2019). Using advanced thermochromic technologies in the built environment: Recent development and potential to decrease the energy consumption and fight urban overheating. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 191(October 2018), 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.10.023>
- Gobierno del Estado de Baja California. (2018). Reglamento del régimen de condominios para el municipio de ensenada. *Periódico Oficial Del Estado*, 12.
- Gobierno del Estado de Baja California. (2024). *INFORME ANUAL SOBRE LA SITUACIÓN DE POBREZA Y REZAGO SOCIAL 2024 02 - Baja California INFORME ANUAL SOBRE LA SITUACIÓN DE POBREZA Y REZAGO SOCIAL 2024 02 - Baja California*.
- Plan estratégico municipal de Ensenada. Visión 2024-2036, 52 (2024).
- Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Ensenada 2024-2036, 52 (2024).
- Gonzalez, M., Martinez, K., Armendariz, J., Santamouris, M., Bojorquez, G., & Luna, A. (2021). Research trends on environmental, energy and vulnerability impacts of Urban Heat Islands: An overview. *Energy and Buildings*, 246, 111051. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111051>
- Hamdan, D. M. A., & de Oliveira, F. L. (2019). The impact of urban design elements on microclimate in hot arid climatic conditions: Al Ain City, UAE. *Energy and Buildings*, 200, 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.028>
- Harkouss, F., Fardoun, F., & Biwole, P. H. (2018). Multi-objective optimization methodology for net zero energy buildings. *Journal of Building Engineering*, 16(August 2017), 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.12.003>
- Hernández, D. (2016). Understanding ‘ energy insecurity ’ and why it matters to health. *Social Science & Medicine*, 167, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2016.08.029>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (McGraw-Hill (ed.); 6ta ed., Vol. 6, Issue 1).
- Hills, J. (2012). Getting the measure of fuel poverty. *Final Report of the Fuel Poverty Review*, 19. www.decc.gsi.gov.uk/hillsfuelpovertyreview%0Ahttp://sticerd.lse.ac.uk/case/%5Cnhttp://sticerd.lse.ac.uk/dps/case/cr/CASereport72.pdf
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. <https://doi.org/10.7551/MITPRESS/1090.001.0001>
- Holland, J. H., & Goldberg, D. E. (1988). *Genetic algorithms and machine learning*. 3, 95–99. <https://doi.org/10.1023/A:1022602019183/METRICS>

- Howard, L. (1833). *The climate of London*. <https://books.google.com.ar/books?id=-yllMDVOz1IC&printsec=frontcover&dq=%22Luke+Howard%22&hl=es-419&sa=X&ei=H37DUM2uBKni0gHc8IHwBA&ved=0CDsQ6AEwAw#v=onepage&q&f=false>
- Hu, Y., White, M., & Ding, W. (2016). An Urban Form Experiment on Urban Heat Island Effect in High Density Area. *4th International Conference on Countermeasure to Urban Heat Island*, 169, 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.020>
- Hudson, R. (2010). Strategies for parametric design in architecture: An application of practice led research. *Ph.D Thesis*, 274.
- Ibrahim, Y., Kershaw, T., Shepherd, P., & Coley, D. (2021). On the optimisation of urban form design, energy consumption and outdoor thermal comfort using a parametric workflow in a hot arid zone. *Energies*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/en14134026>
- Ibrahim, Y., Kershaw, T., Shepherd, P., & Elwy, I. (2021). A parametric optimisation study of urban geometry design to assess outdoor thermal comfort. *Sustainable Cities and Society*, 75(February), 103352. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103352>
- IEA. (2017). *Energy Access Outlook*. Gridmate.
- INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- INEGI. (2025). *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2024 (ENIGH)*. 2024.
- Inostroza, L., Palme, M., & De La Barrera, F. (2016). A heat vulnerability index: Spatial patterns of exposure, sensitivity and adaptive capacity for Santiago de Chile. *PLoS ONE*, 11(9), 1–26. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162464>
- Instituto Metropolitano de Investigación y Planeación de Ensenada. (2018). *Anuario estadístico municipal de Ensenada [in spanish]*.
- Ergonomics of the thermal environment—Instruments for measuring physical quantities (ISO 7726), (1998). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0026478>
- IPCC. (2007a). *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. 976.
- IPCC. (2007b). *Proyecciones de Futuros Cambios Climáticos*. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/spmsspm-6.html
- IPCC. (2013). Cambio climático. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf
- IPCC. (2023a). *Climate Change 2023*. 35–115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- IPCC. (2023b). *Sixth Assessment Report (AR6): Climate Change 2023*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Jayaweera, N., Rajapaksha, U., & Manthilake, I. (2021). A parametric approach to optimize solar access for energy efficiency in high-rise residential buildings in dense urban tropics. *Solar Energy*, 220(September 2020), 187–203. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.054>
- Katoch, S., Chauhan, S. S., & Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. In *Multimedia Tools and Applications* (Vol. 80). Multimedia Tools and Applications.
- Khani, A., Khakzand, M., & Faizi, M. (2022). Multi-objective optimization for energy consumption, visual and thermal comfort performance of educational building (case study: Qeshm Island, Iran). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54(January), 102872. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102872>
- Kheiri, F. (2018). A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92(May), 897–920. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.080>
- Kim, S. W., & Brown, R. D. (2021). Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. *Science of the Total Environment*, 779, 146389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146389>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Landsberg, H. (1981). *The urban climate* (Vol. 28). International Geophysics. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845719>
- Lau, K. K., Thorsson, S., Lindberg, F., Holmer, B., & Ka, K. (2014). Street Geometry Design and its Effect on Mean Radiant Temperature: A Parametric Study based on Numerical Modelling. *9th International Conference on Urban Climate Jointly 12 Th Symposium on the Urban Environment*, 0–5.
- Lei, Y. J., Zhang, S. W., Li, X. B., & Zhou, C. M. (2005). MATLAB genetic algorithm toolbox and application. *The Press of Xidian University*, 4, 1–8.

- Li, J., Wang, Y., & Xia, Y. (2022). A novel geometric parameter to evaluate the effects of block form on solar radiation towards sustainable urban design. *Sustainable Cities and Society*, 84(June), 104001. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104001>
- Li, K., Zhang, T., & Wang, R. (2020). Deep Reinforcement Learning for Multi-objective. *Sustainable Cities and Society*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.2977661>
- Li, L., Zhang, C., Niu, C., & Zhang, H. (2025). *Parametric Multi-Objective Optimization of Urban Block Morphology Using NSGA-II : A Case Study in Wuhan , China*. 1–29.
- Li, R., Luo, L., Li, X., Wu, J., Jiang, F., & Wang, W. (2024). Multi-objective optimization for generative morphological design using energy and comfort models with a practical design of new rural community in China. *Energy and Buildings*, 313(May), 114282. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114282>
- Li, Y., Wang, D., Li, S., & Gao, W. (2021). *Impact Analysis of Urban Morphology on Residential District Heat Energy Demand and Microclimate Based on Field Measurement Data*.
- Liang, Z., Wu, S., Wang, Y., Wei, F., Huang, J., Shen, J., & Li, S. (2020). The relationship between urban form and heat island intensity along the urban development gradients. *Science of the Total Environment*, 708, 135011. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135011>
- Liu, K., Xu, X., Zhang, R., Kong, L., Wang, W., & Deng, W. (2023). Impact of urban form on building energy consumption and solar energy potential: A case study of residential blocks in Jianhu, China. *Energy and Buildings*, 280, 112727. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112727>
- Liu, Y., Li, Q., Yang, L., Mu, K., Zhang, M., & Liu, J. (2020). Urban heat island effects of various urban morphologies under regional climate conditions. *Science of The Total Environment*, 743, 140589. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.140589>
- Machairas, V., Tsangrassoulis, A., & Axarli, K. (2014). Algorithms for optimization of building design: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31(1364), 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.036>
- Makki, M., Farzaneh, A., & Navarro, D. (2015). The Evolutionary Adaptation of Urban Tissues through Computational Analysis. *Ecaade 2015: Real Time - Extending the Reach of Computation*, 2, 563–571.
- Makki, M., Showkatbakhsh, M., & Song, Y. (2019). *Wallacei Primer 2.0* (2.0; Vol. 1). <https://www.wallacei.com/>
- Mangan, S. D., Koclar Oral, G., Erdemir Kocagil, I., & Sozen, I. (2021a). The impact of urban form on building energy and cost efficiency in temperate-humid zones. *Journal of Building Engineering*, 33(June 2020), 101626. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101626>
- Mangan, S. D., Koclar Oral, G., Erdemir Kocagil, I., & Sozen, I. (2021b). The impact of urban form on building energy and cost efficiency in temperate-humid zones. *Journal of Building Engineering*, 33(December 2019), 101626. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101626>
- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 51 (4), 323–334. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0061-8>
- Mazzoli, C., Papadaki, D., & Ferrante, A. (2023). A Parametric Approach for Optimizing Design Solutions in Urban Regeneration and Reshaping: An Application to a District Block in Bologna, Italy. *Buildings*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/buildings13123123>
- Mengist, W., Soromessa, T., & Legese, G. (2020). Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. *MethodsX*, 7, 100777. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.100777>
- Middlemiss, L., & Gillard, R. (2015). Energy Research & Social Science Fuel poverty from the bottom-up : Characterising household energy vulnerability through the lived experience of the fuel poor. *Energy Research & Social Science*, 6, 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.02.001>
- Mirzabeigi, S., & Razkenari, M. (2022). Design optimization of urban typologies: A framework for evaluating building energy performance and outdoor thermal comfort. *Sustainable Cities and Society*, 76(October 2021), 103515. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103515>
- Mo, H., Zhou, Y., & Song, Y. (2022). Parametric Design and Spatial Optimization of East–West-Oriented Teaching Spaces in Shanghai. *Buildings*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/buildings12091333>
- Mohammed, M. A., Ghani, M. K. A., Obaid, O. I., Mostafa, S. A., Ahmad, M. S., Ibrahim, D. A., & Burhanuddin, M. A. (2017). A review of genetic algorithm application in examination timetabling problem. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(20), 5166–5181.
- Naciones Unidas. (2019). *Objetivos de desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Nagy, Z., Gunay, B., Miller, C., Hahn, J., Ouf, M., Hobson, B. W., Abuimara, T., Bandurski, K., André, M., Lorenz, L., Crosby, S., Dong, B., Jiang, Z., Peng, Y., Favero, M., Park, J. Y., Nweye, K., Nojedehe, P., Stopps, H.,

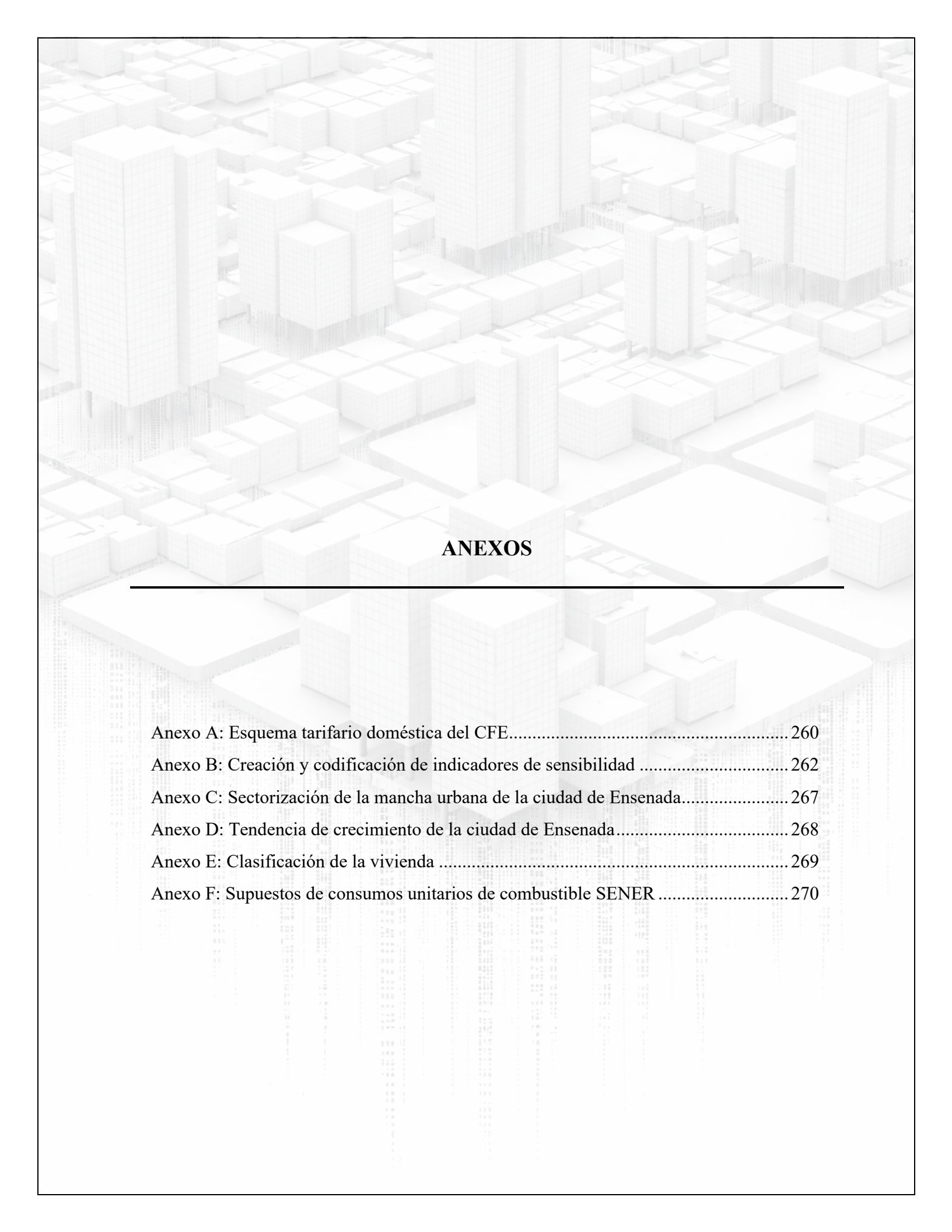
- ... Vellei, M. (2023). Urban heat islands characterized by six thermal indicators Chenguang. *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110820>
- Ngarambe, J., Oh, J. W., Su, M. A., Santamouris, M., & Yun, G. Y. (2021). Influences of wind speed, sky conditions, land use and land cover characteristics on the magnitude of the urban heat island in Seoul: An exploratory analysis. *Sustainable Cities and Society*, 71, 102953. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.102953>
- Nussbaumer, P., Bazilian, M., & Modi, V. (2012). Measuring energy poverty: Focusing on what matters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 231–243. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.150>
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* (second).
- ONU. (2001). *Implementing the Habitat Agenda - The 1996-2001 Experience* (Issue June). [https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Implementing the Habitat Agenda - The 1996 - 2001 Experience.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Implementing%20the%20Habitat%20Agenda%20-%20The%201996%20-%202001%20Experience.pdf)
- Guía del Sistema Mundial de Observación, 453 (2010).
- Park, C. Y., Yoon, E. J., Lee, D. K., & Thorne, J. H. (2020). Integrating four radiant heat load mitigation strategies is an efficient intervention to improve human health in urban environments. *Science of the Total Environment*, 698, 134259. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134259>
- Qaid, A., Bin Lamit, H., Ossien, D. R., & Raja Shahminan, R. N. (2016). Urban heat island and thermal comfort conditions at micro-climate scale in a tropical planned city. *Energy and Buildings*, 133, 577–595. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.006>
- Qu, K., Zhang, H., Zhou, X., Causone, F., Huang, X., Shen, X., & Zhu, X. (2023). Optimal design of building integrated energy systems by combining two-phase optimization and a data-driven model. *Energy and Buildings*, 295(April), 113304. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113304>
- Quan, S. J., Wu, J., Wang, Y., Shi, Z., Yang, T., & Yang, P. P. J. (2016). Urban form and building energy performance in Shanghai neighborhoods. *Energy Procedia*, 88, 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.035>
- Rajagopal, P., Priya, R. S., & Senthil, R. (2023). A review of recent developments in the impact of environmental measures on urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 88(October 2022), 104279. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104279>
- Rajagopalan, P., Lim, K. C., & Jamei, E. (2014). Urban heat island and wind flow characteristics of a tropical city. *Solar Energy*, 107, 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.042>
- Remund, J., Müller, S., Kunz, S., Hugenin-Landl, B., Schmid, C., & Schilter, C. (2014). Meteororm: Global Meteorological Database. In *Meteororm Handbook* (7.1; Issue September, p. 82 (297)).
- Repko, A. F., & Szostak, R. (2020). *Interdisciplinary Research: Process and Theory* (SAGE (ed.); 4th ed.).
- Rode, P., Keim, C., Robazza, G., Viejo, P., & Schofield, J. (2014). Cities and energy: Urban morphology and residential heat-energy demand. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 41(1), 138–162. <https://doi.org/10.1068/b39065>
- Rutten, D. (2010). *Evolutionary Principles applied to Problem Solving*. Grasshopper. <https://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>
- Sánchez, C., Núñez, P., & González, N. (2017). *Isla de calor urbana y población vulnerable. El caso de Madrid. I*, 545–556. <https://search.proquest.com/docview/304783477/previewPDF/1F6AA36BD23345A8PQ/1?accountid=45277>
- Sánchez Díaz, R. (1993). REGLAMENTO DE FRACCIONAMIENTOS DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. *Periodico Oficial Del Gobierno Del Estado*, 1–55.
- Sanchez, L., & Reames, T. G. (2019). Cooling Detroit: A socio-spatial analysis of equity in green roofs as an urban heat island mitigation strategy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 44, 126331. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2019.04.014>
- Santamouris, M. (2015a). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of the Total Environment*, 512–513, 582–598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.060>
- Santamouris, M. (2015b). Regulating the damaged thermostat of the cities — Status, impacts and mitigation challenges. *Energy & Buildings*, 91, 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.027>
- Santamouris, M. (2016). Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change. *Solar Energy*, 128, 61–94. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.021>
- Santamouris, M. (2019). Energy Poverty and Urban Vulnerability. In *Minimizing Energy Consumption, Energy Poverty and Global and Local Climate Change in the Built Environment: Innovating to Zero* (pp. 103–167).

- <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811417-9.00004-0>
- Santamouris, M., Cartalis, C., Synnefa, A., & Kolokotsa, D. (2015). On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings - A review. *Energy and Buildings*, 98, 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.052>
- Santamouris, M., Ding, L., Fiorito, F., Oldfield, P., Osmond, P., Paolini, R., Prasad, D., & Synnefa, A. (2017). Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*, 154, 14–33. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.006>
- Santamouris, M., & Fiorito, F. (2021). On the impact of modified urban albedo on ambient temperature and heat related mortality. *Solar Energy*, 216(January), 493–507. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.031>
- Santamouris, M., & Yun, G. Y. (2020). Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island. *Renewable Energy*, 161, 792–807. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.109>
- Schinasi, L. H., Benmarhnia, T., & De Roos, A. J. (2018). Modification of the association between high ambient temperature and health by urban microclimate indicators: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Research*, 161(September 2017), 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.004>
- Schwartz, Y., Raslan, R., & Mumovic, D. (2016). Implementing multi objective genetic algorithm for life cycle carbon footprint and life cycle cost minimisation: A building refurbishment case study. *Energy*, 97, 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.056>
- SECIHTI, PLANEAS, & PROCANCES. (2022). *Patrones de consumo energético en el sector residencial de México: un análisis desde la perspectiva de usos finales*.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, T. y U. (2016). *Redensificación vertical de las ciudades para detonar el desarrollo, propone la SEDATU*. <https://www.gob.mx/sedatu/prensa/redensificacion-vertical-de-las-ciudades-para-detonar-el-desarrollo-propone-la-sedatu>
- Norma Mexicana NMX-AA-166/2-SCFI-2015, Estaciones meteorológicas automáticas—Parte 2: Especificaciones técnicas y métodos de prueba, (2015). <https://share.google/xwTjalQa2OyWCTLfd>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2018). Programa Especial de Cambio Climático. *Programa Especial Del Cambio Climático, 1*.
- Código de Edificación de Vivienda, (2017).
- SEDATU. (2021). *Programa Nacional de Vivienda 2021-2024*. 3(April), 1–95.
- SEDATU, CONAPO, & SEGOB. (2020). *Sistema Urbano Nacional 2020*. <https://www.google.com.mx/maps/place/México/>
- SENER. (2022). *Prospectiva del sector eléctrico 2022–2036*. Secretaría de Energía. <https://www.gob.mx/sener>
- Shopova, E. G., & Vaklieva, N. G. (2006). BASIC—A genetic algorithm for engineering problems solution. *Computers & Chemical Engineering*, 30(8), 1293–1309. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2006.03.003>
- Showkatbakhsh, M., & Makki, M. (2020). Application of homeostatic principles within evolutionary design processes: adaptive urban tissues. *Journal of Computational Design and Engineering*, 7(1), 1–17. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa002>
- Showkatbakhsh, M., & Makki, M. (2022). Multi-Objective Optimisation of Urban Form: A Framework for Selecting the Optimal Solution. *Buildings*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/buildings12091473>
- SMN. (2021). *El 2020 fue el segundo año más cálido a nivel global*. Servicio Meteorológico Nacional. <https://www.gob.mx/conagua/prensa/el-2020-fue-el-segundo-ano-mas-calido-a-nivel-global>
- Sosa Castro, M., Correa, É., Cantón, M., Of, I., Urban, T. H. E., Over, M., Sosa Castro, M., Correa, É., & Cantón, M. (2017). Influencia de la morfología urbana sobre la habitabilidad térmica exterior en una ciudad de clima árido. *Hábitat Sustentable*, 7(1), 44–53.
- Srivanit, M., & Jareemit, D. (2020). Modeling the influences of layouts of residential townhouses and tree-planting patterns on outdoor thermal comfort in Bangkok suburb. *Journal of Building Engineering*, 30(July 2019), 101262. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101262>
- Sun, C., Liu, Q., & Han, Y. (2020). Many-objective optimization design of a public building for energy, daylighting and cost performance improvement. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/app10072435>
- Szagri, D., Nagy, B., & Szalay, Z. (2023). How can we predict where heatwaves will have an impact? – A literature review on heat vulnerability indexes. *Urban Climate*, 52(October). <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101711>
- Talaei, M., & Sangin, H. (2024). Multi-objective optimization of energy and daylight performance for school

- envelopes in desert, semi-arid, and mediterranean climates of Iran. *Building and Environment*, 255(August 2023), 111424. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111424>
- The Math Works Inc. (2024). *MATLAB*. MATLAB Applications. <https://www.mathworks.com/solutions.html#applications>
- Tian, J., & Xu, S. (2021). A morphology-based evaluation on block-scale solar potential for residential area in central China. *Solar Energy*, 221(May), 332–347. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.049>
- United Nations. (2018). World Urbanization Prospects 2018. In *Department of Economic and Social Affairs*. <https://population.un.org/wup/>
- Vierlinger, R. (2018). *Octopus*. Food4Rhino. <https://www.food4rhino.com/en/app/octopus>
- Vuckovic, M., Loibl, W., Tötzer, T., & Stollnberger, R. (2019). Potential of urban densification to mitigate the effects of heat island in Vienna, Austria. *Environments - MDPI*, 6(7). <https://doi.org/10.3390/environments6070082>
- Wang, M., Yu, H., Yang, Y., Jing, R., Tang, Y., & Li, C. (2022). Assessing the impacts of urban morphology factors on the energy performance for building stocks based on a novel automatic generation framework. *Sustainable Cities and Society*, 87(September), 104267. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104267>
- Wang, S. S., Yi, Y. K., & Liu, N. X. (2021). Multi-objective optimization (MOO) for high-rise residential buildings' layout centered on daylight, visual, and outdoor thermal metrics in China. *Building and Environment*, 205(May), 108263. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108263>
- Wang, W., Liu, K., Zhang, M., Shen, Y., Jing, R., & Xu, X. (2021). From simulation to data-driven approach: A framework of integrating urban morphology to low-energy urban design. *Renewable Energy*, 179, 2016–2035. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.024>
- Wicki, S., Schwaab, J., Perhac, J., & Grêt-Regamey, A. (2021). Participatory multi-objective optimization for planning dense and green cities. *Journal of Environmental Planning and Management*, 64(14), 2532–2551. <https://doi.org/10.1080/09640568.2021.1875999>
- Williamson, T. J., Erell, E., & Soebarto, V. (2009). Assessing the error from failure to account for urban microclimate in computer simulation of building energy performance. *IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009*, 497–504.
- Wohlin, C., Kalinowski, M., Romero Felizardo, K., & Mendes, E. (2022). Successful combination of database search and snowballing for identification of primary studies in systematic literature studies. *Information and Software Technology*, 147(February), 106908. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.106908>
- World Energy Outlook. (2010). *IEA, UNDP, UNIDO. Energy poverty – how to make modern energy access universal?* International Energy Agency. http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2010/weo2010_poverty.pdf
- World Meteorological Organization. (2017). *Manual on the Global Observing System (WMO-No. 544): Volume I – General aspects*. World Meteorological Organization. https://es.scribd.com/document/423434378/544-es?utm_source=chatgpt.com
- Wu, C., Pan, H., Luo, Z., Liu, C., & Huang, H. (2024). Multi-objective optimization of residential building energy consumption, daylighting, and thermal comfort based on BO-XGBoost-NSGA-II. *Building and Environment*, 254(February), 111386. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111386>
- Xia, B., & Li, Z. (2021). Optimized methods for morphological design of mesoscale cities based on performance analysis : Taking the residential urban blocks as examples. *Sustainable Cities and Society*, 64(March 2020), 102489. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102489>
- Xia, Y., Li, Y., Guan, D., Tinoco, D. M., Xia, J., Yan, Z., Yang, J., Liu, Q., & Huo, H. (2018). Assessment of the economic impacts of heat waves: A case study of Nanjing, China. *Journal of Cleaner Production*, 171, 811–819. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.069>
- Xiao, W., Zhong, W., Wu, H., & Zhang, T. (2023). Multiobjective optimization of daylighting, energy, and thermal performance for form variables in atrium buildings in China's hot summer and cold winter climate. *Energy & Buildings*, 297(May), 113476. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113476>
- Xu, L., Wang, J., Xiao, F., El-Badawy, S., & Awed, A. (2021). Potential strategies to mitigate the heat island impacts of highway pavement on megacities with considerations of energy uses. *Applied Energy*, 281(April 2020), 116077. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116077>
- Xu, S., Li, G., Zhang, H., Xie, M., Mendis, T., & Du, H. (2023). Effect of Block Morphology on Building Energy Consumption of Office Blocks: A Case of Wuhan, China. *Buildings*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/buildings13030768>
- Xu, X., Liu, Y., Wang, W., Xu, N., Liu, K., & Yu, G. (2019). Urban layout optimization based on genetic algorithm for microclimate performance in the cold region of China. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(22).

<https://doi.org/10.3390/app9224747>

- Yan, H., Ji, G., & Yan, K. (2022). Data-driven prediction and optimization of residential building performance in Singapore considering the impact of climate change. *Building and Environment*, 226(October), 109735. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109735>
- Zhang, X., Wang, X., Du, S., Tian, S., Jia, A., Ye, Y., Gao, N., Kuang, X., & Shi, X. (2024). A systematic review of urban form generation and optimization for performance-driven urban design. *Building and Environment*, 253(April 2023). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111269>
- Zhang, X., Ye, R., & Fu, X. (2023). Assessment of Urban Local High-Temperature Disaster Risk and the Spatially Heterogeneous Impacts of Blue-Green Space. *Atmosphere*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/atmos14111652>
- Zhou, B., Ereli, E., Hough, I., Rosenblatt, J., Just, A. C., Novack, V., & Kloog, I. (2020). Estimating near-surface air temperature across Israel using a machine learning based hybrid approach. *International Journal of Climatology*, 40(14), 6106–6121. <https://doi.org/10.1002/joc.6570>



ANEXOS

Anexo A: Esquema tarifario doméstica del CFE.....	260
Anexo B: Creación y codificación de indicadores de sensibilidad	262
Anexo C: Sectorización de la mancha urbana de la ciudad de Ensenada.....	267
Anexo D: Tendencia de crecimiento de la ciudad de Ensenada.....	268
Anexo E: Clasificación de la vivienda	269
Anexo F: Supuestos de consumos unitarios de combustible SENER	270

Anexo A: Esquema tarifario doméstica del CFE

El esquema tarifario de la CFE se organiza en función de los diferentes tipos de usuarios, abarcando tarifas domésticas, comerciales, industriales y de servicios. En el contexto de esta investigación, se pone especial énfasis en las tarifas domésticas, las cuales se clasifican en tres tipos (véase Tabla 59):

- Tarifa 1: esta tarifa corresponde al uso doméstico básico y es aplicable a los usuarios que utilizan energía eléctrica para uso doméstico en zonas con temperaturas promedio en verano de hasta 25 °C.
- Tarifa 1A a 1F: estas tarifas represan el uso doméstico en regiones con clima cálido. Cada categoría varía según la temperatura promedio en verano. Estas tarifas aplican a zonas con temperaturas promedio superiores a 25 °C, siendo 1A para zonas menos cálidas y 1F para la más calida.
- Tarifa DAC (doméstica de alto consumo): esta tarifa se aplica a usuarios cuyo consumo excede cierto límite mensual, el cual varía según la tarifa base (1, 1A, 1B, etc.). La tarifa DAC es la más alta para usuarios residenciales, como se ilustra en la Tabla 60.

Tabla 59

Esquema tarifario doméstico vigente del CFE

Tipos de tarifas vigentes	Temperatura promedio en verano
Tarifa 1A	Localidades con temperaturas medias mínimas en verano de 25 °C
Tarifa 1B	Localidades con temperaturas medias mínimas en verano de 28 °C
Tarifa 1C	Localidades con temperaturas medias mínimas en verano de 30 °C
Tarifa 1D	Localidades con temperaturas medias mínimas en verano de 31 °C
Tarifa 1E	Localidades con temperaturas medias mínimas en verano de 32 °C
Tarifa 1F	Localidades con temperaturas medias mínimas en verano de 33 °C

Nota: Obtenido de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

<https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Casa.aspx>

Tabla 60

Límite de alto consumo de la tarifa DAC

Tipos de tarifas vigentes	Límite de alto consumo
Tarifa 1	250 kW/h
Tarifa 1A	300 kW/h
Tarifa 1B	400 kW/h
Tarifa 1C	850 kW/h
Tarifa 1D	1,000 kW/h
Tarifa 1E	2,000 kW/h

Tarifa 1F

2,500 kW/h

Nota: Obtenido de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

<https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Casa.aspx>

Es relevante señalar que, a nivel municipal, coexisten tanto la Tarifa 1 como la Tarifa de alto consumo (DAC). En la Tabla 61 se presentan las cuotas mensuales correspondientes a la Tarifa 1, mientras que la Tabla 62 muestra las cuotas correspondientes a la Tarifa DAC.

Tabla 61

Cuotas aplicables a la Tarifa 1 2025

Cuotas aplicables a la Tarifa 1 2025					
Mes	Consumo básico		Consumo intermedio		Consumo excedente
Enero	\$1.063		\$1.290		\$3.777
Febrero	\$1.067		\$1.295		\$3.791
Marzo	\$1.071		\$1.300		\$3.805
Abril	\$1.075		\$1.305		\$3.819
Mayo	\$1.079	Por cada uno de los primeros 75 kWh bimestrales	\$1.310	Por cada uno de los siguientes 65 kWh bimestrales	\$3.833
Junio	\$1.083		\$1.315		\$3.847
Julio	\$1.087		\$1.320		\$3.861
Agosto	\$1.091		\$1.325		\$3.875
Septiembre	\$1.095		\$1.330		\$3.889
Octubre	\$1.099		\$1.335		\$3.903
Noviembre	\$1.103		\$1.340		\$3.917
Diciembre	\$1.107		\$1.345		\$3.932

Tabla 62

Cuotas aplicables a la Tarifa de alto consumo eléctrico (DAC) 2025

Cuotas aplicables a la Tarifa de alto consumo eléctrico (DAC) para Baja California			
Mes	Cargo Fijo \$/mes	Cargo por energía consumida (\$/kWh)	
		Temporada de Verano	Temporada Fuera de Verano
Enero	\$140.16	\$6.445	\$5.537
Febrero	\$140.26	\$6.609	\$5.678
Marzo	\$141.62	\$6.584	\$5.656
Abril	\$142.50	\$6.525	\$5.606
Mayo	\$142.74	\$6.551	\$5.628
Junio	\$143.27	\$6.313	\$5.423
Julio	\$142.25	\$6.348	\$5.453
Agosto	\$141.91	\$6.267	\$5.384
Septiembre	\$141.29	\$6.139	\$5.274
Octubre	\$141.42	\$6.102	\$5.242
Noviembre	\$141.56	\$6.164	\$5.295
Diciembre	\$142	\$6.242	\$5.362

Anexo B: Creación y codificación de indicadores de sensibilidad

Tabla 63

Desglose del indicador de densidad de población

Densidad de población				
Indicador	Formula	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
DP	$DP = \frac{PT}{ST}$	De 1 a 99 hab por km ²	Muy baja	1
		De 100 a 499 hab por km ²	Baja	2
		De 500 a 999 hab por km ²	Media	3
		1000– 4,999 hab por km ²	Alta	4
		más de 5,000 hab por km ²	Muy Alta	5

Nota: DP= densidad de población, PT= Población total y ST= superficie territorial (km2)

Tabla 64

Desglose del indicador de población no derechohabiente

Población no derechohabiente				
Indicador	Formula	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
PND	$\%PND = \frac{PND}{PT} \times 100$	17.63 - 34.10	Muy baja	1
		34.11 - 50.57	Baja	2
		50.58 - 67.04	Media	3
		67.05 - 83.51	Alta	4
		83.52 o más	Muy alta	5

Nota: %PND= Porcentaje de población no derechohabiente, PND=Población no derechohabiente y PT= Población total.

Tabla 65

Desglose del indicador de analfabetismo

Analfabetismo				
Indicador	Formula	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
ANA	$\%A = \frac{P15aA}{PT15a} \times 100$	1.07 -15.85	Muy baja	1
		15.86 - 30.63	Baja	2
		30.64 – 45.41	Media	3
		45.42 – 60.19	Alta	4
		60.20 o más	Muy Alta	5

Nota: %A= porcentaje de analfabetismo, P15aA= población de 15 años y más analfabeta y PT15a= población total de 15 años y más.

Tabla 66

Desglose del indicador de población de habla indígena

Porcentaje de la población de habla indígena				
Indicador	Formula	La población es predominantemente indígena	Condición de vulnerabilidad	
PI	$\%PI = \frac{P5HLI}{P5} \times 100$	Mas del 40% de la población	Predominantemente indígena	1.00
		Menos del 40% de la población	Predominantemente no indígena	0.00

Tabla 67

Desglose del indicador de demanda escolar

Demanda escolar				
Indicador	Formula	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
DEB	DEB= $\frac{PT6_14aAE}{PT6_14a} \times 100$	42.72 – 54.17	Muy alta	1
		54.18 – 66.62	Alta	2
		66.65 – 77.07	Media	3
		77.08 – 88.52	Baja	4
		88.53 o más	Muy baja	5

Nota: DEB=demanda de educación básica, PT614aAE= Población total de 6 a 14 años que asiste a la escuela y PT6_14= población total de 6 a 14 años.

Tabla 68

Desglose del indicador de grado de escolaridad

Grado general de escolaridad				
Indicador	Formula	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
GPE	GPE= $\frac{SAAP15a}{PT15a}$	1 – 3.2	Muy alta	1
		3.3 -5.4	Alta	2
		5.5 – 7.6	Media	3
		7.7 – 9.8	Baja	4
		9.9 o más	Muy baja	5

Nota: GPE= grado promedio de escolaridad, SAAP15a= suma de años aprobados desde primero de primaria hasta el último año alcanzado de la población de 15 años y más y PT15a= Población total de 15 años y más.

Tabla 69

Desglose del indicador de porcentaje de vivienda con piso de tierra

Porcentaje de viviendas con piso de tierra				
Indicador	Formula	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
%VPT	%VPT= $\frac{TVPT}{TVPH} \times 100$	1.52 – 20.82	Muy baja	1
		20.83 – 40.12	Baja	2
		40.13 – 59.42	Media	3
		59.43 78.72	Alta	4
		78.73 o más	Muy Alta	5

Nota: %VPT= Porcentaje de vivienda con piso de tierra, TVPT= Total de viviendas particulares habitadas con piso de tierra y TVPH= total de viviendas particulares habitadas.

Tabla 70

Desglose del indicador déficit de vivienda

Déficit de vivienda				
Indicador	Formula	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
DV	DV= $\frac{TH-TVPH+TVPMD+TVPT}{TVPH} \times 100$	1.63 – 13.72	Muy baja	1
		13.73 – 25.81	Baja	2
		25.82 – 37.90	Media	3
		37.91 – 49.99	Alta	4
		50.00 o más	Muy Alta	5

Nota: DV= déficit de vivienda, TH= total de hogares, TVPH= total de viviendas particulares habitadas, TVPMD = Total de viviendas particulares con paredes de material desecho y lámina de cartón y TVPT= Total de viviendas particulares habitadas con piso de tierra.

Tabla 71

Desglose del indicador porcentaje de viviendas sin servicio de agua entubada

Porcentaje de viviendas sin servicio de agua entubada				
Indicador	Formula	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
TVNDAE	$\%TVNDAE = \frac{TVSAE}{TVPH} \times 100$	0 – 19.96	Muy baja	1
		19.97 – 39.92	Baja	2
		39.93 – 59.58	Media	3
		59.89 – 79.84	Alta	4
		79.85 o más	Muy Alta	5

Nota: %TVNDAE= porcentaje de viviendas que no disponen de agua entubada, TVSAE= Total de viviendas particulares habitadas que no disponen de agua entubada y TVPH= total de viviendas particulares habitadas.

Tabla 72

Desglose del indicador porcentaje de viviendas sin servicio de drenaje

Porcentaje de viviendas sin servicio de drenaje				
Indicador	Formula	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
VND	$\%VND = \frac{TVND}{TVPH} \times 100$	1.21 – 20.96	Muy baja	1
		20.97 – 40.71	Baja	2
		40.72 – 60.46	Media	3
		60.47 – 80.21	Alta	4
		80.22 o más	Muy Alta	5

Nota: %VND= Porcentaje de viviendas que no disponen de drenaje, TVPH= Total de viviendas particulares habitadas y TVND= Total de viviendas particulares habitadas que disponen drenaje.

Tabla 73

Desglose del indicador porcentaje de viviendas sin servicio de electricidad

Porcentaje de viviendas sin servicio de electricidad				
Indicador	Formula	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
VNDE	$\%VNDE = \frac{TVNDE}{TVPH} \times 100$	0 a 19.76	Muy baja	1
		19.77 – 39.52	Baja	2
		39.53 – 59.28	Media	3
		59.29 – 79.04	Alta	4
		79.05 o más	Muy Alta	5

Nota: %VND= Porcentaje de viviendas que no disponen de energía eléctrica, TVNDE= Total de viviendas particulares que no disponen de energía eléctrica y TVPH= Total de viviendas particulares habitadas,

Tabla 74

Desglose del indicador razón de dependencia

Razón de dependencia				
Indicador	Formula	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
RD	$RD = \frac{P0_14 + P65_a}{P15_64a} \times 100$	37.72 – 57.69	Muy baja	1
		57.70 – 77.66	Baja	2
		77.67 – 97.63	Media	3
		97.64 – 117.60	Alta	4
		117.60 o más	Muy Alta	5

Nota: RD= razón de dependencia, P0_14= población de 0 a 14 años, P65a= población de 65 años y más y P15_64a= población de 15 a 64 años.

Tabla 75

Desglose del indicador tasa de desempleo

Tasa de desempleo				
Indicador	Formula	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
TDD	$TDA = \frac{NoPD}{PEA} \times 100$	0 – 3.09	Muy baja	1
		3.10 – 6.18	Baja	2
		6.19 – 9.27	Media	3
		9.28 – 12.36	Alta	4
		12.37 o más	Muy Alta	5

Nota: TDA=tasa de desempleo abierto, NoPD= número de personas desocupadas y PEA= población económicamente activa

Tabla 76

Desglose del indicador población económicamente activa

Población económicamente activa				
Indicador	Formula	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
PEA	$\%PEA = \frac{PH2SM}{PEA} \times 100$	18.41 – 34.50	Muy baja	1
		34.51 – 50.59	Baja	2
		50.60 – 66.66	Media	3
		66.69 – 82.77	Alta	4
		82.78 o más	Muy Alta	5

Nota: %PEA= Porcentaje de población económicamente activa, PH2SM= Población que percibe hasta 2 salarios mínimos y PEA= población económicamente activa.

Tabla 77

Población de 60 y más

Población de 60 y más			
Indicador	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
Población de 60 y más	0 – 63	Muy baja	1
	64 – 159	Baja	2
	160 – 297	Media	3
	298 – 490	Alta	4
	491 – 1039	Muy Alta	5

Tabla 78

Población de 0 a 14 años

Población de 0 a 14 años			
Indicador	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
Población de 0 a 14 años	0 – 146	Muy baja	1
	147 – 347	Baja	2
	348 – 579	Media	3
	580 – 862	Alta	4
	863 – 1761	Muy Alta	5

Tabla 79
Población femenina

Población femenina			
Indicador	Rango	Condición de vulnerabilidad	Codificación
Población femenina	0 – 259	Muy baja	1
	260 – 622	Baja	2
	623 – 1035	Media	3
	1036 – 1640	Alta	4
	1641 – 2775	Muy Alta	5

Anexo E: Clasificación de la vivienda

A continuación, se presenta la clasificación de la vivienda conforme a lo establecido en el Código de Edificación de Vivienda (2017). De acuerdo con este marco normativo, las tipologías habitacionales se agrupan en vivienda económica, popular y tradicional, categorías que comúnmente se reconocen como vivienda de interés social. Asimismo, se identifican las tipologías de vivienda media, residencial y residencial plus, las cuales se desarrollan, de manera predominante, en conjuntos habitacionales y fraccionamientos.

Tabla 80

Clasificación de la vivienda del Código de Edificación de Vivienda

Promedios	Económica	Popular	Tradicional	Media	Residencial	Residencial Plus
Superficie construida promedio (m ²)	40	50	71	102	156	más de 188
Número de cuartos y cajones de estacionamiento	1 Baño Cocina Área de usos múltiples	1 Baño Cocina Estancia-comedor De 1 a 2 recámaras 1 cajón de estacionamiento	1 y ½ Baños Cocina Estancia-comedor De 2 a 3 recámaras 1 cajón de estacionamiento	2 Baños Cocina Sala Comedor De 2 a 3 recámaras Cuarto de servicio 1 a 2 cajones de estacionamiento	De 3 a 4 baños Cocina Sala Comedor De 3 a 4 recámaras Cuarto de servicio Sala familiar 2 o 3 cajones de estacionamiento	De 3 a 5 baños Cocina Sala Comedor De 3 a más recámaras De 1 a 2 cuartos de servicio Sala familiar Más de 3 cajones de estacionamiento Gimnasio Salón de juegos Jardín

Notas: Los conceptos de vivienda económica, popular y tradicional, son considerados como Vivienda de Interés Social.

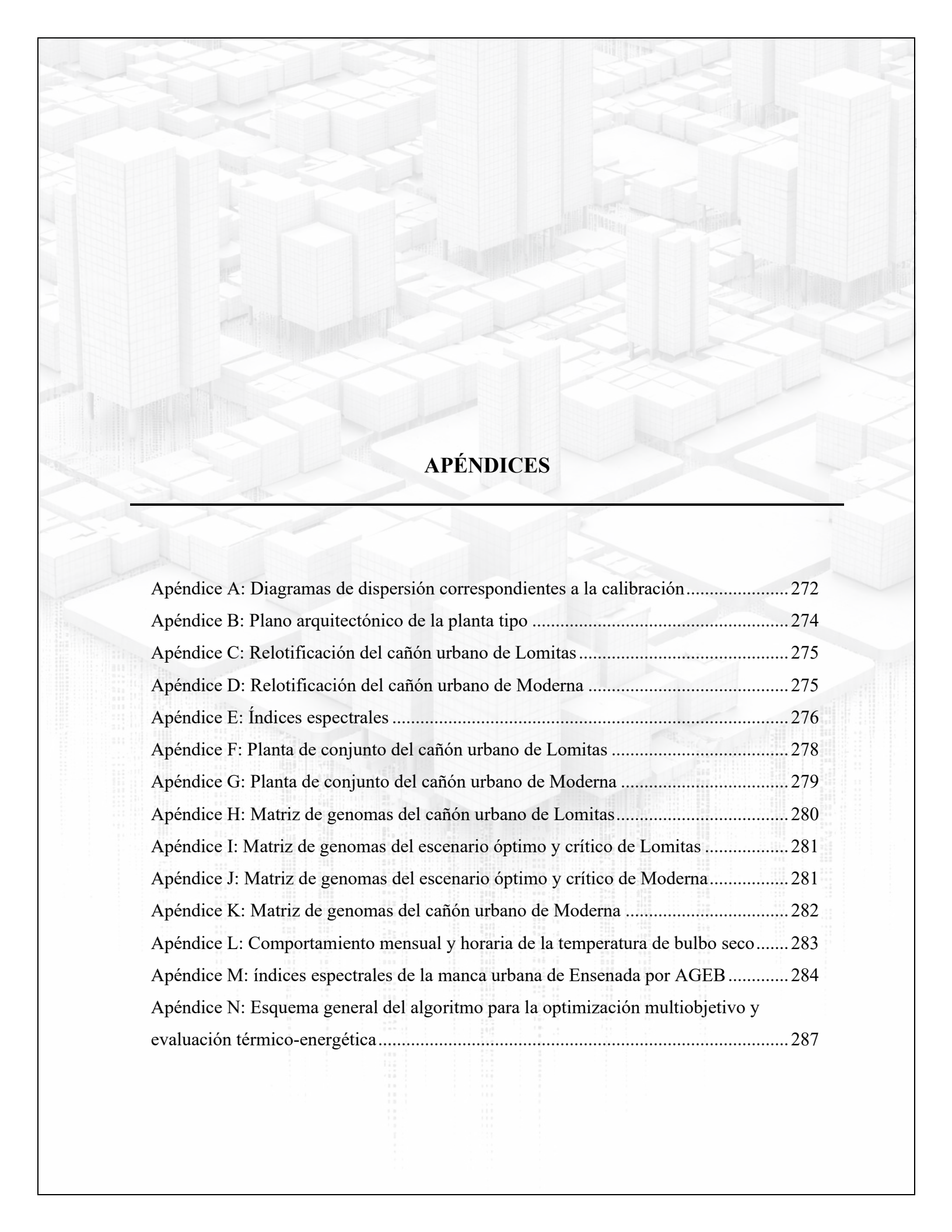
Anexo F: Supuestos de consumos unitarios de combustible SENER

La siguiente tabla resume los supuestos para la estimación de consumos unitarios de combustible de la Secretaría de Energía (SENER) y la Comisión Federal de Electricidad.

Tabla 81

Supuestos de consumos unitarios de combustible

Uso final	Parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Cocción	Tiempo de uso anual	360	h/año	SENER (2011)
Cocción	Consumo promedio estufa GLP	150	kg/vivienda·año	SENER (2011)
Lavado/secado	Potencia promedio secadora	400	W	SENER (2011)
Lavado/secado	Tiempo de uso anual	192	h/año	CFE (2018)
Calentamiento de agua	Consumo calentador GLP	186.7	kg/vivienda·año	SENER (2011)



APÉNDICES

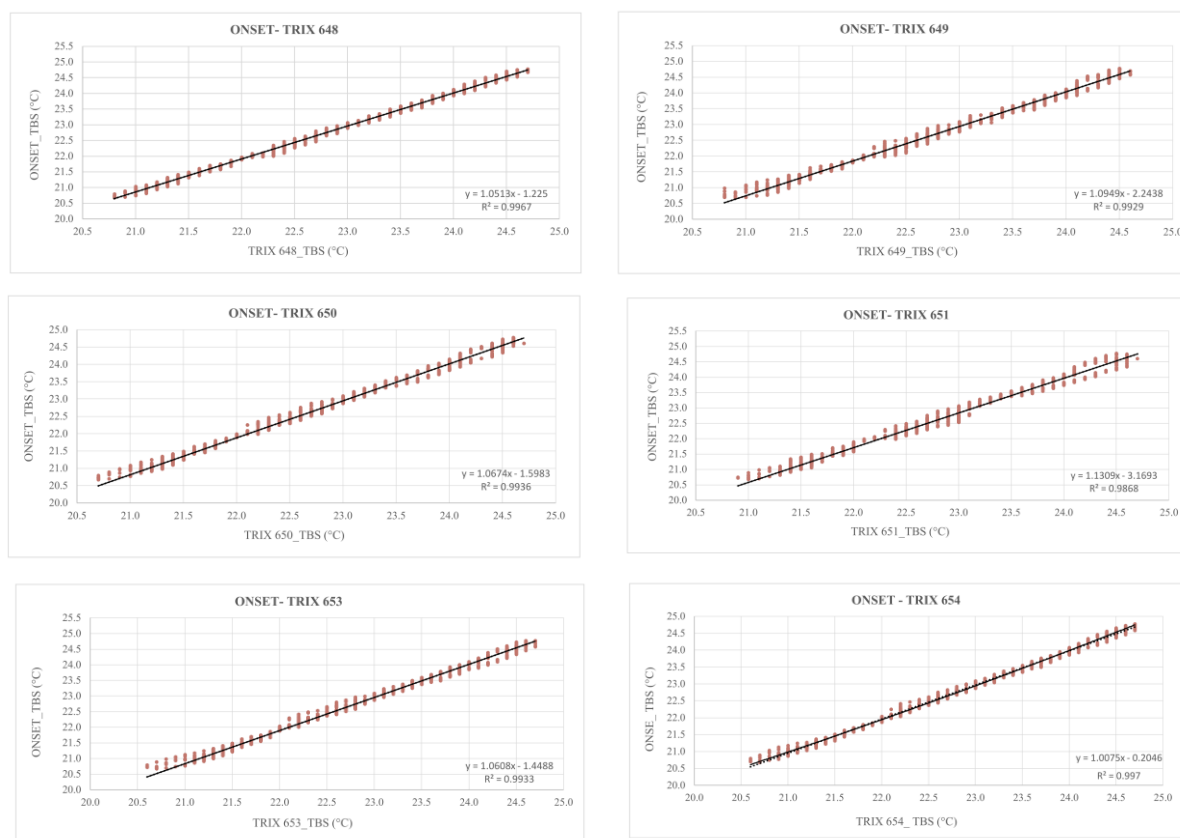
Apéndice A: Diagramas de dispersión correspondientes a la calibración.....	272
Apéndice B: Plano arquitectónico de la planta tipo	274
Apéndice C: Relotificación del cañón urbano de Lomitas	275
Apéndice D: Relotificación del cañón urbano de Moderna	275
Apéndice E: Índices espectrales	276
Apéndice F: Planta de conjunto del cañón urbano de Lomitas	278
Apéndice G: Planta de conjunto del cañón urbano de Moderna	279
Apéndice H: Matriz de genomas del cañón urbano de Lomitas.....	280
Apéndice I: Matriz de genomas del escenario óptimo y crítico de Lomitas	281
Apéndice J: Matriz de genomas del escenario óptimo y crítico de Moderna.....	281
Apéndice K: Matriz de genomas del cañón urbano de Moderna	282
Apéndice L: Comportamiento mensual y horaria de la temperatura de bulbo seco.....	283
Apéndice M: índices espectrales de la manca urbana de Ensenada por AGEB.....	284
Apéndice N: Esquema general del algoritmo para la optimización multiobjetivo y evaluación térmico-energética.....	287

Apéndice A: Diagramas de dispersión correspondientes a la calibración

A continuación, en la Figura 93 se presentan los diagramas de dispersión correspondientes a cada uno de los sensores y estaciones calibradas, junto con sus respectivas líneas de tendencia y ecuaciones de ajuste lineal. En general, los sensores Trix-16 muestran una correlación lineal muy alta entre sus registros y los valores de referencia del sensor Hobo Onset, con coeficientes de correlación (r) superiores a 0,9, con excepción de dos sensores, cuyos valores de R^2 se encuentran entre 0,8 y 0,9, lo que aún indica una correlación alta. Por su parte, la estación meteorológica Acurite presenta también una correlación alta con respecto a la estación Davis, utilizada como referencia, al registrar un coeficiente de determinación comprendido entre 0,8 y 0,9 (véase Figura 94). Estos resultados evidencian una correspondencia adecuada en las mediciones de temperatura obtenidas por los distintos dispositivos, lo que respalda la fiabilidad del procedimiento de calibración aplicado y garantiza la validez de los datos empleados en la campaña de monitoreo.

Figura 93

Diagramas de dispersión correspondiente a la calibración de sensores de temperatura



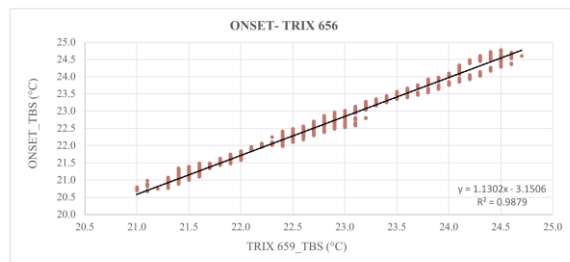
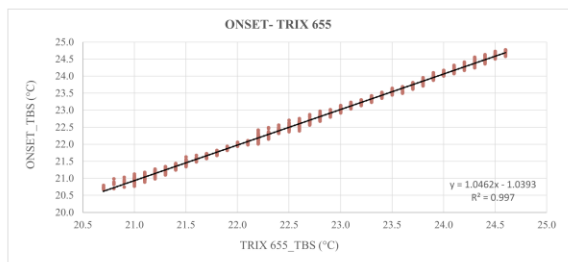
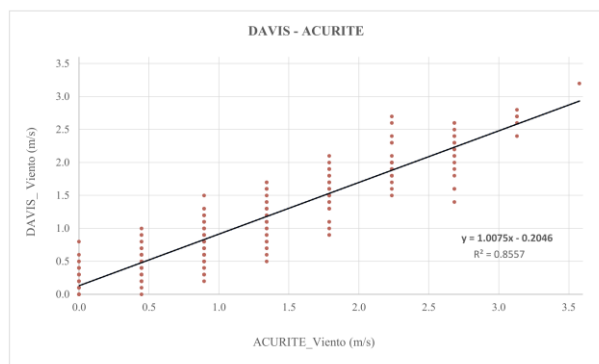
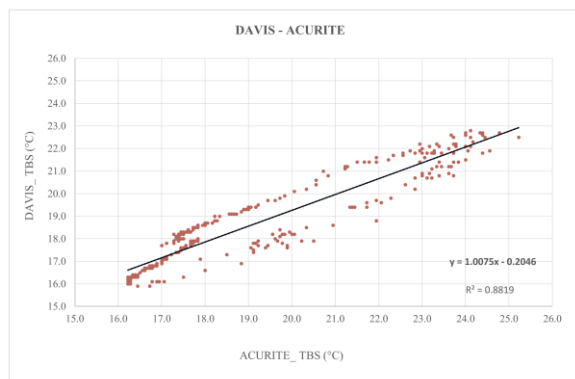


Figura 94

Diagramas de dispersión correspondiente a la calibración de la estación



Apéndice B: Plano arquitectónico de la planta tipo

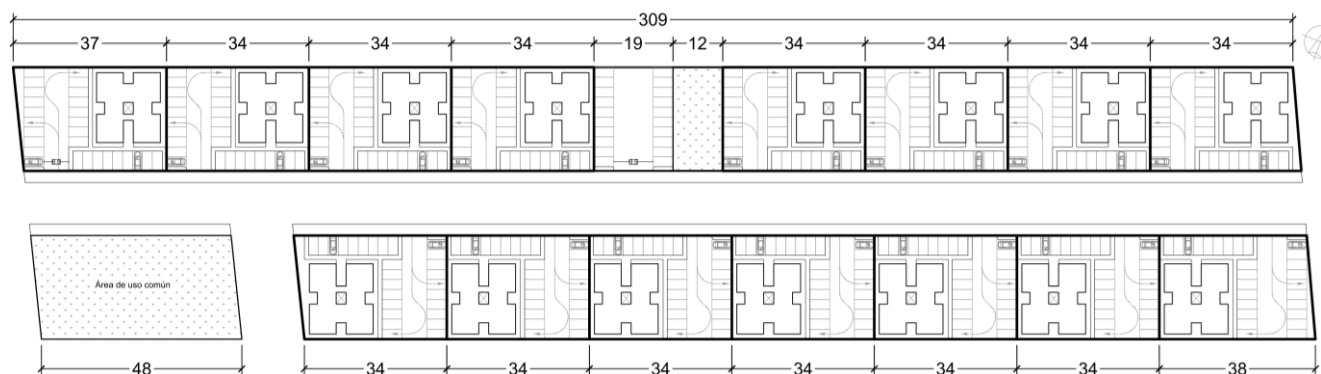
Figura 95
Plano arquitectónico de la planta tipo



Apéndice C: Relotificación del cañón urbano de Lomitas

Figura 96

Planta de conjunto de la relotificación del cañón urbano de Lomitas



Apéndice D: Relotificación del cañón urbano de Moderna

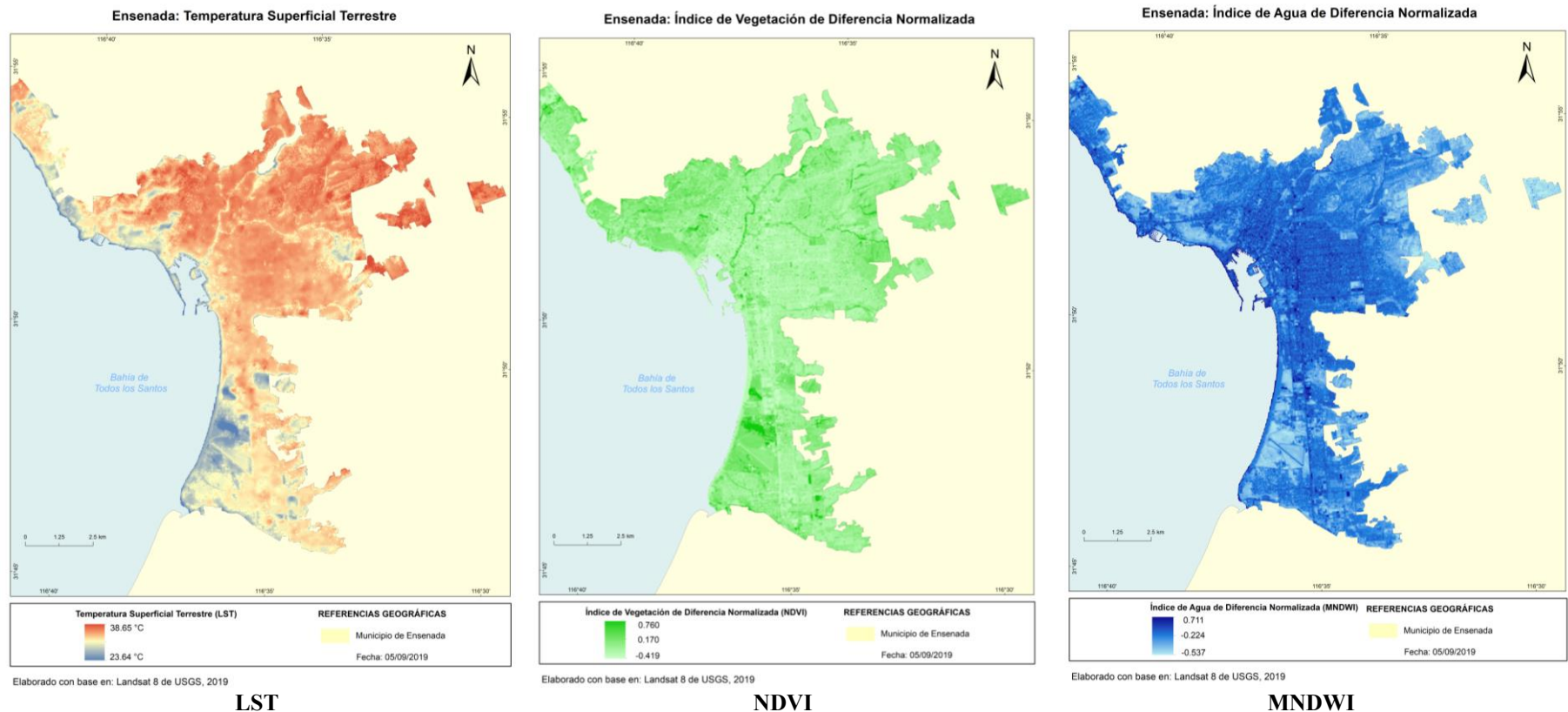
Figura 97

Planta de conjunto de la relotificación del cañón urbano de Moderna



Apéndice E: Índices espectrales

Figura 98
Índices espectrales de la mancha urbana de Ensenada



LST

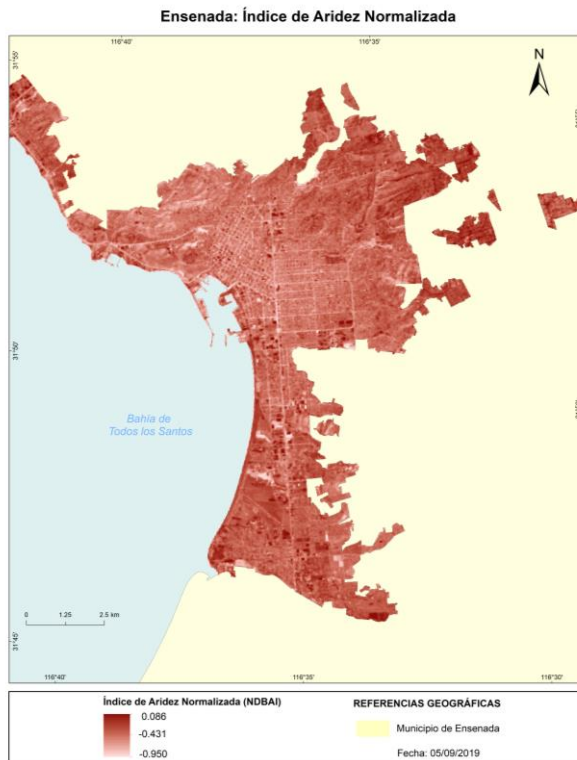
Los valores de LST varían en función de la hora, el día, la cubierta del suelo y las condiciones meteorológicas. Valores altos indican superficies calientes, mientras que valores bajos se asocian con zonas vegetadas o cuerpos de agua.

NDVI

Este índice se utiliza para evaluar la densidad de vegetación. El NDVI varía de -1 a 1. Valores negativos suelen indicar agua. Valores cercanos a cero indican suelo desnudo o áreas sin vegetación. Valores positivos (entre 0,2 y 0,8) indican vegetación.

MNDWI

Se emplea para identificar y monitorear cuerpos de agua y el contenido de agua en la vegetación. El MNDWI varía de -1 a 1. Valores positivos indican la presencia de agua. Valores negativos suelen representar áreas sin agua.

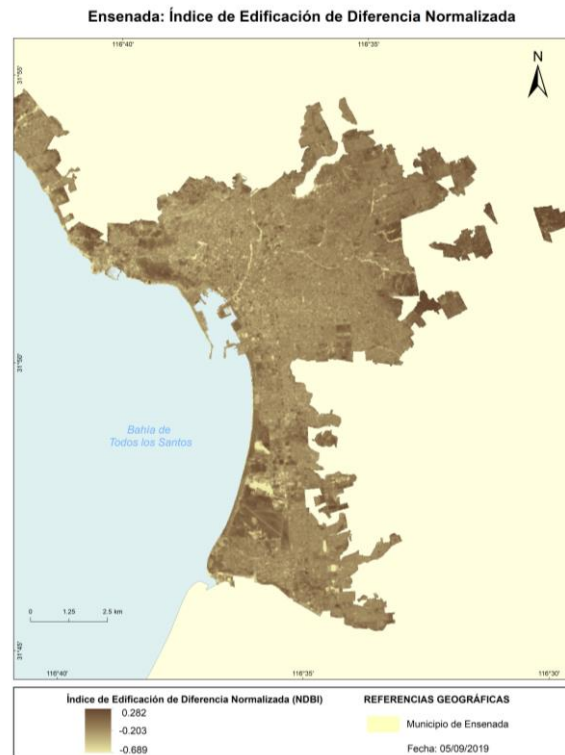


Elaborado con base en: Landsat 8 de USGS, 2019

NDBAI

Este índice se utiliza para identificar y cuantificar áreas de suelo sin cobertura vegetal.

- Los valores más altos indican áreas con más suelo desnudo.
- Valores más bajos sugieren la presencia de vegetación o agua.

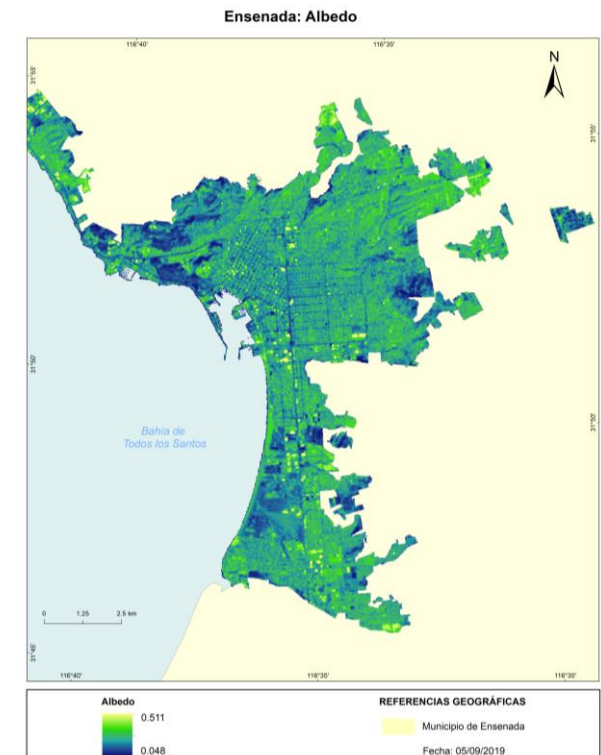


Elaborado con base en: Landsat 8 de USGS, 2019

NDBI

Se emplea para identificar áreas urbanas o edificadas en imágenes satelitales.

- Valores positivos de NDBI indican áreas edificadas.
- Valores negativos suelen representar áreas vegetadas o cuerpos de agua.



Elaborado con base en: Landsat 8 de USGS, 2019

Albedo

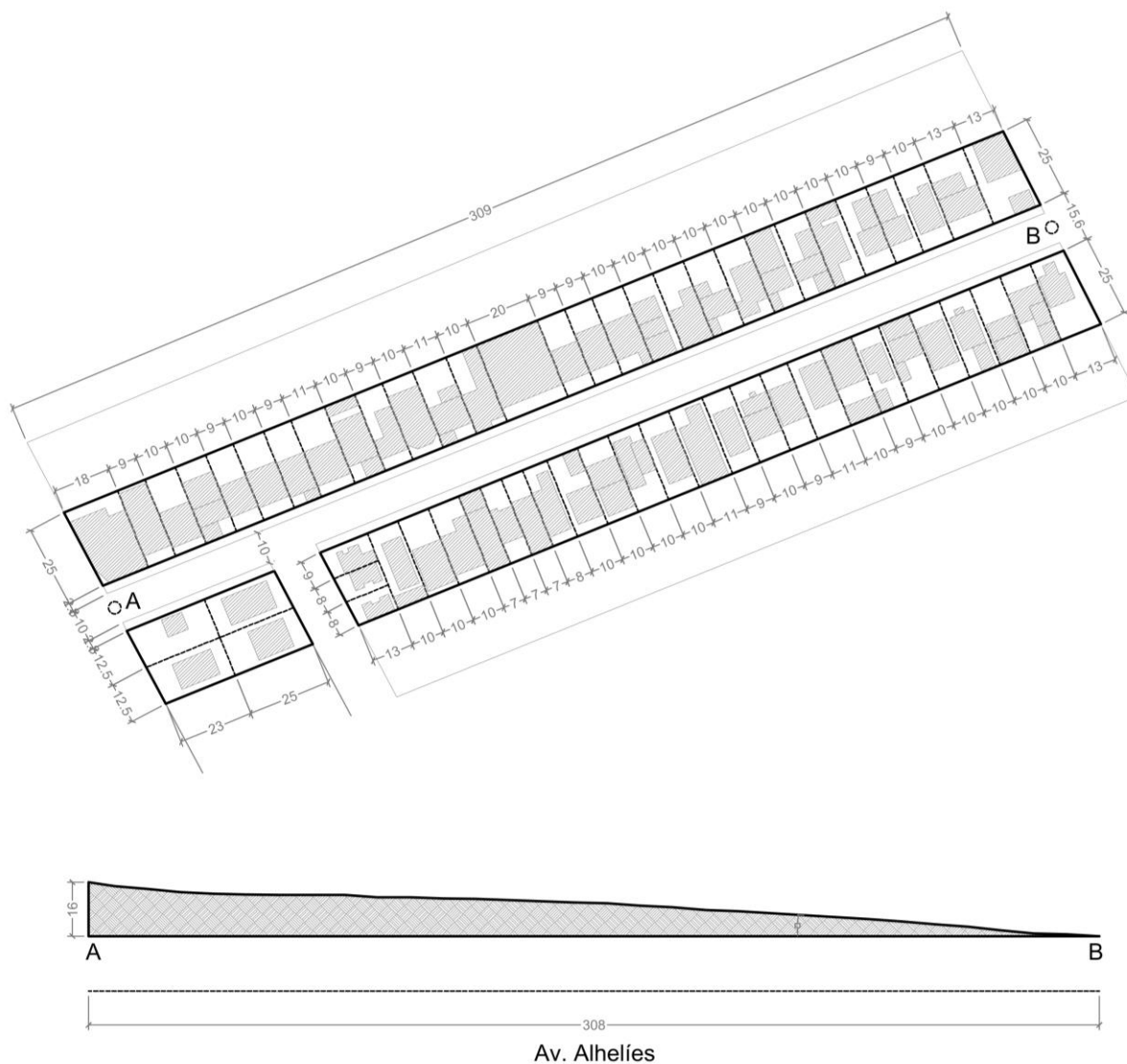
Representa la fracción de radiación solar reflejada por una superficie. Es importante para estudios climáticos y energéticos, ya que influye en la temperatura de la superficie y el balance energético de la Tierra. El albedo varía entre 0 (absorción total de radiación) y 1 (reflexión total).

Apéndice F: Planta de conjunto del cañón urbano de Lomitas

El cañón presenta una orientación oeste–este, con una desviación de 22 ° hacia el norte. Su configuración espacial se compone de una vialidad con un ancho promedio de 10 metros, delimitado por banquetas que suman un total de 5,6 metros, lo que da como resultado un ancho total promedio de 15,6 metros. La longitud aproximada del cañón es de 308 metros. Los lotes colindantes presentan una profundidad uniforme de 25 metros, mientras que el ancho varía entre 7 y 20 metros, siendo el valor más frecuente de 10 metros. La vialidad presenta una pendiente del 4 % (Figura 99).

Figura 99

Planta de conjunto y perfil del cañón urbano de Lomitas

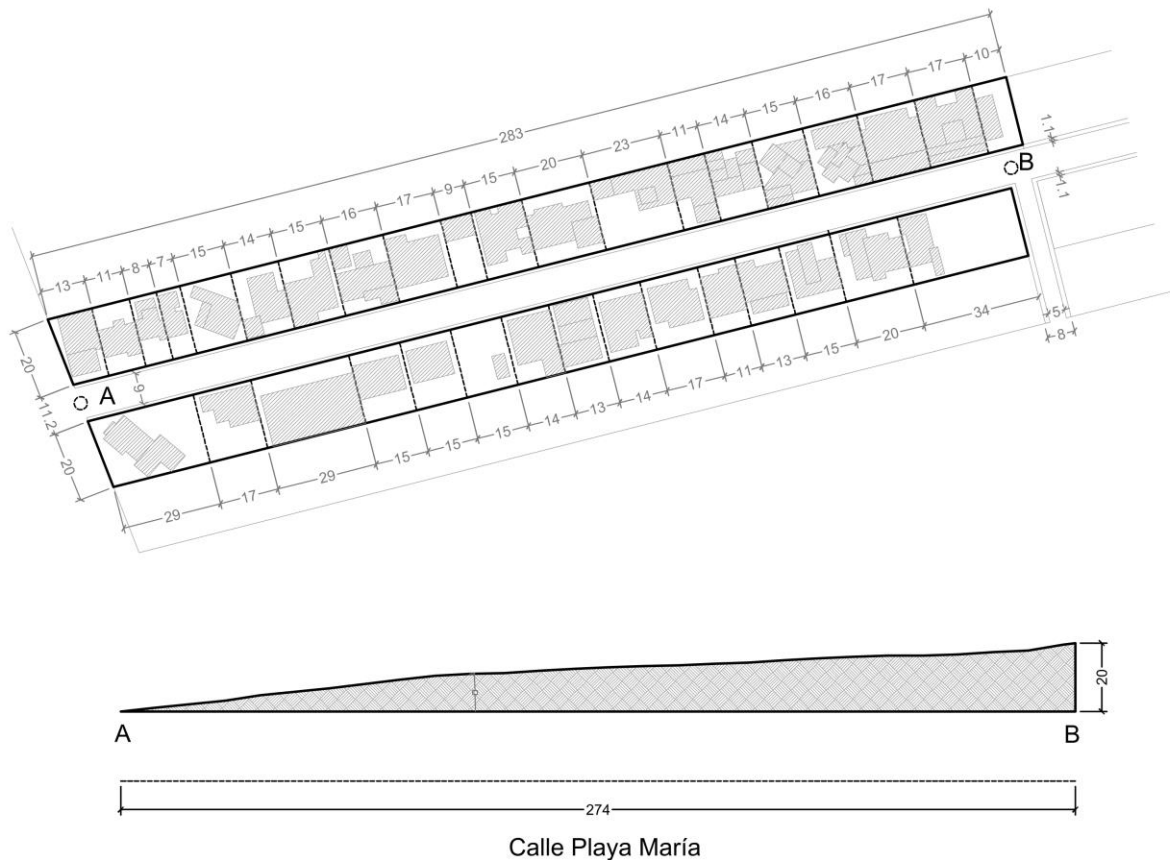


Apéndice G: Planta de conjunto del cañón urbano de Moderna

El cañón presenta una orientación oeste–este, con una desviación de 14° hacia el norte. Su configuración espacial se compone de una vialidad con un ancho promedio de 9 metros, delimitado por banquetas que suman un total de 1,10 metros, lo que da como resultado un ancho total promedio de 11,2 metros. La longitud aproximada del cañón es de 273 metros. Los lotes colindantes presentan una profundidad uniforme de 20 metros, mientras que el ancho varía entre 7 y 20 metros, siendo el valor más frecuente de 10 metros. La vialidad presenta una pendiente del 4 % (Figura 100).

Figura 100

Planta de conjunto y perfil del cañón urbano de Moderna

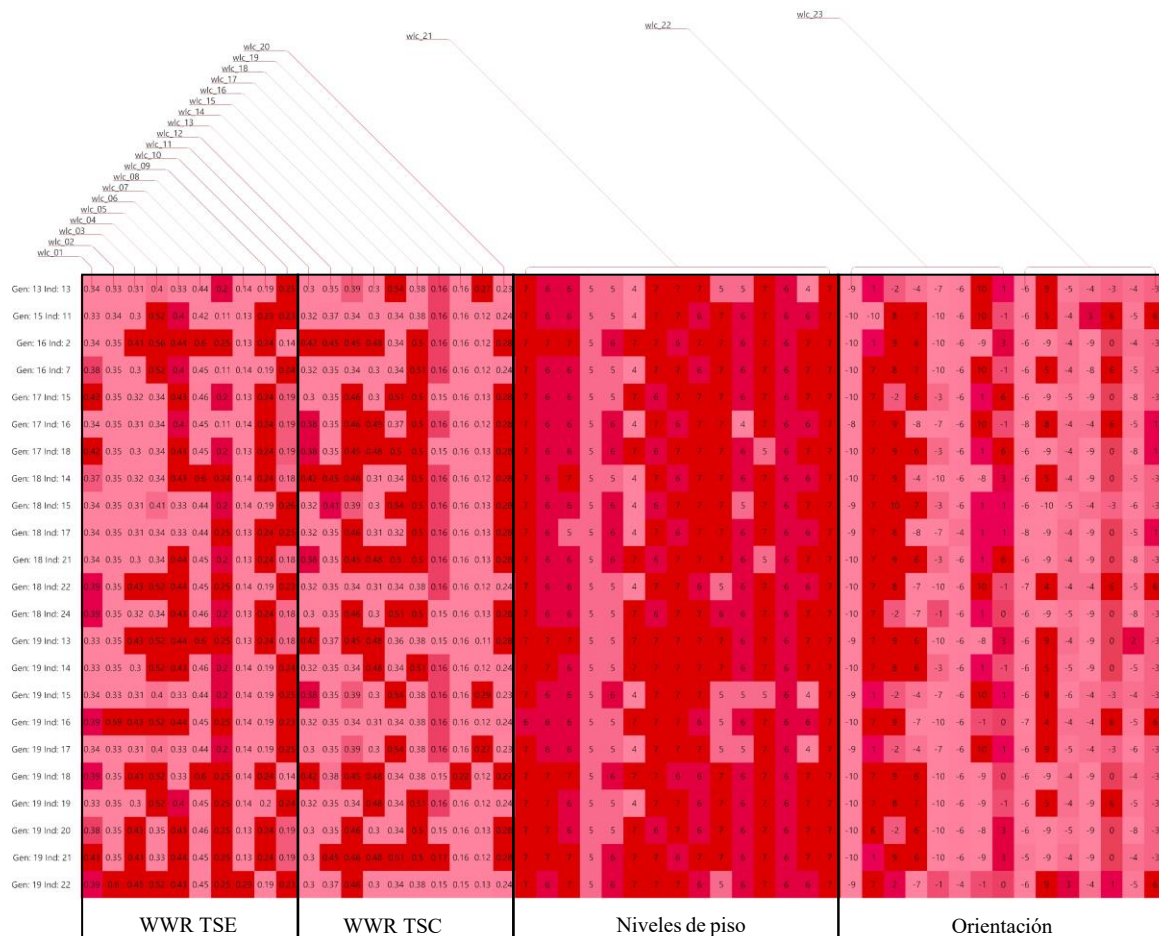


Apéndice H: Matriz de genomas del cañón urbano de Lomitas

A continuación, se presenta la matriz correspondiente a las soluciones del frente de Pareto del cañón urbano Lomitas. Cada fila representa una solución no dominada y cada columna una variable de decisión del modelo de optimización.

Figura 101

Matriz de genomas del frente de Pareto del cañón urbano de Lomitas

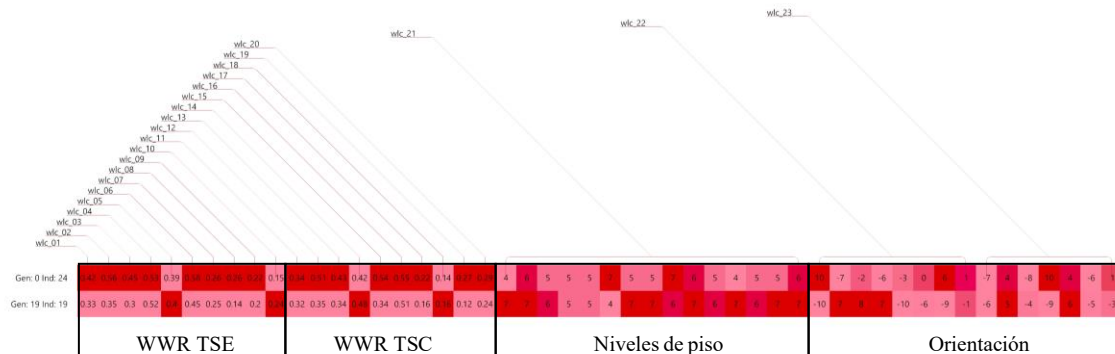


Apéndice I: Matriz de genomas del escenario óptimo y crítico del cañón urbano de Lomitas

A continuación, se presenta la matriz correspondiente al escenario crítico (Gen 0, ind. 24) y del escenario óptimo (Gen 19, Ind. 19) del cañón urbano de Lomitas, derivado del proceso de optimización multiobjetivo.

Figura 102

Matriz de genomas del escenario óptimo y crítico del cañón urbano de Lomitas

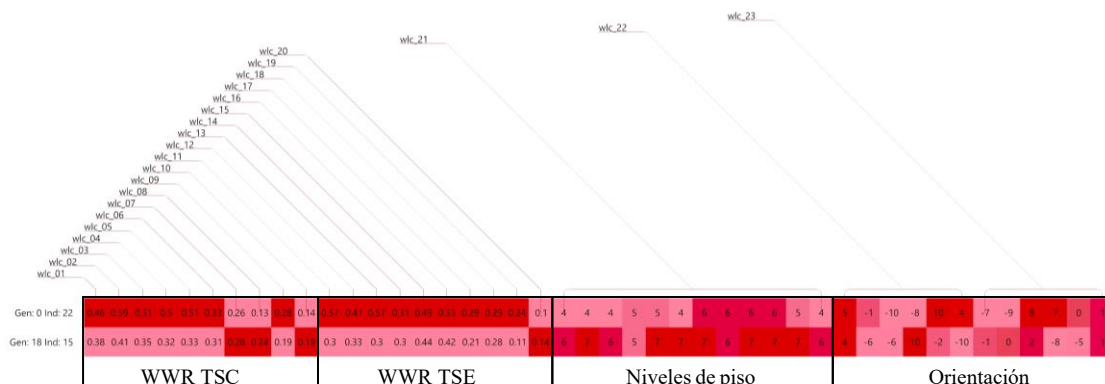


Apéndice J: Matriz de genomas del escenario óptimo y crítico del cañón urbano de Moderna

A continuación, se presenta la matriz correspondiente al escenario crítico (Gen 0, ind. 22) y del escenario óptimo (Gen 18, Ind. 15) del cañón urbano de Moderna, derivado del proceso de optimización multiobjetivo.

Figura 103

Matriz de genomas del escenario óptimo y crítico del cañón urbano de Moderna

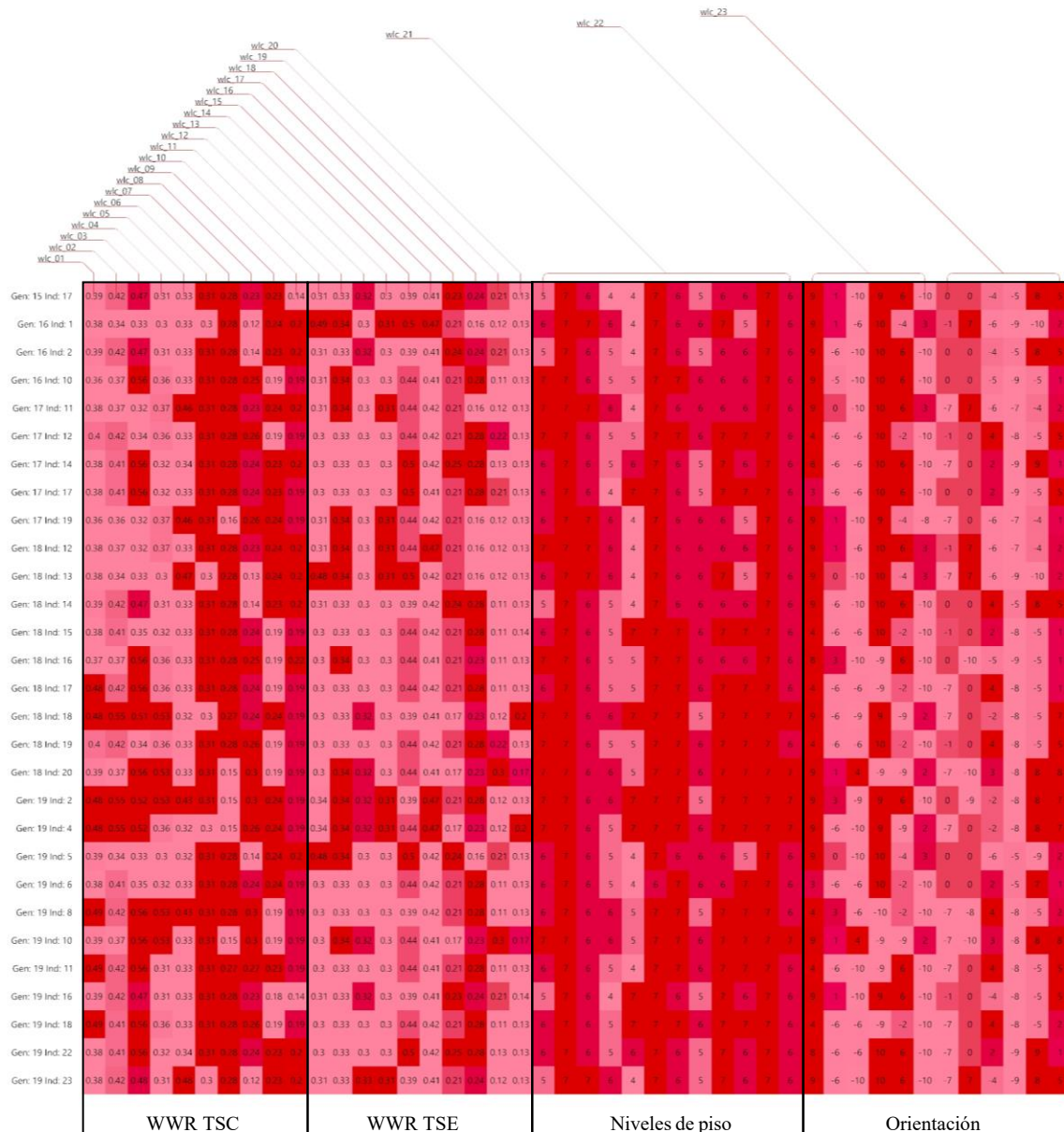


Apéndice K: Matriz de genomas del cañón urbano de Moderna

A continuación, se presenta la matriz correspondiente a las soluciones del frente de Pareto del cañón urbano Moderna. Cada fila representa una solución no dominada y cada columna una variable de decisión del modelo de optimización.

Figura 104

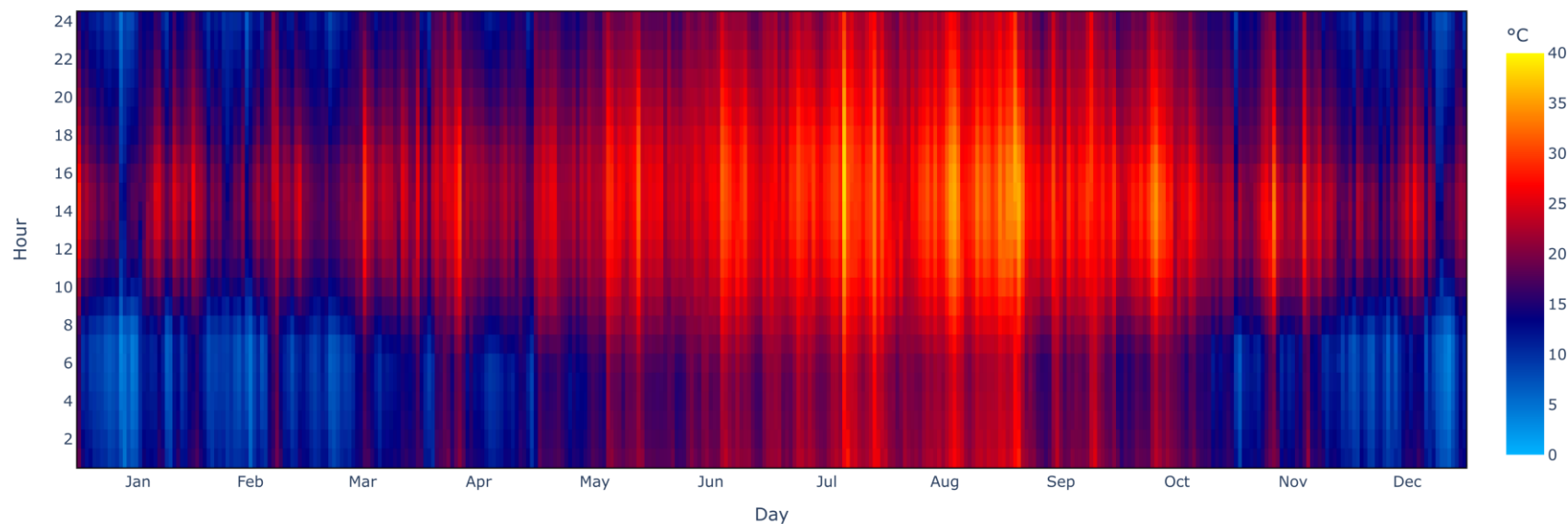
Matriz de genomas del frente de Pareto del cañón urbano de Moderna



Apéndice L: Comportamiento mensual y horario de la temperatura de bulbo seco

Figura 105

Comportamiento mensual y horario de la temperatura de bulbo seco

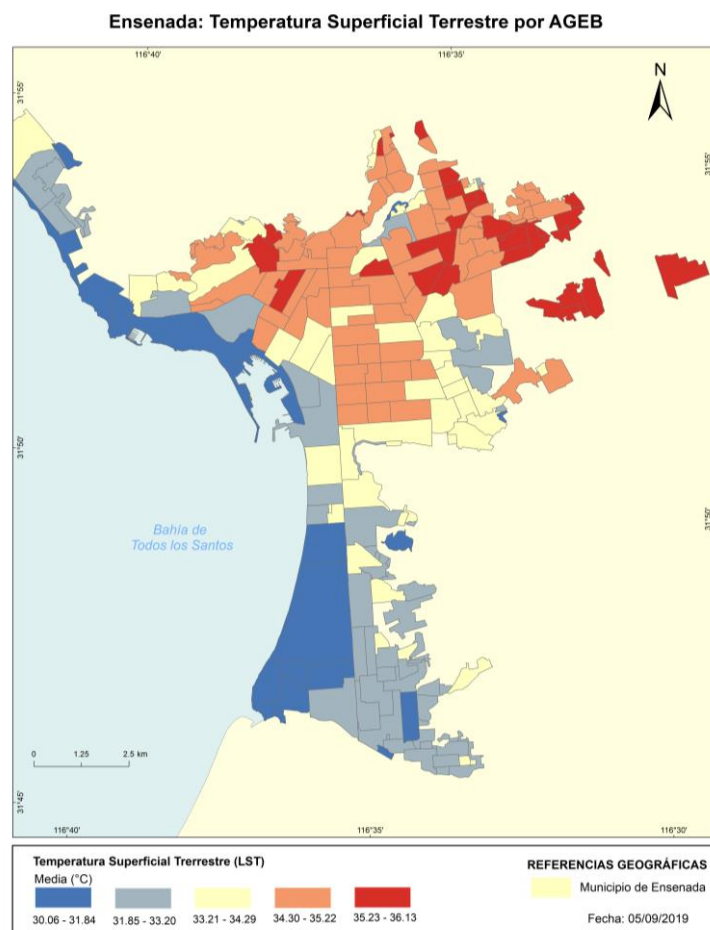


Nota. Obtenido *CBE Clima Tool*: una aplicación web gratuita y de código abierto para análisis climático adaptado al diseño de edificios sostenibles. Versión 0.8.12. Por Betti G., Tartarini F., Nguyen C., Schiavon S. (2022). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2212.04609>. Fecha de acceso 03/12/2023

Apéndice M: índices espectrales de la mancha urbana de Ensenada por AGEB

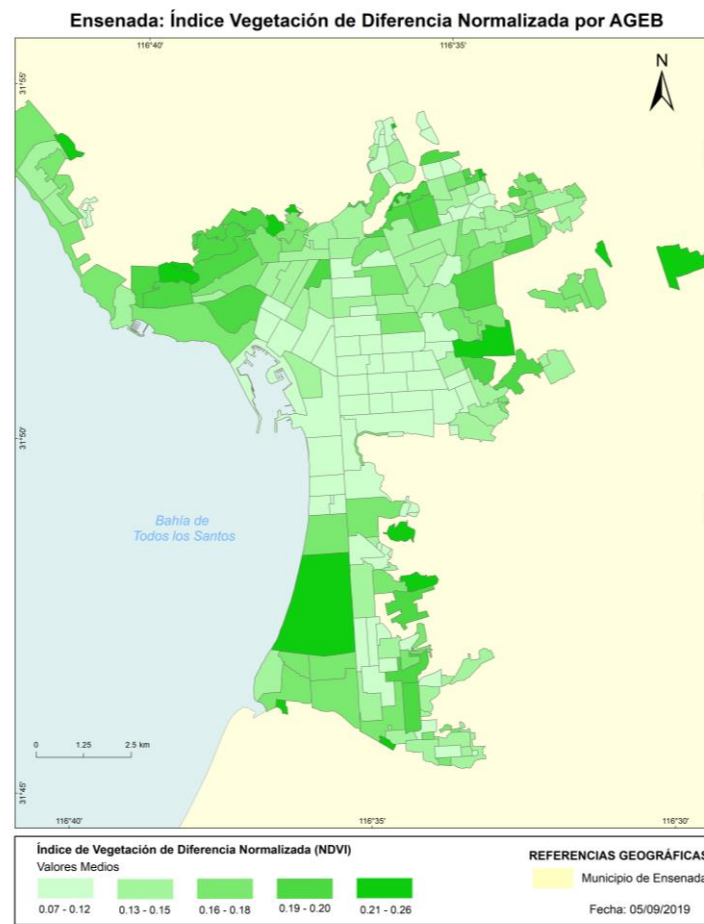
Figura 106

Índices espectrales de la mancha urbana de Ensenada por AGEB



Elaborado con base en: Landsat 8 de USGS, 2019

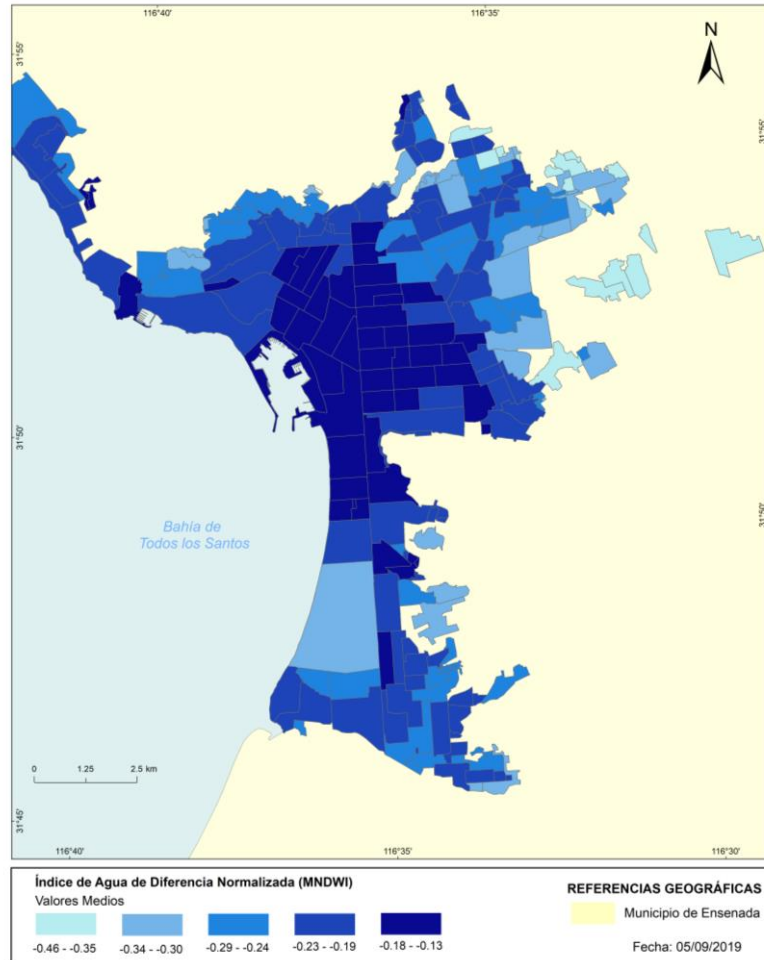
(a) LST



Elaborado con base en: Landsat 8 de USGS, 2019

(b) NDVI

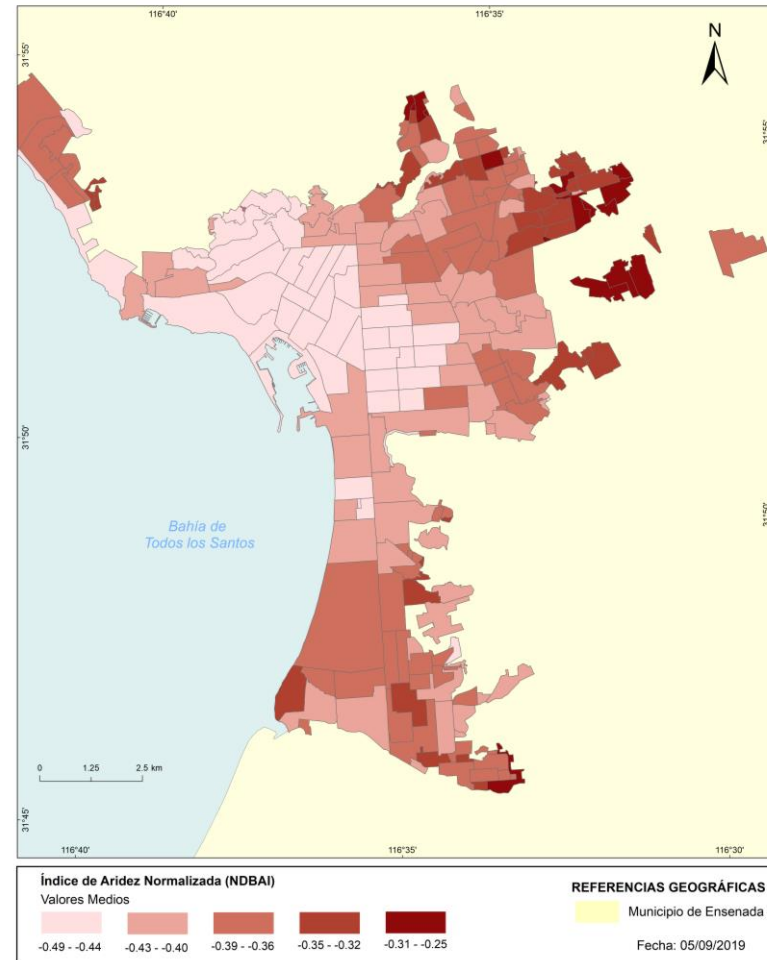
Ensenada: Índice de Agua de Diferencia Normalizada por AGEB



Elaborado con base en: Landsat 8 de USGS, 2019

(c) MNDWI

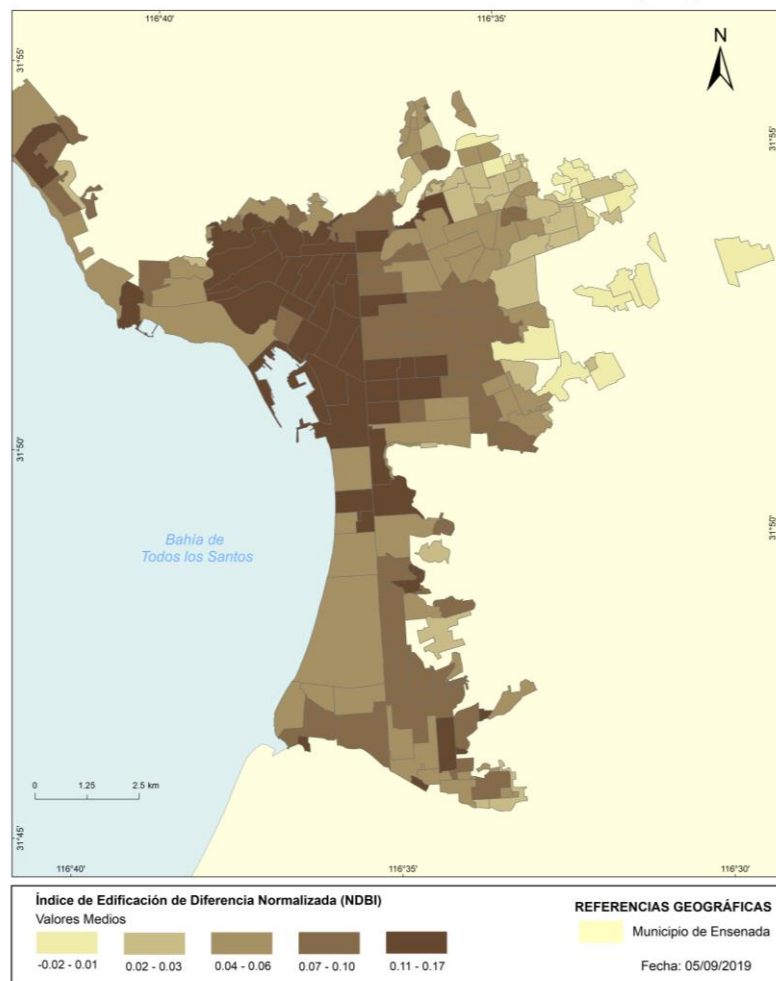
Ensenada: Índice de Aridez Normalizada por AGEB



Elaborado con base en: Landsat 8 de USGS, 2019

(d) NDBAI

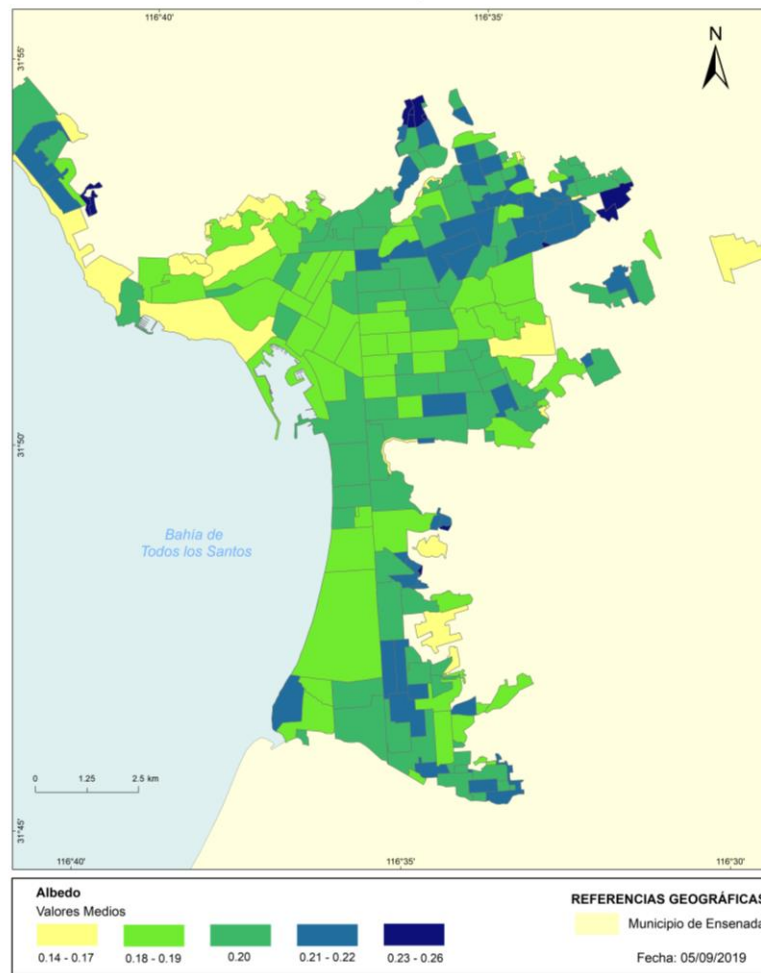
Ensenada: Índice de Edificación de Diferencia Normalizada (NDBI)



Elaborado con base en: Landsat 8 de USGS, 2019

(e) NDBI

Ensenada: Albedo por AGEB



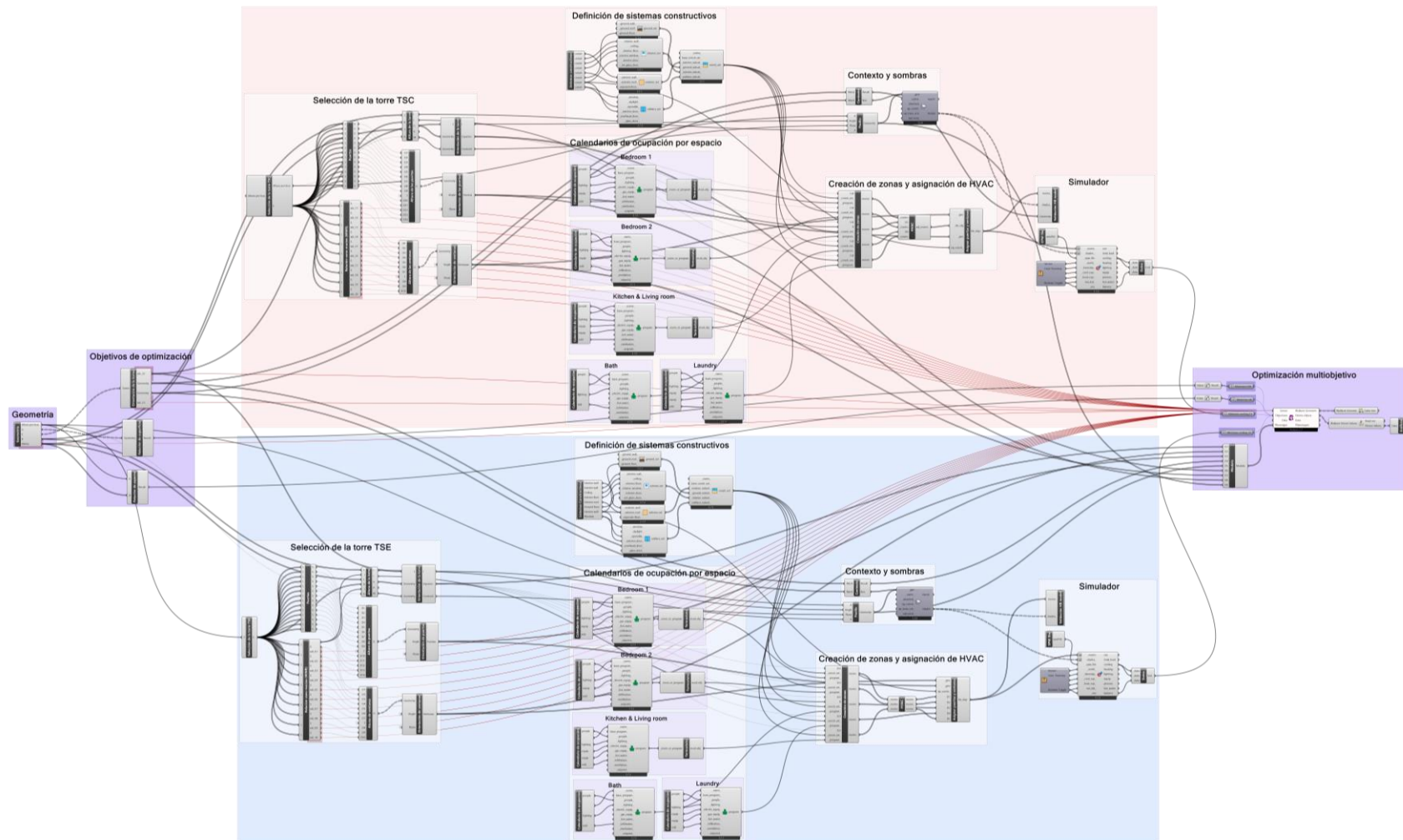
Elaborado con base en: Landsat 8 de USGS, 2019

(f) Albedo

Apéndice N: Esquema general del algoritmo para la optimización multiobjetivo y evaluación térmico-energética

Figura 107

Esquema general del algoritmo para la optimización multiobjetivo y evaluación térmico-energética





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO



ARQUITECTURA
URBANISMO Y DISEÑO
MAESTRÍA Y DOCTORADO
"Investigación de frontera en diseño"

NAYELI MONTSERRAT CASTREJON ESPARZA