

TESIS DOCTORAL

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA  
AMBIENTAL. EL CASO DE HERMOSILLO (MÉXICO)**

AUTOR: CARLOS FERNANDO LÓPEZ ORDÓÑEZ

DIRECTORES: DRA. ISABEL CRESPO CABILLO – DR. JAUME ROSET CALZADA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN ARQUITECTURA ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE  
ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE BARCELONA – OCT 2020  
**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA (UPC)**



## Agradecimientos

*A mi madre y mi hermana, gracias por todo, siempre.*

*A mis directores de tesis, Isabel Crespo y Jaume Roset, gracias por su guía y valiosos consejos durante este proceso. ¡Lo logramos!*

*A Helena Coch, gracias por haberme dado la oportunidad de formar parte de la familia AiEM y por haber compartido su experiencia, conocimiento y amistad.*

*A mis compañeros del grupo de investigación AiEM, por haber sido parte fundamental de esta tesis, y de los que no guardo más que solo buenos momentos. ¡Gracias Toni, Anna, Marta, Carlos, Juanan, Cristina!*

*En este camino me he encontrado con personas de latitudes muy distintas, muchas de éstas se han convertido en grandes amigos: Moritz, Jefferson, Bruno, Gilkauris, Judit, Badia, Eduardo, Mafe, Fidel y Emilia. ¡Gracias!*

*Un especial agradecimiento a Elenita, que apareció a medio recorrido y me ayudó a alcanzar la meta.*

Esta tesis ha sido financiada por el Consejo Nacional de la Ciencia y Tecnología – CONACYT a través de la beca de la convocatoria CONACYT – SENER Sustentabilidad Energética 2015-2016 Cuarto Periodo otorgada al CVU 469347.



## RESUMEN

Para el año 2050, la población mundial se habrá duplicado y será mayoritariamente urbana. Esta perspectiva genera la necesidad de pensar el presente y el futuro de las ciudades, especialmente de las localizadas en latitudes medias, donde se acumula una gran parte de esa población. Muchas de estas ciudades se encuentran en regiones con climas semiárido-cálido y cálido-seco.

Tradicionalmente, las ciudades del desierto eran diseñadas con formas compactas en respuesta a diversos factores climáticos. En la actualidad, estas ciudades han adoptado el modelo de ciudad dispersa, impulsadas por el uso del automóvil, la aparición de sistemas de refrigeración y una constante bajada en los costos de la energía. Esta forma de crecimiento plantea una serie de problemas desde un punto de vista ambiental: poca habitabilidad del espacio público, grandes distancias, elevado consumo de suelo, una alta demanda de refrigeración.

El objetivo de esta tesis es evaluar las repercusiones energéticas del aumento de la densidad urbana en ciudades poco densas y dispersas con clima cálido-seco de la región noroeste de México. Se toma como caso de estudio la ciudad de Hermosillo en Sonora, una ciudad de tamaño medio en expansión. Esta tesis analiza los efectos de la densificación urbana en tres escalas diferentes: de ciudad, de barrio y de edificio.

Con base a un análisis cartográfico **a escala de ciudad**, esta tesis muestra que Hermosillo presenta un patrón disperso de crecimiento de baja densidad con dos características principales: baja centralidad y alta fragmentación. La baja centralidad se debe a la pérdida de peso poblacional y económico del centro urbano en favor de la periferia. La fragmentación urbana, a la existencia de un gran número de lotes baldíos (35% del área urbana). Por lo tanto, se identifican dos estrategias urbanas a seguir para desacelerar el crecimiento de la mancha urbana: el *infill* de lotes baldíos y la densificación de tejidos existentes (apilamiento) para la creación de subcentros de alta densidad.

**A escala de barrio**, se selecciona el centro histórico de Hermosillo para analizar el impacto de la densificación de un tejido urbano existente sobre la habitabilidad del espacio urbano. Actualmente, este tejido presenta un alto potencial peatonal, pero baja densidad poblacional y edificatoria, y elevados índices de radiación solar. En esta tesis se ha replanteado el área de estudio a través de un proceso de densificación, mediante el lote de uso mixto y el apilamiento de viviendas. Se muestra que, respetando la normativa actual, es posible alcanzar valores de densidad edificatoria similares a los de centros urbanos y tejidos de ciudades de morfología compacta. Además, de permitir un aumento en la densidad, permite conseguir calles con una relación de aspecto de alrededor de  $h/w=1$ , una relación que, en esta latitud, permite la creación de «corredores de sombra», espacios protegidos de la radiación.

Por último, se analiza el impacto del apilamiento sobre el comportamiento energético **a escala de edificio** mediante simulaciones térmicas dinámicas. Para ello, se compara el comportamiento térmico de las viviendas en régimen libre y la demanda de refrigeración durante la temporada de calor de viviendas unifamiliares aisladas y las viviendas plurifamiliares en altura. Se concluye que a mayor nivel de apilamiento mejor desempeño térmico y energético. Se muestra además que, en viviendas sin refrigeración, el uso de protección solar en las ventanas logra una mejora ligeramente superior a la del aislamiento térmico.

Por lo tanto, esta tesis permite demostrar que un aumento de la densidad (edificatoria y poblacional) tiene ventajas a diferentes escalas, sobre todo en ciudades de clima cálido-seco. El apilamiento permite la creación de sombra en el espacio público, y al mismo tiempo una mejora en el consumo energético interior de las viviendas refrigeradas.

## ABSTRACT

By 2050, the world's population will have doubled and will be mainly urban. This perspective generates the need to think about the present and the future of cities, especially those located in mid-latitudes, where a large part of that population accumulates. Many of these cities are in regions with hot semi-arid and hot-dry climates.

Traditionally, desert cities were designed in compact shapes in response to various climatic factors. Today, these cities have adopted the dispersed city model, driven by car use, the emergence of cooling systems, and a steady decline in energy costs. This form of growth raises a series of problems from an environmental point of view: poor habitability of the public space, long distances, an elevated land use, high demand for cooling.

The goal of this thesis is to evaluate the energy repercussions of the increase in urban density in dispersed and low-density cities with a hot-dry climate in the northwestern region of Mexico. The city of Hermosillo in Sonora, a medium-sized city in expansion, is taken as a case study. This thesis analyzes the effects of urban densification on three different scales: city, neighborhood, and building.

Based **on a city-scale** cartographic analysis, this thesis shows that Hermosillo presents a dispersed pattern of low-density growth with two main characteristics: low centrality and high fragmentation. The low centrality is due to the loss of population and economic weight of the urban center in favor of the periphery. The urban fragmentation is a result of the existence of a large number of vacant lots (35% of the urban area). Therefore, two urban strategies are identified and could be followed to slow down the growth of the urban area: the infill of vacant lots and the densification of existing fabrics (stacking) for the creation of high-density sub-centers.

The historic center of Hermosillo is selected to carry out the analysis **on a neighborhood scale**. The impact that a densification process of an existing urban fabric has on the habitability of the urban space is assessed. Currently, this fabric has a high pedestrian potential, but low population and building density, and high levels of solar radiation. In this thesis, the study area is rethought through a densification process employing the mixed-use lot and the stacking of houses. It is shown that by following the current regulations is possible to achieve building density values similar to those of urban centers and tissue of cities with compact morphology. Also, by allowing an increase in density allows achieving streets with an aspect ratio of around  $h/w=1$ , a ratio that, at this latitude, permits the creation of "shadow corridors" spaces protected from radiation.

Finally, the impact of stacking on energy performance **at the building scale** is analyzed using dynamic thermal simulations. To this end, this thesis compares the thermal behavior of free-running homes and the energy demand for cooling during the hot season of isolated single-family homes and multi-family homes in height. The conclusion is that the higher the stacking level, the better the thermal and energy performance. Furthermore, this study demonstrates that in homes without refrigeration, the use of solar protection on windows achieves a slightly superior improvement than that of thermal insulation.

Therefore, this thesis allows us to demonstrate that an increase in density (building and population) has advantages at different scales, especially in cities with a hot-desert climate. Stacking allows the creation of shade in the public space and, at the same time, an improvement in the internal energy consumption of refrigerated homes.

# INDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>7</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>13</b>
JUSTIFICACIÓN .....	15
OBJETIVOS .....	21
ESTRUCTURA DE TESIS Y METODOLOGÍA.....	22

## PARTE 1

25

<b>CAPITULO 1: CIUDAD COMPACTA Y CIUDAD DISPERSA</b> .....	<b>27</b>
1.1    EVOLUCIÓN DE LA CIUDAD .....	29
1.1.1 La ciudad compacta histórica en el clima cálido – seco .....	30
1.1.2 La ciudad compacta histórica europea .....	31
1.1.3 Impacto de la revolución industrial: éxodo rural y urbanización .....	32
1.1.4 La ciudad jardín, nace la ciudad dispersa.....	34
1.1.5 El urban sprawl americano – latinoamericano .....	36
1.1.6 La ciudad dispersa en el clima cálido - seco en México .....	39
1.1.7 El concepto actual de ciudad compacta y la ciudad paseable.....	41
1.2    DENSIDAD URBANA .....	43
1.2.1    Evolución del concepto de densidad urbana .....	44
1.2.2    Medidas de densidad urbana .....	46
<b>CAPITULO 2: CLIMA URBANO Y COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA VIVIENDA</b> .....	<b>51</b>
2.1 LA MEJORA DEL CLIMA URBANO EN UNA CIUDAD DEL DESIERTO .....	53
2.1.2 El modelo de cañón urbano: relación de aspecto y orientación .....	55
2.1.3 Trama urbana .....	59
2.2 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA VIVIENDA .....	65
2.2.1 Los efectos positivos de la sombra y la alta reflectancia. ....	65
2.2.2 Discusión sobre los efectos del aislamiento térmico .....	68
2.2.3 Estrategias combinadas .....	70
RESUMEN PARTE I .....	74

**CAPITULO 3: HERMOSILLO: UNA CIUDAD DISPERSA EN CLIMA CÁLIDO - SECO ..... 79**

3.1 EL CLIMA ..... 81

    3.1.1 México ..... 81

    3.1.2 Hermosillo: clima cálido – seco ..... 82

3.2 EVOLUCIÓN URBANA DE HERMOSILLO ..... 87

    3.2.1 Breve historia urbana de Hermosillo ..... 87

    3.2.2 La actualidad urbana de Hermosillo ..... 92

    3.2.3 La vivienda actual en Hermosillo ..... 98

    3.2.4 Espacios vacíos en la ciudad: una ciudad fragmentada..... 101

3.3 DOS ESTRATEGIAS DE CRECIMIENTO URBANO A SEGUIR ..... 103

RESUMEN DE CAPÍTULO ..... 105

**CAPITULO 4: UN NUEVO ENFOQUE EN LA PLANIFICACIÓN DE CIUDADES DE CLIMA CÁLIDO - SECO ..... 107**

4.1 LA CIUDAD A TRAVÉS DE LOS MAPAS ..... 109

4.2 ANÁLISIS DEL CENTRO URBANO, ÁREA DE ESTUDIO ..... 117

    4.2.1 Walkability del área de estudio ..... 119

    4.2.2 Elementos de la ciudad: patrimonio y equipamiento ..... 122

    4.2.3 Análisis de la densidad: poblacional, vivienda y densidad edificatoria..... 124

    4.2.4 Análisis de la incidencia de la radiación solar directa en el espacio público: la calle..... 136

4.3 NUEVO ENFOQUE / CRITERIOS PARA LA REORDENACIÓN DEL CENTRO URBANO DE HERMOSILLO ..... 149

    4.3.1 Normativa vigente ..... 149

    4.3.2 Condiciones de asoleo recomendables para el espacio público ..... 150

    4.3.3 Modelado de un prototipo de reordenación del centro urbano de Hermosillo ..... 153

    4.3.4 Evaluación del comportamiento de la radiación solar en el nuevo espacio público..... 154

    4.3.5 La nueva densidad edificatoria y poblacional tras el replanteamiento del centro urbano .. 166

RESUMEN DE CAPÍTULO ..... 169

<b>CAPITULO 5: REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE REFRIGERACIÓN: LA VIVIENDA EN ALTURA.....</b>	<b>171</b>
5.1 CONSUMO ENERGÉTICO.....	173
5.1.1 México.....	173
5.1.2 Sonora - Hermosillo.....	174
5.2 LA VIVIENDA ACTUAL EN HERMOSILLO.....	176
5.2.1 Características de las viviendas de Hermosillo.....	176
Características espaciales.....	177
Características térmicas.....	180
5.2.2 Distribución cartográfica de las tipologías de vivienda.....	185
5.3 COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR AISLADA.....	187
5.3.1 Comportamiento térmico de la vivienda unifamiliar aislada en régimen libre.....	187
5.3.2 Comportamiento de la demanda de refrigeración en la vivienda unifamiliar aislada.....	193
5.3.3 Distribución de las tipologías de vivienda por demanda energética de refrigeración.....	197
5.3.4 Mejora térmica de una vivienda unifamiliar popular de una planta.....	199
5.4 COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA VIVIENDA PLURIFAMILIAR EN ALTURA.....	207
5.4.1 Comportamiento térmico de la plurifamiliar en altura en régimen libre.....	207
5.4.2 Comportamiento de la demanda de refrigeración en la vivienda plurifamiliar en altura.....	211
5.5 COMPARATIVA DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR AISLADA Y LA VIVIENDA PLURIFAMILIAR EN ALTURA.....	213
5.5.1 Comparativa del comportamiento térmico de la vivienda unifamiliar aislada y la vivienda plurifamiliar en altura en régimen libre.....	213
5.5.2 Comparativa del comportamiento de la demanda de refrigeración de la vivienda unifamiliar aislada y la vivienda plurifamiliar en altura.....	215
RESUMEN DE CAPÍTULO.....	221
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>223</b>
CONCLUSIONES FINALES.....	225
INVESTIGACIONES FUTURAS.....	226
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>227</b>
<b>LISTADO DE MAPAS, TABLAS Y FIGURAS.....</b>	<b>241</b>
<b>ANEXO A4: TABLAS Y MAPAS DE NUEVAS DENSIDADES.....</b>	<b>251</b>
<b>ANEXO A5: VALIDACIÓN DE SIMULACIONES Y RESULTADOS.....</b>	<b>263</b>



## **INTRODUCCIÓN**

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

## JUSTIFICACIÓN

En las últimas décadas, las ciudades se han convertido en el principal escenario en el cual se desarrolla la cotidianidad de la mayoría de las personas. Actualmente el 55% de la población mundial vive en ciudades. De acuerdo a Naciones Unidas (United Nations, 2019), para el año 2050 se prevé una población mundial de casi el doble y que la población urbana pase de 55% a 68%.

La región de América Latina y el Caribe, es una de las más urbanizadas del mundo. Actualmente, el 81% de su población habita en áreas urbanas, frente al 74% en Europa, 68% en Oceanía, el 50% en Asia y un 43% en África (**Figura I.1**). Este alto nivel de urbanización es resultado del acelerado ritmo de crecimiento experimentado por las ciudades latinoamericanas desde mediados del siglo XX. En 1950, alrededor del 40% de su población era urbana; en 1990, se había llegado a un 70%. De acuerdo a UN-Hábitat, para el año 2050 su población urbana será casi el 90% (United Nations, 2017; United Nations, 2019).

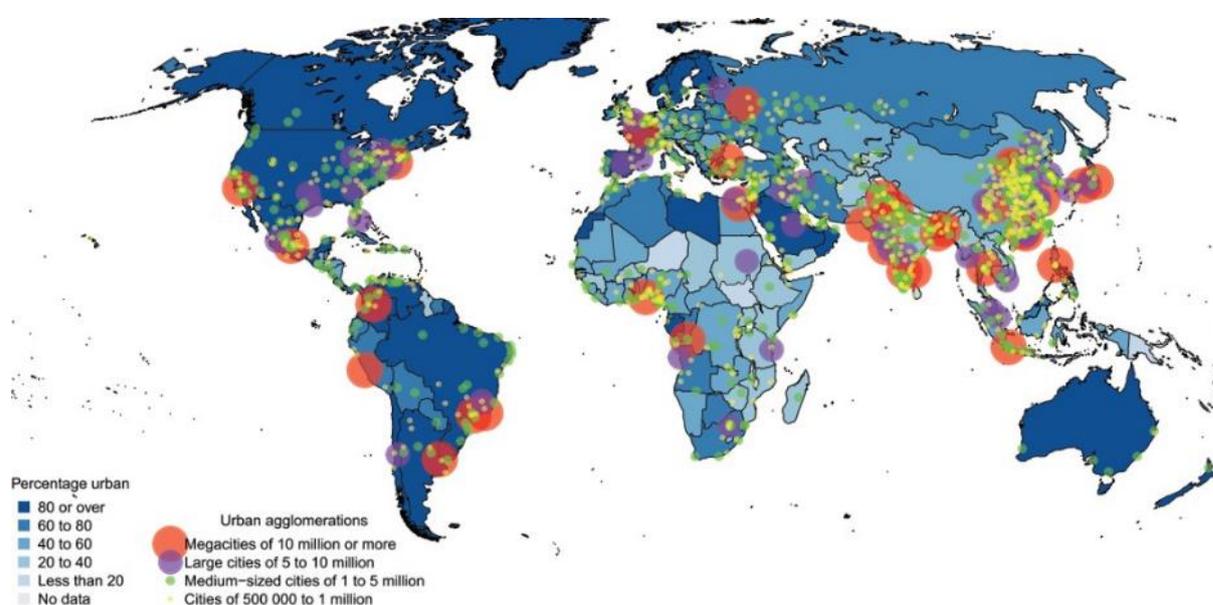


Figura I.1. Porcentaje de urbanización y aglomeraciones urbanas de 500.000 o más hab. (United Nations, 2019b).

En 1950, México ya era el segundo país más poblado de la región con 28 millones de habitantes, de los cuales el 43% vivía en asentamientos urbanos (United Nations, 2019). En el 2018, México alcanzó los 131 millones de habitantes y un 80% de población urbana (World Bank, 2020b). Es decir, actualmente, las ciudades mexicanas concentran más de 100 millones de personas.

De esta manera, la urbanización se convertirá en una de las tendencias más transformativas del siglo XXI. La población, actividades económicas, interacciones sociales y culturales, así como un aumento en el impacto ambiental, concentrados cada vez más en las ciudades, plantean enormes desafíos de sostenibilidad en términos de vivienda, infraestructura, servicios básicos, seguridad y recursos naturales, entre otros (United Nations, 2017a).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

Actualmente, un tercio de la población mundial vive en zonas clasificadas como *drylands* (tierras secas), caracterizadas por la escasez de agua. Éstas ocupan el 41% de la superficie continental y continúan extendiéndose debido a un constante proceso de desertificación. Si bien, están presentes en todos los continentes, aproximadamente tres cuartos de las *drylands* se concentran en países en vías de desarrollo (**Figura 1.2**). A su vez, el 100% de las tierras secas consideradas híper – áridas (desiertos) están localizadas en estos países y concentran una población superior a 100 millones de habitantes. Las condiciones extremas de climas desérticos plantean una serie de retos desde el punto de vista urbano y de desarrollo social.

Dentro de las *drylands*, entre las latitudes 20° y 33° tanto norte como sur, se encuentran las regiones con clima semiárido–cálido (BSh) y cálido–seco (BWh) (de acuerdo a la clasificación climática de Köppen (Peel, Finlayson, & McMahon, 2007)). Una gran cantidad de ciudades están en estas zonas y concentran una gran parte de la población mundial (Safriel et al., 2005). Son ejemplos de estas ciudades: Alice Springs en Oceanía; Almería y Las Palmas en Europa; Bagdad, Karachi, Doha, La Meca, Riad, Kuwait, Dubái en Asia; El Cairo, Alejandría o Jartum en África; Phoenix, Tucson, Las Vegas, en Norte América; Iquique y Lima en Sudamérica, por mencionar algunas. En el caso de México: Hermosillo, Ciudad Obregón, Mexicali, La Paz, Torreón, Saltillo, Monterrey, Aguascalientes, Santiago de Querétaro, Tijuana, Culiacán y Chihuahua, que concentran más de 16 millones de habitantes, una población similar a la de países como Senegal.

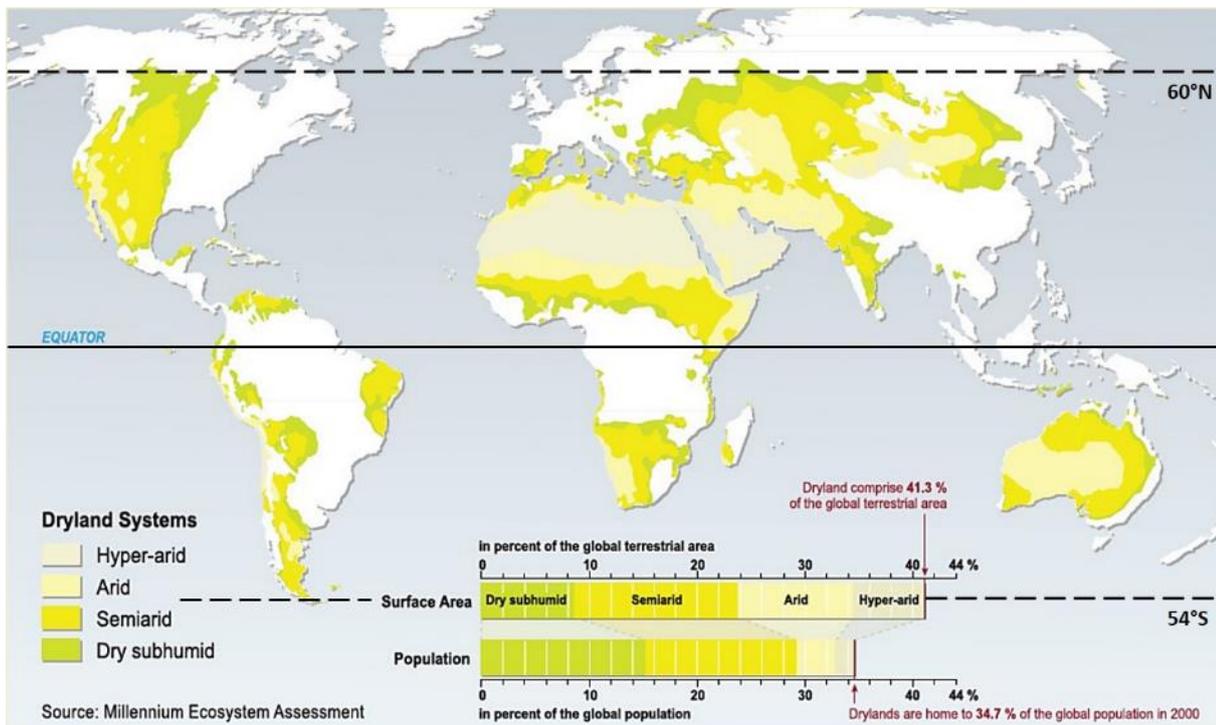


Figura 1.2. Distribución del sistema de *drylands* y sus subtipos (Safriel et al., 2005).

En climas áridos, para protegerse tanto de la alta radiación solar como de las elevadas temperaturas características de estos, se optaba por estrategias de protección a la radiación. La ciudad compacta actúa como generadora de sombra, tanto para los edificios como para el espacio público (Coch, 1998; Golany, 1996). Durante las últimas décadas, los tradicionales patrones de crecimiento urbano en regiones áridas han sido sustituidos por morfologías menos compactas.

Esta situación es particularmente evidente en las ciudades desérticas de México, donde para dar respuesta a un aumento de población y a una creciente demanda de vivienda, se ha optado por un patrón de crecimiento de ciudad dispersa. Este modelo se basa en la zonificación, la edificación de baja altura y en bajas densidades de ocupación. El predominio del automóvil como medio de transporte y la influencia de los modelos urbanos de Estados Unidos tuvieron una influencia decisiva en la morfología urbana de las ciudades mexicanas. Este tipo de crecimiento se ha dado durante la segunda mitad del siglo XX, dando paso al fenómeno del *urban sprawl*.

Este modelo de crecimiento con bajas densidades de población comporta un alto consumo energético por persona debido al transporte, con el consecuente impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>), esto se puede ver en la **Figura I.3**.

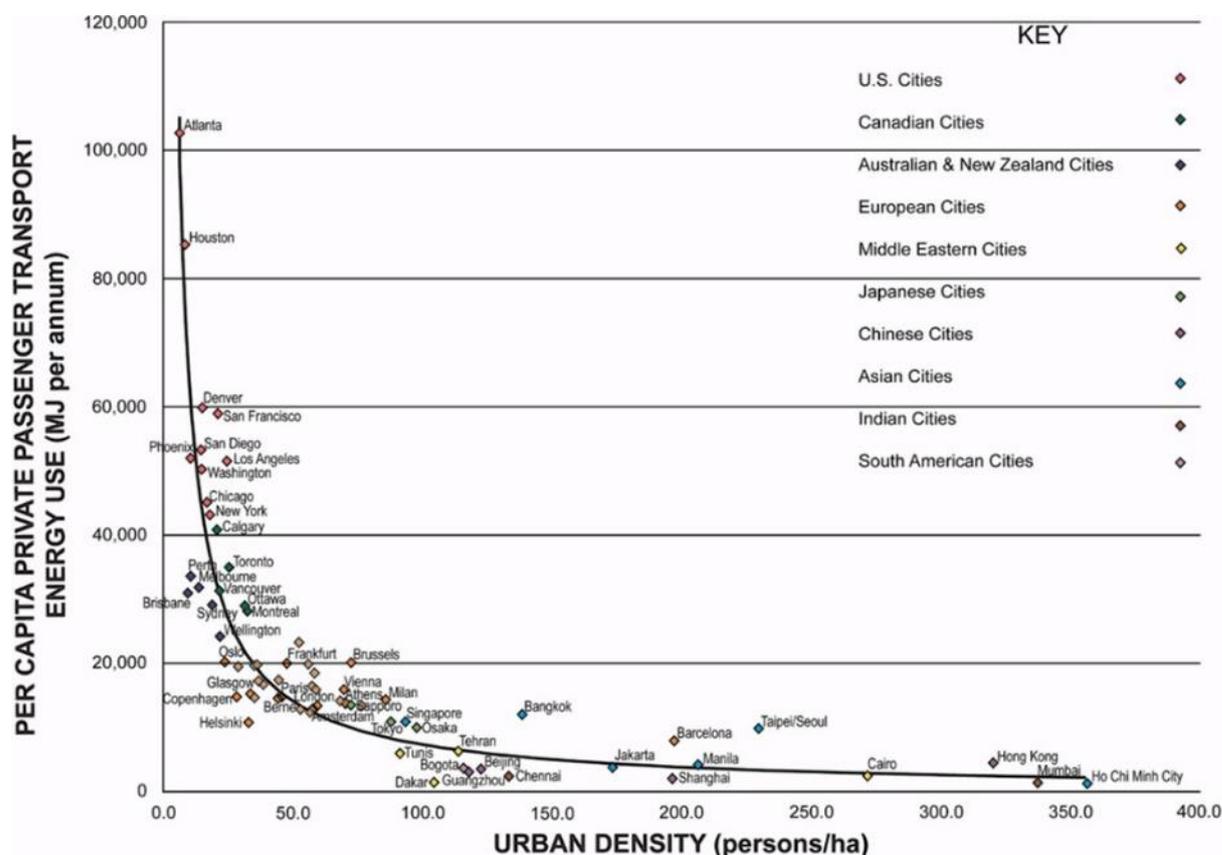


Figura I.3. Relación entre el uso de energía del transporte privado per cápita y densidad urbana (Newman, 2014).

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

El actual proceso de calentamiento del planeta y la ubicación de los distintos focos de crecimiento demográfico hacen necesario pensar en una ciudad capaz de adaptarse a un clima cálido–seco. Esta ciudad deberá de brindar una respuesta a toda la problemática demográfica y climática de manera económicamente viable.

Un proceso de densificación de la ciudad, es decir, modificar la propia forma urbana, podría retomar estrategias que funcionaron anteriormente, al reducir el acceso de la radiación solar.

Para una correcta evaluación de las repercusiones de la densificación, es necesario tener en cuenta las diferentes escalas urbanas: territorial, de barrio y de edificio. Esto es necesario ya que las tres escalas están conectadas entre sí: no se puede analizar un edificio aislándolo de su entorno, como tampoco se puede analizar un barrio dejando de lado el resto de la ciudad. Este enfoque tiene como punto de partido la escala territorial, donde mediante distintos análisis se identifican diferentes puntos de interés urbano en la escala de barrio. Es a partir de esta escala que se hace necesario analizar los diferentes factores climáticos, energéticos y morfológicos de la ciudad, los cuales actúan de manera directa en la escala del edificio.

Como consecuencia del actuar de estos factores en las ciudades mexicanas surgen dos aspectos clave a estudiar, tanto a escala urbana como de edificio:

Uno es la habitabilidad del espacio público. La fuerte radiación solar existente en las calles hace que los peatones deban realizar largos recorridos en condiciones climáticas extremas, tanto por la temperatura del aire como por la acción de la radiación directa. La ausencia de sombra debida a la escasa vegetación, propia de climas áridos, así como la estructura urbana característica de ciudades dispersas generan un espacio público desierto y, por tanto, peligroso (**Figura I.4**).



Figura I.4. Peatones esperando el transporte público bajo la sombra de un poste del servicio eléctrico.

Fuente: (<https://www.noroeste.com.mx/>)

El segundo, es el consumo de energía del sector residencial. En un clima cálido-seco la tipología de vivienda, unifamiliar aislada y de una o dos plantas<sup>1</sup>, resulta ineficiente energética y térmicamente. La principal demanda energética de la vivienda es el consumo debido al uso de sistemas de refrigeración (INEGI, 2018; Isaac & van Vuuren, 2009). Una de las principales estrategias arquitectónicas para reducir la demanda de refrigeración consiste en limitar el flujo de calor al interior de la vivienda, modificando la envolvente. El uso de aislamiento térmico es una de las soluciones más aceptadas, apoyándose en un supuesto efecto positivo sobre la reducción de la demanda energética.

En los últimos años, ciudades como Hermosillo en México, están comenzando a experimentar un cambio en el paradigma de vivienda: la vivienda plurifamiliar en altura ha comenzado a desarrollarse con mayor regularidad. Por lo tanto, resulta importante estudiar su comportamiento energético en este tipo de climas. Un mejor conocimiento del comportamiento ambiental de esta tipología edificatoria podría ayudar a generar una mayor aceptación por parte de la población.

Como resultado de lo expuesto, surgen algunas preguntas que se pretenden responder en esta tesis. ¿Es posible que, al densificar la ciudad, además de mejorar las condiciones urbanas y térmicas del espacio público, se logre reducir la demanda energética por aire acondicionado de las viviendas? La vivienda social actual, en un clima cálido-seco, ¿Realmente mejora su comportamiento térmico mediante el uso de aislamiento térmico?

En la presente tesis se desarrolla un análisis de la morfología de una ciudad dispersa en un clima cálido-seco, sus repercusiones en el espacio público y en la demanda energética de la vivienda. El caso de estudio es la ciudad mexicana de Hermosillo, caracterizada por sus altas temperaturas y elevados niveles de radiación solar durante todo el año, llegando a ser conocida en México como la “Ciudad del Sol”.

En una época de una crisis climática causada por el calentamiento global se recomienda una reducción del consumo energético y de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Un mayor conocimiento del funcionamiento de la edificación y de la ciudad permite proponer estrategias adecuadas desde el punto de vista medioambiental, energético y económico, para México.

---

<sup>1</sup> Viviendas unifamiliares: vivienda mínima (32-45 m<sup>2</sup>), vivienda popular (45-60 m<sup>2</sup>), vivienda de interés social (60-90 m<sup>2</sup>), vivienda de interés medio (90-120 m<sup>2</sup>), vivienda residencial (>120 m<sup>2</sup>) (Marincic et al., 2011)

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

### OBJETIVOS

La presente investigación doctoral se enfoca en un análisis energético a diferentes escalas: la urbana y de vivienda. Este análisis gira en torno a un proceso de densificación urbana producido mediante el “apilamiento” de la vivienda. Se lleva a cabo en Hermosillo, una ciudad de clima cálido–seco, que sigue un patrón de crecimiento disperso, llevándola a presentar problemas de *urban sprawl*.

El objetivo general de esta tesis es determinar y cuantificar los efectos energéticos derivados de un proceso de densificación en una ciudad dispersa con un clima severo, tanto a nivel urbano, como al nivel de la vivienda.

En el marco de este objetivo general, se definen los siguientes objetivos secundarios:

- Crear una base de datos urbanos georreferenciados de Hermosillo. Esto con el fin de elaborar cartografía útil para analizar el comportamiento histórico de la ciudad.
- Evaluar el potencial de la estrategia de densificación por apilamiento de alojar nuevas viviendas, sin urbanizar nuevos terrenos, en un área de estudio con una baja densidad poblacional.
- Cuantificar los efectos de la densificación por apilamiento en el comportamiento energético del espacio público, centrándose en su impacto sobre la incidencia de la radiación solar.
- Analizar el comportamiento térmico de la tipología de vivienda social actual en el escenario de que un hogar no pueda contar con sistemas de refrigeración. Comprobar la eficiencia del uso de aislamiento térmico en la piel de la vivienda.
- Analizar y comparar el comportamiento térmico interior, y la demanda energética de refrigeración de las diferentes categorías de vivienda unifamiliar aislada, y la vivienda plurifamiliar en altura. La finalidad de este análisis es generar recomendaciones de crecimiento urbano energéticamente más eficientes.

## ESTRUCTURA DE TESIS Y METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos propuestos, esta tesis se basará en dos métodos de análisis: la cartografía mediante información georreferenciada y simulaciones energéticas. Se crearán mapas tanto de la ciudad completa como del centro de la ciudad, estos mapas estarán enfocados en aspectos de densidad de población y edificada. Las simulaciones se llevarán a cabo a nivel de tejido urbano (radiación solar en onda corta), y a nivel de vivienda (comportamiento térmico interior y de la demanda de refrigeración).

La tesis está dividida en dos partes (**Figura 1.5**). En la primera parte, compuesta por los capítulos I y II, se hace una exhaustiva revisión de la literatura existente sobre el estudio tanto de la forma y densidad urbana, como del clima de la ciudad y el comportamiento energético de viviendas en ciudades con clima cálido-seco. La segunda parte de la tesis está compuesta por los capítulos III, IV y V. En el capítulo III se hace un análisis del clima, la evolución urbana y de la situación actual de la vivienda de la ciudad de Hermosillo. En el capítulo IV se analiza el caso de estudio desde el punto de vista de la morfología urbana y sus repercusiones energéticas sobre el clima de la calle (mediante cartografía y simulaciones de radiación en onda corta). En el capítulo V se analiza el comportamiento térmico y la demanda de refrigeración de las viviendas unifamiliares aisladas y plurifamiliares. Este análisis se lleva a cabo mediante simulaciones tanto en régimen libre como activo.



Figura 1.5. Metodología de la tesis.

La figura anterior muestra el esquema de cada sección de esta tesis. Si bien, la primera parte es dedicada a la literatura existente, la segunda parte requiere de una descripción detallada. Como se ha mencionado, el capítulo III es dedicado a un análisis climático y urbano de la ciudad de Hermosillo, la información del clima se ha obtenido a través de distintas fuentes: las normales climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de la estación Hermosillo II DGE, ubicada en una zona céntrica de la ciudad. En cuanto a los valores de radiación solar, estos se obtienen de tres fuentes: la estación meteorológica del LEMA (Laboratorio de Energía

y Medio Ambiente de la Universidad de Sonora), la estación meteorológica del Aeropuerto y a través de simulaciones en Heliodon2.

En cuanto al análisis urbano (escala territorial), se elaborarán diferentes mapas en GIS para representar información georreferenciada de distintas bases de datos públicas: el catastro de Hermosillo y del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Para los mapas de distribución de la densidad de población se utilizarán los siguientes *inputs*: la población por manzana (número de habitantes), la superficie de manzana ( $m^2$  y ha). Para el mapa de la distribución de lotes baldíos se utilizará como *input* la cantidad de  $m^2$  de construcción por lote ( $0 m^2$  equivale a un lote baldío). Para el mapa de crecimiento de la ciudad en los últimos 30 años (1990-2020) se utilizaron imágenes satelitales de *Google Earth* e información del Ayuntamiento de Hermosillo. Para producir el mapa de distribución del tipo de vivienda se utilizarán como *inputs* la cantidad de  $m^2$  construidos por lote e imágenes satelitales y a nivel de calle de *Google Earth*. A partir de los mapas elaborados se propondrán distintas estrategias a nivel urbano y se seleccionarán las zonas de la ciudad donde estas puedan ser aplicadas.

Con el capítulo IV se iniciará con la modelización y análisis. En esta tesis se tomará como área de estudio al centro urbano de Hermosillo. A partir de cartografía en CAD se evaluará el nivel de *walkability* del área de estudio a través de su red de calles (densidad de intersecciones,  $i/ha$  y densidad de red,  $m/m^2$ ) y manzanas (perímetro, diagonal y superficie promedio de manzanas). Los resultados obtenidos serán comparados con otras tipologías de tejidos urbanos utilizados habitualmente en la planeación urbana.

El siguiente análisis cartográfico será a través de mapas GIS. En primer lugar, se hará un levantamiento detallado de los elementos urbanos presentes en el área de estudio, sobre todo los de carácter patrimonial y de equipamiento. El siguiente paso será el estudio de la densidad de población y de viviendas dentro del área de estudio. Para esto se harán dos mapas, uno con la distribución por manzanas de la densidad de población (datos del INEGI), y otro mapa con la distribución de viviendas habitadas, deshabitadas o vandalizadas (datos del catastro). El estudio de la densidad edificatoria se hará mediante cuatro indicadores (GSI, FSI, L y OSR) a través de cartografías GIS a nivel de manzana. Una vez obtenidos los valores de los cuatro indicadores de densidad edificatoria del área de estudio, se hará una comparación con centros urbanos de diferentes ciudades a través del método gráfico de *Spacemate*.

En este capítulo se hará un análisis de la incidencia de la radiación solar directa en el espacio público mediante simulaciones en Heliodon2. Para llevarlo a cabo, se construirá un modelo 3D morfológico con un nivel de detalle adecuado para este análisis en la ciudad de Hermosillo (LoD 1: los edificios carecen de ventanas o puertas y tienen cubiertas planas). Las simulaciones se harán a dos niveles, el primero es en dos calles tipo y el segundo es a nivel del área de estudio, durante la temporada de calor (del 1 de mayo al 31 de octubre).

Una vez hecho el análisis de densidad poblacional y edificatoria, y de la incidencia de la radiación solar en el espacio público, se elaborará una propuesta de reordenación del centro urbano. Para esta propuesta se ha de tener en consideración la normativa vigente (altura y huella edificatoria permitidas) y condiciones de asoleo en el espacio público (modificación de la relación de aspecto). Para evaluar la propuesta se ha de construir un nuevo modelo 3D, en

## **PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

este caso es un modelo tipológico, donde la altura de los edificios es uniforme en cada manzana (salvo en las manzanas que contienen edificios con valor patrimonial o de equipamiento urbano). A partir de este modelo se obtendrán nuevos valores de radiación solar incidente en el espacio público y para los diferentes indicadores de densidad población y edificatoria. Estos nuevos valores serán producto del proceso de apilamiento (densificación vertical).

En el capítulo V se analizará y comparará el comportamiento térmico interior y la demanda energética de refrigeración de diferentes tipos de vivienda: unifamiliar aislada y plurifamiliar en altura. Este análisis servirá para evaluar los beneficios el enfoque de apilamiento de la vivienda puede aportar en ciudades dispersas con un clima desértico. Se analizarán las características espaciales y térmicas de cada tipología de vivienda, para después llevar a cabo una serie de simulaciones energéticas con *DesignBuilder*.

En primer lugar, se simulará el comportamiento energético de la vivienda unifamiliar aislada (de una o dos plantas) en dos situaciones: el comportamiento térmico interior en distintas viviendas en régimen libre, y la demanda de energía en las mismas viviendas con el uso de refrigeración activo. Se seleccionará una vivienda unifamiliar de interés social para evaluar y comparar, mediante simulaciones en régimen libre, el efecto producido por dos estrategias de mejora térmica interior: aislamiento en la piel de la vivienda y el uso de protección solar en las ventanas. A continuación, se repetirá el procedimiento de simulaciones para las viviendas plurifamiliares en altura (régimen libre y con refrigeración). Una vez que se haya analizado el comportamiento térmico y de la demanda de refrigeración en las viviendas plurifamiliares, se llevara a cabo una comparación entre el comportamiento térmico de éstas y las viviendas unifamiliares.

Finalmente se presentan las conclusiones del estudio y se presentan las posibles investigaciones futuras.

# PARTE 1



**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

CREDITOS DE LA IMAGEN EN LA PÁGINA ANTERIOR

Zona Arqueológica de Paquimé, Chihuahua (México).

Ciudad indígena de morfología compacta.

*Fuente: <https://www.mexicodesconocido.com.mx/tips-viajero-paquime-chihuahua.html>*

# **CAPITULO 1**

## **CIUDAD COMPACTA Y CIUDAD DISPERSA**

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

## 1.1 EVOLUCIÓN DE LA CIUDAD

Las ciudades son organismos complejos, que pueden ser analizados desde su morfología, su evolución, medio ambiente, su gente, su cultura, espacios públicos, gobernanza, instituciones, economía, etc. (W. Caves, 2005). Kevin Lynch (1960) dice que, «*al igual que una pieza de arquitectura, la ciudad es una construcción en el espacio, pero de gran escala, algo que se percibe solo en el transcurso de largos periodos*». Por esta razón, para entender la ciudad actual, es necesario analizar el desarrollo de las ciudades a lo largo de la historia.

Las primeras ciudades de las que se tiene conocimiento se fundaron en terrenos fértiles y de una localización estratégica, para tener la capacidad de autoabastecerse y protegerse (Coch, Crespo, & Serra-Coch, 2016). Las actividades agrícolas dominaban los primeros asentamientos y las distancias eran limitadas a lo que una persona podía caminar. Las murallas se convertirían en algo común a medida que se creaban más asentamientos (W. Caves, 2005).

La evolución de la ciudad continuó durante los tiempos de la antigua Grecia y el Imperio Romano. Se comenzó a poner orden en los espacios dentro de las murallas con la creación y localización, por ejemplo, de lugares de reunión o mercados. Aparece, también, el comercio entre ciudades y se establecen caminos, sistemas de riego, acueductos y sistemas de drenaje. La población urbana continúa creciendo, lo cual dará lugar a una sobrepoblación intramuros y a una serie de problemas relacionados con este fenómeno. Después de la caída del Imperio Romano, la población comenzó a instalarse alrededor de castillos buscando protección, creando nuevas ciudades estado. Durante la Edad Media, el número de ciudades se incrementó, pero mantenían un tamaño pequeño debido al tamaño del castillo y a la disponibilidad de recursos (W. Caves, 2005).

Durante el renacimiento (**Figura 1.1**) y el periodo barroco, con la llegada del capitalismo mercantil europeo, aparece la figura del planificador urbano (Berghauer Pont & Haupt, 2009). La llegada de la revolución industrial abrió paso al capitalismo industrial en Inglaterra, extendiéndose por el resto del mundo durante la segunda mitad del siglo XIX y las primeras décadas del siglo XX. A mediados del siglo XIX, con Ildelfons Cerdà, se origina el termino urbanismo, utilizado por primera vez en 1867 en «Teoría General de la Urbanización» (Choay, 1994; W. Caves, 2005), donde identifica los fundamentos científicos y se inicia el largo desarrollo en este campo (García-Bellido, 2000). Esto marca un antes y un después en el estudio de las ciudades.



Figura 1.1. «*Città ideale*», autor desconocido. Representa una plaza renacentista en perspectiva.  
Fuente: <https://commons.wikimedia.org/>.

### 1.1.1 La ciudad compacta histórica en el clima cálido – seco

En sus orígenes, el diseño de las ciudades estaba influenciado por factores climáticos (García-Nevado, 2019). Estas consideraciones climáticas eran utilizadas para dar forma a la ciudad. Históricamente, las ciudades de regiones con climas muy extremos, especialmente en clima cálido–seco, evolucionaron como asentamientos compactos para dar respuesta al clima (Golany, 1996). Las viviendas en este tipo de clima se encuentran frecuentemente acomodadas en patrones compactos, una muy cerca de la otra, dejando muy poca separación en forma de callejones o patios, con lo que se logra reducir las superficies expuestas al sol (Coch, 1998; Foruzanmehr, 2017; García-Nevado, 2019).

Los antiguos asentamientos mesopotámicos son un ejemplo de este tipo de ciudades, con clima extremo y de morfología compacta (Coch & Serra, 1995). Alrededor del 3.500 a.C. existían entre 15 y 20 ciudades–estado en Sumeria (parte sur de la antigua Mesopotamia), incluidas Ur, Uruk, Lagash, Kish y Nippur. Todas ellas con una población de aproximadamente 50.000 habitantes (Ur tenía una superficie de alrededor de 10 km<sup>2</sup> y estaba amurallada) (Lynch, 1984).

Una de las lecciones significativas que se obtienen de los asentamientos vernáculos históricos es la forma compacta. Esta configuración, además de evitar la ocupación de tierra adecuada para cultivo y protección, es una forma que responde bien a climas extremos. Entre las estrategias de diseño urbano adecuadas para la ciudad de clima cálido – seco, Golany (1996) menciona: formas compactas, mezcla de alturas de edificios, calles estrechas y sinuosas, espacios públicos abiertos pequeños, dispersos y protegidos, uso de refrigeración evaporativa y zonas arboladas densas.

En América se conservan algunos ejemplos de asentamientos indígenas siguiendo estas pautas de diseño (**Figura 1.2**), que datan del XI y XV (Giovagnorio & Chiri, 2016; Swanson, 2003): Long House en Mesa Verde, Pueblo Bonito y Pueblo Acoma en Nuevo México, en el sur de Estados Unidos; Paquimé y Cuarenta Casas en el Norte de México.



Figura 1.2. Pueblo del desierto en Nuevo México con morfología compacta (Coch & Serra, 1995).

### 1.1.2 La ciudad compacta histórica europea

La tradición europea de urbanizar de forma concentrada se debe a diversas causas: herencia urbana de sistemas viarios y parcelación; existencia de murallas defensivas que marcaban un claro límite para la extensión urbana; la escasez relativa de tierras en ciertas áreas para acomodar a una población creciente, p. ej., los Países Bajos; la necesidad de contención para conservar tierras agrícolas cercanas a la ciudad; incluso, en menor medida, condicionantes climáticas (García-Nevado, 2019).

Dentro de estas condicionantes, la seguridad ocupaba un sitio preponderante en la creación y crecimiento de la mayoría de las ciudades durante la Edad Media. Cuando una sociedad aumentaba su número, aumentaba en cierto nivel su seguridad, y esto iba de la mano de otras medidas de seguridad, como las murallas (Mumford, 1938; Pounds, 2005), de modo que, la fortificación fue determinante para definir la forma urbana (**Figura 1.3**).

Otros factores determinantes de la morfología de las antiguas ciudades medievales eran los patrones de movilidad de las personas, fundamentalmente a pie. Dentro de la ciudad, los comerciantes y artesanos, ricos y pobres, jóvenes y viejos, necesariamente tenían que vivir y trabajar cerca (Gehl, 2011). Por consiguiente, las calles de la ciudad pre-industrial tenían unas dimensiones acordes con la movilidad peatonal. La densidad de las viviendas tenía que ser relativamente alta y todo había de estar conectado a la calle (Southworth, 2005).

A pesar de que las ciudades eran polos de atracción, la mayor parte de la población europea siguió siendo rural hasta la revolución industrial. Es a partir de 1750, pero sobre todo durante el siglo XIX, que el ritmo de urbanización en Inglaterra y posteriormente en otros países europeos y en los Estados Unidos aumentó rápidamente (United Nations et al., 2019a; W. Caves, 2005).



Figura 1.3. Ciudad amurallada de Florencia. Ilustración de las Crónicas de Núremberg de 1493.

Fuente: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Colored\\_woodcut\\_town\\_view\\_of\\_Florence.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Colored_woodcut_town_view_of_Florence.jpg).

### 1.1.3 Impacto de la revolución industrial: éxodo rural y urbanización

La revolución industrial marcó una serie de grandes cambios a nivel urbano. El paso de una economía agrícola y rural hacia una economía urbana e industrial, sumados a avances tecnológicos y nuevos procesos de producción, ocasionaron grandes cambios en las ciudades que modificaron de manera permanente la construcción del espacio urbano.

En Gran Bretaña, y posteriormente el resto de Europa y el mundo, durante los siglos XVIII y XIX, se producen flujos masivos de personas procedentes de áreas rurales a las ciudades en busca de una mayor prosperidad, asociada con la economía de las ciudades. Conforme aumentaba la población de las ciudades, las industrias tenían acceso a mano de obra barata. Pero al mismo tiempo, esta migración significó que la capacidad de las ciudades amuralladas fuese excedida (**Figura 1.5**). Como resultado, las murallas fueron gradualmente demolidas, poniendo fin a la ciudad compacta antigua (Batty, Besussi, & Chin, 2003; OECD, 2012; W. Caves, 2005).



Figura 1.4. Calle de la antigua ciudad amurallada de Barcelona.

Fuente: Arxiu Fotogràfic de Barcelona. <http://www.anycerda.org/web/any-cerda/fa-150-anys/resum>.

El declive de la antigua ciudad preindustrial coincidió con los avances tecnológicos asociados con la Revolución Industrial: mejoras en el transporte (ferrocarriles y tranvías) y desarrollo de nuevas medidas de higiene y saneamiento (redes que suministran agua potable limpia y sistemas de alcantarillado). Estas medidas mejoraron las condiciones de vida y redujeron la alta tasa de mortalidad en las ciudades históricas (W. Caves, 2005).

A pesar de los avances, las condiciones de vivienda y trabajo para la nueva clase trabajadora eran eminentemente deficientes, al igual que las condiciones de la salud y la seguridad (Eßer, 2011). Los trabajadores vivían en unidades mal construidas, mal ventiladas, mal iluminadas, y carentes de instalaciones sanitarias básicas. Esta situación resultaba agravada por la falta de actuación de las autoridades, especialmente frente a las prácticas de construcción intensiva llevadas a cabo por los especuladores inmobiliarios (Curreli, 2016). Además, por lo general, las fábricas se situaban dentro de la ciudad, generando altos niveles de contaminación. Esto provocaba una serie de problemas de salud, que favorecían la propagación de enfermedades infecciosas e incrementaban la tasa de mortalidad (W. Caves, 2005).

Asimismo, en esta época se produce un gran crecimiento de los suburbios, nacidos originalmente para una clase privilegiada, y que en este momento se extienden como franjas urbanas periféricas sobrepobladas, desordenadas e inhabitables (Curreli, 2016).

Londres era el ejemplo de todos los vicios de la metrópoli industrial (**Figura 1.5**): una segregación extrema, con una fuerte división entre las clases sociales, el trabajo y los espacios de vida separados y un hacinamiento tal, que limitaba el acceso de la población a la luz solar y el espacio abierto (W. Caves, 2005). A principios de 1700, Londres con 550.000 habitantes era junto con París, una de las ciudades más grandes de Europa. Hacia 1830, Londres o Gran Londres, llegaría a los 1,5 millones de habitantes, convirtiéndola en la ciudad más grande del mundo (**Figura 1.6**). En 1851, Londres alcanzó los 2,4 millones de habitantes (Bairoch & Goertz, 2006). El nacimiento de la ciudad industrial y su rápida expansión se considera como el momento en que la planificación urbana se convirtió en un sistema regulador (W. Caves, 2005).

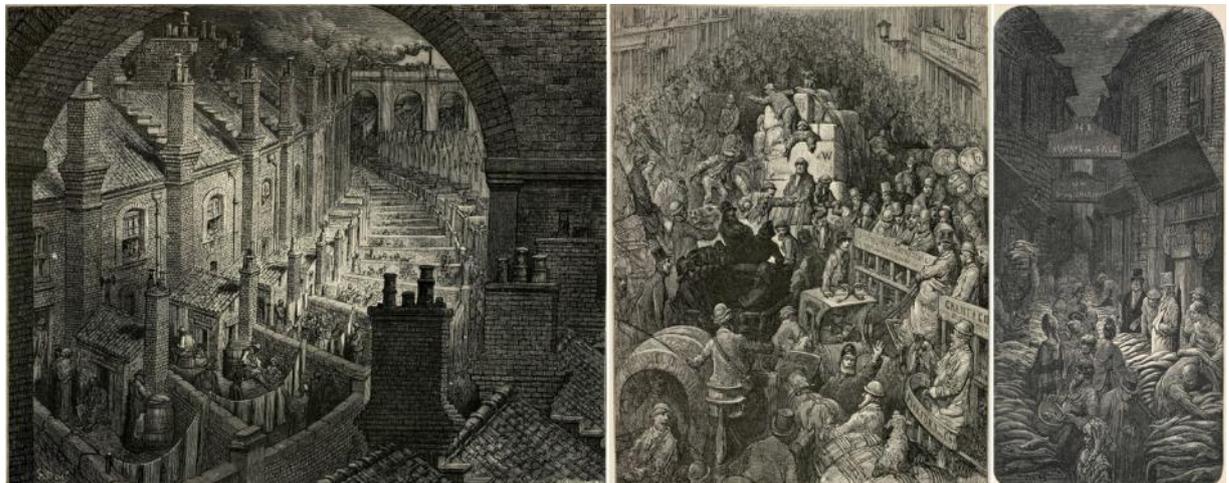


Figura 1.5. Ilustraciones de Gustave Doré de 1872. Escenas de Londres.

Fuente: <https://www.bl.uk/collection-items/london-illustrations-by-gustave-dor>.

Durante una primera etapa de la Revolución Industrial, la típica ciudad industrial en Europa era de tamaño medio. Por el contrario, en los Estados Unidos la industrialización se produjo principalmente en las grandes ciudades. En una segunda etapa, en los Estados Unidos las fábricas comenzaron extenderse hacia el campo, favorecidas por la construcción de la red ferroviaria (W. Caves, 2005).

Este período de rápido crecimiento industrial, que comenzó en Gran Bretaña durante la segunda mitad del siglo XVIII con la invención de la máquina de vapor, y se extendió a Europa y más tarde a otros países, incluido Estados Unidos, tuvo profundas consecuencias sociales y económicas. La Revolución Industrial marca el comienzo de un fuerte aumento en el uso de combustibles fósiles y la emisión de gases, en particular, de dióxido de carbono fósil (CO<sub>2</sub>) (IPCC, 2014).

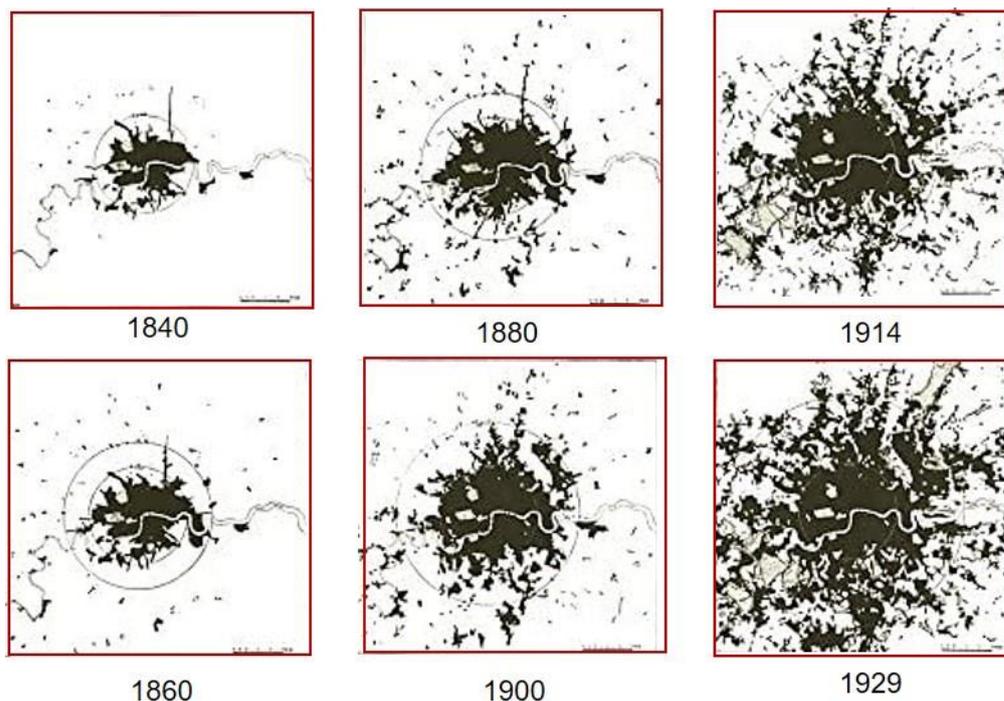


Figura 1.6. Crecimiento de Londres (1840 – 1929).

Fuente: Elaboración propia a partir de las imágenes de «*Greater London Plan 1944*» de Patrick Abercrombie.

#### **1.1.4 La ciudad jardín, nace la ciudad dispersa**

En las ciudades de principios del siglo XIX, las malas condiciones originadas en la Revolución Industrial ocasionaron un movimiento higienista. Este condenaba la situación de los barrios marginales de la clase trabajadora, miserables y abarrotados, considerando la ausencia de aire fresco y luz solar como la razón principal de enfermedades letales (Giovagnorio & Chiri, 2016).

En 1844, surge en Londres la *Society for improving the condition of labouring classes*, organización que intentaba hacer frente a los problemas de salud pública de la sociedad londinense. Esto dio paso, en 1848, a la *Public Health Act*, regulación británica que impulsó la inversión en obras públicas de agua potable, alcantarillado, parques y pavimentos, sirviendo de ejemplo para muchas ciudades en Europa (Berghauser Pont & Haupt, 2009). Durante estos años, en distintos puntos de Europa se comienzan a dar distintos movimientos que buscaban mejorar las condiciones en las ciudades: el Plan Haussman de 1851, que consistía en la creación de una red de bulevares en París, o la creación de la *Ringstrasse* de Viena en 1857. Otro ejemplo destacado es el Plan Cerdà de Barcelona de 1859, que nació para dar pautas y ordenar el crecimiento de la ciudad.

En 1876, en Alemania, Reinhard Baumeister aboga por un planteamiento más científico para lidiar con los problemas de higiene y miseria social en las ciudades sobrepobladas. Plantea un enfoque pragmático del desarrollo de ciudad que combinaba la necesidad de acceso a la luz solar y al aire fresco, sin dejar de lado consideraciones económicas prácticas.

En 1889, Camillo Sitte argumenta que la planeación de las ciudades debía ser más que solo la planificación de usos de suelo, en la cual las calles y parcelas se encontraban predeterminados. A Sitte le preocupaba que el desarrollo de ciudades las llevara a la monotonía, y abogaba por ciudades con forma compacta y calles estrechas (Berghauser Pont & Haupt, 2009).

En Inglaterra, Ebenezer Howard fundo la *Garden City Association* para promover una «ciudad social». Este nueva y descentralizada ciudad ofrecía una alternativa a las ciudades sobrepobladas e insalubres con una falta de ambientes naturales. En su libro *Garden Cities of Tomorrow, A Peaceful Path to Real Reform*, publicado en 1898, Howard explicaba sus ideas sobre la ciudad ideal (Berghauser Pont & Haupt, 2009). Howard propuso el concepto de *Garden City* (**Figura 1.7**), que consistía en comunidades autónomas y autosuficientes rodeadas por cinturones verdes que funcionaban como límite, proveedores de alimentos y ocio (OECD, 2012; R. Berke, 2002). El movimiento de la Ciudad Jardín proponía la descentralización de funciones residenciales en núcleos satélites de dimensión limitada y baja densidad, inmersos en los cinturones verdes. La distribución de los núcleos satelitales era de forma radial alrededor del centro de la estructura de la *Garden City*, que concentraría las actividades financieras, administrativas, culturales y comerciales. En el interior de esta estructura, los nuevos medios de transporte (ferrocarril, metropolitano, y sobre todo el automóvil), tendrían un rol fundamental en asegurar las conexiones entre los distintos núcleos (Curreli, 2016).

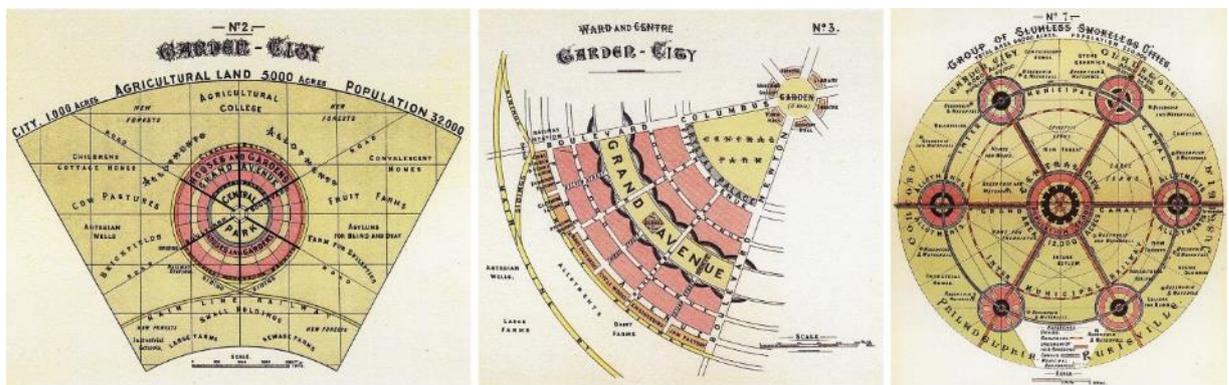


Figura 1.7. Diagramas de la Ciudad Jardín de Howard.

Fuente: Elaboración propia, imágenes de <https://commons.wikimedia.org/>.

Las *Garden Cities* debían de tener un crecimiento controlado y limitado, con un máximo de 30.000 habitantes en un área de 1.000 acres (aproximadamente 400 ha) (Berghauser Pont & Haupt, 2009), mientras que la tierra era propiedad de la autoridad para evitar la especulación inmobiliaria. Howard buscaba que la *Garden City* tuviese una escala humana y un balance funcional (Mumford, 1938, 1961).

A comienzos del siglo XX, el desarrollo de las ciudades se volvió rápidamente influenciado por estas tres corrientes de fin de siglo: la “Ciudad Saludable” de Baumeister, la “Ciudad Hermosa” de Sitte y la “Ciudad Social” de Ebenezer (Berghauser Pont & Haupt, 2009). Sin embargo, la visión de Ebenezer Howard fue la que más influyó en las siguientes generaciones de diseñadores urbanos de Europa y Estados Unidos (R. Berke, 2002) (**Figura 1.8**).



Figura 1.8. Nueva Delhi es un ejemplo de la influencia del modelo de Howard.  
Fuente: Creada por Daily Overview, origen de la imagen MAXAR TECHNOLOGIES.

### **1.1.5 El urban sprawl americano – latinoamericano**

La historia de la planeación urbana del siglo XX representa una reacción a los males de la ciudad del siglo XIX. El periodo más importante en la historia del debate de la forma urbana fue de 1898 a 1935. Durante este periodo, los casos extremos fueron propuestos: el modelo centralizado de Le Corbusier y modelo descentralizado de Wright. Perfectamente definidas para 1935, ambas posturas tenían la necesidad de proponer un antídoto a la visión de Ebenezer (Breheny, 1996).

Las formas de urbanización dispersa se originan en las primeras décadas del siglo XX. Estas se consolidaron, sobretodo, en los Estados Unidos gracias al uso de la zonificación en las normativas urbanísticas, la mejora de los sistemas de transporte surgidos a lo largo del siglo XIX, y a una creciente industria automotriz, favorecida por inversiones en infraestructuras carreteras en detrimento del transporte público (Curreli, 2016; García-Nevado, 2019). «Este nuevo sistema urbano se extiende por el territorio sin límites, a excepción de los que impone la orografía externa y algunas reservas naturales que, al final, casi vienen a ser lo mismo» (Rueda i Palenzuela, 1998) (**Figura 1.9**).

En la década de 1920 surgen las primeras voces en contra de este tipo de desarrollo urbano de dispersión en Estados Unidos. Sin embargo, no fue hasta los años 50 – 60 que la expresión *urban sprawl* fue acuñada. Este término se utilizaba para describir la propagación de la dispersión urbana en las ciudades estadounidenses, resaltando su connotación crítica y negativa (Burchell, Shad, Listokin, Phillips, & Downs, 1998).



Figura 1.9. Publicidad de la Agencia BBH para *The Guardian*. Retrata el acelerado crecimiento urbano: Londres si creciera tan rápido como Lagos, y París si tuviese la misma cantidad de automóviles que Bombay.

Fuente: <https://www.adeevee.com/2013/08/the-guardian-london-and-lagos-sydney-and-shanghai-paris-and-mumbai-print/>.

A pesar de la difusión de la expresión *urban sprawl*, no existe una definición clara que permita encuadrar de forma inequívoca este concepto. De hecho, normalmente se explica a través de sus efectos y características. Entre ellas destaca la baja densidad como el aspecto más peculiar y distintivo.

El *urban sprawl* ha sido descrito como:

- Una ciudad que favorece a aquellos que pueden pagar, por lo que tiende a segregar desarrollos habitacionales de acuerdo los salarios. Le otorga cuatro características: es estéticamente desagradable; es poco eficiente en materia económica, en consumo de tiempo, generación de desperdicios y pérdida de tierra; es generador de problemas sociales como desigualdad, segregación racial y económica; por último, el alto consumo de energía (Batty et al., 2003).
- Un desarrollo urbano que cumple cuatro características territoriales: baja densidad; desarrollo disperso (expansión descentralizada); zonas comerciales (desarrollos en franjas comerciales); y desarrollo de salto (*leapfrog*) (Tsai, 2005).
- Un tipo de ciudad de baja centralidad donde aparecen enclaves especializados y homogéneos. En ellas la gente y actividades se mueven hacia el exterior de la ciudad ocasionando que el centro tradicional pierda peso económico y poblacional frente a las áreas más periféricas (Muñiz, García, & Calatayud, 2006).
- Un tipo de desarrollo urbano caracterizado por la impermeabilización del suelo, la apropiación humana del agua de cuenca, la fragmentación del territorio, la pérdida de biodiversidad y de suelo fértil (Rueda i Palenzuela, 2002).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
 LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

- Una ciudad poco adecuada para el peatón (Pozueta Echavarri, Lamíquiz Daudén, & Porto Eschettino, 2013), con zonificación monótona, de carácter mono funcional y que aísla a sus habitantes (Gehl, 2011).
- Un crecimiento urbano que presenta 10 rasgos (Downs, 1999): extensión ilimitada hacia el exterior; asentamientos residenciales y comerciales de baja densidad; desarrollo en salto (*leapfrog, discontinuo*); fragmentación de poderes sobre el uso de la tierra entre muchas localidades pequeñas; dominio del transporte por parte de los vehículos privados; no hay planificación centralizada o controlada de los usos de suelo; desarrollo comercial generalizado en franjas; grandes disparidades fiscales entre localidades; segregación de usos de suelo en diferentes zonas y segregación socioeconómica.
- Un patrón de uso de suelo que presenta bajos niveles en alguna combinación de 8 dimensiones: densidad, continuidad, concentración, agrupamiento, centralidad, nuclearidad, usos mixtos y proximidad (Galster et al., 2001) (**Figura 1.10**).

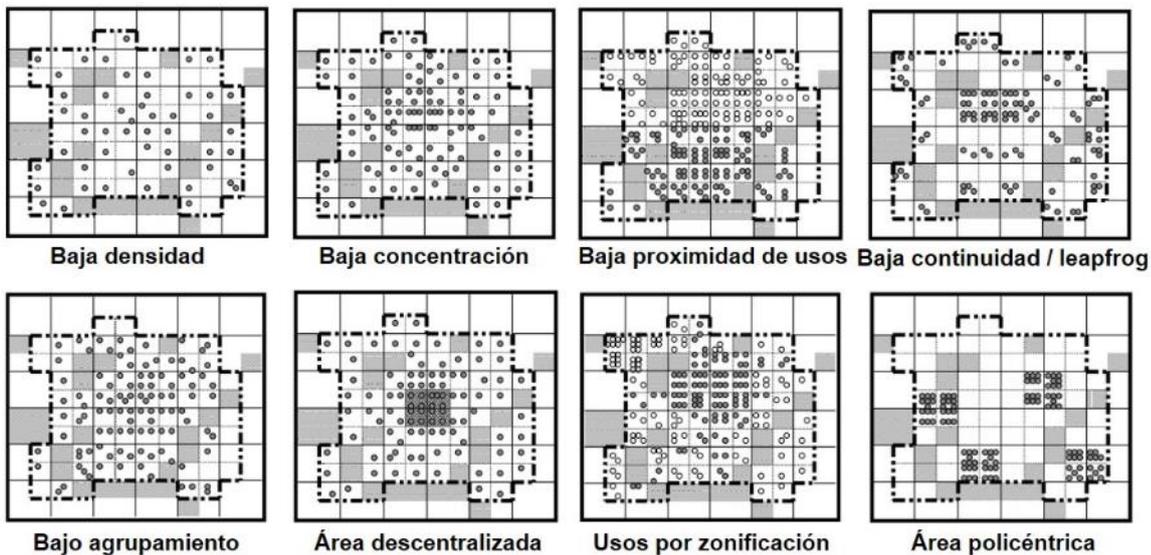


Figura 1.10. Patrones físicos que definen el *urban sprawl* (Galster et al., 2001).

En general, el *urban sprawl* se considera una forma de desarrollo urbano disfuncional, con una gran cantidad de impactos sociales, económicos y ambientales: alta dependencia al automóvil, alto uso del suelo, fragmentación del paisaje, exceso de viajes, congestión, vida urbana pobre, uso elevado de energía en transporte y edificios (Ewing & Rong, 2008).

A pesar de los aspectos negativos del *urban sprawl*, esta forma de crecimiento es la norma en muchos países, tanto desarrollados como en vías de desarrollo. A día de hoy, aproximadamente la mitad de los estadounidenses vive en suburbios diseñados para el uso del automóvil (**Figura 1.11**). Por ello, las características del *sprawl* son generalizados y han dominado el crecimiento metropolitano estadounidense durante los últimos 65 años (Frumkin, 2002; Southworth, 2005).



Figura 1.11. Urban sprawl: Suburbios de Sun City en Phoenix, Arizona, inaugurada en 1960.  
Fuente: Creada por Daily Overview, origen de la imagen NEARMAP.

Desde la segunda mitad del siglo XX, América Latina comienza a experimentar un proceso de dispersión de la urbanización impulsado por el modelo de vida suburbano basado en el “sueño americano” de “una casa y un automóvil”. No obstante, hasta bien entrada la década de 1970, la mayoría de los crecimientos urbanos en Latinoamérica se caracterizaban por altas densidades, polarización social, inmigraciones internas y la proliferación de barrios marginales. Sin embargo, las formas de urbanización de las últimas décadas se caracterizan por ser privatizadas, fragmentadas y mucho más dispersas, resultando en un elevado consumo de suelo por habitante (Arellano Ramos & Roca, 2010).

Actualmente, en México, el consumo de suelo alcanza 169 m<sup>2</sup>/hab. Si bien esta cifra dista de la de sus vecinos del norte (Estados Unidos y Canadá con 800 m<sup>2</sup>/hab), es superior a la media mundial (161 m<sup>2</sup>/hab) y latinoamericana (158 m<sup>2</sup>/hab).

### 1.1.6 La ciudad dispersa en el clima cálido - seco en México

En la zona norte y noroeste de México, existe una cantidad importante de ciudades con clima cálido-seco que siguen un patrón de ciudad dispersa. Debido a su cercanía con Estados Unidos, estas ciudades presentan una mayor influencia del modelo de crecimiento suburbano: bajas densidades, construcciones de uno o dos niveles y una dependencia casi total del automóvil. Esto produce un espacio público pobre y a una demanda continua de terrenos para el desarrollo de nuevas viviendas (Jacobs, 1961; López-Ordóñez, Crespo, & Roset, 2019).

En México, el *urban sprawl* no se caracteriza tanto por las bajas densidades, sino por la forma dispersa y fragmentada de la urbanización (Arellano Ramos & Roca, 2010). En los últimos 30 años, las ciudades de esta zona de México han experimentado el surgimiento de estos fraccionamientos cerrados en todos los estratos sociales (Duarte Aguilar, 2003). La huella que deja este tipo de tejidos en la ciudad, es un paisaje urbano escaso de vegetación, a base de muros, rejas, y demás elementos que segregan a sus habitantes, que ven la ciudad como un

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

espacio de amenaza. Estos «vecindarios defensivos» ocasionan la pérdida de la calle como espacio colectivo, volviéndola un espacio monótono y mono funcional, y solamente utilizado por el automóvil (López Levi & Rodríguez Chumillas, 2005; Méndez Sainz, 2004). El aumento de estos fraccionamientos en Latinoamérica, al igual que en Estados Unidos, ha sido identificado a la vez como causa y efecto del aumento de la violencia e inseguridad urbana (Blakely & Snyder, 1999; Low, 2003; Palomares, 2008; Svampa, 2003).

En este clima, estas características urbanas inhiben el uso del espacio público como un lugar de encuentro social. La actual ciudad del desierto se ha alejado de la tradicional morfología compacta de las ciudades históricas, que respondían de mejor manera a las condiciones climáticas de su entorno, ya sea a través de la propia generación de sombra o al reducir las superficies expuestas al sol (Ali-Toudert, 2005; Coch, 1998; López-Ordóñez, Crespo, & Roset, 2018), (**Figura 1.12**). Al igual que las ciudades dispersas en otros climas, las periferias concentran una gran cantidad de problemas, que van desde segregación, largos trayectos, pérdida de oportunidades y un tejido social dañado.



Figura 1.12. Fraccionamientos cerrados de diferentes niveles socioeconómicos en la ciudad de Hermosillo.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

La habitabilidad de los espacios interiores también se ve afectada, y se requiere el uso de sistemas de refrigeración (López-Ordóñez, Crespo, Roset, & Coch, 2020). En ciudades con este clima, sus periferias reciben, en mayor medida, viento caliente y polvo durante el verano. Por lo tanto, las viviendas localizadas ahí tienden a consumir más energía en refrigeración que las viviendas del centro de la ciudad, de forma más compacta (Golany, 1996). En los espacios públicos, el efecto es similar, debido a la falta de protección por parte de la propia forma urbana y a la poca vegetación, sobretodo en ciudades con problemas de escasez de agua.

### 1.1.7 El concepto actual de ciudad compacta y la ciudad paseable

Desde la adopción mundial de los objetivos de sostenibilidad a principios de la década de 1990, ha habido un interés creciente en el concepto de ciudad compacta, es decir, de la forma urbana de alta densidad y usos mixtos (Burton, 2002).

Se puede decir que la ciudad compacta no es una idea nueva (Burton, 2002). Como hemos visto anteriormente, podemos hacer referencia a ciudades antiguas que presentaban una morfología compacta, ya sea por cuestiones climáticas, culturales - artísticas, religiosas, defensa o logística (Salvati, 2016). Jane Jacobs (1961), con su libro *The Death and Life of Great American Cities*, crítica duramente al urbanismo moderno de la primera mitad del siglo XX, al que culpaba de la decaída de la vida urbana, sentando las bases de un modelo urbano que, en la década siguiente, se identificó como «ciudad compacta». En 1973, G.B. Dantzing y T.L. Saaty utilizan por primera vez este término y proporcionan una descripción bastante detallada de sus características, entre las que incluyen: alta densidad, usos mixtos y diversidad, igualdad social, autosuficiente y con gobierno independiente (OECD, 2012).

Obtener una definición de ciudad compacta que satisfaga a todos resulta difícil. Por ello, se tiende a describirla por oposición al *urban sprawl* (Breheny, 1996; Katz, 1994), en la **Tabla 1.1**, se enumeran sus características (Neuman, 2005):

#### Características de la ciudad compacta

1. Altas densidades residenciales y de empleo.	8. Posibilidad de transporte multimodal.
2. Mezcla de usos de suelo.	9. Alto grado de accesibilidad: local / regional.
3. Grano fino de usos de suelo (proximidad de usos variados y parcelas de tamaño relativamente pequeño.	10. Alto grado de conectividad entre calles (internas/externas), incluidas aceras y carriles de bicicletas.
4. Alto nivel de interacciones sociales y económicas.	11. Alto grado de cobertura de superficie permeable.
5. Desarrollo contiguo (algunas parcelas o estructuras pueden estar vacantes o abandonadas).	12. Baja proporción de espacios abiertos
6. Desarrollo urbano contenido, demarcado por límites claros.	13. Control unitario de la planificación del territorio o un control estrechamente coordinado.
7. Infraestructura urbana, especialmente alcantarillado y red de agua potable.	14. Suficiente capacidad fiscal del gobierno para financiar instalaciones e infraestructura urbana.

Tabla 1.1. Características de una ciudad compacta (Neuman, 2005).

Para Burton (2002), la ciudad compacta es descrita como al menos uno de los siguientes tres tipos de ciudad: la ciudad de alta densidad, la ciudad de usos mixtos y la ciudad intensificada. Este último tipo de ciudad es aquella que ha experimentado un proceso de compactación a diferentes escalas, desde el *infill* urbano, subcentros, hasta la creación de nuevos asentamientos.

Tradicionalmente, el término «ciudad compacta» ha sido asociado con una estructura urbana monocéntrica, considerada como lo contrario a la descentralización. Sin embargo, este modelo que considera el centro de la ciudad como el único foco de toda actividad social y económica ya no es visto como la norma en los patrones de crecimiento urbano en Europa. Esta visión comienza también a imponerse en Norte América, Australia y Asia (Batty et al., 2003; OECD, 2012). Un modelo de ciudad compacta monocéntrica podría no ser realista en mega ciudades,

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

ya que podría causar efectos negativos como un alto tráfico, contaminación del aire. En su lugar, una ciudad compacta policéntrica podría ser preferible (**Figura 1.13**). Detener la expansión urbana es imposible y poco deseable, ya que las áreas metropolitanas continúan aumentando su población. Pero las densidades en las periferias podrían aumentar limitando la extensión al desviar un mayor crecimiento hacia un *infill* urbano (Downs, 1999) y crear nuevos subcentros. La ciudad debe de tener centros urbanos densos que ayuden a crear un ambiente urbano sostenible, que facilite múltiples actividades y contribuya a la vitalidad (Haughton & Hunter, 1994), y a su vez, la creación de nodos o subcentros de «alta densidad» favorecen y potencian el transporte público (Rydin, 1992).

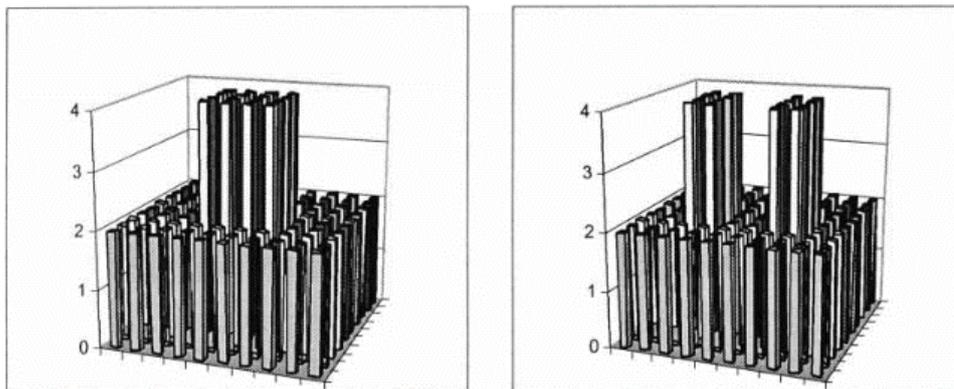


Figura 1.13. Desarrollo monocéntrico (izquierda) y desarrollo policéntrico (derecha) (Tsai, 2005).

El modelo de ciudad compacta tiene un gran impacto en la movilidad del ciudadano, tanto en las formas posibles de desplazarse, como en la calidad de dicho desplazamiento. Elkin, McLaren, & Hillman (1991) señalan que una ciudad sostenible debe de ser de una forma y escala apropiada para caminar o usar bicicleta y que cuente con un transporte público eficiente, así como un nivel de compacidad que promueva la interacción social.

La ciudad compacta se asocia al concepto de “ciudad paseable”, *walkable*, donde el concepto de *walkability* es el eje central del discurso. Forsyth & Southworth (2008) definen “paseable” como un conjunto de características del espacio: cercanía (distancias cortas); libre de barreras (entorno transitable), seguro (en términos de delincuencia percibida y tráfico); lleno de infraestructura y destinos peatonales; lujoso, frondoso o cosmopolita (entorno peatonal agradable para profesionales de clase media alta, que tienen otras opciones para moverse). Estas características se asemejan a las que Kevin Lynch (1960) otorga a la imagen de una ciudad, caminos, bordes, distritos o barrios, nodos e hitos.

La relación entre morfología y *walkability* es central dentro del diseño urbano, y está relacionado fuertemente a la salud y sostenibilidad ambiental (Pafka & Dovey, 2017). Reducir las infraestructuras para el uso exclusivo de vehículos privados, a través de favorecer el transporte público y lograr una red de calles amigables para el peatón, es fundamental (Mawromatis, 2002). En este sentido, las manzanas urbanas pequeñas o medianas son más adecuadas, ya que favorecen la permeabilidad del tejido urbano al peatón (Jacobs, 1961; Pafka & Dovey, 2017; Sabaté Bel, 2014; Siskna, 1997). Dependiendo del nivel de peatonalización que se busque, las distancias entre intersecciones pueden variar entre 50 – 110 m de longitud.

## 1.2 DENSIDAD URBANA

La densidad es un concepto clave en la planificación, la arquitectura y el diseño urbano, ya que ayuda a predecir y controlar los usos de suelo. Está determinada por la antigüedad, la historia, el contexto, la cultura, la geografía, las políticas, las actitudes y la economía de una ciudad o región (Boyko & Cooper, 2011). Estrictamente hablando, la densidad es una medida puntual definida como la relación entre la masa de alguna entidad (el tamaño de la población o el número de viviendas, en el numerador) y las unidades del área de referencia (el denominador) (Batty, 2009; Churchman, 1999). La densidad es un término objetivo, cuantitativo y neutral.

Se podría asumir que la densidad, un término objetivo y cuantitativo, no es problemática, pero no es el caso. No existe una medida aceptada de densidad entre países o dentro de ellos, ni siquiera dentro de las regiones metropolitanas (Churchman, 1999). Un problema habitual en este sentido aparece al realizar comparaciones entre densidades cuando las cantidades de área varían (denominador). Esto explica las grandes diferencias entre densidades netas y brutas (Batty, 2009). La **Figura 1.14** muestra diferentes configuraciones espaciales con una misma densidad.

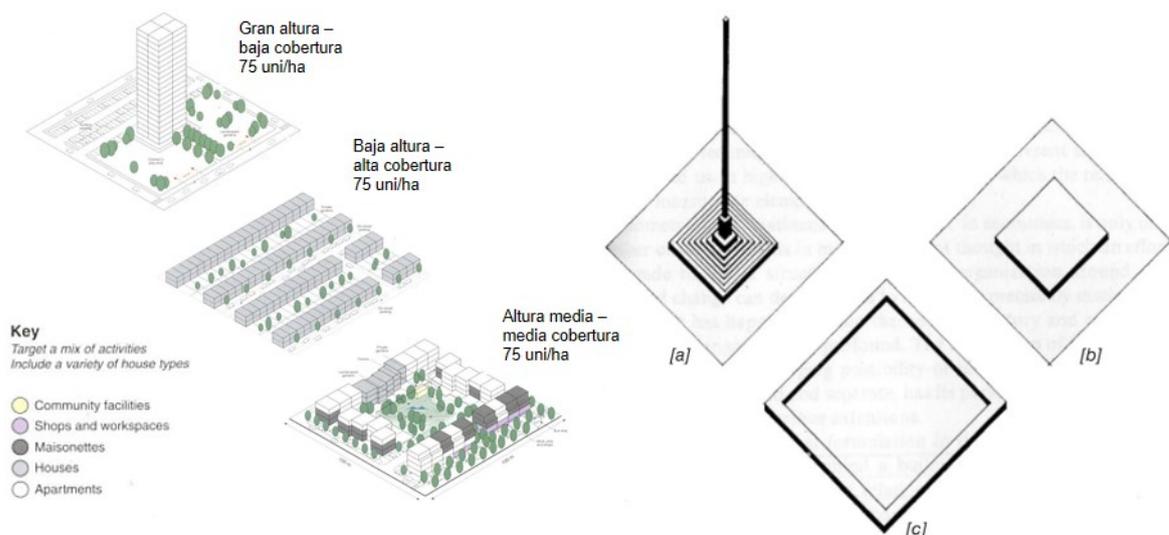


Figura 1.14. De izquierda a derecha: misma densidad de viviendas, diferente morfología urbana (Urban Task Force, 1999); misma cantidad de espacio construido, diferente distribución (Martin & March, 1972).

Las discusiones sobre la densidad urbana han sido durante mucho tiempo parte central en las teorías relacionadas con la forma urbana (Dovey & Pafka, 2014). A pesar de esto, al hablar de la densidad en relación a la forma urbana, se ha de enfatizar que, al tratarse de un parámetro cuantitativo, objetivo y neutral, la información que proporciona es sobre la concentración de un determinado objeto en una determinada superficie. Esto significa que no proporciona un valor cualitativo, no describe la distribución del objeto medido.

### 1.2.1 Evolución del concepto de densidad urbana

Gran parte de la preocupación por la densidad en la planificación y otros campos relacionados se ha centrado en la alta densidad urbana y su supuesto efecto negativo en la calidad de vida de los residentes urbanos. Históricamente, la ciudad se ha percibido como un lugar de hacinamiento, ruido, suciedad, crimen, pobreza, enfermedades, etc. (Churchman, 1999).

El concepto de densidad urbana aparece en el siglo XIX, como consecuencia directa de las condiciones de inhabilitación de las ciudades europeas de la época. Se analizaba cómo la densidad urbana afectaba la salud de los habitantes, la necesidad de acceso solar a la vivienda, ventilación, estandarización de la altura de los edificios, ancho de las calles, etc. (Berghauser Pont & Haupt, 2009). Desde mediados de siglo, aparecen normativas limitando la altura máxima de los edificios en relación al ancho de la calle (Cerdà en España, Haussmann en Francia). Aunque de manera indirecta, estas marcan la irrupción del concepto densidad en el planeamiento urbano. A finales de siglo XIX, los planificadores urbanos comienzan a emplear este concepto de densidad de forma explícita. Baumeister y Stübben, en Alemania, son los pioneros en este sentido en 1880. En 1899, E. Howard fija la densidad ideal de su nuevo modelo de ciudad en 75 hab/ha, especificando un número máximo de 30.000 habitantes 400 hectáreas.

En las siguientes décadas del siglo XX, surgen diferentes estudios y planes que retomaron las ideas de Howard. En torno a 1910, Unwin (1909, 1912) proponía una densidad de 30 viviendas por hectárea, excluyendo los caminos (**Figura 1.15**). Su libro publicado en 1909, «*Town Planning in Practice*», tuvo una amplia resonancia internacional, actuando como vehículo de difusión de la experiencia de la *Garden City* y de las teorías de Camillo Sitte (Sabaté Bel, 1985). En 1915, en Holanda, se pone en marcha el Plan Zuid de Ámsterdam, donde se propone una densidad de 315 hab/ha (4 veces más que la *Garden City* de E. Howard) (Berghauser Pont & Haupt, 2009).

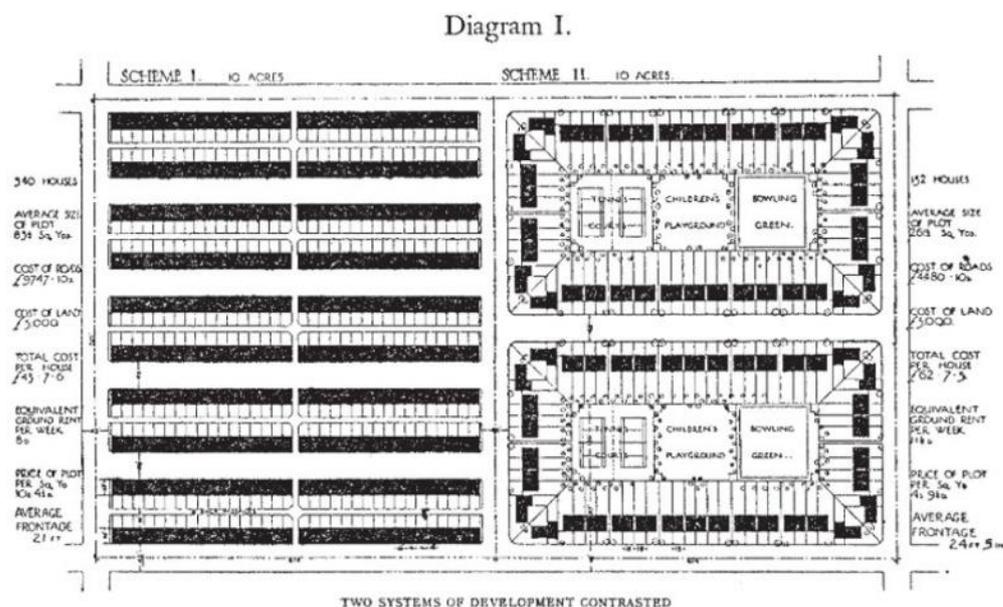


Figura 1.15. Estudio comparativo de la distribución de viviendas en 4 hectáreas (Unwin, 1912).

Durante la década de 1920, en Alemania, Anton Hoenig introduce el concepto de *spaciousness* (amplitud) en un intento de medir la calidad urbana. Este concepto surgió de la ordenanza de construcción de Berlín de 1925, la cual definía cinco categorías de edificios basada en la altura del edificio (de 2 a 5 plantas) y la cobertura del lote (del 10 al 60%). La amplitud es la relación entre la superficie no construida (m<sup>2</sup>) y la cantidad total de m<sup>2</sup> de construcción. Hoenig establecía un mínimo de 1 m<sup>2</sup> de espacio abierto por cada m<sup>2</sup> de espacio construido (Berghauser Pont & Haupt, 2009).

Alrededor de los años 30, Walter Gropius investiga las ventajas de los edificios altos (8-12 plantas): mayor acceso solar, mayor densidad, menor cantidad de terreno para un mayor número de viviendas. En esta década, Le Corbusier se erige como punta de lanza del movimiento modernista, que buscaba las altas densidades (hasta 1.000 hab/ha) para permitir una gran cantidad de espacio abierto, luz solar y aire fresco (lo opuesto a las ciudades del siglo anterior). La respuesta a esto fueron los modelos centralizados de *La Ville Radieuse* y el *Plan Voisin* de París, que consistían en edificios de gran altura (60 plantas) y una gran cantidad de espacio abierto (95% de la parcela). Estas propuestas se muestran en la **Figura 1.16**.

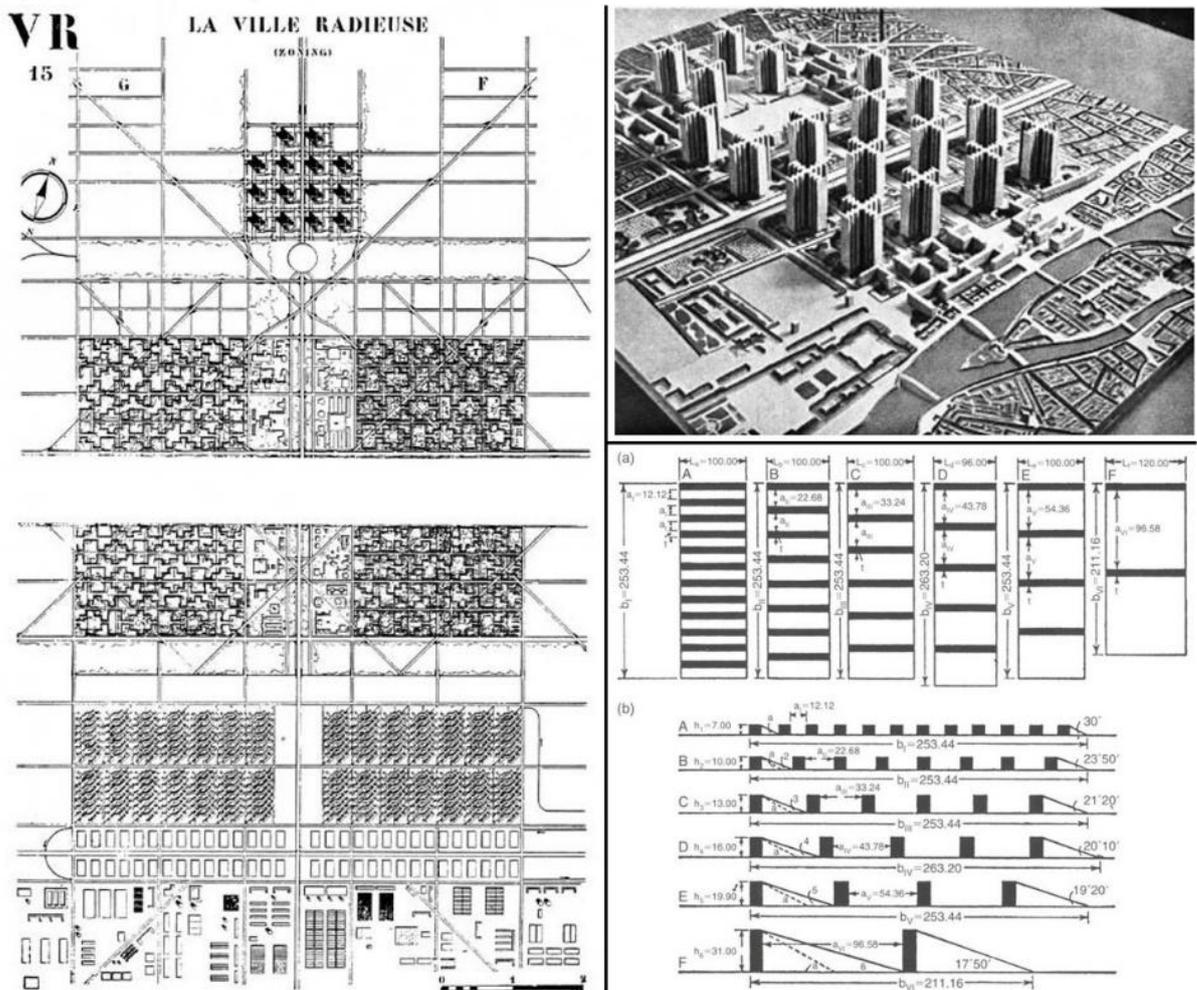


Figura 1.16. La Ville Radieuse y el Plan Voisin para París de Le Corbusier (Izquierda y derecha arriba); Relación entre la altura del edificio, ángulo solar, cobertura del suelo y densidad edificada de Gropius (Derecha abajo).

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/>.

Berghauer Pont & Haupt (2009) destacan dos libros de mitad del siglo XX que contribuyeron a cambiar la teoría y práctica del desarrollo urbano:

- *Can Our Cities Survive?* (Sert, 1942), donde se argumenta que la alta densidad era continuamente confundida con la sobrepoblación, y que soluciones como la *Garden City* o las soluciones de gran altura de Le Corbusier o Gropius eran culpables del declive en la vida urbana.
- *The Death and Life of Great American Cities* (Jacobs, 1961) donde se discute cómo el movimiento moderno había ignorado la complejidad de la ciudad y había olvidado que la vitalidad social y económica eran esenciales para lograr una ciudad funcional. Para lograr esto, Jacobs proponía una densidad mínima de 250 viviendas por hectárea.

A pesar de la gran cantidad de estudios sobre la densidad, no fue hasta 1974 con la publicación del informe «*The Cost of Urban Sprawl*», desarrollado por la *Real Estate Research Corporation*, que se abordó exhaustivamente y desde una perspectiva científica la relación entre densidad, patrones de crecimiento y costos de desarrollo urbano (en términos de consumo de tierra, construcción de vivienda e infraestructura/equipamientos asociados, costes energético-ambientales y calidad de vida personal) (Burchell et al., 1998; García-Nevado, 2019).

### 1.2.2 Medidas de densidad urbana

En el marco de esta tesis, se analizarán cinco métodos de medición de la densidad física, estos son los métodos más utilizados para llevar a cabo estudios urbanos:

- Densidad de población y de viviendas
- Intensidad de uso de suelo (FSI)
- Cobertura (GSI)
- Altura de edificación (L)
- Amplitud (OSR)

La **densidad de población** (**Figura 1.17**) puede ser expresada en términos de personas o de hogares en un área determinada, mientras que la **densidad de viviendas**, solamente expresa la cantidad de viviendas en un área determinada. El denominador puede ser la superficie territorial, el área cubierta, o una zona residencial (Morganti, 2013).



Figura 1.17. Modelos con la distribución de la densidad poblacional de tres ciudades (Burdett & Deyan, 2011).

La **intensidad de uso de suelo** (**Figura 1.18.a**) es también conocido como *Floor Area Ratio (FAR)*, *Floor Space Index (FSI)*, *Coeficiente de Uso de Suelo (CUS)* o como *Edificabilidad*. Es la relación entre el área total construida o edificada y la porción de terreno a la que se refiere. Desde 1948 está instituida en Europa como la medida estándar (Morganti, 2013). Un término comparable utilizado en New York es el FAR, que expresa el volumen del edificio en relación con el tamaño de la parcela, está incluido en la *New York City's Zoning Resolution* de 1961.

La **cobertura** (**Figura 1.18.b**), también conocida como *Coeficiente de Ocupación de Suelo (COS)*, *Compacidad*, *Gross Space Index (GSI)* o *Índice de Cobertura*. Este concepto ha sido utilizado frecuentemente durante el siglo XX, expresa la relación entre la huella del edificio y el área general de referencia. La cobertura fue activamente utilizada incluso durante el siglo XIX: el plan de ensanche de Barcelona de Cerdà (1867) establecía una cobertura máxima del 50%. En 1961, Jacobs (1961) proponía una cobertura entre el 60 – 80% de las manzanas urbanas. Más recientemente, Jan Gehl (2010) retoma el mismo argumento de un alto grado de cobertura.

La **altura de edificación** (*L*) (**Figura 1.18.c**) y el ancho de las calles se regulan mediante ordenanzas en la mayoría de países europeos desde finales del siglo XIX. Estos dos elementos de la forma urbana estaban estrechamente relacionados: En Paris, en la ordenanza de 1902, edificios de 7 plantas + ático estaban permitidos solamente en calles con al menos 20 m de ancho. Cerdà (1867) proponía calle de 20 m de ancho con edificios de 16 m de altura máxima.

La **amplitud** (**Figura 1.18.d**) u *Open Space Ratio (OSR)* es la relación entre la superficie libre de construcción y la superficie total construida (por m<sup>2</sup>) de un área determinada. Por lo general, se establece como un valor predeterminado en la planificación para garantizar una cierta cantidad de espacio abierto (Morganti, 2013).

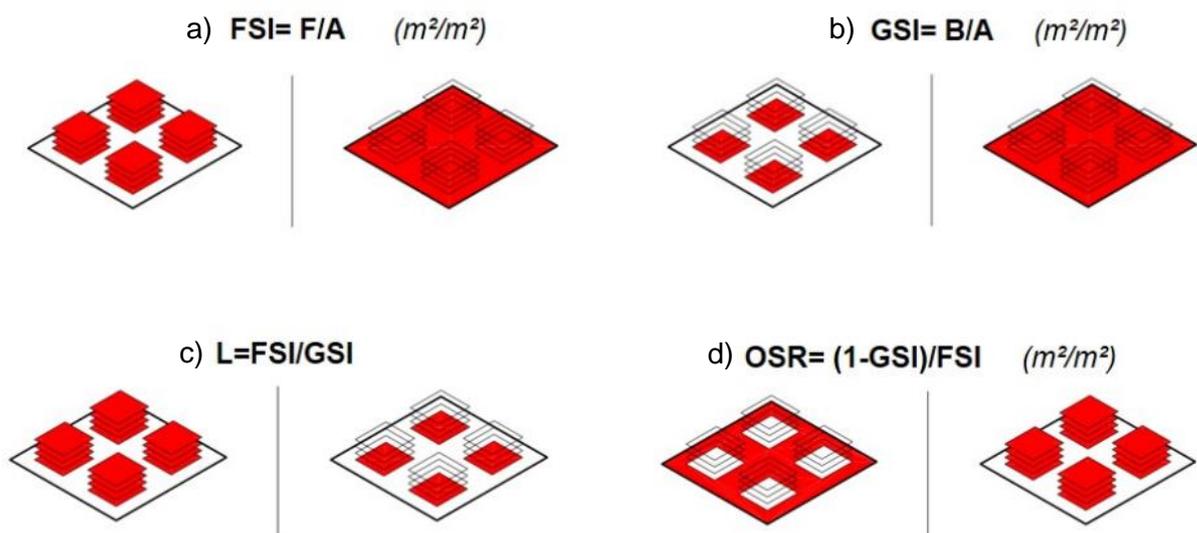


Figura 1.18. Cálculo de los indiferentes indicadores de densidad (Berghauer Pont & Haupt, 2009).

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

Los indicadores básicos para medir la densidad son la intensidad de uso de suelo (FSI) y la cobertura, (GSI). A partir de éstos, se pueden obtener el resto de indicadores (OSR y L). Para poder calcularlos, es necesario conocer tres variables:

- Área de base, "A" (área edificio, lote, manzana, tejido, distrito, etc.).
- Superficie total construida, "F" (es la suma de todas las superficies de las plantas del edificio).
- Área construida o huella del edificio, "B" (es el área del edificio medida a nivel de suelo).

### Representación de la densidad

Cada una de las medidas anteriores (indicadores) resulta insuficiente por sí sola, por lo tanto, se debe de utilizar más de una para describir un área urbana. A lo largo de la historia del urbanismo, se han utilizado diferentes combinaciones como en los casos de *New York City's Zoning Regulation* (FSI + GSI + Población), Barcelona (GSI + L), la Ordenanza de Berlín (FSI + GSI + L), por mencionar algunos de los más destacados.

El *Spacematrix* es un método basado en un diagrama tridimensional que combina tres indicadores (FSI, GSI y N – densidad de red) para proporcionar indicaciones sobre las características morfológicas del área estudiada (**Figura 1.19**). Fue diseñado por Meta Berghauser y Per Haupt en la Universidad de Delft (Berghauser Pont & Haupt, 2009). Este procedimiento resulta muy efectivo para evaluar y ubicar gráficamente las diferencias formales de una manera sencilla (Morganti, 2013).

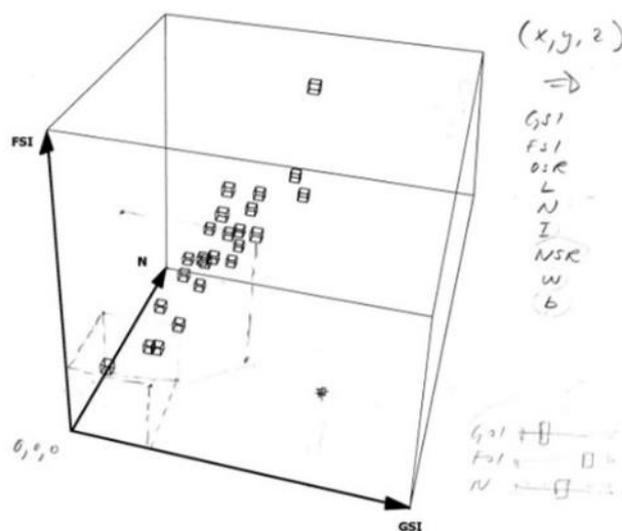


Figura 1.19. *Spacematrix* con los tres ejes: FSI, GSI y N (Berghauser Pont & Haupt, 2009).

En el marco de esta tesis, se ha optado por la proyección *Spacemate* con FSI (GSI). Es decir, el eje Y corresponde a FSI, el eje X es para GSI; OSR y L son gradientes que se abren en abanico sobre el diagrama.

A través de estos indicadores es posible colocar los tejidos estudiados en una zona específica del diagrama *Spacemate*. La **Figura 1.20** muestra las 5 zonas definidas por Berghauser y Haupt de acuerdo a los indicadores de densidad: parque, suburbano, ciudad jardín, urbano y altamente urbano.

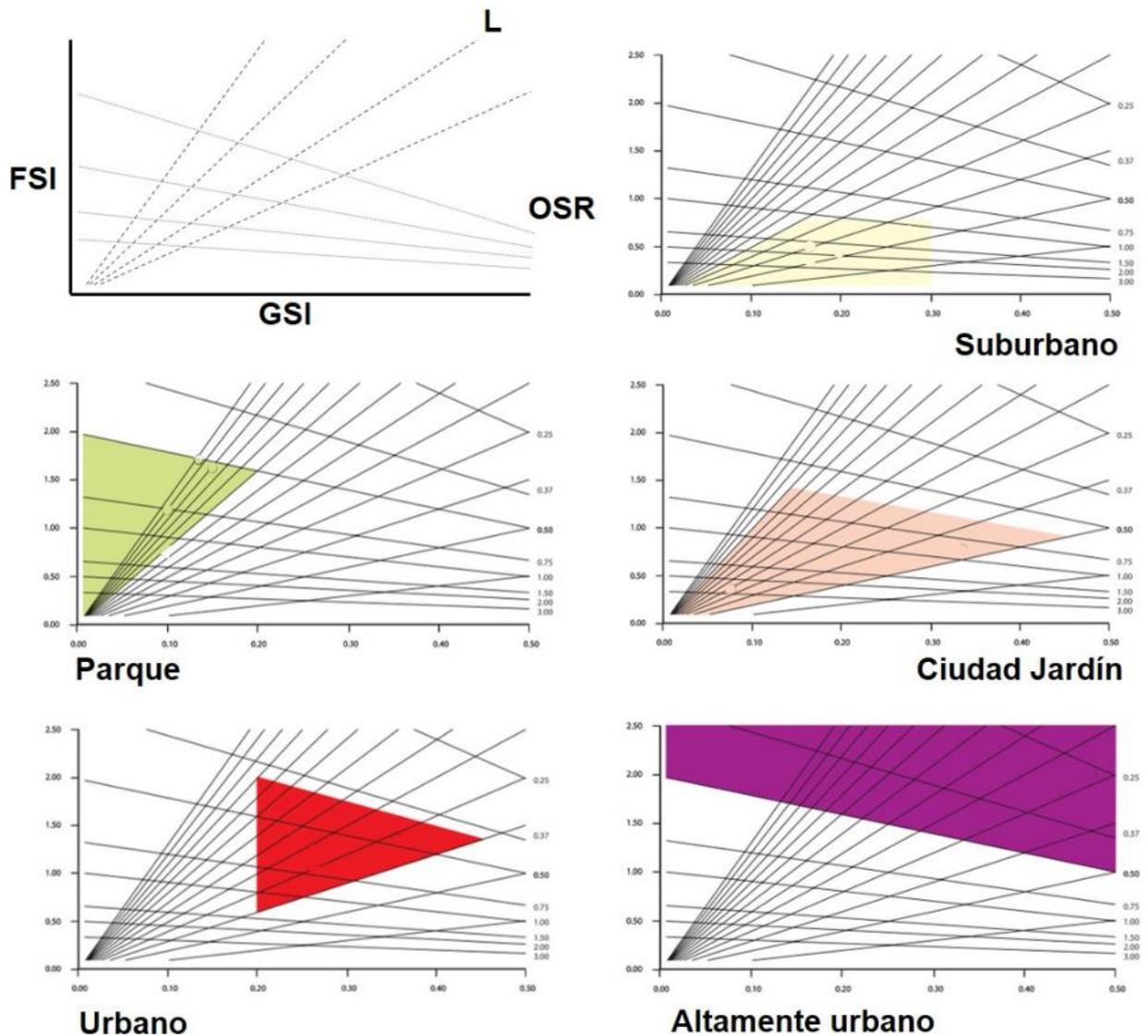


Figura 1.20. En la imagen superior se muestran las áreas de referencia del *Spacemate* que cumplen con los criterios de densidad indicados (Berghauser Pont & Haupt, 2009).

En la **Figura 1.21** se han colocado los indicadores de diferentes modelos urbanos que han sido discutidos a lo largo de la historia: (1) Unwin, 1912; (2) Hoening, 1920; (3) Le Corbusier 1920-30; (4) Gropius, 1930; (5) Jacobs, 1961; (6) Lozano, 1990. Salvo Jacobs y Le Corbusier, el resto de doctrinas quedan representadas como límites, la dirección de la flecha indica si es un límite máximo (flecha hacia abajo) y un mínimo (flecha hacia arriba). En el caso de los dos primeros, quedan acotados en una zona definida del diagrama, Le Corbusier en la zona de edificios altos y una gran cantidad de espacio libre, y Jacobs en la zona de alta urbanidad.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

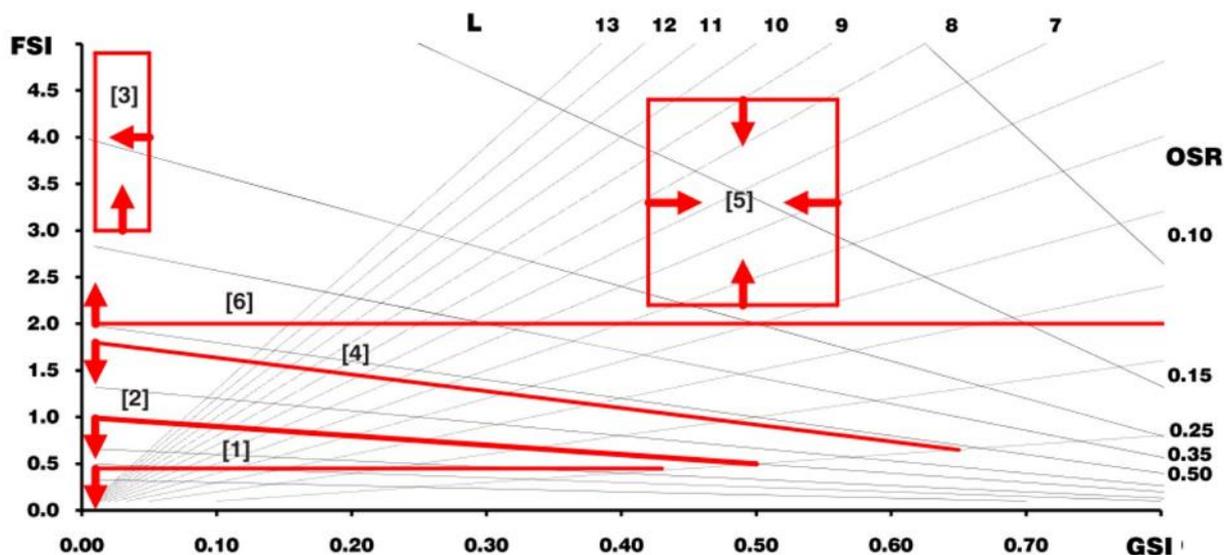


Figura 1.21. Ubicación en el *Spacemate* de las diferentes doctrinas que han sido discutidas a lo largo de la historia (Berghauser Pont & Haupt, 2009).

Por lo tanto, esta herramienta es útil para realizar comparaciones de distintos tejidos urbanos, ya sea de una misma ciudad o alguna otra. Al mismo tiempo permite obtener un diagnóstico rápido y fácil de entender de la situación morfológica del área estudiada, haciendo posible observar los indicadores en los que se ha de trabajar para modificar la posición del área estudiada sobre el gráfico. Dada a esta versatilidad, es que esta tesis utiliza el gráfico *Spacemate* como herramienta de análisis.

**CAPITULO 2**  
**CLIMA URBANO Y COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA VIVIENDA**

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

## 2.1 LA MEJORA DEL CLIMA URBANO EN UNA CIUDAD DEL DESIERTO

Muchos de los estudios existentes sobre el clima urbano se centran en la relación de la forma de la ciudad y la radiación solar. En climas cálido–secos, con altos niveles de radiación y altas temperaturas, el análisis de la radiación solar directa adquiere gran importancia (AlKhaled, Coseo, Brazel, Cheng, & Sailor, 2020; Bourbia & Awbi, 2004b; Coch, 1998).

Los parámetros ambientales que influyen sobre el confort térmico son: la temperatura del aire, la humedad relativa del aire, la velocidad del aire y la temperatura media radiante (Coch & Serra, 1995). La temperatura media radiante (TMR) resulta un parámetro clave para evaluar el confort térmico en los espacios exteriores. Este parámetro engloba todos los flujos de radiación recibidos por el ser humano, tanto en onda corta como onda larga (Ali-Toudert, 2005). En el clima cálido–seco (BWh), donde existe una fuerte radiación solar directa, ésta se convierte en el agente más significativo en la ganancia de calor (Kántor & Unger, 2011; Sharmin & Steemers, 2013). Por un lado, la radiación solar directa es la componente más importante de los flujos de onda corta recibidos por los peatones expuestos al sol. Por otro, la radiación solar directa es la causa principal del sobrecalentamiento de las superficies urbanas y, por tanto, de su emisión de radiación en onda larga. Por ello, esta tesis se centra en la evaluación de la radiación solar directa.

Debido a la preeminencia de este parámetro en las condiciones ambientales, tanto en ciudades contemporáneas, como en ciudades antiguas localizadas en regiones desérticas, la reducción de la incidencia solar en el espacio público suele ser un importante criterio de diseño urbano (Bourbia & Awbi, 2004a, 2004b).

Una manera de estudiar la radiación directa es analizar la cantidad de horas de sol directo que recibe una superficie; este indicador describe el tiempo que un espacio es habitable, y está relacionado con la morfología urbana. Otra manera es el analizar la cantidad de energía que recibe la superficie en un determinado periodo; esta información habla de la intensidad de la radiación solar directa.

Otro método muy utilizado para medir la radiación solar, es el factor de vista de cielo, (en inglés: *Sky View Factor*, SVF). Es la proporción del domo del cielo que es "visto" por una superficie, ya sea desde un punto particular de esa superficie o integrado en toda su área (Erell, 2011; Johnson & Watson, 1984; Oke, Mills, Christen, & Voogt, 2017) (**Figura 2.1**).

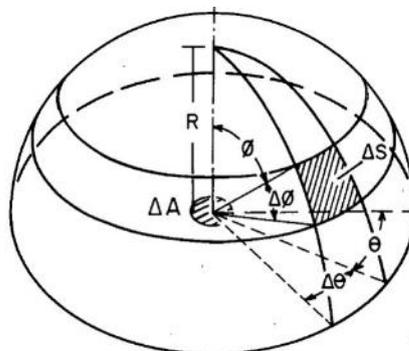


Figura 2.1. Modelo geométrico del *Sky View Factor* (Johnson & Watson, 1984).

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

El *Sky View Factor* es un parámetro geométrico que sirve para calcular los intercambios de radiación que ocurren de forma difusa entre el cielo y una superficie. Este indicador ha sido correlacionado con diversos aspectos energéticos como el fenómeno de la isla de calor (UHI), la posibilidad de iluminación natural bajo cielo cubierto o de enfriamiento radiativo nocturno de las superficies (Ali-Toudert, 2005; Arnfield, 1990a; García-Nevado, 2019; Oke, 1978; Salvati, 2016). En cambio, estudios como el de Robinson (2006) muestran que este indicador no resulta indicado para describir la radiación solar directa recibida por las superficies, parámetro de interés para esta tesis.

AlKhaled et al. (2020) realizaron una exhaustiva revisión de la literatura referente a distintas estrategias de mitigación del calor en ciudades localizadas en desiertos cálidos. En su trabajo, distinguen tres principales estrategias de mitigación del calor: morfológicas, materiales y paisajismo. Centrándose en las estrategias morfológicas morfología, este artículo selecciona diversos trabajos entre 1988 y la actualidad en base a su calidad, ya que incluyen una metodología, datos y resultados. En la **Figura 2.2** se representa la ubicación del área de estudio de los mismos.

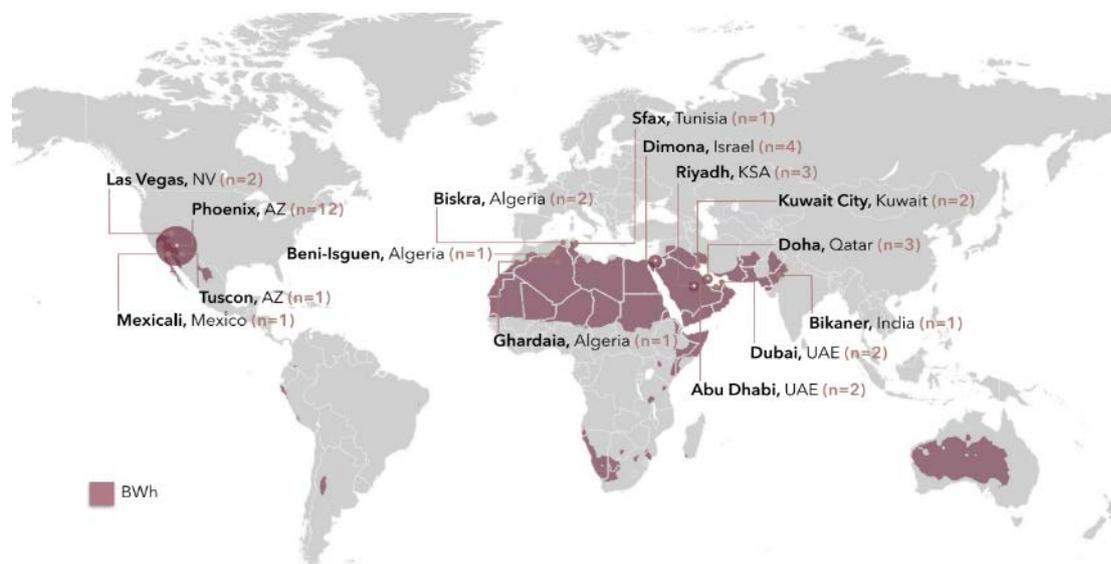


Figura 2.2. Sitios estudiados y numero de estudios por sitio, con su distribución en la superficie global del subtipo climático BWh de Köppen (AlKhaled et al., 2020).

De estos estudios, 8 se enfocan solamente en la morfología urbana, mientras que en el resto (11) se combinan la morfología con una o con dos estrategias distintas (materiales y paisajismo). Lo hacen principalmente durante el verano (12) y en menor medida durante el verano e invierno (7). Estos estudios, al medir principalmente la temperatura del aire, temperatura superficial, temperatura media radiante o índices de confort, son hechos en su mayoría (15) durante el ciclo diario (24h); mientras que el resto (4) es durante el día.

Los indicadores más utilizados para evaluar la morfología a nivel de calle son: (6) la relación de aspecto (H/W), (5) la orientación de la calle con respecto al sol, (2) la densidad construida, (3) el porcentaje de cobertura del edificio, (2) el Factor de Vista de Cielo (SVF), (2) la orientación de la calle con respecto al viento, (1) el ancho de la calle, (1) la sombra vegetal.

En esta revisión de la literatura, se encontró que la variabilidad en la evaluación térmica a través de los distintos indicadores está sujeta a la forma de describirlos y utilizarlos. Por lo tanto, se remarca la importancia en la normalización y representatividad de los indicadores para evitar sesgos. Como se mencionó en el capítulo anterior, el uso de la densidad edificada es considerado como problemática debido a la falta de un consenso en su cálculo, sobre todo al utilizarla de manera cualitativa.

Esta tesis se centra en la forma de la ciudad. Por ello es muy importante tanto el tipo de modelo geométrico sobre el que se realiza el estudio, como los indicadores utilizados para el estudio de la incidencia de la radiación solar sobre el espacio urbano.

### 2.1.2 El modelo de cañón urbano: relación de aspecto y orientación

El concepto de cañón urbano ha sido adoptado como la unidad estructural básica en el análisis de la investigación climatológica urbana, tanto a través de mediciones como de cálculos modelados (Arnfield, 1990b; Erell, 2011). Se le llama cañón urbano a la estructura formada por la calle y los edificios que la flanquean (**Figura 2.3**).

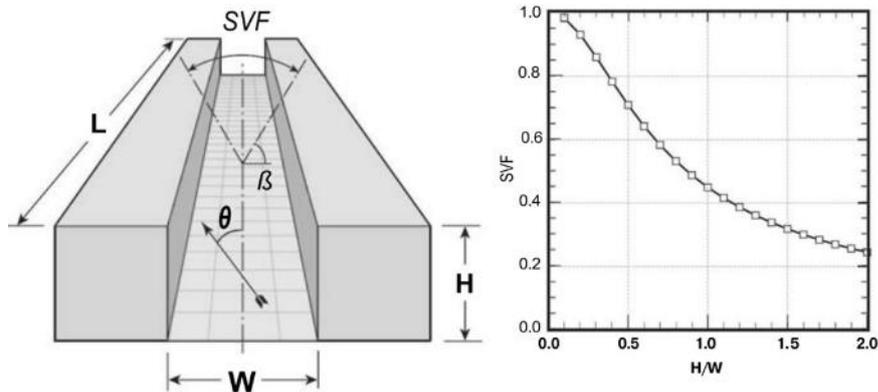


Figura 2.3. Vista esquemática de un cañón urbano simétrico y sus descriptores geométricos. A la derecha se muestra el valor del SVF en función a la relación de aspecto del cañón (Erell, 2011).

Los dos parámetros más característicos de un cañón urbano son su sección transversal y su orientación. La **sección transversal** se describe habitualmente por la relación adimensional  $H/W$ , donde  $H$  es la altura de los edificios adyacentes a la calle y  $W$  es el ancho de ésta. (Arnfield, 1990b; García-Nevado, Pages-Ramon, & Coch, 2016; Oke, 1988; Oke et al., 2017; Strømman-Andersen & Sattrup, 2011). El indicador  $H/W$  es conocido como relación de aspecto (en inglés: *aspect ratio*). La relación de aspecto del cañón urbano es relevante para muchas características del clima urbano: acceso solar, sombra, atrapamiento radiativo, efectos del viento, confort térmico y la dispersión de los contaminantes de los vehículos (Oke et al., 2017).

Junto a la relación de aspecto ( $H/W$ ), la **orientación** del cañón urbano tiene gran influencia en el tiempo e intensidad de la incidencia de la radiación solar sobre las superficies urbanas, y por ende, sobre la sensación térmica de las personas (Ali-Toudert & Mayer, 2007; Bourbia & Awbi, 2004a). Arnfield (1990) realizó un exhaustivo estudio numérico sobre varios cañones ( $H/W$ : 0,25 – 4,0) en distintas orientaciones (E-W, N-S) para todas las latitudes y durante todo el año, tomando especial interés en el invierno (diciembre) y el verano (junio) (**Figura 2.4**).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

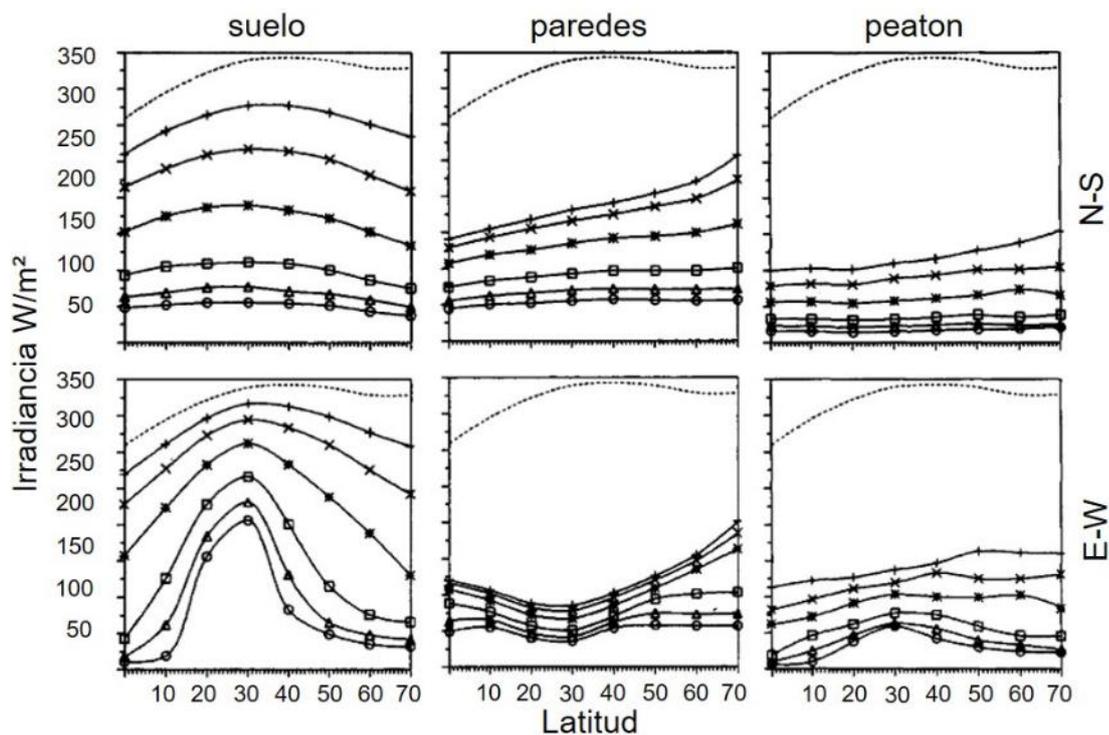


Figura 2.4. Irradiancias mensuales medias para cañones con E-W y N-S, con diferentes relaciones de aspecto. Los símbolos +, x, \*, □, Δ corresponden a H/W= (0,25 ;0,5 ;1, 2, 3, 4) Köppen (Arnfield, 1990b).

La orientación tiene mayor influencia en la cantidad de radiación recibida por las fachadas, mientras que la profundidad del cañón resulta de mayor peso en la cantidad de radiación sobre el suelo del cañón. Esta importancia de la orientación se acrecienta durante el verano. Para el peatón (ubicado en una zona normalmente utilizada para el tráfico peatonal), la orientación del cañón produce poca variación en los niveles de radiación recibida a lo largo del año.

En invierno, cuando la altura solar es la más baja, se generan más sombras sobre las superficies del cañón, debido a la obstrucción producida por la geometría del propio cañón; este efecto se incrementa en las latitudes altas, donde se dan los menores niveles de irradiancia. Esta diferencia entre fachadas y suelo es más notable en orientaciones E-W con latitudes entre 20°– 40°. Arnfield encontró que, en estas latitudes, las elevaciones solares altas permiten una penetración máxima en el cañón. Por ello, el efecto de la profundidad del cañón resulta es menos influyente. Por ejemplo, en una latitud 30°N, el suelo de un cañón E-W con una relación de aspecto H/W=4 recibe aproximadamente la mitad de irradiancia solar incidente que recibe una superficie horizontal sin obstrucciones.

Esta última observación hecha por Arnfield, también quedó demostrada por Erell (2011), que hizo un estudio de varios cañones con diferentes relaciones de aspecto (0,33 – 2), en una latitud 30°N el 21 de junio y el 21 de diciembre. Sus resultados gráficos se muestran en la **Figura 2.5**.

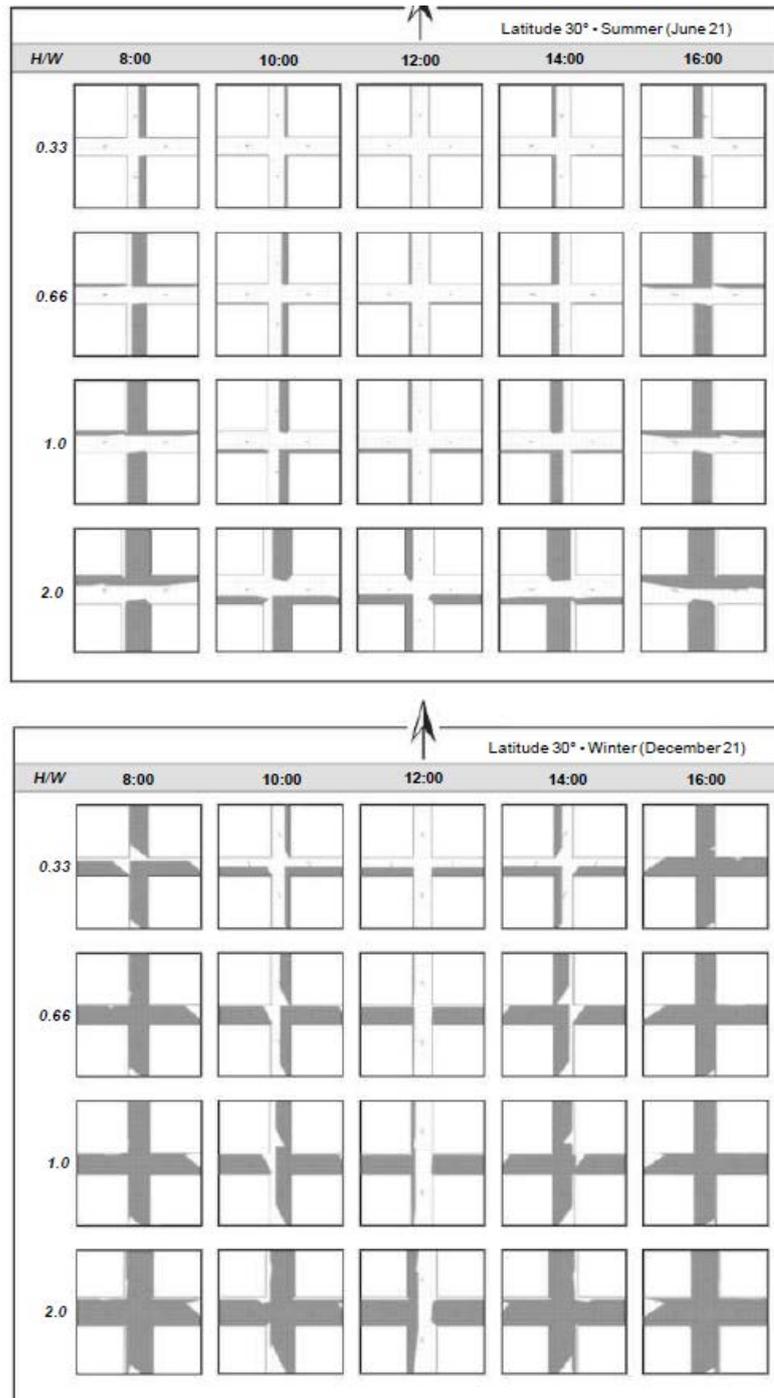


Figura 2.5. Patrones de sombra de varios cañones con diferentes relaciones H/W, a diferentes horas en un día de verano y uno de invierno. Las sombras están calculadas para una latitud 30°N (Erell, 2011).

A los estudios de Oke (1976, 1978, 1988) y Arnfield (1990b, 1994) de las últimas décadas del siglo XX, les han seguido numerosos trabajos que evalúan diferentes aspectos tanto del clima urbano como del interior de los edificios a través del modelo de cañón urbano. Para esta tesis, son de especial interés los trabajos realizados en climas cálido–secos (BWh, en la clasificación de Köppen). De estos caben destacar los trabajos realizados por Ali-Toudert & Mayer (2006), Bourbia & Awbi (2004a, 2004b), Krüger, Pearlmutter, & Rasia (2010) y Pearlmutter, Bitan, & Berliner (1999).

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

La principal ventaja del uso del cañón urbano es su simplicidad, ya que su diseño geométrico puede ser descrito por los parámetros anteriormente mencionados (relación de aspecto y orientación). García-Nevedo (2016) señala que estos parámetros solamente tienen correspondencia con las obstrucciones creadas por los planos verticales de ambas fachadas. Añade que, a pesar de la innegable utilidad del concepto de cañón urbano, modelar calles como corredores rectangulares infinitos pasa por alto la complejidad tridimensional de los tejidos urbanos, esencial para la comprensión de los intercambios energéticos urbanos. En este sentido, las intersecciones de las calles han recibido poca atención en estudios de energía solar. El diseño de estas intersecciones puede significar una diferencia substancial en la cantidad de radiación solar en los tejidos urbanos, incluso cuando cuenten con la misma relación de aspecto.

Actualmente, el modelo teórico de cañón urbano se sigue utilizando para estudiar el comportamiento energético de la forma urbana. A comienzos de su uso las limitaciones técnicas hacían muy complicado pasar de una representación bidimensional a una tridimensional. No obstante, en la actualidad los avances en los métodos de cálculo y modelizado hacen posible una representación del entorno urbano más cercana a la realidad.

Existen pocos trabajos en climas cálido - secos en los que se ha detallado la sección transversal del cañón urbano. Autores como Ali-Toudert & Mayer (2007) y Krishan (1996), han trabajado con modelos de cañón urbano asimétricos y con irregularidades (balcones, galerías, etc.), en los cuales se ha demostrado la importancia de una representación más apegada a la realidad (**Figura 2.6**).

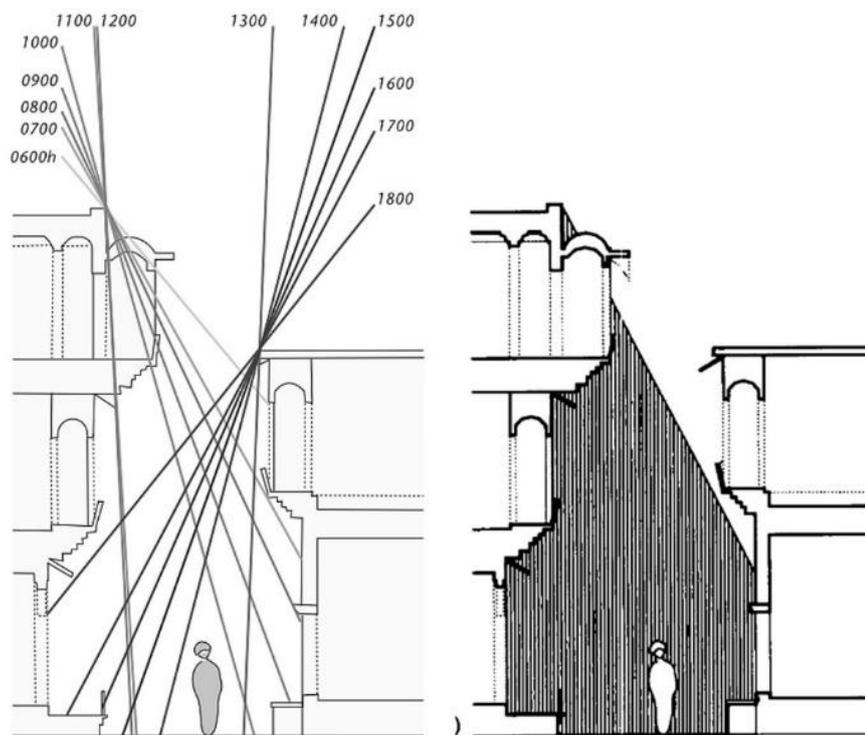


Figura 2.6. Sección de una calle típica en Jaisalmer, India (27°N). Se muestra la proyección de la sombra en diferentes momentos del solsticio de verano (Krishan, 1996).

### 2.1.3 Trama urbana

Los modelos utilizados para estudiar la radiación solar en ambientes urbanos se pueden agrupar en dos familias. La primera engloba los estudios relacionados con el enfoque del cañón urbano, en la que el análisis que se realiza en dos dimensiones. La segunda incluye los trabajos basados en tramas urbanas, es decir, modelos tridimensionales de la ciudad. Este enfoque permite considerar la complejidad geométrica de la forma urbana, pasando de la micro escala (1 cm – 1 km) a estudios de escala local/urbana (100 m – 50 km) (**Figura 2.7**).



Figura 2.7. Diferenciación de las escalas espaciales para el estudio climático (Oke, 1978).

Existen dos enfoques para la elaboración de modelos tridimensionales de tramas urbanas (**Figura 2.8**): el tipológico y morfológico (Curreli & Coch, 2013). Los modelos tipológicos representan la geometría urbana de manera simplificada, creando un tejido homogéneo con las características promedio del tejido real. Los modelos morfológicos buscan representar la trama urbana de una manera fiel a la realidad, manteniendo detalles específicos de su geometría, aunque con diferentes niveles de detalle (Biljecki, Ledoux, & Stoter, 2016).

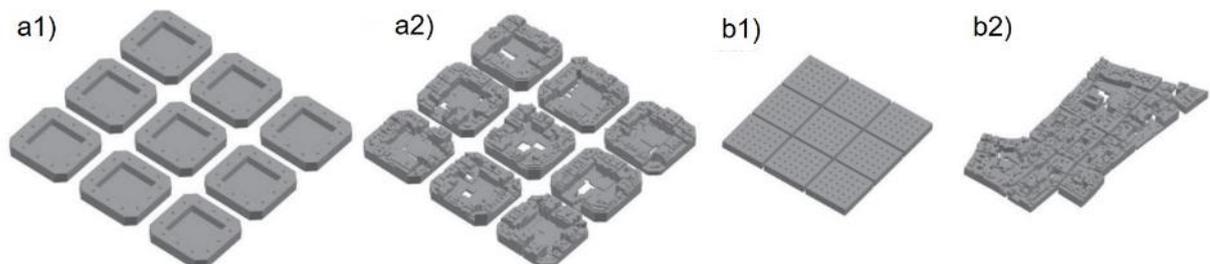


Figura 2.8. Modelos tipológicos y morfológicos de dos barrios de Barcelona (Curreli & Coch, 2013).

Debido a estos aspectos, cada uno de los tipos de modelo (tipológico o morfológico) suele ser utilizado con distintos propósitos. Los modelos tipológicos son mayormente utilizados en investigaciones teóricas, en los que se busca obtener datos que permitan evaluar una trama urbana desde un punto de vista tendencial (Gupta, 1984, 1987; Morganti, Salvati, Coch, & Cecere, 2017; Ratti, Raydan, & Steemers, 2003; Salvati, Coch, & Morganti, 2017). Las **Figura 2.9** y **Figura 2.10** muestran ejemplos de estudios tipológicos. Los modelos morfológicos se utilizan en estudios más específicos, en los que se busca obtener resultados cuantitativos. Los modelos morfológicos sirven asimismo para elaborar intervenciones urbanas, por lo que han de considerar las dimensiones y aspectos característicos del área estudiada.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

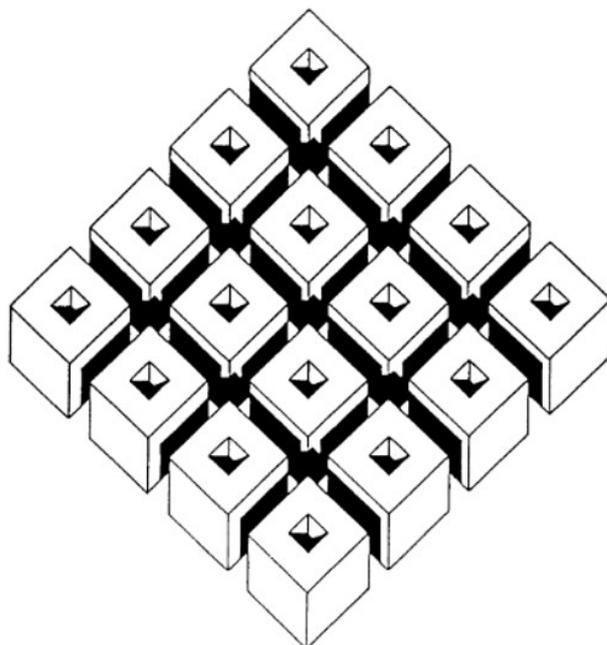
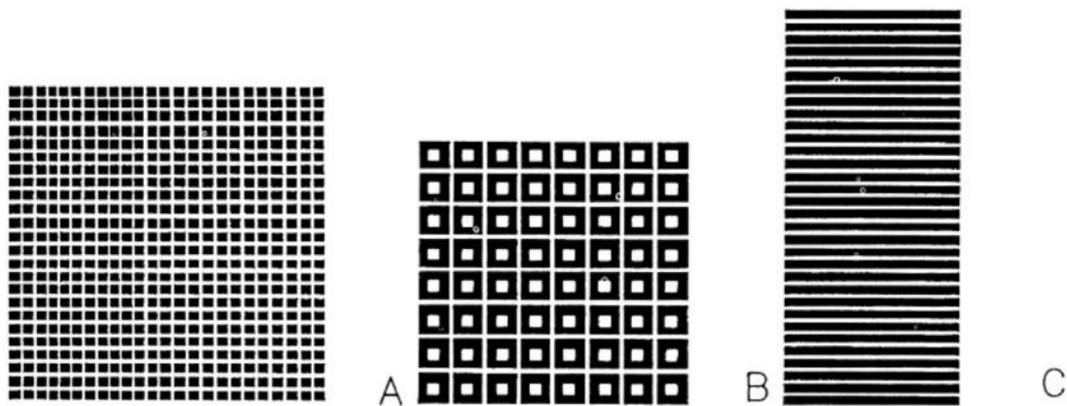


Figura 2.9. Tres posibles configuraciones de un volumen edificado de 800.000 m<sup>3</sup> (arriba): (A) pabellón, (B) patio central, (C) bloque lineal. Patrones de sombra/luz en un clúster de edificios de patio central (abajo) (Gupta, 1987).

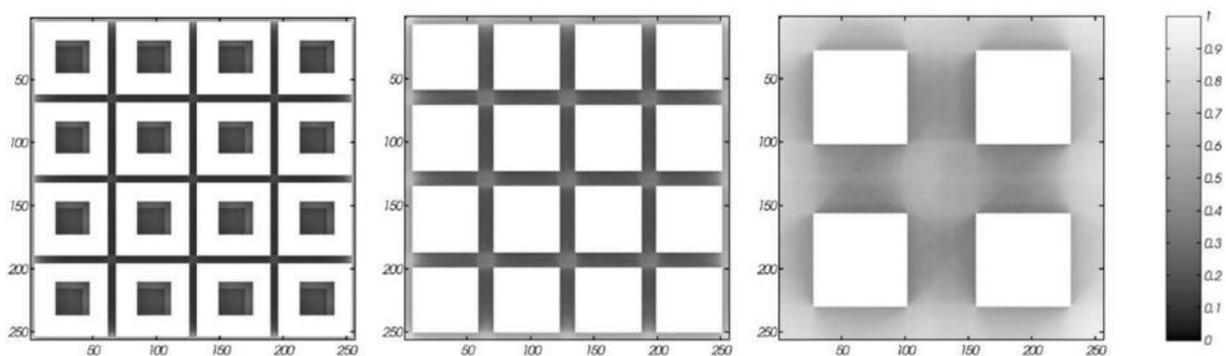


Figura 2.10. Sky View Factor a nivel de cale en tres diferentes configuraciones urbanas (Ratti et al., 2003).

Los modelos tipológicos fueron los primeros en ser utilizados ya que se podían definir de manera paramétrica (ancho de calle, alto, ancho manzana, etc.). Este tipo de estudios permitió avanzar en el conocimiento del clima urbano, expresando tendencias. Sin embargo, sus conclusiones son difícilmente aplicables en tejidos reales, sobre todo en los ya existentes. Además, está demostrado que los estudios tipológicos (y sus simplificaciones) pueden producir desviaciones importantes que afectan sobre todo al potencial energético de distintas superficies (cubiertas, calle, etc.) (Benoit Beckers, Rodríguez, Antalucha, & Batoz, 2010).

Actualmente, gracias a los avances en los métodos de cálculo y a una mayor disponibilidad de modelos urbanos complejos (GIS, *Google Earth*, etc.), ha aumentado la cantidad de estudios que adoptan los modelos morfológicos (**Figura 2.11**). La mayoría de estos estudios morfológicos se han realizado en países desarrollados, debido en parte a la mayor capacidad técnica para realizarlo, y a disponer de bases de datos ricas y de acceso público.

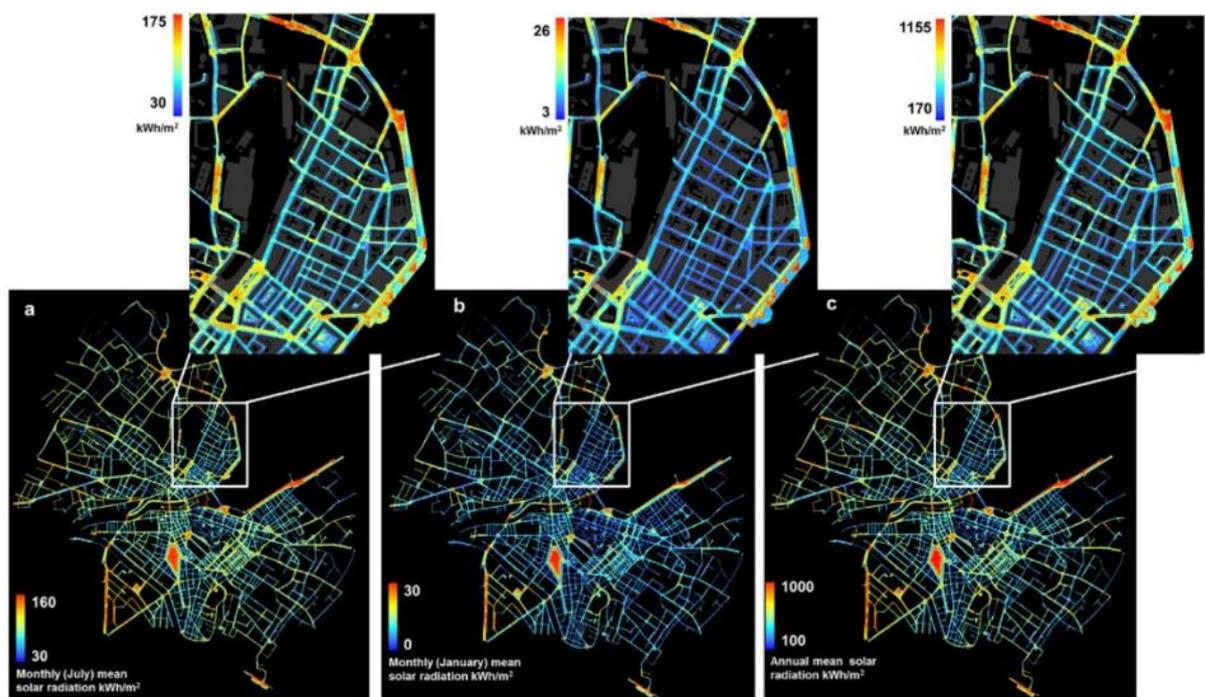


Figura 2.11. Radiación media mensual y anual (kWh/m<sup>2</sup>) en la superficie de las calles de Ginebra, Suiza, se ha utilizado GIS para su estimación (Mohajeri et al., 2019).

La posibilidad de hacer estudios sobre tramas urbanas proporciona una información espacializada que permite identificar áreas de interés, ya sea por su buen comportamiento energético o por ser áreas problemáticas. Estos estudios se pueden llevar a cabo por diferentes medios: mediciones in situ o simulaciones tridimensionales. Mientras que las mediciones están limitadas a lo existente, las simulaciones permiten tanto la evaluar la situación actual como escenarios alternativos. Esta última posibilidad ha sido explotada mayormente en los modelos tipológicos, gracias a que este tipo de modelo permite la parametrización de distintos aspectos urbanos (altura edificios, anchos de calle, ocupación del suelo, etc.), permitiendo que la creación de un nuevo modelo hipotético sea relativamente fácil (Cheng, Steemers, Montavon, & Compagnon, 2006) (**Figura 2.12**).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

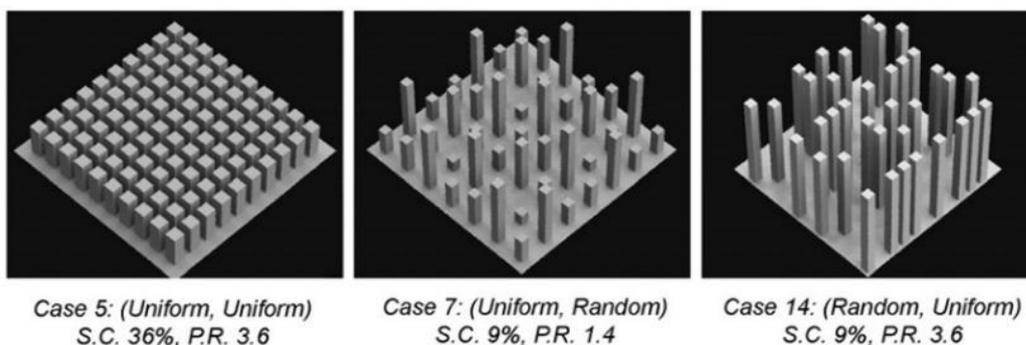


Figura 2.12. Estudio sobre forma urbana, densidad y potencial solar. Modelos genéricos para simulación (Cheng et al., 2006).

Por su parte, los estudios sobre modelos morfológicos se han centrado en ambientes urbanos de geometrías complejas para ser evaluados y no modificados (Curreli, Serra-Coch, Isalgue, Crespo, & Coch, 2016; Mohajeri et al., 2019, 2016; Montavon, Scartezzini, & Compagnon, 2004; Ratti, Baker, & Steemers, 2005; Robinson, 2006), ocasionando que existan pocos estudios morfológicos sobre tramas en los que se evalúe su situación y se haga una propuesta morfológica (Compagnon, 2004; Sarralde, Quinn, Wiesmann, & Steemers, 2015) (**Figura 2.13**).



Figura 2.13. Comparación de cuatro formas urbanas hipotéticas en el área de Perolles en Friburgo, Suiza. Se calculó el potencial solar en las fachadas (Compagnon, 2004).

Otro aspecto que resulta de importancia en el marco de esta tesis, es que, de acuerdo a la revisión de la literatura existente, la mayoría de los estudios con modelos morfológicos se han hecho para ubicaciones con un clima donde se busca aumentar la radiación solar recibida y el SVF de los distintos ambientes urbanos. En cambio, son escasos en los estudios hechos en sitios donde el exceso de radiación solar es un problema. Estos se enfocan tanto en la evaluación de la situación actual, como en generación de propuestas para la reducción de la radiación recibida (Al-Sallal, 1996; Aleksandrowicz, Zur, Lebendiger, & Lerman, 2020; Middel, Hüb, Brazel, Martin, & Guhathakurta, 2014). La **Figura 2.14** muestra un ejemplo de estudio morfológico donde se evalúa el índice de sombra sobre la calle en diversos barrios.



Figura 2.14. De izquierda a derecha: Mapa de valores medios de un índice de sombra en los barrios de Tel Aviv. Mapa con los valores medios del índice de sombra en segmentos de las calles de Tel Aviv. En la tercera imagen se muestra un mapa con valores de la radiación recibida en las calles (Aleksandrowicz et al., 2020).

La mayoría de los estudios morfológicos se enfocan en la radiación solar. Esto se debe a que es uno de los principales parámetros en cuestiones energéticas tanto a nivel de tejido urbano como a nivel de manzana o edificio. Como se ha mencionado en este capítulo, en esta tesis se evaluará la radiación solar directa a una escala de tejido urbano, mediante un modelo morfológico sencillo que permita elaborar propuestas que se apeguen a la normativa existente.

Para la simulación de la radiación solar directa (onda corta) incidente sobre la calle, se ha utilizado el software Heliodon2 (Benoit Beckers & Masset, 2006). Este software permite realizar cálculos de una manera simplificada al considerar solamente la componente directa de la radiación solar. Heliodon2 permite generar en cada punto del modelo estudiado un diagrama solar con las máscaras de su entorno. La **Figura 2.15** muestra como esta proyección estereográfica se puede transformar en isócrona, equivalente o en una proyección ortográfica, dependiendo del resultado que se busque.

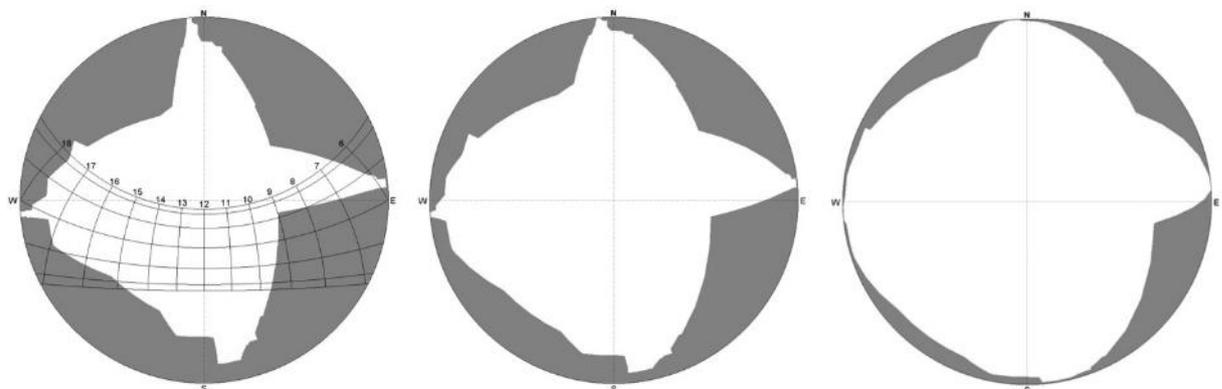


Figura 2.15. Diferentes proyecciones generadas por Heliodon2. De izquierda a derecha: proyección estereográfica, proyección equivalente y proyección ortográfica.

Fuentes: (Elaboración propia con Heliodon2).

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

Para realizar los cálculos de radiación incidente, Heliodon2 utiliza el modelo de cielo despejado de Liu & Jordan (1960). Este modelo tiene en cuenta la transmisividad de la atmósfera y el espesor de la misma para los cálculos del flujo solar. Esta herramienta integra el flujo solar en intervalos definidos por el usuario (fracción de hora, hora, día, mes, estación o anual), proporcionando información gráfica y cuantitativa sobre la radiación solar recibida ( $\text{kWh/m}^2$ ), obteniendo como resultado mapas de radiación incidente sobre las distintas superficies que conforman el modelo estudiado (B. Beckers & Rodríguez, 2009; García-Nevado, 2019). En la **Figura 2.16** se muestra un ejemplo de estos mapas de radiación.

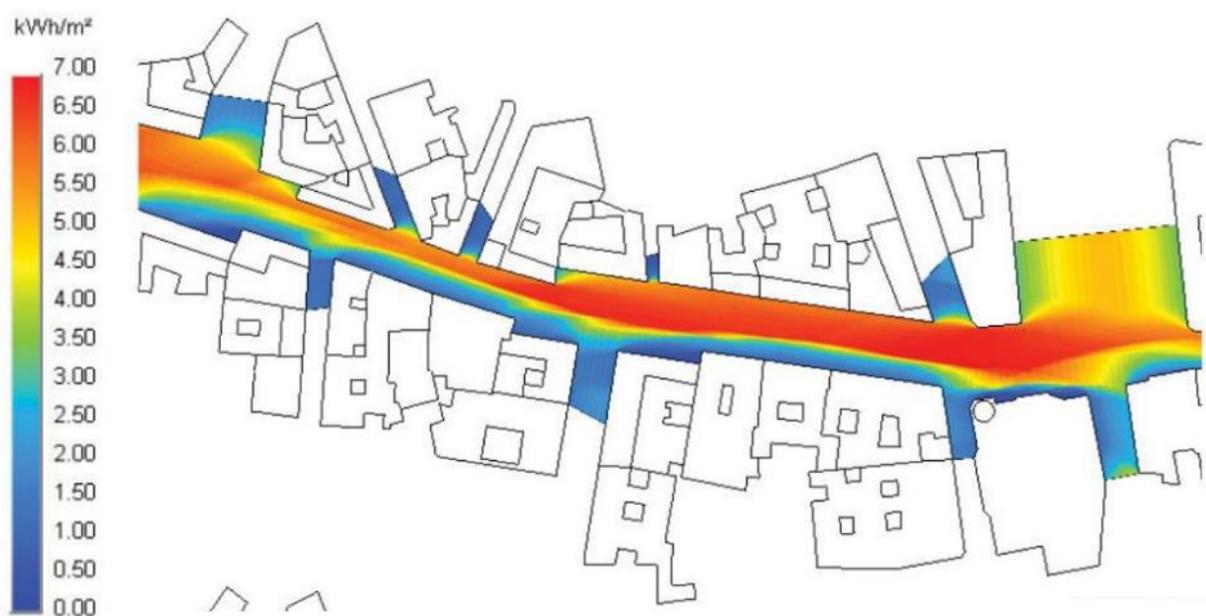


Figura 2.16. Mapa producido por Heliodon2, muestra la radiación solar directa recibida sobre el pavimento (García-Nevado, 2019).

## **2.2 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA VIVIENDA**

Históricamente, mantener el calor en ambientes fríos a través de alguna forma de calefacción (el fuego, hipocausto, las estufas de leña y calderas) siempre ha sido una prioridad. En contraparte, el uso de energía para la refrigeración en ambientes cálidos de gran tamaño es algo del siglo XX (Sivak, 2009).

Con la consolidación de la demanda social de confort térmico, los sistemas de climatización se han convertido en una necesidad casi ineludible en una gran parte del mundo. En los países desarrollados, el consumo derivado de los sistemas HVAC representa la mitad del uso de energía en los edificios y alrededor de una quinta parte del uso total de la energía de países como Estados Unidos (Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008). Se espera que entre 2010 y 2050, el consumo mundial en climatización aumente entre un 7 y un 40% (Güneralp et al., 2017). Esta gran variabilidad se debe a la incertidumbre sobre la densidad de las ciudades con un rápido crecimiento, particularmente las localizadas en China.

En regiones de clima cálido, se ha calculado que entre el 70 y 80% del consumo total de energía se utiliza para operar sistemas de refrigeración mecánicos (Dabaieh, Wanas, Hegazy, & Johansson, 2015). Actualmente, el uso de refrigeración en las viviendas de países en desarrollo es poco común, a pesar de esto, se espera que el aumento en la capacidad económica de las personas cambie esto. Sivak (2009) examinó la demanda potencial de energía para refrigeración de 50 áreas metropolitanas utilizando datos de grados-día de refrigeración y calefacción locales y obtuvo los siguientes resultados:

- Dentro de las 50 áreas metropolitanas más pobladas del mundo, 38 se encuentran en países en desarrollo, y la mayoría de estos son países con climas cálidos.
- 28 de las primeras 30 áreas metropolitanas principales en términos de grados-día de refrigeración se encuentran en países en desarrollo.
- La demanda potencial de enfriamiento es mayor que las demandas de calefacción en la mayoría de las áreas metropolitanas que se encuentran en países en desarrollo (24 de 38).

En climas cálido-secos (BWh), donde el uso de refrigeración en las viviendas es prácticamente obligatorio, se utilizan distintas estrategias arquitectónicas para reducir la demanda que significa el uso de los sistemas de refrigeración. En el marco de esta tesis se ha revisado la literatura referente a las principales estrategias utilizadas en este tipo de climas para la reducción de la demanda energética.

### **2.2.1 Los efectos positivos de la sombra y la alta reflectancia.**

El incremento de la reflectancia de las superficies y el uso de protecciones solares son dos estrategias altamente efectivas para reducir las cargas térmicas durante el día en los edificios, y por lo tanto, evitar su sobrecalentamiento (De Boeck, Verbeke, Audenaert, & De Mesmaeker, 2015). En climas cálido-secos, donde la refrigeración es la principal demanda de climatización, ambas estrategias tendrán siempre un impacto positivo en la demanda energética de las edificaciones.

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

Un aumento en la reflectancia de las superficies provoca una reducción en la cantidad de radiación solar que estas absorben. Esto se traduce en una menor temperatura superficial (Simpson & McPherson, 1997), lo que permite disminuir el flujo de calor hacia el interior del edificio al evitar un mayor almacenamiento de calor en el elemento constructivo (Suehrcke, Peterson, & Selby, 2008). En un estudio hecho en la ciudad de Hermosillo, Alpuche et al. (2014) simularon la demanda energética de una vivienda social al modificar la reflectancia solar de la envolvente (paredes + cubierta). Encontraron que al pasar de una reflectancia de 0,3 a 0,5 se lograba reducir 7% la demanda de energía, mientras que una variación de 0,3 a 0,7 representa una reducción del 12%.

El impacto final de una intervención de este tipo sobre la demanda del edificio dependerá del tamaño de la superficie intervenida (con respecto al total de la envolvente), así como a la radiación solar que esta recibe. La reflectancia de la cubierta tiene un efecto muy grande sobre las cargas de refrigeración de las viviendas unifamiliares con cubierta plana, tipología dominante en los climas con poca lluvia, mientras que el efecto de las paredes laterales es casi insignificante (Shariah, Shalabi, Rousan, & Tashtoush, 1998). Marincic et al. (2011) constataron que en Hermosillo la mayoría de los edificios presentan cubiertas blancas y fachadas con colores claros. Como muestra la **Figura 2.17**, esto no siempre es así en todas las ciudades desérticas.



Figura 2.17. Colores en las cubiertas. De arriba hacia abajo: Hermosillo, El Cairo y Phoenix.

Fuentes: (Elaboración propia con Google Earth).

El uso de protecciones solares ha demostrado ser una estrategia muy efectiva en reducir la demanda de refrigeración de los edificios. Existen distintas maneras de lograr una protección solar eficiente: mediante una forma urbana compacta, un diseño de piel del edificio con entrantes y salientes, añadiendo vegetación o protecciones solares como aleros o celosías. La elección de una u otra estrategia dependerá de distintos factores, ya sean urbanos, climáticos, económicos, etc. En ciudades dispersas y de clima cálido – seco, como Hermosillo, es posible que las opciones más adecuadas sean las que actúan a escala de edificio y que no requieran de agua.

Desde el punto de vista de la reducción de la demanda energética del edificio, el proteger la parte acristalada de la fachada es la prioridad, especialmente cuanto mayor sea la superficie acristalada del edificio. En el diseño de las protecciones solares se debe tener en cuenta la latitud y la orientación de la fachada, tal y como muestra el estudio realizado en diferentes climas por (Palmero-Marrero & Oliveira, 2010). Además, el diseño de las protecciones solares debe de minimizar la entrada de radiación solar y al mismo tiempo garantizar niveles de iluminación adecuada en el interior.

Cuando se trata de oficinas, habitualmente con una alta tasa de acristalamiento y elevados requerimientos de iluminación, la instalación de protecciones solares automatizadas y controladas por sensores de luz puede ser una opción interesante para encontrar un equilibrio entre ambas necesidades (Hammad & Abu-Hijleh, 2010). A. Sherif et al. (2012) demostraron que el uso de celosías para la protección de ventanas en ambientes desérticos calurosos proporciona una reducción de la demanda energética considerable (iluminación y refrigeración) (**Figura 2.18**). El caso de estudio simulado fue la ventana de un salón en una vivienda del Oasis de Kharga en Egipto. La reducción en la demanda de energía, al utilizar una «celosía ideal» alcanzó el 30%, 30,1%, 25,8% y 7% para orientaciones Oeste, Sur, Este y Norte respectivamente en comparación con una ventana sin protección.

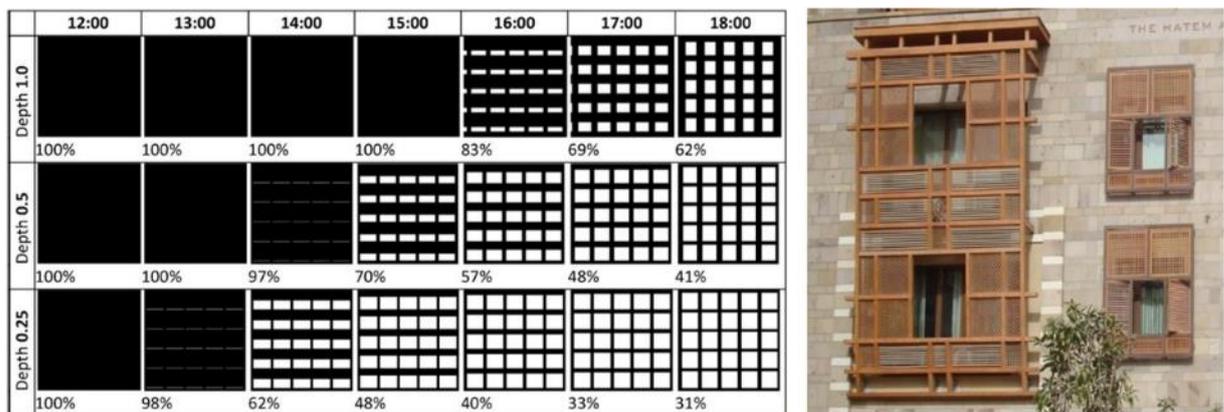


Figura 2.18. Celosía: Patrones de sombra y porcentajes de sombreado resultantes de celosías con diferentes relaciones de profundidad. Ejemplo de celosía moderna utilizada en El Cairo. Fuente (A. Sherif et al., 2012).

Un elemento que no suele ser considerado al utilizar protecciones solares es la parte opaca de la envolvente del edificio. Esta estrategia también resulta beneficiosa para reducir la demanda de refrigeración, aunque su efecto será menor en comparación al de proteger los acristalamientos. A. Sherif et al. (2012) señalan que no existe una condición general «única» para la efectividad del sombreado de las paredes, ya que esta es distinta para cada latitud y

clima. En El Cairo (30°N, similar a Hermosillo con 29°N), el sombreado de la parte opaca de las fachadas demostró ser una opción útil para reducir la demanda de refrigeración incluso más efectiva que el uso de aislamiento térmico. Por ejemplo, al sombrear la fachada Este se lograban reducciones de la demanda de refrigeración de hasta el 11%, mientras que al aislarla, la reducción era de solo el 6%. Otros estudios, como el de Galindo Duarte et al. (2008) en Mexicali (32°N), muestran que instalar un cubre-techos en las viviendas es factible para mejorar el comportamiento energético de viviendas poco aisladas.

La reflectancia y las protecciones solares son estrategias muy importantes en climas con un alto nivel de radiación solar, como lo es el estudiado en esta tesis. Ambas estrategias son empleadas para evitar que la radiación solar incidente sea absorbida por las superficies de la edificación. La diferencia entre ambas radica en que mientras una lo hace mediante la reflexión en su superficie de la onda corta, la otra estrategia impide que esta radiación llegue a la superficie.

### **2.2.2 Discusión sobre los efectos del aislamiento térmico**

En las últimas décadas, se han llevado a cabo numerosas investigaciones sobre los efectos de incrementar el nivel de aislamiento en el comportamiento térmico de los edificios. La revisión bibliográfica realizada en esta tesis, en el contexto en climas con una temporada de calor severa (cálido–secos, BWh), ha encontrado conclusiones enfrentadas respecto a la eficacia de esta estrategia.

Existe una gran cantidad de estudios que sostienen que incrementar el aislamiento térmico de la envolvente es una forma eficaz de reducir el sobrecalentamiento interior de los edificios y, por lo tanto, disminuir su demanda de refrigeración. Según Calderón et al. (2011), aplicar 9 cm de aislamiento en muros y cubiertas en una vivienda social de la zona desértica del Norte de México permite una reducción en la demanda de refrigeración del 49,3%. Friess, Rakhshan, Hendawi, & Tajerzadeh (2012), encontraron en su estudio sobre eficiencia energética, en una villa residencial de Dubái, que si se lleva a cabo una rehabilitación por el exterior del edificio añadiendo 16 cm de aislamiento, se pueden lograr reducciones de hasta un 30% sobre el caso de base, mientras que aislando solo los puentes térmicos con 5 cm de aislante se reduce un 23%.

Por otro lado, existen diversos estudios que apuntan a que el uso de aislamiento térmico puede repercutir en un mayor requerimiento de energía para refrigeración. Este efecto podría estar asociado a una mayor dificultad de los edificios aislados para disipar el calor, lo cual produciría un calentamiento del interior del edificio. Según Kolaitis et al. (2013), el uso de aislamiento térmico incrementaría la demanda energética de refrigeración entre 10 y 30% en un clima Mediterráneo con veranos cálidos y secos. Dicha investigación señala, no obstante, que la presencia de un "usuario activo" que gestione la sombra y la ventilación nocturna podría compensar parcialmente este efecto negativo del aislamiento. En un clima cálido–seco como el de Bahrein, Radhi (2009) demostró que disminuir la transmitancia térmica de la envolvente de edificios de oficinas podía conducir a un mayor consumo de refrigeración debido al atrapamiento de la energía que penetra por el acristalamiento y que generan las fuentes internas.

En la literatura analizada surgen tres parámetros importantes en relación a la efectividad del aislamiento:

- La cantidad de material aislante usado.
- La temperatura de consigna establecida.
- La posición del aislante dentro del elemento constructivo (interior, intermedia o exterior).

En cuanto a la cantidad aislamiento, cabe decir que sus efectos no son directamente proporcionales a su espesor. En general, puede decirse que, en climas cálidos, los primeros centímetros de aislamiento (<10 cm) tienen efectos significativos sobre las cargas de refrigeración del edificio. Mientras que el uso de espesores mayores tiene un impacto limitado.

La temperatura de consigna es un factor que depende de las preferencias del usuario, y por lo tanto es difícil de controlar, y puede tener un impacto notable en la efectividad del aislamiento. En general, los efectos positivos del aislamiento son más notables con temperaturas de consignas bajas (por ejemplo, 22 - 24°C), donde mientras mayor sea el nivel de aislamiento, menor es la demanda de refrigeración. Sin embargo, conforme aumentan las temperaturas de consigna, este efecto positivo va disminuyendo. Incluso puede darse el caso que para temperaturas de consigna elevadas (>26°C), el incrementar el aislamiento produce efectos negativos, aumentando el consumo energético. Este comportamiento se ilustra en la **Figura 2.19** para un espacio residencial sin ventanas en Miami (clima monzónico, Am, Köppen).

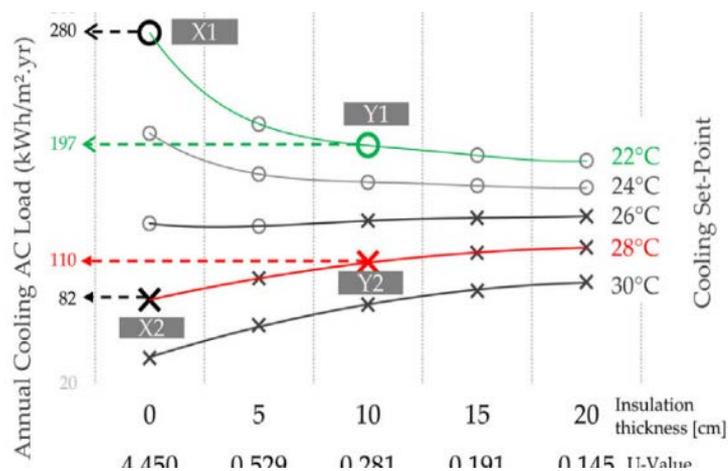


Figura 2.19. Identificación del comportamiento anti-aislamiento. Ejemplo de una vivienda con perfil continuo de ocupación, en Miami, con una envolvente compuesta de ladrillo + aislamiento + ladrillo (Idris & Mae, 2017).

Los climas cálido–secos, al contrario de lo que la mayoría de la gente piensa, parecen ser menos susceptibles a efectos contraproducentes del aislamiento. Idris & Mae (2017) muestran que la presencia de aislamiento es siempre positiva en climas extremadamente cálidos como los de Phoenix y Riad (**Figura 2.20**), incluso con temperaturas de consigna muy elevadas (de hasta 30°C). Este estudio señala que es necesario más investigaciones sobre estos efectos en edificios reales.

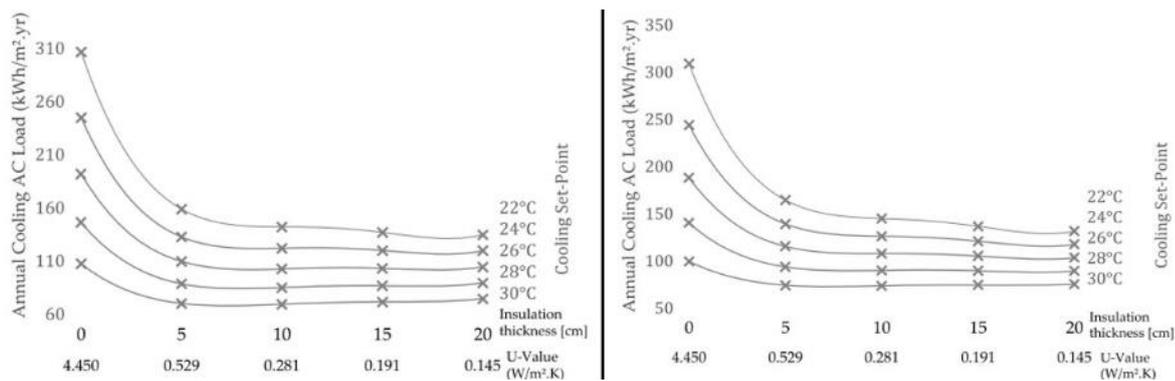


Figura 2.20. Comportamiento anti-aislamiento con distintas configuraciones: (de izquierda a derecha): Phoenix, Arizona, con envoltente compuesta de aislamiento + ladrillo + aislamiento; Riad, Arabia Saudita, con envoltente de compuesta de ladrillo + aislamiento (Idris & Mae, 2017).

En lo referente al tercer parámetro, la posición del aislamiento, cabe señalar que la opción más adecuada responderá al uso del edificio (residencial vs oficina) y el perfil de ocupación del mismo (continuo vs discontinuo). En edificios residenciales, donde la ocupación tiende a ser más estable, se recomienda el uso de aislantes exteriores (Idris & Mae, 2017). Kolaitis et al. (2013) señalan que el uso de aislamiento externo en viviendas disminuye hasta un 8% la demanda anual de refrigeración en comparación con un caso de vivienda sin aislamiento.

### 2.2.3 Estrategias combinadas

Diversas investigaciones han demostrado que la eficiencia del aislamiento térmico depende de si esta medida se utiliza de forma individual o combinada con otras estrategias. Alalouch et al. (2019) mostraron que la energía consumida para refrigeración en el sector residencial de la zona cálida seca de Omán puede reducirse un 48,2% si se aplican las medidas mínimas de eficiencia energética de la normativa nacional, que incluyen un incremento del aislamiento y el uso de vidrios con un bajo coeficiente de ganancia térmica solar (SHGC, *Solar Heat Gain Coefficient*).

Galindo Duarte et al. (2008) encontraron que utilizar un sistema que combine paneles de aislamiento con cubre-techos incrementaba la efectividad de la intervención. Esta combinación lograba reducir la temperatura interior hasta 3,5°C más que cuando solo se aumenta el aislamiento. Sin embargo, el estudio señala que las viviendas deben contar con al menos 80 m² de cubierta para que esta estrategia combinada sea económicamente factible. En caso contrario, la alternativa más viable sería únicamente aplicar aislamiento. Este estudio demuestra que la eficacia y viabilidad de una intervención depende no solo del tipo de estrategia implementada, sino también del tamaño de la superficie intervenida (en relación al total de la envoltente).

En cambio, otros estudios demuestran que añadir aislamiento térmico puede disminuir la eficacia de ciertas intervenciones. En este aspecto, Dabaieh et al. (2015) mostraron que la tipología de cubierta más eficaz para reducir la temperatura interior en el caso de El Cairo (30°N) eran las bóvedas con una elevada reflectancia superficial, gracias a su limitada absorción solar y su elevado potencial de disipación de calor hacia el cielo. Este estudio demuestra que añadir aislamiento a este tipo de intervención resultaba contraproducente.

Simpson & McPherson (1997) llevaron a cabo un estudio mediante mediciones, donde demostraron que aumentar la reflectancia de 0,10 a 0,75 en una cubierta poco aislada ( $U=2,9 \text{ Wm}^2\text{K}$ ) reducía la demanda de refrigeración del edificio en un 28% en Tucson (Arizona, Estados Unidos, clima BSh). En cambio, pasar de una reflectancia de 0,30 a 0,75 con una cubierta altamente aislada ( $U=0,2 \text{ Wm}^2\text{K}$ ) solo reducía las cargas de aire acondicionado un 5%. La influencia de los cambios en la reflectancia sobre la demanda de refrigeración de la cubierta será mayor cuanto menos aislada sea.

Shariah et al. (1998) mostraron mediante simulaciones que aumentar la reflectancia de la envolvente (paredes + cubierta) de cero a uno, permitía reducir la demanda anual de refrigeración un 47% en edificios no aislados, y del 32% para los edificios aislados en Aqaba (Jordania, clima BWh) (*Figura 2.21*).

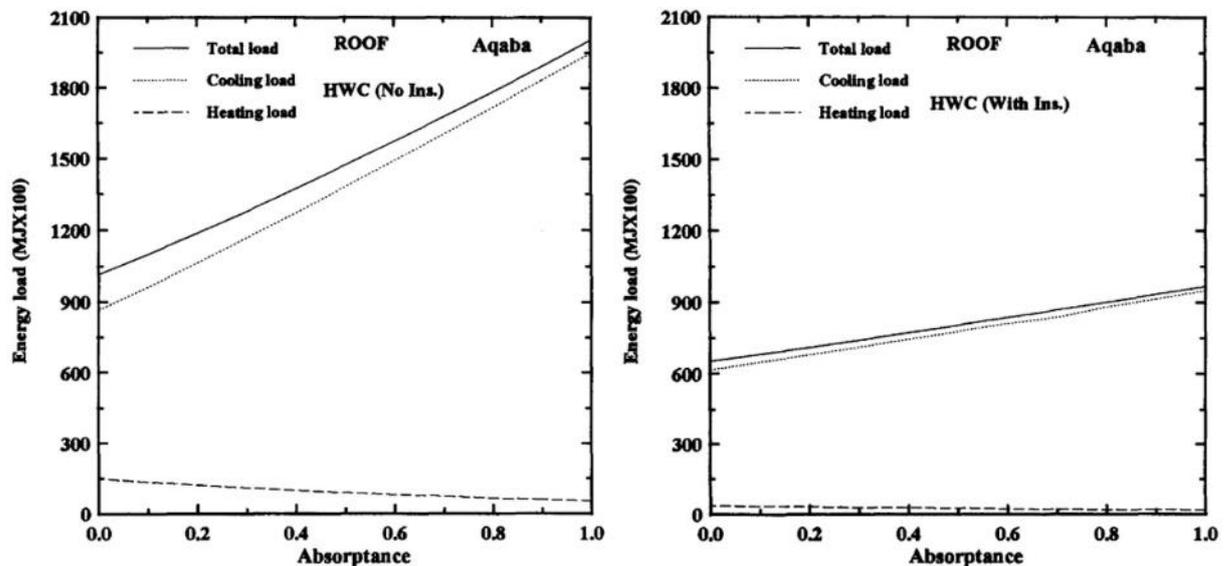


Figura 2.21. A la izquierda, la variación en la calefacción y refrigeración y carga total con la absorptancia de una cubierta plana de hormigón sin aislamiento; a la derecha, se representa ésta variación pero con la absorptancia de la misma cubierta con aislamiento (Shariah et al., 1998).

En la siguiente *Tabla 2.1* se muestra, a manera de resumen, las referencias que se han encontrado mediante una exhaustiva revisión de la literatura sobre estrategias para mejorar el comportamiento energético en climas cálidos.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
**LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

Tabla 2.1. Estudios previos sobre el estudio del comportamiento energético y mejora de la vivienda en un clima cálido – seco (BWh)

Referencia	Localización / Clima	Tipología / Uso	Método	Herramienta	Control	Confort	Demanda / Consumo	Parámetro medido	Elemento intervenido / Tipo de intervención
(Krüger et al., 2010)	Néguev (Israel) - BSh	V. A. 2P - Residencial	S+M	IDA Indoor Climate and Energy	Activo	-	X	-	Entorno / relación de aspecto
(Alalouch et al., 2019)	Varios (Omán) – BWh / BSk / BSh	V.A. 1P - Residencial	S	eQuest	Activo	-	X	Peak Load	T+V+M+S / Aislamiento + SHGC
(Calderón et al., 2011)	Mexicali, Obregón, Hermosillo / BWh	V.A. 1P – Residencial	S	DOE-2.1	Activo	-	X	CO2	T+M / Aislamiento + Equipos
(Dabaieh et al., 2015)	El Cairo / BWh	1 V.P. – Residencial	S	Design Builder	Mixto	X	X	T. Operativa	T / Forma + Aislam + Color + Inercia
(Idris & Mae, 2017)	Riad, Phoenix, +11 / BWh, otros	Residencial + Oficina	S	Energy Plus	Activo	-	X	-	T+M+S / aislamiento
(Giancola, Soutullo, Olmedo, & Heras, 2014)	Madrid / Csa	Bloque V.P. - Residencial	M	Data Logger	Pasivo	-	-	T. Aire	M+V / Aislamiento + Sombra
(El-Deeb, El-Zafarani, & Sherif, 2012)	Yeda, El Cairo, Alejandría / BWh	V.A. 2P + Bloque V.P. - Residencial	S	Design Builder	Activo	-	X	-	Entorno + Edificio / Forma + Relación de aspecto
(Marincic, Ochoa de la Torre, & Del Río, 2012)	Hermosillo / BWh	V.A. 1P - Residencial	M+E	Data Logger	Pasivo	X	-	T. Aire + HR	-
(Kolaitis et al., 2013)	Atenas, Kozani / Csa / Cfb	1 V.P. - Residencial	S	TRNSYS + HETRAN	Activo	-	X	-	M / Aislamiento interior / exterior
(Solís, 2008)	Hermosillo, Mexicali, +4 / BWh, otros	V.A. 1P - Residencial	S	-	Mixto	X	X	-	Edificio / Orientación
(Galindo Duarte et al., 2008)	Mexicali / BWh	Caja	M	Data Logger	Pasivo	-	-	T. Aire	T+M / Aislamiento + Sombra

Tabla 2.2. Estudios previos sobre el estudio del comportamiento energético y mejora de la vivienda en un clima cálido – seco (BWh) (Continuación)

Referencia	Localización / Clima	Tipología / Uso	Método	Herramienta	Control	Confort	Demanda / Consumo	Parámetro medido	Elemento intervenido / Tipo de intervención
(Vásquez, Alpuche Cruz, Marincic, & Ochoa de la Torre, 2014)	Hermosillo / BWh	V.A. 1P + 1 V.M.- Residencial	M	HOBO Data Logger	Pasivo	-	-	T. Aire	Edificio / Forma + Aislamiento
(Friess et al., 2012)	Dubái / BWh	V.A. 2P - Residencial	S+M	Design Builder	Activo	-	X	-	M / Aislam. en puentes térmicos / global
(Radhi, 2009)	Baréin / BWh	1P + 11P - Oficina	S	Visual DOE	Activo	-	X	-	T+M+V / Aislamiento + SHGC + WWR
(Suehrcke et al., 2008)	Townsville, Australia / AW	V.A. 2P	S+M	Calculo edo. Estacionario / Data Logger	Pasivo	-	-	T. Aire + Flujo de calor	T / Color
(Alpuche Cruz et al., 2014)	Hermosillo / BWh	V.A. 1P - Residencial	S	Design Builder	Mixto	-	X	T. Aire	T+M / Color
(Shariah et al., 1998)	Áqaba, Jordania / BWh	Caja - Residencial	S	TRNSYS	Activo	-	X	-	T+M / Color
(Simpson & McPherson, 1997)	Tucson, Arizona / BSh	Modelo a escala	M	Termopares / Data Logger	Mixto	-	X	T. Aire + T. Superficial	T / Color + Aislamiento
(Hamad & Abu-Hijleh, 2010)	Abu Dabi / BWh	Caja con ventana - Oficina	S	IES-VR Software	Activo	-	X	-	V / Sombra + Automatización
(Palmero-Marrero & Oliveira, 2010)	C. Mexico, El Cairo, +3 / BWh, otros	Caja con ventana	S	TRNSYS	Activo	-	X	T. Operativa	V / Sombra
(Ahmad Sherif et al., 2012)	El Cairo, Alejandria, Kharga / BWh	1 V.P. - Residencial	S	Design Builder	Activo	-	X	-	M / Sombra
(A. Sherif et al., 2012)	Kharga / BWh	1 V.P. - Residencial	S	Design Builder	Activo	-	X	-	V / Sombra

## **RESUMEN PARTE I**

En el capítulo 1 se ha mostrado cómo desde mediados del siglo XIX se ha estudiado y experimentado con la forma de la ciudad. Durante el último siglo, el discurso se ha centrado en dos modelos de crecimiento urbano: el modelo de ciudad compacta y el modelo de ciudad dispersa. Desde mediados del siglo XX, el modelo compacto ha ido ganando adeptos, al considerar que sus características representan un crecimiento urbano más sostenible: mezcla de usos de suelo, desarrollo contiguo, altas densidades, un alto nivel de interacciones sociales y económicas, accesibilidad, conectividad, menor consumo de suelo y energía, etc., mientras que las ciudades dispersas son relacionadas con el *urban sprawl*, un tipo de crecimiento de baja densidad y concentración, zonificación, extensión ilimitada hacia el exterior y un mayor consumo energético, etc.

En este capítulo, se hace mención a la densidad como uno de los conceptos clave en la planificación urbana. Este concepto se ha utilizado como un descriptor de la forma urbana, a la cual ha estado ligado directa o indirectamente desde el siglo XIX. Sin embargo, es un concepto problemático: no existe una medida de densidad aceptada universalmente, y al hablar de morfología urbana, una misma densidad puede presentar distintas configuraciones espaciales. En esta tesis se hace necesario que la densidad sea abordada desde diferentes frentes a la vez: densidad de población, de viviendas y edificatoria; con los cuales pueda ser comparada de manera gráfica con otros casos de estudio.

Este capítulo muestra que la actual ciudad del desierto, al igual que la de otros climas, ha abandonado la tradicional forma compacta de las ciudades históricas. La urbanización dispersa reduce la sombra generada por la propia forma de la ciudad tanto sobre el espacio público como en los propios edificios. En el desierto, al tratarse de un clima de temperaturas extremas y alta radiación solar, los efectos de este tipo de urbanización son especialmente perjudiciales para el confort interior y exterior. La zona noroeste de México constituye un buen ejemplo de este cambio en la forma de hacer ciudades en el desierto. Las ciudades vernáculas de forma compacta, tales como Paquimé o Cuarenta Casas, fueron abandonadas y se han convertido en sitios arqueológicos. En cambio, las ciudades actuales presentan bajas densidades, una forma de crecimiento disperso y fragmentado, típico del *urban sprawl*.

En el capítulo 2 se exponen los estudios sobre el clima urbano y el comportamiento energético de la vivienda, poniendo énfasis en los realizados en un clima cálido-seco (BWh). Se ha mostrado como los primeros se centran en la forma urbana y en la radiación solar, un parámetro con una gran importancia en estos climas. Tradicionalmente, se ha optado por utilizar el modelo de cañón urbano para este tipo de análisis, debido a su simplicidad. Sin embargo, para mejorar la comprensión del comportamiento de la radiación solar en la forma urbana, son necesarios nuevos métodos de cálculo, modelos tridimensionales, bases de datos públicas. Es necesario que, al estudiar una trama urbana, se defina el nivel de detalle de los modelos con respecto a los resultados que se buscan (modelo tipológico y modelo morfológico). Por lo tanto, como uno de los objetivos de esta tesis es analizar el comportamiento energético del espacio público en una zona específica de la ciudad, se harán dos modelos tridimensionales con diferente nivel de detalle para cada etapa del análisis: un

modelo morfológico para estudiar el estado actual, y un modelo tipológico para estudiar el impacto de la propuesta (capítulo 4).

A nivel de edificio, en este capítulo se señala que la mayoría de los estudios sobre la reducción en la demanda energética en viviendas de ciudades con clima cálido-seco se han hecho a partir de una mejora en la envolvente. También se ha encontrado que la sombra y la alta reflectancia son estrategias que resultan positivas en este tipo de climas. Sin embargo, en esta revisión de la literatura, se observan diversos estudios con conclusiones enfrentadas respecto a la eficacia del uso de aislamiento térmico en la envolvente. Por lo tanto, es del interés de esta tesis, el analizar esta estrategia en la ciudad de Hermosillo, donde el uso del aislamiento térmico es escaso, limitado al uso en las cubiertas de la vivienda (capítulo 5). Al mismo tiempo, es necesario estudiar el efecto energético producido por llevar a cabo un proceso de densificación en una ciudad dispersa y de clima severo como Hermosillo.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

## PARTE 2



**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

CREDITOS DE LA IMAGEN EN LA PÁGINA ANTERIOR

Vista aérea de la ciudad de Hermosillo (México), desde el Cerro de la Campana hasta Los Lagos.

*Fuente: elaboración propia a partir de imágenes de Google Earth.*

**CAPITULO 3**  
**HERMOSILLO: UNA CIUDAD DISPERSA EN CLIMA CÁLIDO - SECO**

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

### 3.1 EL CLIMA

#### 3.1.1 México

México es un país localizado en el continente americano, forma parte de América del Norte. Limita al norte con Estados Unidos y al sur con América Central, al oeste con el océano Pacífico y al este con el Golfo de México y el Mar Caribe. Su territorio se encuentra entre la latitud 32° N y 14°N (**Figura 3.1**).

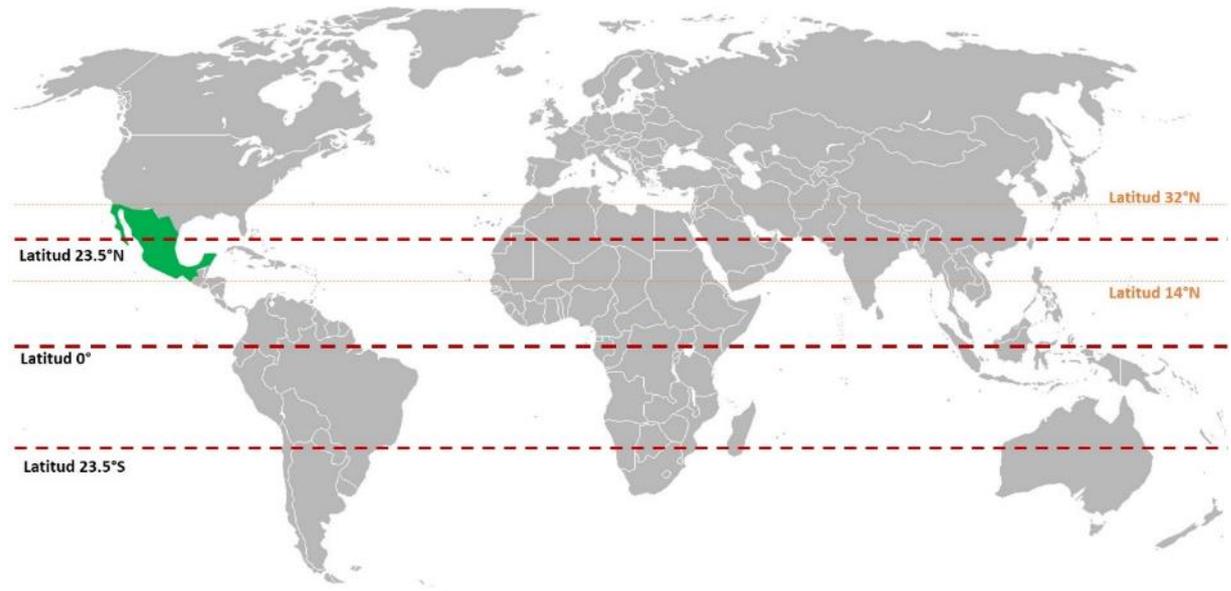


Figura 3.1. Ubicación de México (verde) en el mapa mundial.

Su superficie territorial es de 1.964.375 km<sup>2</sup>, es el decimotercer país más extenso del mundo. Su población es de aproximadamente 125 millones de habitantes (INEGI, 2018a), es el décimo país más poblado, el 80% de su población vive en áreas urbanas (World Bank, 2020b).

La situación geográfica de México lo ubica en dos áreas diferenciadas por el Trópico de Cáncer (lat. 23,5° N). Esto significaría que, climáticamente, México contaría con una zona tropical y una zona templada. Sin embargo, debido a la extensión territorial de México, su relieve y la presencia de dos océanos influyen en la configuración climática del país (PROMEXICO, 2016).

México cuenta con 4 grupos climáticos dentro de las cinco categorías principales de la clasificación climática de Köppen: Climas Tropicales (A), Climas Secos (B) y Climas Templados (C). Los Climas E (Polares), se encuentran solo en áreas muy reducidas (García, 2004).

Los climas secos (semiáridos (BS) y desérticos (BW)) se encuentran en amplias regiones de México, especialmente en su mitad septentrional. Esto se debe a la situación de México con respecto a la zona subtropical de alta presión, y a la orientación general de sus principales sierras (García, 2004).

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

Los climas cálido - secos, se ubican en la parte norte de la Altiplanicie Mexicana en altitudes menores de 1.500 m, así como en la porción de la llanura costera del Pacífico, situada al norte del paralelo 25°N y en las zonas litorales de la península de Baja California (**Figura 3.2**).

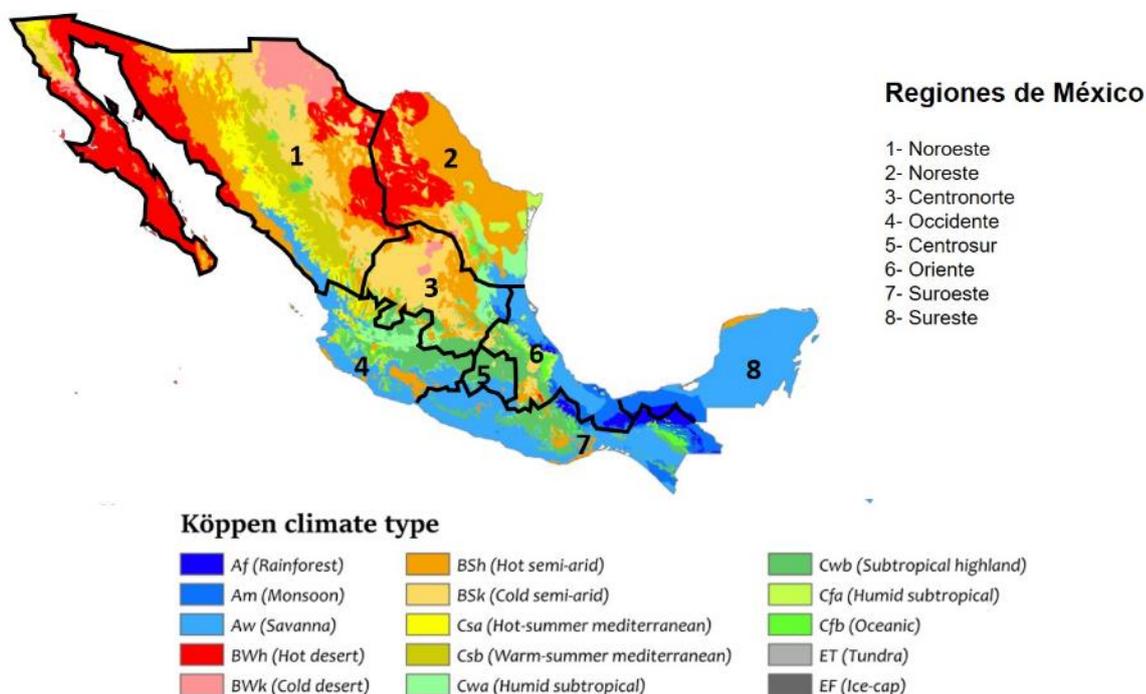


Figura 3.2. Clasificación climática de Köppen y regiones de México.  
Fuente: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mexico\\_K%C3%B6ppen.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mexico_K%C3%B6ppen.svg).

En esta tesis se ha seleccionado la región Noroeste, específicamente la ciudad de Hermosillo en el estado de Sonora como caso de estudio. La región noroeste es la tercera región más poblada con 16.022.528 habitantes (INEGI, 2015, 2018b). En cuanto a territorio, es la más extensa (757.220 km<sup>2</sup>), por lo tanto, es la de menor densidad de población.

Realizar un estudio energético en esta región es interesante por varios motivos: es una zona con condiciones extremas. La existencia de problemas de confort térmico, tanto en el exterior como en el interior de los edificios, esto genera un elevado consumo energético en sistemas de acondicionamiento de aire. Baste como muestra, el hecho de que los estados de Sonora y Sinaloa reciben una tarifa especial, por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), durante los meses cálidos (mayo a octubre) (COEES, 2020; CFE, 2020).

### 3.1.2 Hermosillo: clima cálido – seco

Hermosillo (latitud 29° N), es la capital del estado de Sonora, ubicado en la región Noroeste de México. Hermosillo se encuentra dentro del desierto de Sonora, aproximadamente a 110 km de distancia del Mar de Cortés y a una altitud promedio de 210 msnm (**Figura 3.3**).



Figura 3.3. Ubicación de Hermosillo en el desierto de Sonora.

Fuentes: Elaboración propia a partir de Google Earth.

El clima de Hermosillo, de acuerdo a la clasificación climática de Köppen, es cálido seco (BWh) (Beck et al., 2018). De acuerdo a las modificaciones hechas al sistema de clasificación de Köppen, para México, por parte de Enriqueta García, se define a estos climas como “climas muy áridos o muy secos”, porque los verdaderos desiertos, en la correcta acepción de la palabra (lugares deshabitados), pueden no corresponder precisamente con zonas áridas (García, 2004).

Este clima se caracteriza por una gran oscilación de temperatura, tanto anual como diaria, altos niveles de radiación solar, bajos niveles de humedad y de precipitación (<300 mm). Estos climas representan la mayor superficie en el planeta, el 14,2% (Peel et al., 2007). Se localizan normalmente entre los 20° y 33° latitud norte y sur.

Hermosillo tiene una temperatura media anual de 25°C, con una oscilación anual de 15°C ( $\pm 7,5^\circ\text{C}$ ), los meses más cálidos son junio, julio, agosto y septiembre. Sin embargo, la temporada cálida se extiende desde mayo a octubre. Durante esta temporada, Hermosillo presenta temperaturas extremas, las cuales rondan los 50°C (Milenio Digital, 2019; Robles, 2020; Vanguardia, 2019). La humedad relativa tiene un promedio que se mantiene entre 30% y 55% a lo largo del año, el promedio anual es de 43%. Los meses más secos son abril, mayo y junio que, junto con marzo, son los meses con los cielos más despejados. La temporada de lluvia es durante los meses de julio, agosto y septiembre, mientras que abril y mayo son los meses que menos llueve, 3.7 y 2.5 mm respectivamente, el acumulado anual es de 387 mm (**Figura 3.4**).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

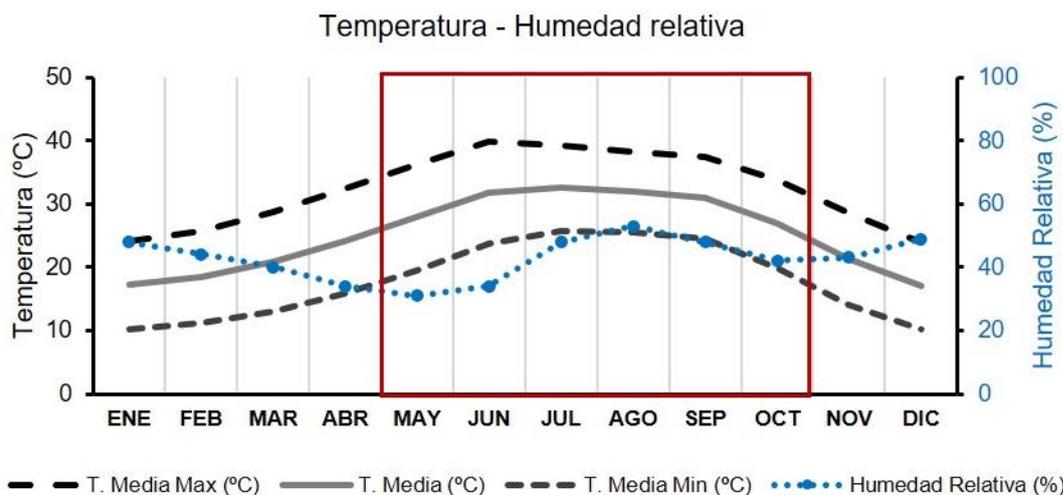


Figura 3.4. Temperatura (media máxima, media y media mínima), y la humedad relativa media en la ciudad de Hermosillo. Se ha señalado de rojo la temporada cálida (mayo – octubre) (SMN, 2019).

Como ciudad desértica en una latitud media, Hermosillo presenta cielos despejados durante gran parte del año. Esta nubosidad, de manera general, está condicionada por la latitud de cada región, alto en latitudes cercanas al ecuador, y bajo en latitudes medias (Benoit Beckers, 2013; Torres-Quezada, Coch, & Isalgué, 2019) (**Figura 3.5**).

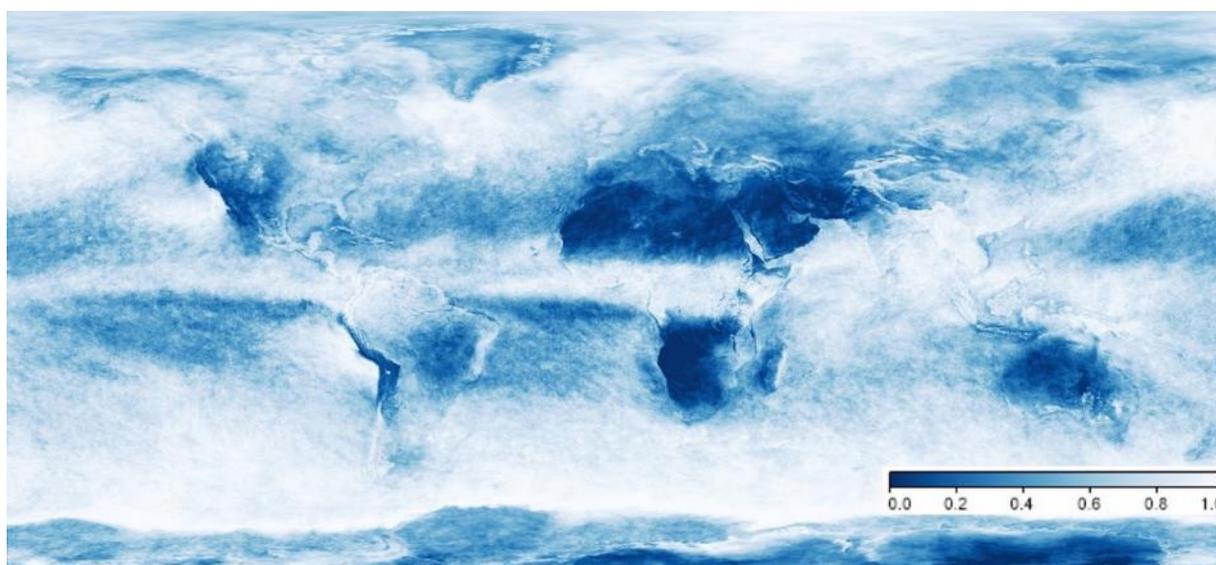


Figura 3.5. Mapa nubosidad de junio de 2019 hecho a partir de imágenes satelitales de NASA.  
Fuente: [https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MYDAL2\\_M\\_CLD\\_FR&date=2019-06-21](https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MYDAL2_M_CLD_FR&date=2019-06-21).

La intensidad del azul del cielo, en latitudes medias, está relacionada con la alta radiación en onda corta (radiación directa), y al mismo tiempo con una alta capacidad de enfriamiento radiativo (Torres-Quezada, 2018). El caso contrario se da en latitudes cercanas al ecuador, cielos de un azul menos intenso y con mayores niveles de humedad (con alta nubosidad).

La claridad del cielo, tal y como se menciona, influye de manera directa en la cantidad de radiación solar recibida sobre la superficie. En ciudades con clima cálido – seco y localizadas en latitudes medias, la radiación solar es el factor climático de mayor peso (Coch & Serra, 1995), por lo que en esta tesis se hace hincapié en este factor climático.

Debido a estas características, Hermosillo presenta altos niveles de radiación solar. El valor total de irradiación horizontal anual se encuentra entre 2.100 – 2.200 kWh/m<sup>2</sup> (LEMA, 2019; World Bank, 2020a), es decir, la ciudad recibe una radiación solar media anual de 5,8 – 6,1 kWh/m<sup>2</sup> por día sobre el plano horizontal. Para poner en contexto este valor, el Sahara presenta valores anuales de irradiación horizontal que varían entre 2.500 – 2.600 kWh/m<sup>2</sup> (6,6 – 7,2 kWh/m<sup>2</sup> día) (World Bank, 2020a).

En el gráfico de la **Figura 3.6**, se comparan los valores de radiación solar global de la estación meteorológica del LEMA, con los de radiación solar directa obtenidos a través de Heliodon2. La estación del LEMA presenta valores entre 3,3 kWh/m<sup>2</sup> día en diciembre a 7,7 kWh/m<sup>2</sup> por día en mayo, con una media anual de 5,8 kWh/m<sup>2</sup> por día. Los valores de la simulación varían entre 2,5 kWh/m<sup>2</sup> por día en diciembre a 7,2 kWh/m<sup>2</sup> por día en junio; con una media anual de 5 kWh/m<sup>2</sup> día.

La diferencia de valores se debe a que Heliodon2 solamente calcula la radiación solar directa. En su modelo de cálculo se considera un cielo totalmente despejado y un porcentaje de transmitancia atmosférica del 70%. Sin embargo, los valores de radiación directa simulados, se asemejan a los valores de radiación global de la estación meteorológica del LEMA, sobre todo en los meses de junio, julio, agosto y septiembre, cuando hay una mayor nubosidad.

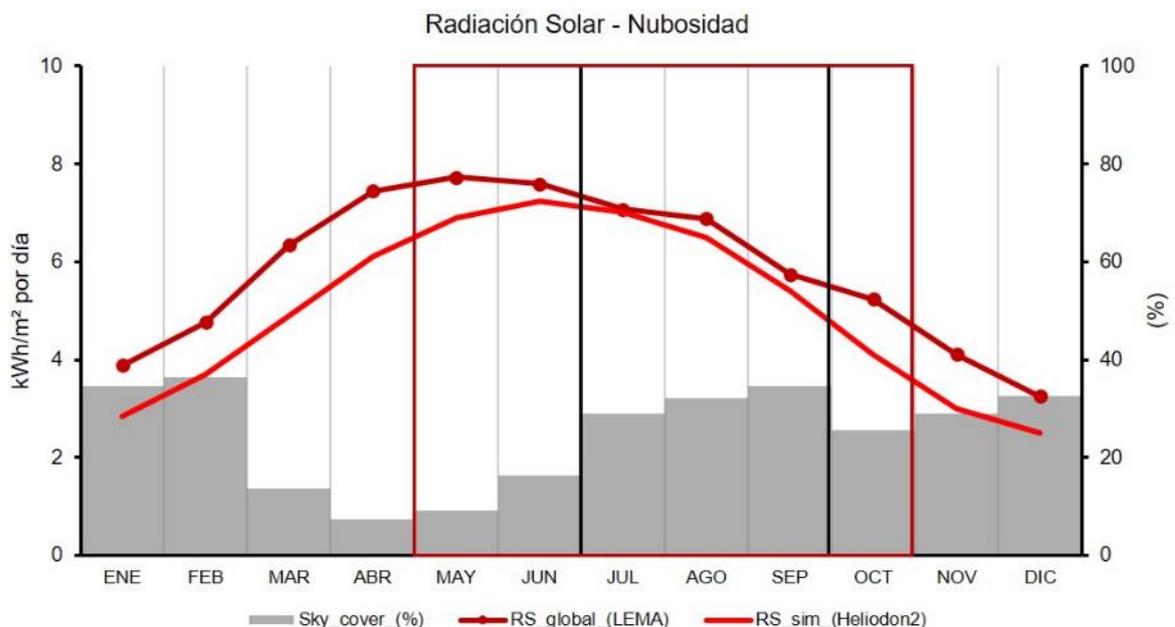


Figura 3.6. Comparación de la radiación solar directa simulada RS\_sim\_(Heliodon2) con la radiación solar global RS\_global\_(LEMA), nubosidad media mensual (Sky\_cover\_(%)). El recuadro negro indica la temporada de lluvias, el recuadro rojo indica la temporada de calor (mayo – octubre).

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la estación meteorológica del Aeropuerto de Hermosillo, del LEMA y Heliodon2.

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

Los valores de radiación solar difusa media varían entre 24 – 30%. La diferencia entre la radiación mensual simulada y medida en entre mayo y octubre, fue en promedio del 8%, oscilando entre 1% en julio y el 21% en octubre. Debido a la similitud entre los valores de radiación simulada y los de la estación del LEMA, en esta tesis, se ha optado trabajar con los valores obtenidos a partir de la simulación.

El gráfico de la **Figura 3.6** también se muestra como el comportamiento de la nubosidad coinciden con el de la humedad relativa, es decir, los meses con menor porcentaje de nubosidad media son los meses con una menor humedad relativa media (abril 34%, mayo 31% y junio 34%), mientras que de julio a septiembre son los meses con mayor porcentaje de humedad relativa media (48%, 53% y 48%).

Como se ha podido demostrar en este apartado, el factor climático de la radiación solar, en una ciudad como Hermosillo, tiene un rol determinante. Por lo tanto, un análisis más detallado sobre la incidencia solar a nivel urbano será necesario para llevar a cabo esta tesis.

## 3.2 EVOLUCIÓN URBANA DE HERMOSILLO

### 3.2.1 Breve historia urbana de Hermosillo

La historia de Hermosillo se remonta a finales del siglo XVII, cuando México era colonia española. El territorio dividía en seis regiones: el Reino de la Nueva España, el Reino de la Nueva Galicia, el Gobierno de Nuevo México, el Gobierno de Coahuila, el Nuevo Reino de León y el Reino de la Nueva Vizcaya, del cual, Sonora formaba parte (Lagarda, 2008).

Hermosillo se funda el 18 de mayo de 1700 por el Alférez Juan Bautista de Escalante, bajo el nombre de La Santísima Trinidad del Pitiquín. A raíz de múltiples problemas de organización política y social, a mediados del siglo XVIII se funda el presidio San Pedro de la Conquista del Pitic, en ese momento nace la Hacienda del Pitic. En 1783, la hacienda recibe el título de Villa, pasando a llamarse Villa de San Pedro de la Conquista del Pitic (Lagarda, 2008).

A diferencia de las Villas formadas a partir de las Ordenanzas de Felipe II, el esquema que se siguió en Hermosillo fue distinto. En la **Figura 3.7**, se muestra como en ambos casos, la plaza mayor es acompañada por los edificios de gobierno y eclesiásticos. Sin embargo, en Hermosillo, la función de plaza mayor fue asignada a la plaza del Presidio del Pitic, la cual fue realizada después de la ya existente plaza del poder civil, que se encontraba fuera del presidio (Loredo López, 2002)

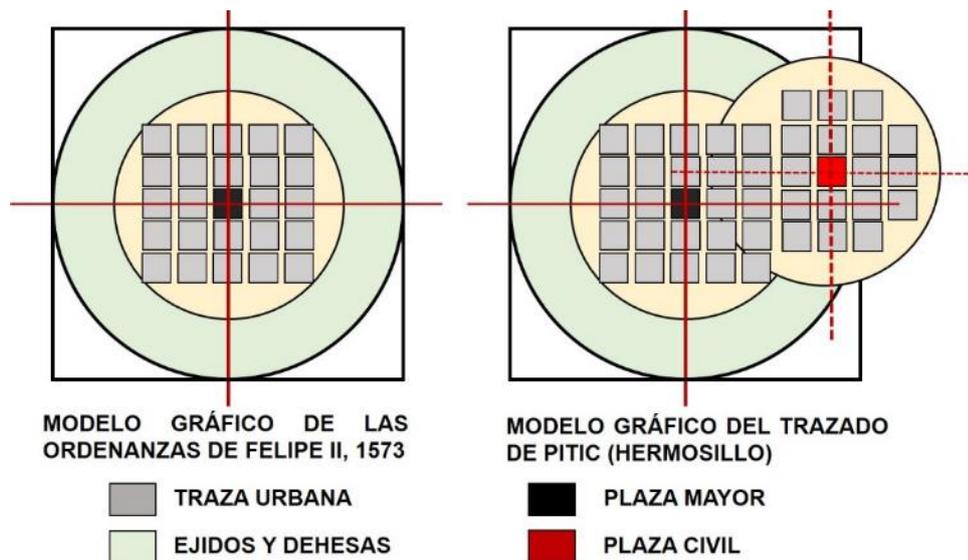


Figura 3.7. Esquema del trazado establecido por las Ordenanzas de Felipe II y el seguido en Hermosillo.  
Fuente: Elaboración propia a partir del esquema de Juan Luis Loredo (2002).

Resulta de interés para esta tesis, el hecho de que, en esta época y gracias a la situación urbana con la que contaba, la ciudad ya presentaba más de un centro. La existencia de estos centros, permitía una distribución de las diferentes funciones (eclesiásticas, civiles y de justicia) en dos puntos, en lugar de concentrarlas en uno solo sitio. En 1804, la villa tenía unas dimensiones de 933,31 m de longitud norte – sur, mientras que la longitud de este – oeste era de 2,095 m, una superficie de 195,5 hectáreas (Lagarda, 2008) (**Figura 3.8**).

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

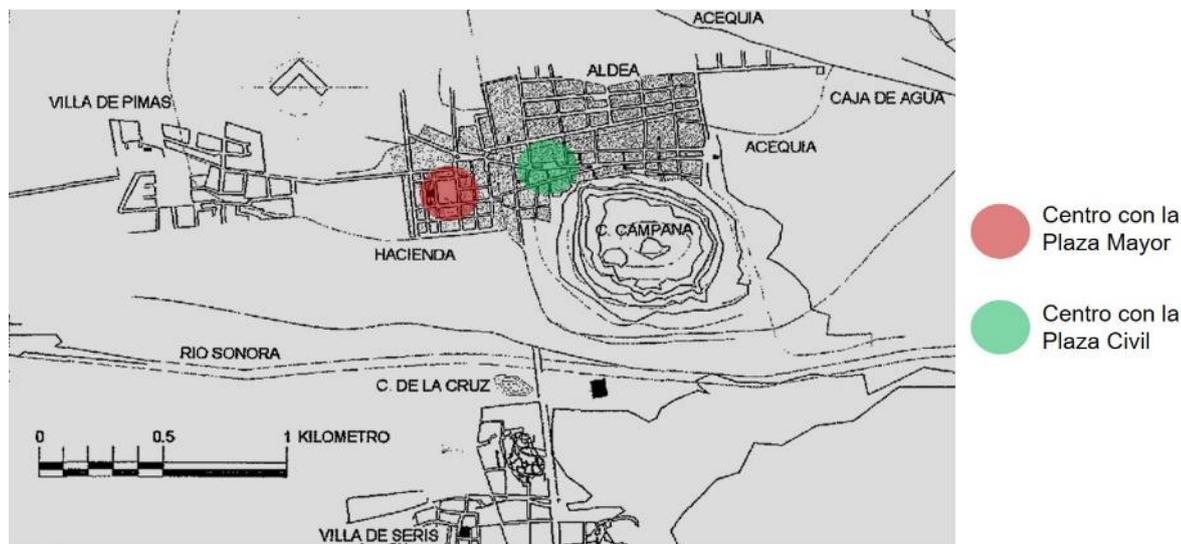


Figura 3.8. Mapa que muestra el aspecto que pudo tener Hermosillo a finales del siglo XVIII.

Fuente: Elaboración propia a partir de mapas de Juan Luis Loredo (2002).

Una vez consumada la independencia de México, hacia 1827, la Villa tenía cerca de 8.000 habitantes. Nueva Navarra pasó a ser conocido, como el Estado de Occidente (1824 – 1830).

Testimonios importantes, que dan pistas sobre la morfología que tenía la ciudad en el siglo XIX, son las palabras que utilizó el coronel Bourne en 1827 para describirla, y el dibujo de Russel Bartlett de 1852. A continuación, se muestra un extracto del libro *Seis expulsiones y un adiós: despojos y exclusiones en Sonora* (Grageda Bustamante, 2003) y el dibujo de Bartlett (**Figura 3.9**).

«La población está construida de manera muy curiosa, ya que no hay nada que se parezca a una calle; las casas están dispersas en todas direcciones, con tan poca intención de tener orden como si hubieran sido acomodadas por una tormenta. En el centro hay una plaza grande, con una iglesia a un lado y algunas buenas casas en los otros; de hecho, hay muchas casas excelentes en el Pitic, en especial una nueva, construida por un español antiguo, de nombre Monteverde, que es como un palacio y está adornada con gran número de cuadros y grabados; su estilo es superior a cuanto me haya tocado encontrar desde que salí de Guadalajara».

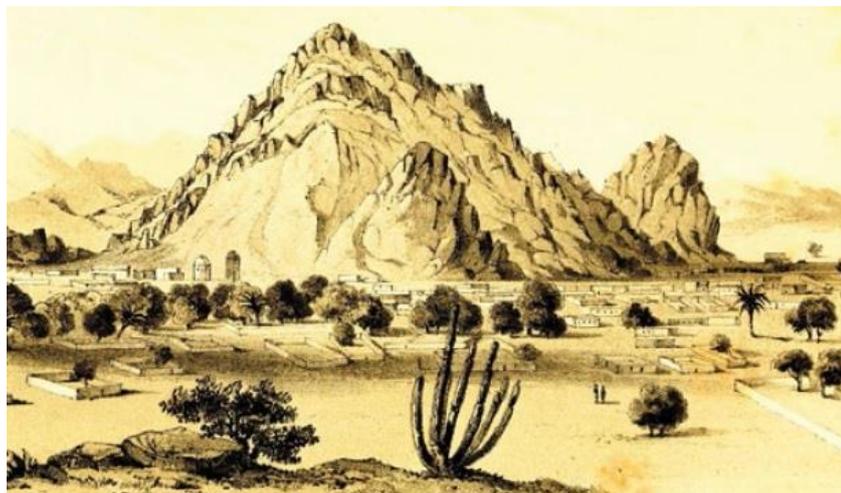


Figura 3.9. Ilustración de Hermosillo al pie del Cerro de la Campana de J. Russel Bartlett, 1852 (Lagarda, 2008).

En 1828 la Villa recibe el nombre de Hermosillo, y en 1879 es designada capital del estado de manera definitiva en 1879, comenzando un proceso de expansión constante (Lagarda, 2008). Durante el porfiriato (1876 – 1911), la ciudad entra en una era de modernidad: el telégrafo, instalación de drenaje, iluminación eléctrica (**Figura 3.10**) (Duarte Aguilar, 2003). La ciudad se expande a lo largo del Río Sonora, hacia el norte (Méndez Sainz, 1997), expansión potenciada por el tendido de las vías del ferrocarril que une Hermosillo con la ciudad de Guaymas.



Figura 3.10. Plano de Hermosillo y proyecto de ensanche hacia el norte. Jesús M. Ainsa, 1900 (Gutiérrez Corrales, 2015).

El porfiriato terminó con la revolución mexicana (1910 – 1917), dando inicio a una época de grandes cambios en el país, en Hermosillo se vio como el momento para comenzar a ser una «verdadera ciudad», una ciudad con cultura, una ciudad revolucionaria.

Durante el periodo comprendido entre 1943 – 1948, en Hermosillo se le da un gran empuje a distintas iniciativas que tendrían consecuencias dramáticas en la morfología de la ciudad: paisajismo triunfalista, infraestructura vial, bulevares, la Universidad de Sonora. Hermosillo se convierte en una ciudad producto del uso del automóvil.

Este tipo de urbanismo continua con la fundación de las colonias<sup>2</sup> Centenario y Pitic (estrato social alto) y varias colonias populares, la Presa Abelardo L. Rodríguez, etc. (**Figura 3.11**).

<sup>2</sup> Colonia: En México, una colonia es el nombre genérico que se le da a cada barrio que conforma la ciudad.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

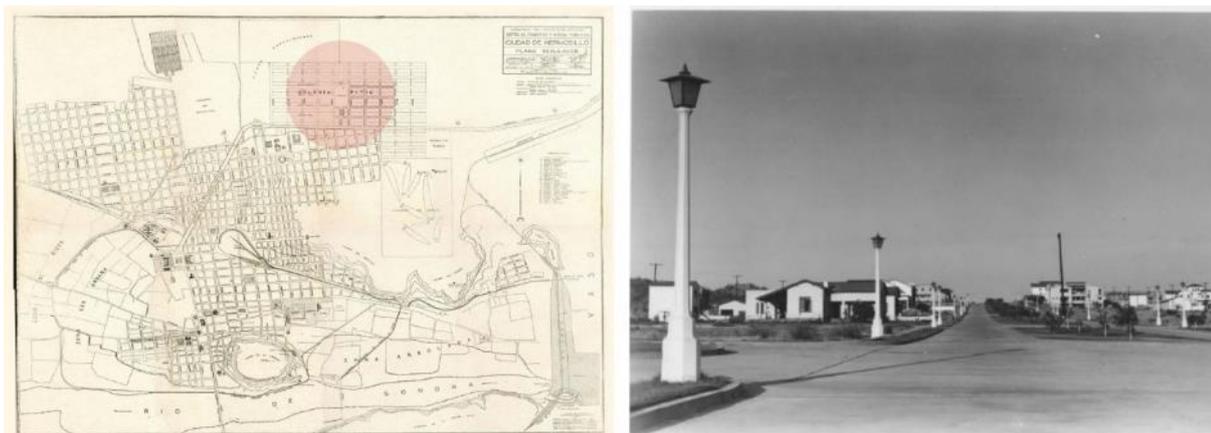


Figura 3.11. Hermosillo en 1947. Ubicación de la nueva Colonia Pitic y una imagen de las calles de la nueva colonia, influenciada por los suburbios de Estados Unidos (Lagarda, 2016).

No es, sino hasta mediados de la década de 1960, que este urbanismo comienza a menguar ante el empuje del urbanismo estadounidense<sup>3</sup> (Duarte Aguilar, 2003). La ciudad vuelve a experimentar un crecimiento acelerado. El aumento en la cantidad de automóviles provoca la formación de un eje vial este – oeste, fragmentando el proyecto de ordenamiento pretendido en la década de 1940, el cual dotaría de un orden al trazado urbano a partir del campus de la Universidad. Hermosillo refuerza su dependencia al automóvil.

La instalación de maquiladoras<sup>4</sup> estadounidenses en la frontera de Sonora ocasiona que el tráfico comercial, con el país del norte, sea más intenso. Esto desencadena una serie de cambios en el urbanismo de Hermosillo (décadas 1970 – 1980). Uno de los principales proyectos de esta época, es la creación de anillos periféricos (Duarte Aguilar, 2003).

En 1990, comienza la globalización, y con ella la creación de los «Megaproyectos» en Hermosillo. México firma el *Tratado del Libre Comercio de América del Norte* (NAFTA), que en vigor en 1994. En esta época, se produce una explosión en el sector de la construcción. Surge una serie de megaproyectos promovidos por el Estado, por ejemplo, el «Proyecto Río Sonora Hermosillo XXI», con el cual se buscaba detonar la zona del antiguo cauce del Río Sonora, convirtiéndolo en el centro de negocios de la ciudad (Duarte Aguilar, 2003). Actualmente, este proyecto no ha resultado con el éxito que se preveía, y ahora, más que ser un centro de negocios, ejerce como una frontera física, y en el imaginario colectivo, entre el norte y sur de la ciudad (**Figura 3.12**).

<sup>3</sup> En Hermosillo, siempre se ha tomado como ejemplo el urbanismo del vecino del norte, incluso, antes que a otras ciudades de México.

<sup>4</sup> Son plantas de ensamblaje de Estados Unidos que operan en territorio mexicano bajo un marco legal especial. Se remontan a 1964, cuando el gobierno mexicano introdujo el Programa de Industrialización Fronteriza (BIP) (W. Caves, 2005)

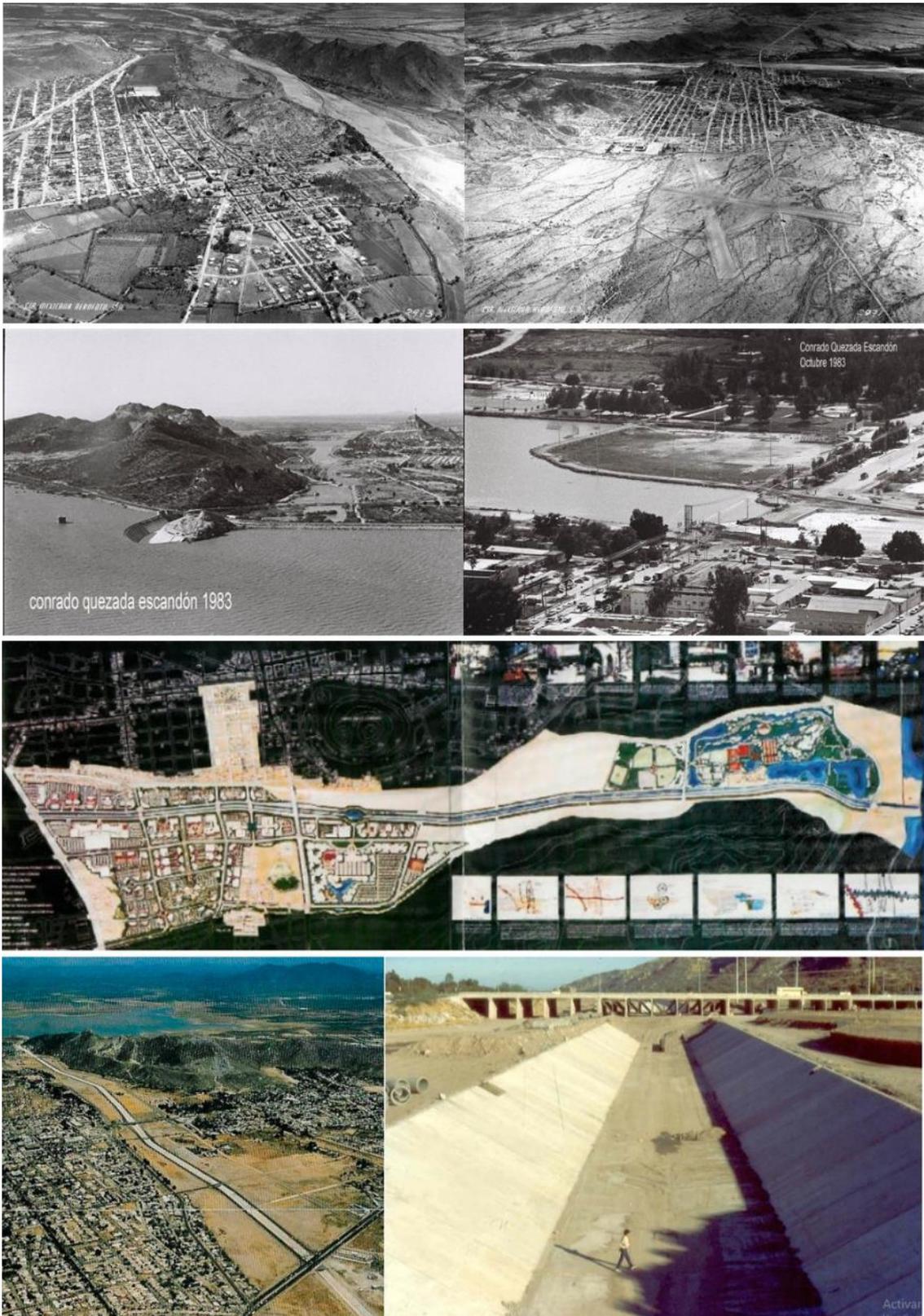


Figura 3.12. Relación Hermosillo - Río Sonora a lo largo de su historia. De arriba abajo: Imágenes de Hermosillo en los años 40 (Compañía Mexicana Aerofoto); Cauce del Río Sonora en los años 80 (Conrado Quezada Escandón); Proyecto Río Sonora Hermosillo XXI; Cauce Río Sonora años 90 (Duarte Aguilar, 2003)

Fuente: Elaboración propia a partir de [www.historiadehermosillo.com](http://www.historiadehermosillo.com).

En 1995, Hermosillo es incluido en el programa de «100 ciudades», parte del Programa Nacional de Desarrollo Urbano 1995 – 2000. Se buscaba propiciar un ordenamiento territorial de las actividades económicas y de población conforme a las potencialidades de las ciudades, de igual manera, inducir el crecimiento de las ciudades de forma ordenada (SEGOB, 1996).

Durante los siguientes años, se elaboran los primeros planes urbanos que mostraban una continuidad entre sí. A su vez y en contra parte a esta planeación urbana, hay un incremento de asentamientos irregulares<sup>5</sup> y una acelerada expansión de la ciudad (Duarte Aguilar, 2003).

### 3.2.2 La actualidad urbana de Hermosillo

En de la década de 1990 aparecen los fraccionamientos cerrados, provocando un rápido crecimiento de la mancha urbana. La mayoría pertenece a un estrato socioeconómico bajo y se ubicaron en la periferia de la ciudad, principalmente al norte y en menor medida al sur. Los fraccionamientos de clase media y alta se concentraron al poniente y noreste de la ciudad.

Los fraccionamientos cerrados de interés social siguen apareciendo en la «nueva» periferia, ayudando a extender la ciudad. Este crecimiento genera problemas a diferentes niveles: a nivel social, de transporte y movilidad; de infraestructura urbana, de calidad en el espacio público; la transformación de suelo agrícola en urbano y un elevado consumo energético.

Actualmente, Hermosillo presenta una tasa de crecimiento elevada: su población se duplico entre 1990 – 2015 (400.000 – 800.000) (INEGI, 2016). Durante 1990 y 2010, Hermosillo tuvo la sexta tasa de crecimiento más elevada del país (H. Ayuntamiento de Hermosillo, 2018). La superficie urbana también ha mantenido un acelerado crecimiento, en el mismo periodo, aumento en 134%, pasó de 7.400 ha a 17.500 ha (H. Ayuntamiento de Hermosillo, 2014, 2016) (**Figura 3.13, Mapa 3.1**).

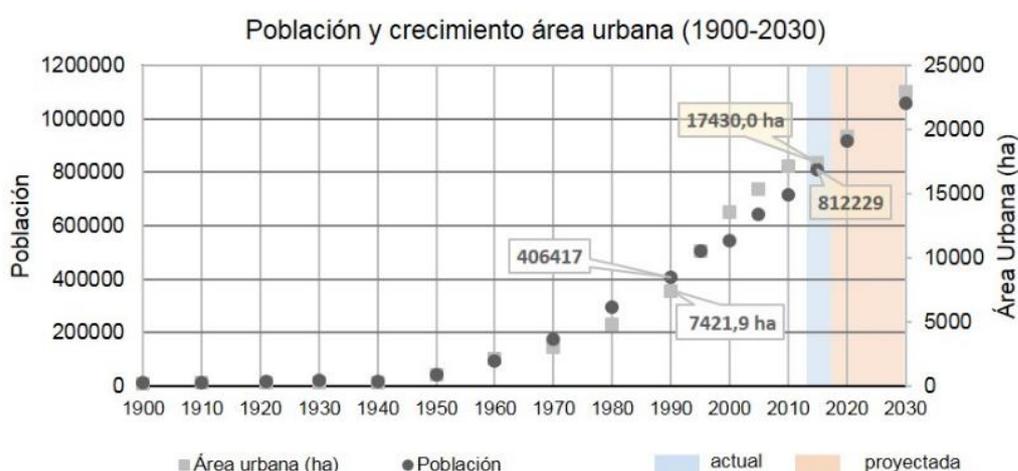
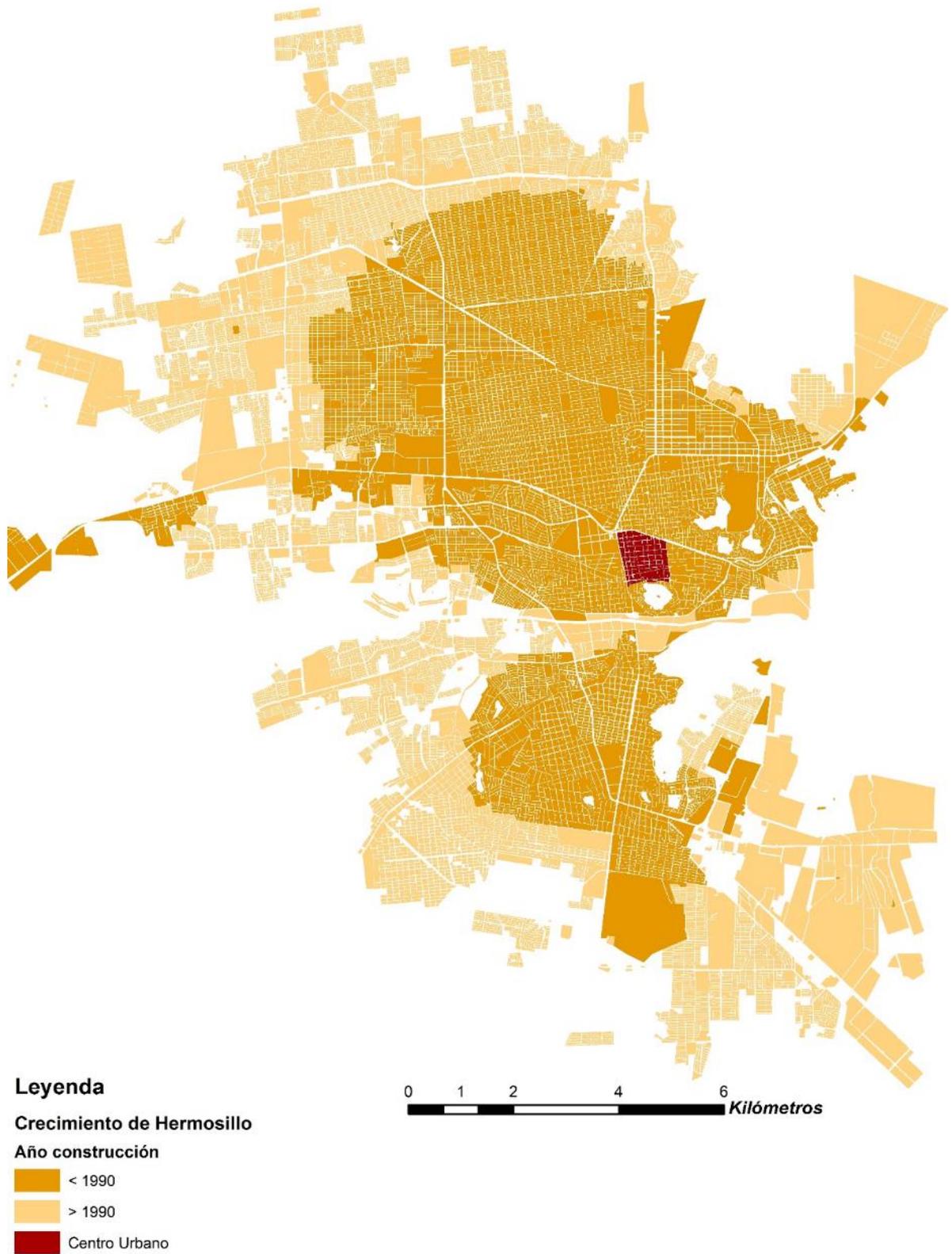


Figura 3.13. Crecimiento de la población de Hermosillo y de la mancha urbana.

Fuente: Elaboración propia a partir de dato del H. Ayuntamiento de Hermosillo (2016) y el INEGI (1990).

<sup>5</sup> Asentamiento irregular: una vivienda o grupo de viviendas que carece de uno de 5 elementos: a) agua potable; b) drenaje; c) seguridad en la tenencia; d) durabilidad de la vivienda (materiales de construcción); e) área insuficiente para vivir (hacinamiento) (Ruiz Hernández, 2014)



Mapa 3.1. Mapa en SIG del crecimiento de Hermosillo a partir de 1990.  
Fuente: Elaboración propia con ArcGIS, a partir de datos de INEGI (2010).

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

El comportamiento de la ciudad en los últimos 30 años, junto con una política de vivienda que favorece la construcción de viviendas unifamiliares y fraccionamientos cerrados, ha llevado a la ciudad a tener una distribución irregular de la población (**Mapa 3.2**).

Mientras en la mayoría de las ciudades la densidad comienza a reducirse mientras se aumenta la distancia respecto al centro de la ciudad (Angel et al., 2016), en Hermosillo sucede lo contrario. Este efecto de baja centralidad es característico de las ciudades dispersas (Muñiz et al., 2006). Significa que los habitantes y ciertas actividades económicas tienden a desplazarse del centro de la ciudad hacia las afueras de la ciudad. Esto hace que el centro urbano pierda peso económico y de población en comparación con las zonas suburbanas. Estas bajas densidades se mantienen alrededor del centro de la ciudad y son rodeadas por densidades más altas, creando un efecto de donut en el área urbana.

Este comportamiento, ha ocasionado que la densidad de población actual sea de 47 hab/ha. Si dividimos el análisis de la densidad en antes y después de 1990, la densidad promedio ha bajado de 58 hab/ha entre los años 1900 – 1990 a 46 hab/ha entre los años 1990 – 2020 (**Figura 3.14**).

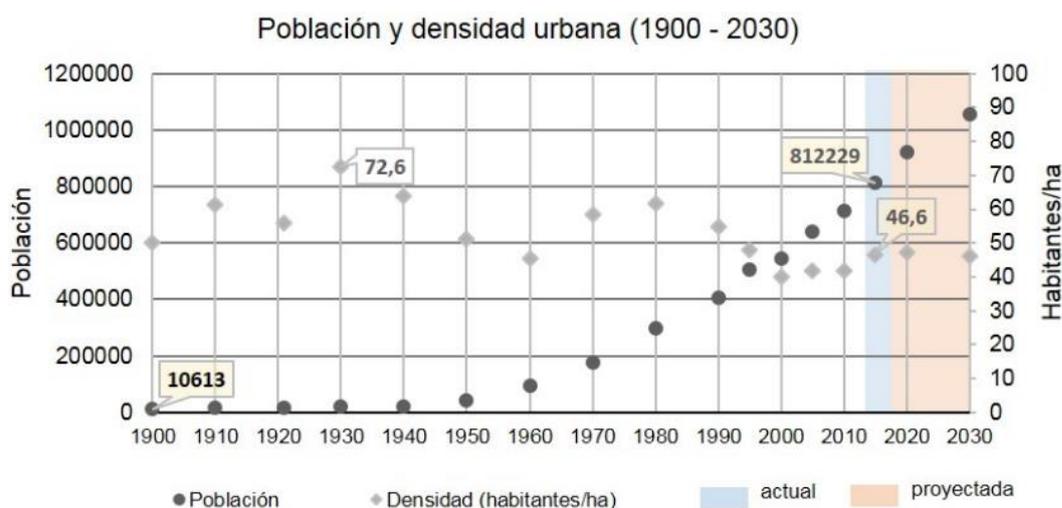
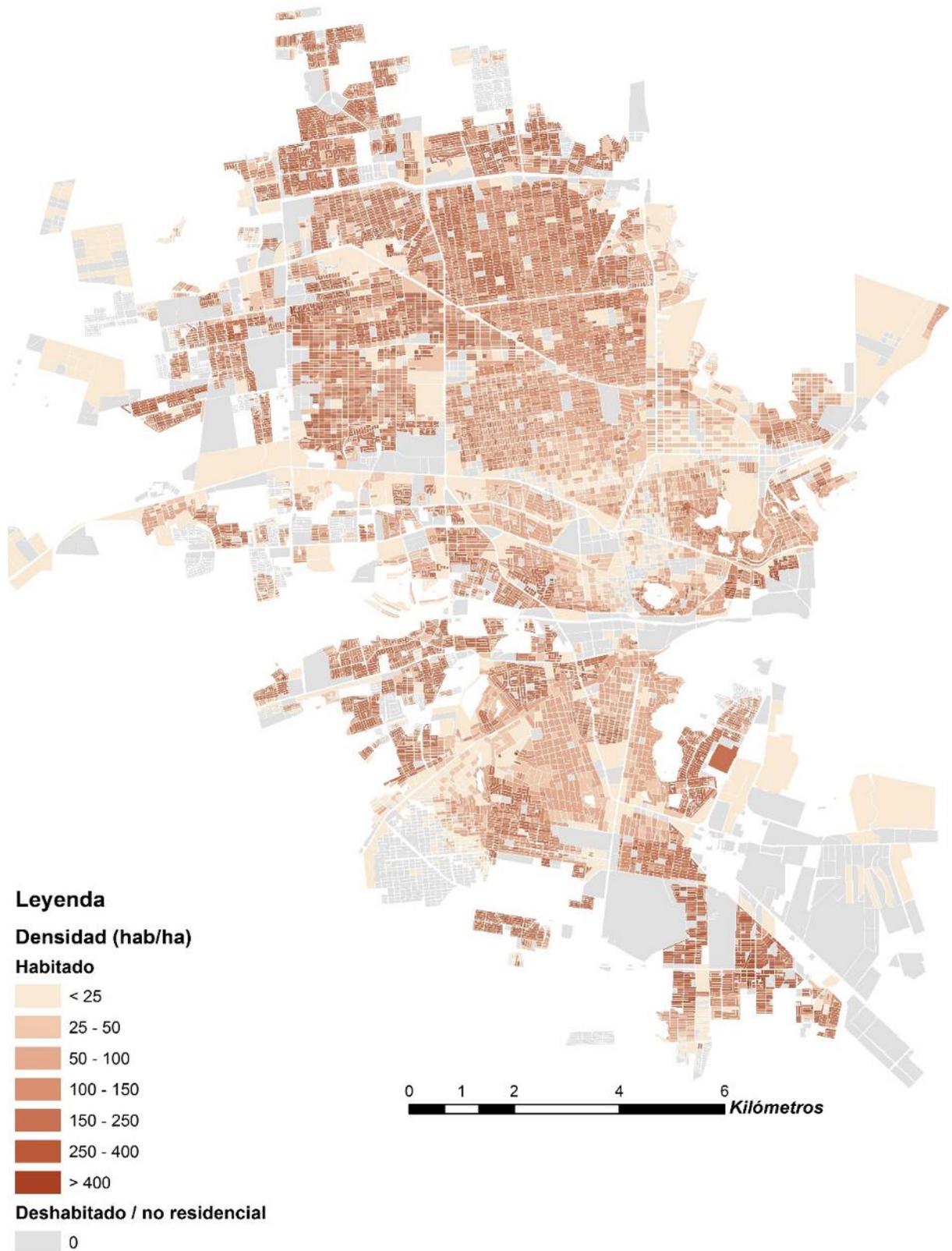


Figura 3.14. Crecimiento de la población de Hermosillo y el comportamiento de la densidad urbana.  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del H. Ayuntamiento de Hermosillo (2016) y el INEGI (1990).

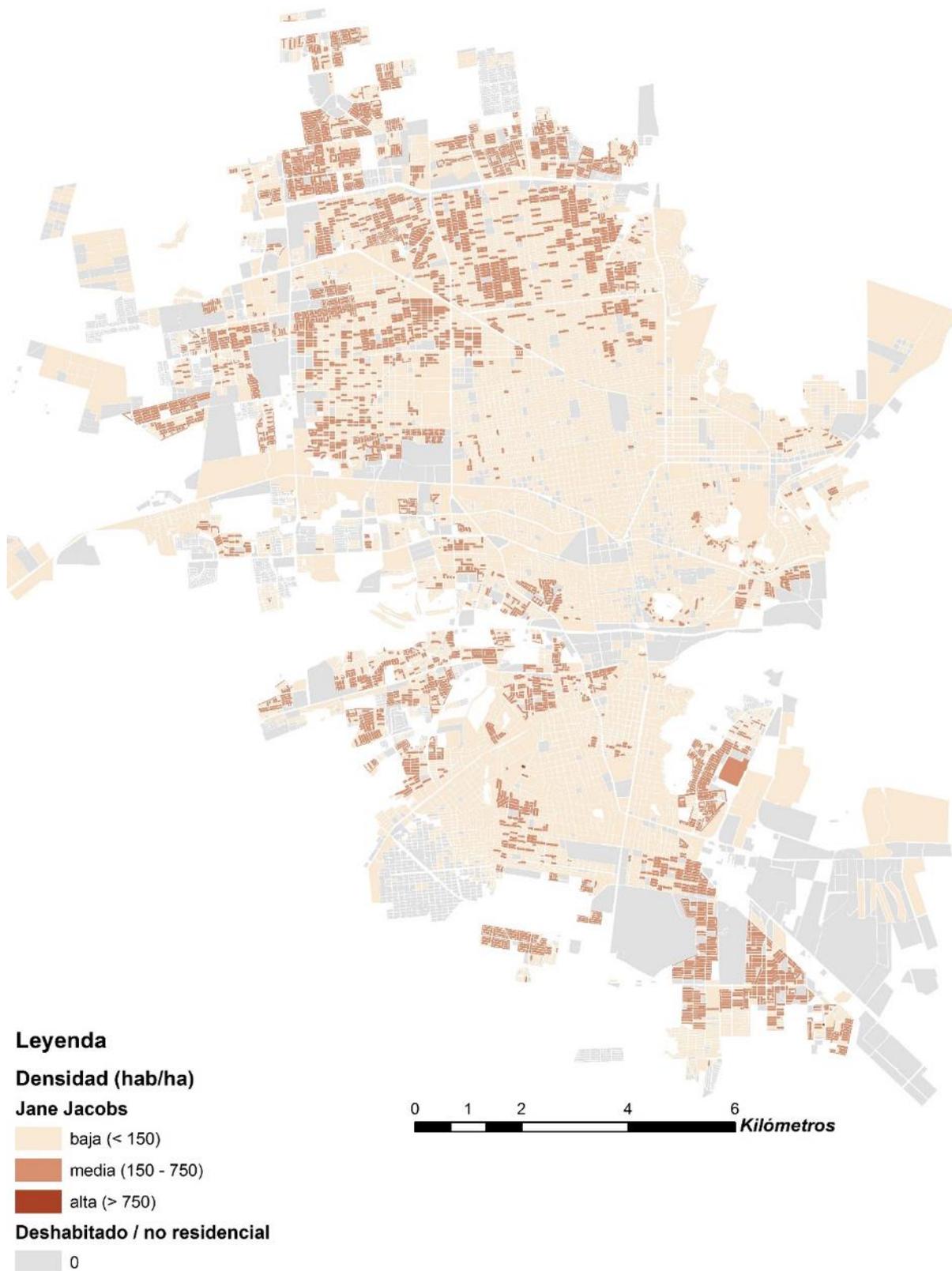
El **Mapa 3.2** muestra la distribución de la densidad de población en la ciudad. El crecimiento de Hermosillo ha sido principalmente hacia el norte y hacia el sur, mientras que en menor medida al oeste. Esta es la razón del porque estas áreas presentan mayores niveles de densidad. La ciudad ha seguido estas direcciones ya que limita al este con la Presa Abelardo L. Rodríguez y al noreste con el Cerro del Bachoco, parte de la Sierra Espinazo Prieto.

En el **Mapa 3.3** se representa la densidad de Hermosillo ajustada a los rangos establecidos por Jane Jacobs (Jacobs, 1961). Se puede observar, de manera más clara que en el **Mapa 3.2**, que Hermosillo es una ciudad de baja densidad casi en su totalidad, con excepción de las zonas norte y sur de la ciudad, donde se pueden apreciar niveles de densidad media.



Mapa 3.2. Mapa en SIG de la distribución de la densidad de población de Hermosillo.  
Fuente: Elaboración propia con ArcGIS, a partir de datos de INEGI (2010).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**



Mapa 3.3. Mapa en SIG de la distribución de la densidad de población de Hermosillo ajustada a los rangos establecidos por Jane Jacobs.

Fuente: Elaboración propia con ArcGIS, a partir de datos de INEGI (2010).

Es importante poner en contexto mundial el valor de la densidad de este caso, comparándolo con otras ciudades del planeta, en relación al clima de cada caso. En el gráfico de la **Figura 3.15**, se hace esta comparación, utilizando como criterio para agrupar las ciudades la clase a la que pertenecen dentro de la Clasificación Climática de Köppen.

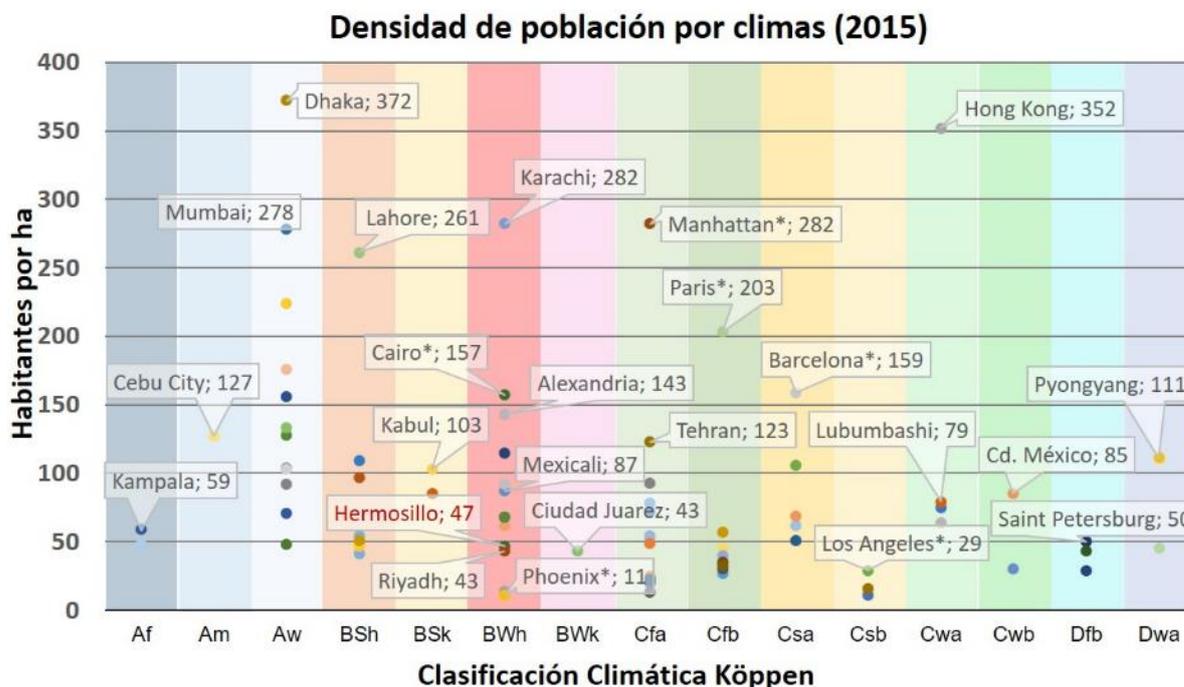


Figura 3.15. Densidad urbana en 2015 de diversas ciudades agrupadas por climas.  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Atlas de Expansión Urbana (Angel et al., 2016).

En el gráfico se observa que el promedio de densidad urbana de Hermosillo (47 hab/ha) palidece al lado de ciudades consideradas ejemplos de sostenibilidad: Barcelona 159 hab/ha, Paris 203 hab/ha o Manhattan con 282 hab/ha. Si bien, estas ciudades se encuentran en climas distintos, Hermosillo se encuentra lejos de ciudades históricas con el mismo clima: El Cairo con 157 hab/ha o Alejandría con 143 hab/ha.

Al considerar solamente ciudades con clima cálido – seco (BWh), Hermosillo presenta una importante diferencia con respecto a Phoenix (11 hab/ha) y un valor ligeramente superior a Riad (43 hab/ha). Sin embargo, en el contexto nacional, Hermosillo se encuentra por debajo de ciudades fundadas recientemente como la fronteriza Mexicali (87 hab/ha).

No se espera un cambio en los próximos 10 años. De hecho, se proyecta que en el año 2030 Hermosillo tenga una población cercana a 1.100.000 habitantes. Además, si la superficie urbana continúa creciendo a este ritmo, se calcula que el área urbana será de alrededor de 23.000 ha, manteniendo la densidad de población (López-Ordóñez et al., 2019).

Al mismo tiempo, y debido a su clima, Hermosillo se ha transformado en una ciudad que es poco paseable y dependiente del uso del automóvil para salvar los grandes recorridos creados por la expansión urbana. Esta dinámica urbana provoca que la ciudad carezca de espacios públicos de calidad.

### 3.2.3 La vivienda actual en Hermosillo

Como resultado de la política de vivienda y del comportamiento urbano de los últimos 30 años, la mayoría de las viviendas en Hermosillo son unifamiliares aisladas. Las viviendas del centro de la ciudad, al ser una zona con mayor antigüedad, son unifamiliares adosadas. La principal característica de las viviendas aisladas, es la falta de colindancia con la vivienda vecina. Es importante resaltar que este tipo de viviendas están en un lote con dos patios: uno al frente y otro detrás, con un pasillo en al menos un costado de la vivienda.

En los años 60 y 70, y coincidiendo con la aparición de maquiladoras en la frontera y un crecimiento acelerado, se genera una proliferación de casas de "interés social". En 1970, una casa de interés social contaba con un área aproximada de 90 m<sup>2</sup> y se ubica en uno de los límites del lote, creando así un patio que la rodea por tres de sus cuatro fachadas (**Figura 3.16**).

Es a partir de la década de 1990, al surgir los fraccionamientos cerrados, que se da el boom definitivo del sector de la construcción de viviendas. La producción de vivienda unifamiliar aumenta, pero el espacio de las viviendas disminuye: una vivienda de interés social de los años 90 tiene un área aproximadamente 30% menor, es decir, 62 m<sup>2</sup> (**Figura 3.16**).

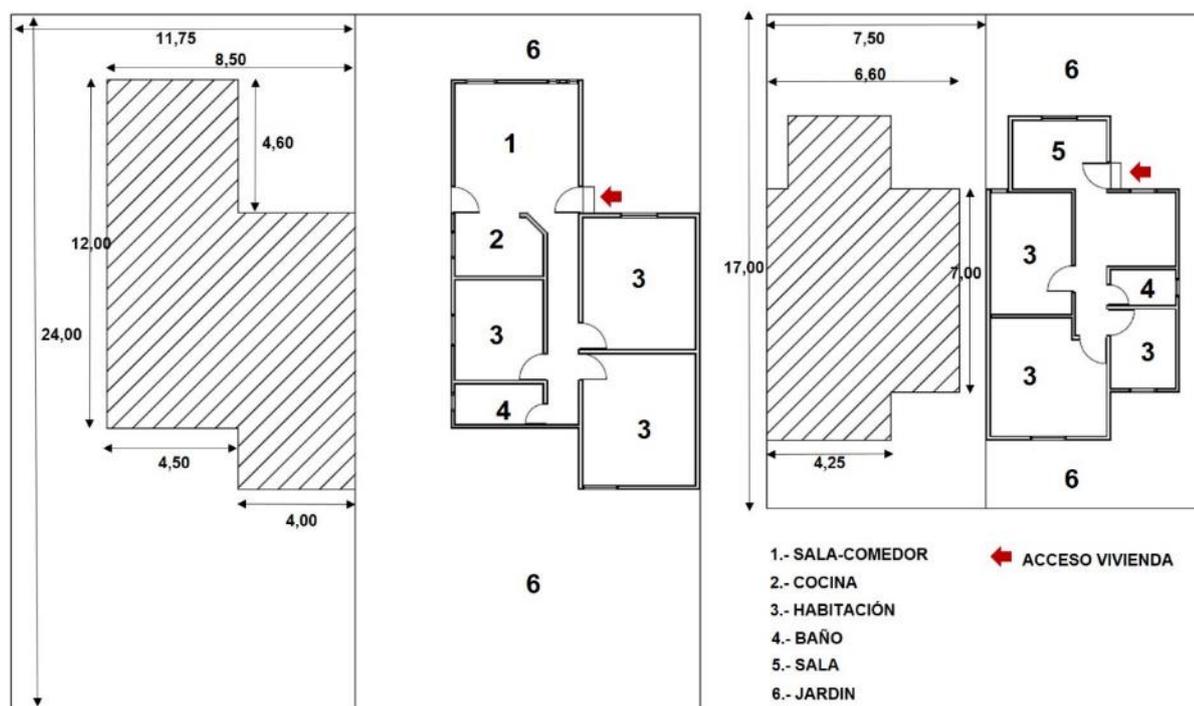


Figura 3.16. Vivienda de interés social 1970 (izquierda) y 1990 (derecha).

Actualmente, este tipo de vivienda sigue siendo el más construido. Marincic (2011) elaboró una clasificación de las viviendas de acuerdo a su área de construcción: pie de casa (24 m<sup>2</sup> < casa ≤ 32 m<sup>2</sup>), vivienda mínima (32 m<sup>2</sup> < casa ≤ 45 m<sup>2</sup>), vivienda popular (45 m<sup>2</sup> < casa ≤ 60 m<sup>2</sup>), vivienda de interés social (60 m<sup>2</sup> < casa ≤ 90 m<sup>2</sup>), vivienda de interés medio (90 m<sup>2</sup> < casa ≤ 120 m<sup>2</sup>) y vivienda residencial (casa > 120 m<sup>2</sup>).

### ***La vivienda plurifamiliar en altura de Hermosillo***

Existen algunos ejemplos de vivienda plurifamiliar en altura, sin embargo, son casos singulares. Los desarrollos de este tipo, destinados a vivienda de interés social, no se han repetido.

Hay dos ejemplos de plurifamiliares de interés social. El primero, es el conjunto habitacional de la colonia FOVISSSTE (**Figura 3.17**). Fue construido en la década de 1980 y cuenta con viviendas unifamiliares adosadas, aisladas y pequeñas “torres” (dos o tres niveles). El segundo, es el conjunto habitacional de la IV Zona Militar. Cuenta con dos tipologías de edificios en base a la cual se agrupan, el primer grupo, construido en 1997, es de ocho edificios y el segundo grupo de cuatro. Los edificios son de tres niveles y cuatro viviendas por nivel.



Figura 3.17. Ubicación de los conjuntos habitacionales FOVISSSTE y su aspecto actual.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Actualmente, comienzan a surgir nuevos desarrollos de vivienda plurifamiliar en altura. Estos desarrollos están dirigidos a un sector socioeconómico con un alcance mayor a la media de la población, y presentan una tipología distinta a los casos anteriores. Al momento de elaborar esta tesis, existen tres nuevos desarrollos plurifamiliares (**Figura 3.18**): Torre Solara, que es el primer edificio con esta tipología que se ha construido en Hermosillo, cuenta con 12 niveles; Sky Pitic, este edificio pertenece a una clasificación de bloque lineal y tiene 12 niveles, por último, las Torres Altitud 40, dos torres de nueve niveles.

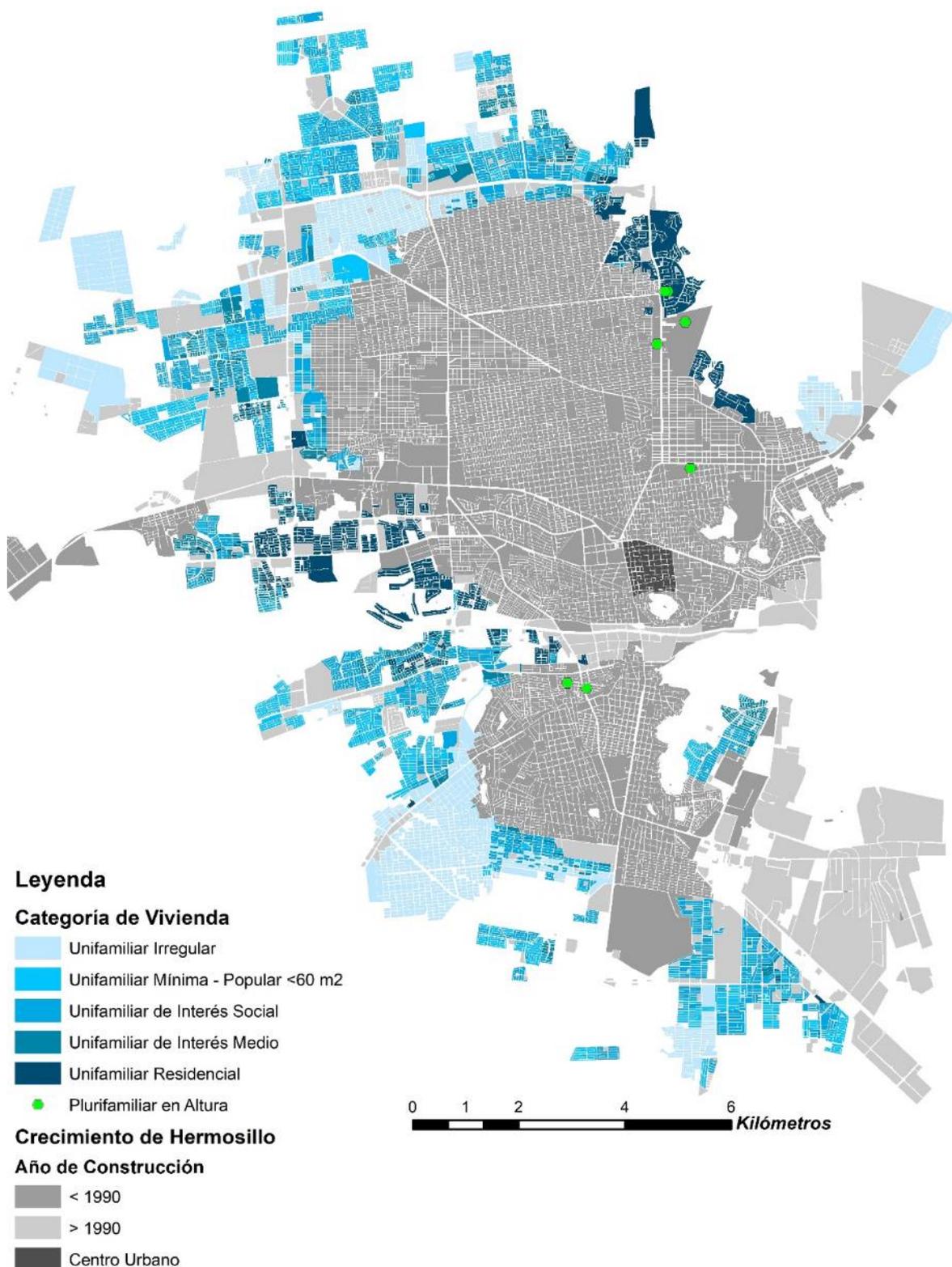


Figura 3.18. Torre Solara (izquierda), Sky Pitic (Centro) y Torres Altitud 40 (derecha).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

El **Mapa 3 4** vivienda plurifamiliar en altura (verde). Actualmente, el 54% de la superficie urbana está destinada al uso de suelo residencial (9.400 ha aproximadamente) (Davis et al., 2017).



Mapa 3 4. Mapa en SIG con las tipologías de vivienda existente en Hermosillo.  
Fuente: Elaboración propia con ArcGIS 2019.

### 3.2.4 Espacios vacíos en la ciudad: una ciudad fragmentada

Otro aspecto que está relacionado de manera directa con la baja densidad población en Hermosillo, es la presencia de una importante cantidad de lotes baldíos. En el año 2010, cuando la superficie urbana de Hermosillo era de 17.000 ha, 12.500 ha estaban destinadas a lotes urbanos edificables. El resto era suelo no edificable: vías públicas y zonas de cerros en el interior de la mancha urbana. Sin embargo, de esa superficie de lotes urbanos edificables (12.500 ha), poco menos de la mitad eran lotes baldíos (Quintana Pacheco et al., 2015).

Actualmente, esta tendencia se mantiene. El 30% (5.000 ha) del área urbana (17.500 ha) son lotes baldíos (**Figura 3.19**). Existen 34.096 lotes baldíos (Lopez-Ordoñez, Crespo, Roset, & Coch, 2020).

El **Mapa 3.5** muestra la distribución de los lotes baldíos existentes. Para realizar este mapa, se han considerado como lotes baldíos los que se encuentra dentro del área urbanizada y no presentan edificación. Para esta selección no se ha tenido en cuenta su tipo de uso de suelo. Sin embargo, los lotes listados como áreas verdes por el ayuntamiento no han sido considerados.

En el mapa, se puede ver como la mayoría de los lotes baldíos se encuentran en áreas ubicadas al oeste, al noroeste y suroeste. Coincidiendo con las zonas que actualmente presentan un mayor desarrollo de vivienda unifamiliar.

Los mapas **3.2, 3.3 y 3.4** muestran algunas manzanas como deshabitadas o no residenciales, sin embargo, esto no significa que estas manzanas se encuentran desocupadas, esta es la razón por la cual no se encuentran señaladas en el **Mapa 3.5**. Por ejemplo, la zona industrial al sureste de la ciudad, o la Universidad, en la zona centro de la ciudad. Hay otros tipos de manzanas: parques industriales, reservas residenciales, equipamiento urbano, etc.

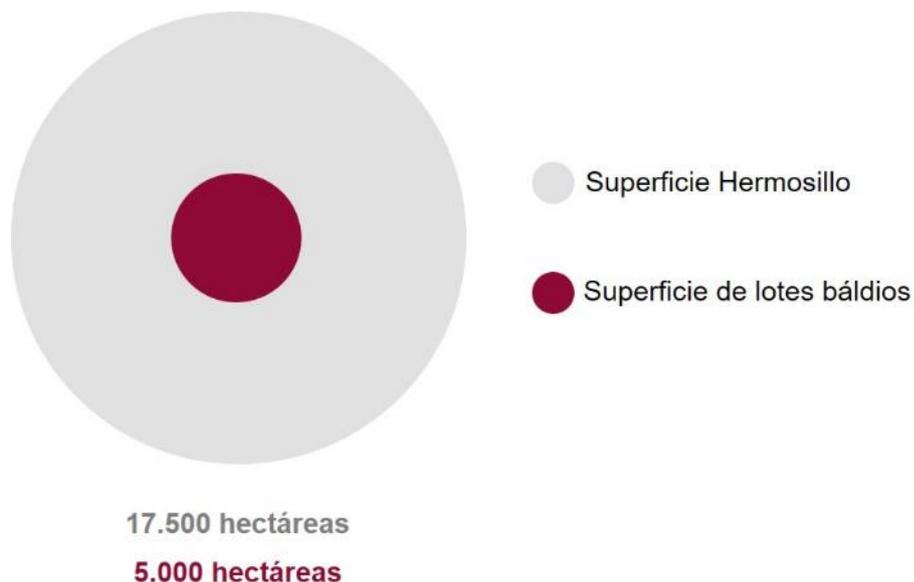


Figura 3.19. Relación entre la superficie total de lotes baldíos y la superficie total de Hermosillo.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**



Mapa 3.5. Mapa en SIG de la distribución de lotes baldíos en Hermosillo.  
Fuente: Elaboración propia con ArcGIS a partir de datos del INEGI (2010).

### 3.3 DOS ESTRATEGIAS DE CRECIMIENTO URBANO A SEGUIR

Después de analizar el clima de Hermosillo, su evolución urbana y de población, así como el tipo de vivienda predominante y la presencia de una elevada cantidad de lotes baldíos, parece necesario definir algunas estrategias para la creación de una política urbana que tenga en cuenta estos aspectos. En esta tesis, se proponen dos estrategias, a diferentes escalas, que podrían ayudar a reducir las distancias urbanas, por lo tanto, promover una proximidad en la vida diaria, cívica, administrativa y social.

La primera estrategia consiste en rellenar los lotes baldíos que se encuentran dentro del área urbana consolidada. Este enfoque podría representar una mejora en cuanto un ligero aumento de la densidad urbana. Para que este enfoque funcione, la implementación de lotes de uso mixto es necesaria (al momento de elaborar este estudio, no se ha encontrado este tipo de lotes en Hermosillo). Este tipo de enfoque podría ayudar a disminuir la zonificación de usos de suelo que las ciudades dispersas presentan (grandes áreas con un solo uso de suelo).

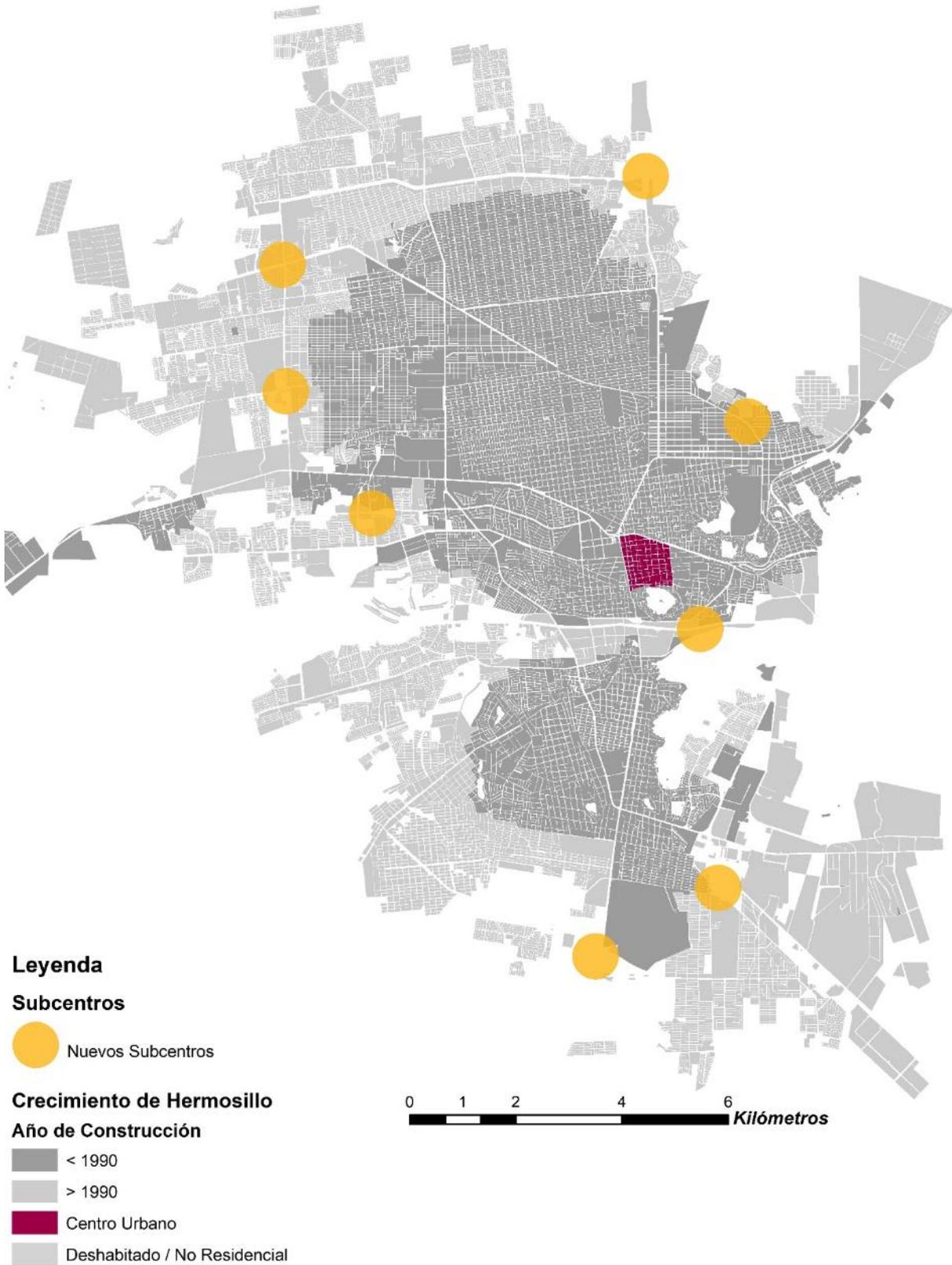
La segunda estrategia es la creación de subcentros urbanos en diferentes áreas de la ciudad. Este enfoque intenta pasar de una dinámica de crecimiento urbano de ciudad dispersa, en continua expansión, a una nueva dinámica en la que se fomenta la creación de subcentros para limitar la expansión urbana, aumentando la densidad urbana. Estos nuevos subcentros deben de ser de alta densidad, tanto edificatoria como de población. Al mismo tiempo, considerando el tipo de clima con el que cuenta Hermosillo, estos subcentros deben tener una morfología que permita la creación de sombra en los espacios públicos a través de la propia forma urbana, protegiendo a los peatones de la alta incidencia de la radiación solar, que en este tipo de climas, es el parámetro climático con mayor peso.

Estas estrategias, a pesar de que pueden implementarse individualmente, deben considerarse complementarias entre sí, ya que estarían creando una sinergia para lograr un objetivo común. En ciudades dispersas, estas intervenciones podrían llevar a una mejora en la calidad del espacio público, y aportarían una característica necesaria para la mejora de la vida urbana, que es la proximidad de los servicios a los ciudadanos.

En el caso de Hermosillo, ambas estrategias podrían ser aplicadas en el centro urbano, aprovechando el hecho de que es un área comercial activa y con todos los servicios públicos. Esto se podría hacer mediante el relleno de los lotes baldíos dentro que existen en el área, y el apilamiento de viviendas sobre los edificios actuales (cuya construcción lo permita). Esto permitiría la diversificación de los usos de suelo y aumentar la densidad de población y edificatoria.

El llevar a cabo estas estrategias en un área como el centro urbano de Hermosillo podría tener un efecto de catalizador en otras zonas de la ciudad. A su vez, un cambio en la política de vivienda podría ayudar a mejorar la situación, favoreciendo la construcción de vivienda plurifamiliar en altura sobre la de viviendas unifamiliares aisladas. El **Mapa 3.6** muestra una posible distribución de subcentros en Hermosillo.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**



Mapa 3.6. Mapa en SIG de la distribución de posibles sub – centros en Hermosillo.

## **RESUMEN DE CAPÍTULO**

En este capítulo se analizan las condiciones climáticas y la evolución urbana de la ciudad de Hermosillo. En el análisis climático se mostró que, si bien en ciudades como Hermosillo se alcanzan temperaturas muy elevadas durante la temporada de calor (hasta 50°C), el factor climático clave es la alta radiación solar directa. Dado que Hermosillo es una ciudad que cuenta con un crecimiento disperso y edificación de baja altura (1 – 2 niveles), el espacio público recibe una alta radiación solar. Al mismo tiempo, es posible que la configuración actual de sus viviendas unifamiliares no sea la más adecuada para este tipo de climas.

En este capítulo, se realizaron simulaciones sobre radiación solar directa en Heliodon2 que fueron comparadas con los datos radiación global de estaciones meteorológicas de la ciudad de Hermosillo. Los valores de radiación solar simulados, calculados considerando una transmitancia atmosférica del 70%, fueron similares a los medidos en la estación meteorológica durante la temporada de calor (mayo-octubre). La diferencia entre la radiación mensual simulada y medida en este periodo fue en promedio del 8%, oscilando entre 1% en julio y el 21% en octubre. Estos resultados evidencian el papel predominante de la componente directa de la radiación solar frente a la difusa en Hermosillo y, validan en uso de Heliodon2 como herramienta de análisis en este clima.

A continuación, se realizó un análisis urbano mediante un recorrido en la historia urbana de Hermosillo. Se creó una cartografía con información estadística de bases de datos públicas, haciendo posible un diagnóstico gráfico de la situación urbana actual de Hermosillo. Esta nueva cartografía muestra cómo la ciudad ha seguido un modelo de crecimiento que favorece el *urban sprawl*, la fragmentación y una baja centralidad poblacional.

Se crearon cinco mapas, cada uno representa aspecto urbano analizado:

- El crecimiento de la ciudad en los últimos 30 años. La superficie de la ciudad se ha multiplicado por 2,3 en tres décadas, pasando de 7.500 ha a 17.500 ha.
- La distribución de la densidad de población en la ciudad. En estos mapas (2) se ve el efecto de baja centralidad, característico de ciudades con este tipo de crecimiento; Hermosillo tiene una densidad actual de 47 hab/ha (en 1990 era de 58 hab/ha).
- La distribución de los tipos de vivienda en la «nueva» superficie urbana (1990 – 2020). Actualmente, el 54% de la superficie total de Hermosillo es destinada a la vivienda unifamiliar, mientras que solamente existen 6 ejemplos de vivienda plurifamiliar vertical (3 anteriores al año 2000).
- El nivel de fragmentación que tiene la ciudad de Hermosillo: 30% (5.000 ha) del área urbana son lotes baldíos.

A partir de estos cinco mapas con información georreferenciada y los datos climatológicos, en este capítulo se diseñan una serie de estrategias de crecimiento urbano a través de un aumento en la densidad y cambio en la manera de construir viviendas, pasando del paradigma de vivienda unifamiliar aislada a el de la vivienda plurifamiliar. Las estrategias que se proponen en esta tesis son: la implementación del lote de uso mixto (comercio en planta baja y vivienda encima), la intensificación de la ciudad por medio del relleno de lotes baldíos (aplicando el

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

concepto de lote de uso mixto) y la creación de subcentral de alta densidad mediante un apilamiento de la vivienda. Este último enfoque se representó en un sexto mapa, donde se muestra la ubicación de 8 posibles subcentros. Los efectos de una densificación de este tipo se analizarán en los capítulos 4 y 5 a través de cartografía, simulaciones energéticas en el espacio público y de demanda energética de viviendas.

Estos cambios podrían generar una mejora en la calidad de vida urbana al reducir las distancias en los recorridos, favorecer la concentración de la población y fomentar una mayor proximidad en los distintos aspectos de la vida urbana.

**CAPITULO 4**  
**UN NUEVO ENFOQUE EN LA PLANIFICACIÓN DE CIUDADES DE CLIMA**  
**CÁLIDO - SECO**

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

## 4.1 LA CIUDAD A TRAVÉS DE LOS MAPAS

El estudio de la ciudad se ha hecho siempre, y los mapas han sido una de las herramientas más importantes para llevarlo a cabo. Desde su origen, los mapas han sido utilizados para plasmar diferentes puntos de interés, como situaciones geográficas o climáticas. También se han utilizado para representar los movimientos o actividades relacionadas con la población de los distintos pueblos que han habitado en diferentes puntos del planeta a lo largo de la historia.

Sin embargo, resulta interesante que el primer mapa que se conoce es de estrellas. Los principales vestigios encontrados de estos mapas se hallan en el sur de Francia y en la península Ibérica (Antequera, 1991). En las Cuevas de Lascaux (**Figura 4.1**) se encuentran plasmadas, desde hace más de 16,500 años, las tres estrellas conocidas como «Triángulo de verano», Altaír, Deneb y Vega. En la misma cueva, también se encuentra lo que parece ser un mapa de Las Pléyades (Antequera, 1991; BBC, 2000). También se ha identificado un mapa de estrellas, de hace 14,000 años, en la Cueva de El Castillo, ubicadas en Cantabria, España.



Figura 4.1. « Le panneau de l'Ours » en las cuevas de Lascaux, Francia. Imagen de Norbert Aujoulat.  
Fuente: <http://archeologie.culture.fr/lascaux/fr/mediatheque/panneau-ours>.

No es hasta los siglos XIV – XIII a. C., en el periodo de la dinastía Casita en Babilonia, que se puede rastrear el primer plano urbano a escala (**Figura 4.2**). Se trata de la ciudad fortificada de Nippur, se muestra el templo principal, almacenes, un parque y otro recinto. Se muestra el río Éufrates y dos canales de riego que atraviesan la ciudad (Phaidon Editors, 2015).

El mapa de la ciudad de Nippur es incluso más antiguo que uno de los mapas topográficos de referencia más antiguos, el Mapa de Bedolina (Beltràn Lloris, 1972). Este mapa (**Figura 4.3**) es interpretado como la representación de parcelas cultivadas, caminos de montañas y pueblos. La representación de un territorio de cultivo tan intensivo, se adapta a un contexto cultural de la Edad del Hierro (I milenio a. C.), cuando en Europa había una idea completa de la propiedad privada (Turconi, 1997).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

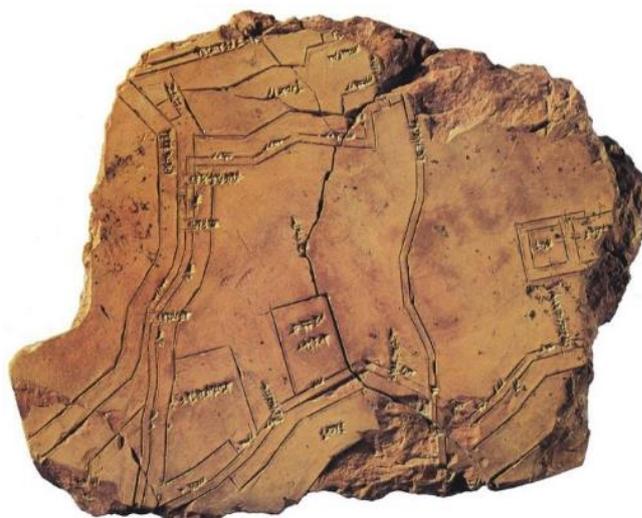


Figura 4.2. Tablilla de arcilla con el plano de la ciudad de Nippur (Phaidon Editors, 2015).

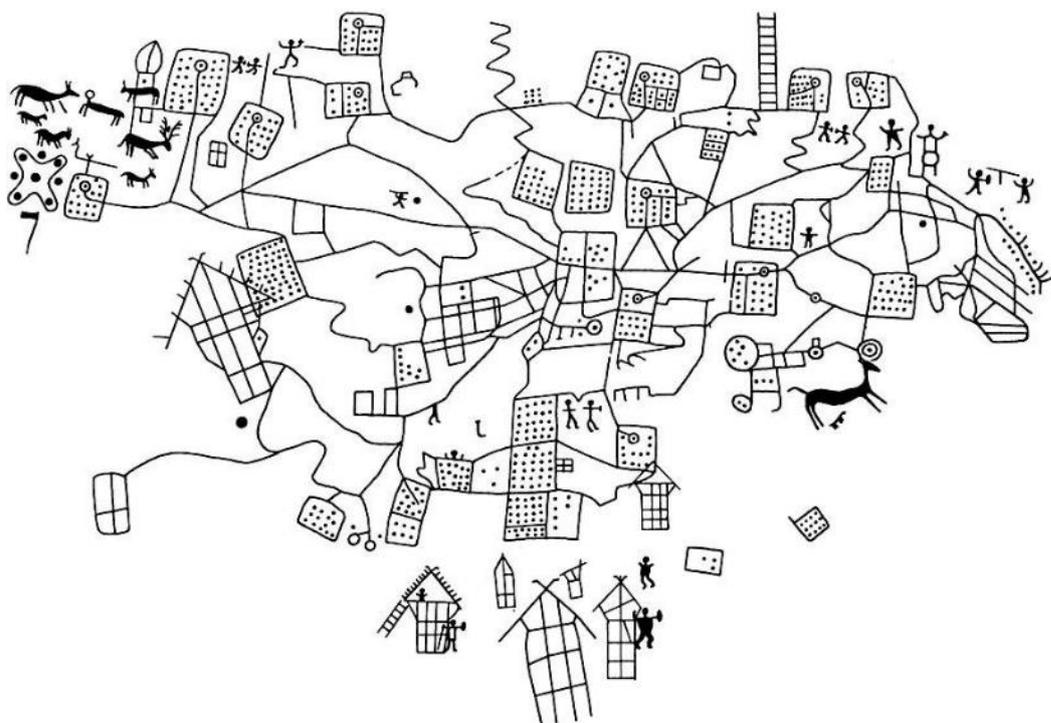


Figura 4.3. Reproducción gráfica de «La Roca 1 de Bedolina», conocida como el Mapa de Bedolina.  
Fuente: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-49774999>.

La existencia de presentaciones gráficas como las de Nippur y de Bedolina, nos demuestra la importancia que han tenido los mapas de asentamientos humanos a lo largo de la historia, así como la necesidad del ser humano de representar su entorno más inmediato. Una vez que se logra representar gráficamente el territorio «urbano», aparece el primer mapa del mundo conocido que sobrevive a nuestra época (**Figura 4.4**). Este mapa al igual que el de Nippur, tiene su origen en Babilonia en el siglo VI a. C. (Phaidon Editors, 2015).



Figura 4.4. Mapa del mundo conocido, en el centro Babilonia aparece sobre el Éufrates (Phaidon Editors, 2015).

A lo largo de la historia se han elaborado una gran cantidad de mapas de ciudades. Resulta de interés, para este estudio, mencionar algunos de los mapas que han marcado la historia de la cartografía urbana.

La Forma Urbis, también llamada *Forma Urbis Severiana* o *Forma Urbis Romae* (**Figura 4.5**), es un enorme mapa de la antigua Roma hecho en mármol en el siglo III d. C., durante el reinado del Emperador Séptimo Severo. Presenta un alto nivel de detalle: muestra las plantas de cada edificio y monumento de la ciudad imperial a una escala de 1:240 (Najbjerg, n.d.).



Figura 4.5. Fragmento de la *Forma Urbis* (Phaidon Editors, 2015).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

Las Crónicas de Núremberg, escrita en latín por Hartmann Schedel, en 1493, representan una importante recopilación de 89 vistas de ciudades. Una tercera parte de las ciudades, son reconocibles por su topografía y edificios principales. Otras ciudades, se basan en dibujos tomados al natural, tienen un valor artístico y topográfico (**Figura 4.6**). En estas vistas, se reproducen fortificaciones, puentes, palacios e iglesias con los rasgos de los estilos arquitectónicos locales (UCM, 2020). Es decir, lo que se buscaba en estas ilustraciones, era enfatizar los edificios representativos de cada ciudad, dejando de lado la exactitud de la misma.



Figura 4.6. Vista de Núremberg, Crónicas de Núremberg, Folio C. Hartmann Schedel, 1493.  
Fuente: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nuremberg\\_chronicles\\_-\\_Nuremberga.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nuremberg_chronicles_-_Nuremberga.png).

En el siglo XVI, el establecimiento de las bases matemáticas de la perspectiva en el siglo anterior, debió significar un importante cambio para los cartógrafos encargados de elaborar paisajes urbanos. Entre los cientos de vistas de ciudades en el siglo XVI, ya sean vistas de pájaro, planos, vistas en alzado, en xilografías y gravados, destaca el mapa de Venecia de Jacopo de' Barbari de 1500 (**Figura 4.7**) por su gran tamaño (135 x 280 cm, repartidos en seis hojas de 66 x 99 cm, las más grandes producidas en Europa), detalle y belleza en diseño y ejecución (Schulz, 1978).



Figura 4.7. Vista de Venecia de principios del siglo XVI de Jacopo de' Barbari, 1500 (Phaidon Editors, 2015).

A principios del siglo XVI, Leonardo da Vinci trabajaba como arquitecto para Cesare Borgia, que había sitiado y dañado Imola antes conquistarla (Phaidon Editors, 2015). Ese mismo año, da Vinci elaboró el mapa de la ciudad (**Figura 4.8**). Mientras que la mayoría de mapas renacentistas son conocidos por su imaginaria, inclusión de dragones, castillos, etc., da Vinci buscaba representar de una manera precisa la ciudad. Para hacer este mapa, es posible que haya utilizado un hodómetro especial y una brújula inventada por él. Da Vinci centro el plano en un círculo con cuatro líneas, cruzándolo en dirección de los puntos cardinales y mostró la ciudad de manera iconográfica. Es el primer mapa de este tipo que existe (Bliss, 2016).



Figura 4.8. Mapa de Imola al centro de un anillo, líneas trazadas con una brújula. Leonardo da Vinci, 1502 (Phaidon Editors, 2015).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

Durante ese mismo siglo, en el continente americano se estaba llevando a cabo la etapa de colonización europea. Los aztecas eran grandes cartógrafos, sin embargo, no se conserva ningún mapa precortesiano. El mapa más antiguo que se tiene de la Ciudad de México es el “mapa de Cortés” o “mapa de Núremberg” (**Figura 4.9**), éste se publicó en el año 1524 en la ciudad de Núremberg (Matos Moctezuma, 2001) junto con la traducción en latín de las Cartas de Relación de Hernán Cortés y el rey Carlos V. Hasta donde se sabe, el mapa está basado en la descripción de Tenochtitlan de la segunda carta (Medina, 2007).



Figura 4.9. Mapa de Cortés, impreso en Núremberg en 1524 (Phaidon Editors, 2015).

En el siglo XVIII aparece La pianta grande di Roma (**Figura 4.10**), o *mapa de Nolli Roma*, 1748, hecho por el arquitecto Giambattista Nolli. Es un mapa iconográfico, que representa la ciudad con una exactitud que permite comparar las diferentes formas, tamaños y posiciones de manera inmediata (Baicocchi et al., 2013). Como representación iconográfica, es el opuesto a la perspectiva de ojo de pájaro (estilo prevalente).

Nolli fue el primero en realizar un mapa de este tipo para Roma, por lo que su perspectiva única ha sido utilizada desde entonces (Lelo, 2014). El mapa provee un inmediato e intuitivo entendimiento de la forma urbana por medio de un método gráfico simple y efectivo. Define los sólidos con un color gris oscuro, y los huecos con tonos blancos o de un color gris claro. Nolli represento la planta de todas las iglesias y edificios públicos de Roma, lo que lo convierte en algo más que un dibujo plano, en un catálogo de edificios singulares geolocalizados (**Figura 4.11**).

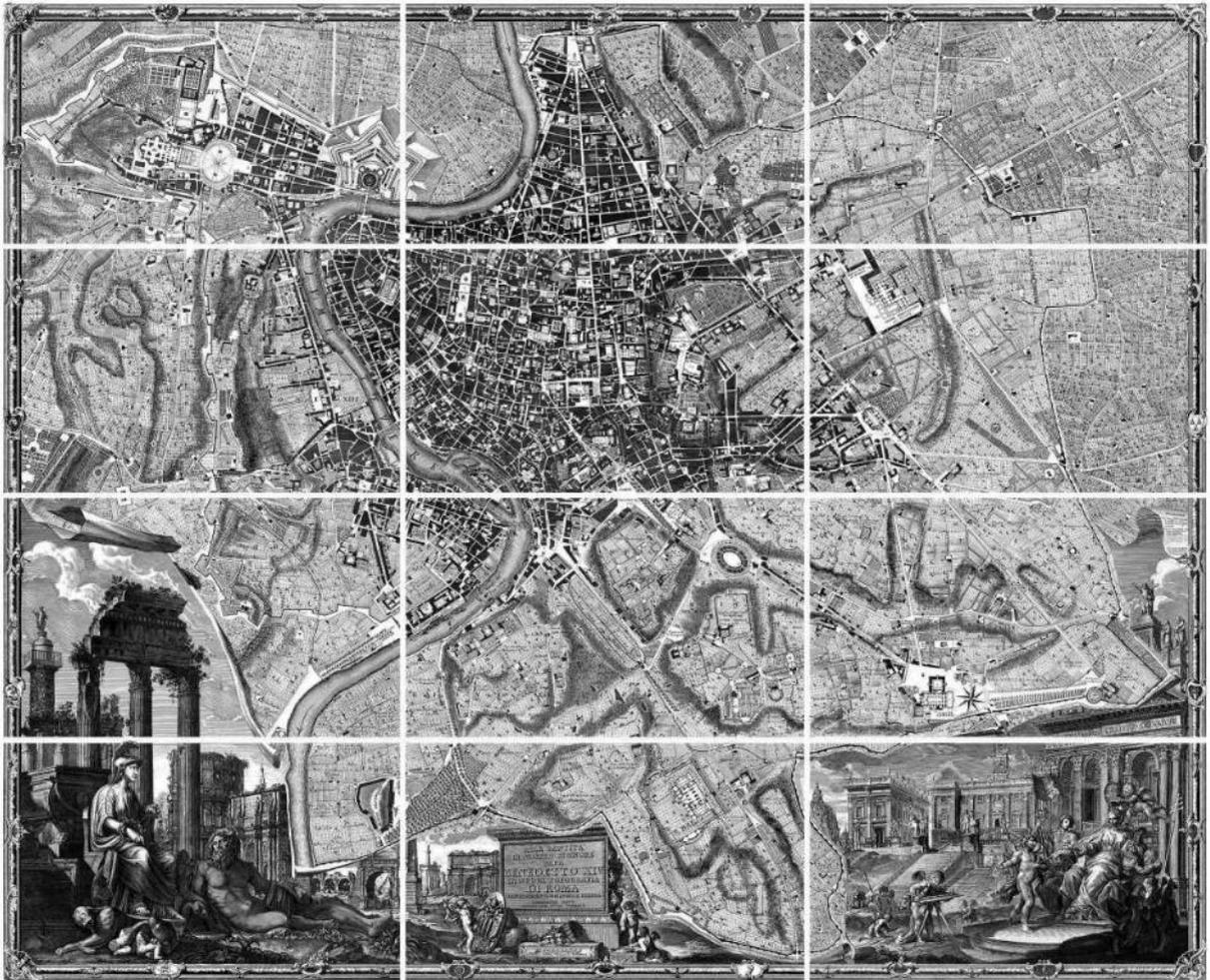


Figura 4.10. La pianta grande di Roma, Mapa de Nolli. Giambattista Nolli, 1748.

Fuente: <https://thearchiologist.com/student/pasquale-iaconantonio>.



Figura 4.11. Comparación de detalles del mapa de Nolli de 1748 con imágenes de satélite actuales.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

En el siglo XX, los mapas se volvieron algo común gracias a grandes avances en diversas áreas tecnológicas: fotografía, impresión y aviación. A su vez, el uso de ordenadores en la creación de mapas permitió diferentes formatos, escalas, proyecciones, etc.

Actualmente, la cartografía ha vivido un importante avance con el uso de software, logrando desarrollar una gran cantidad de tipos de representación. En los mapas de la actualidad se pueden representar un sin fin de categorías (**Figura 4.12**), desde mapas de comportamiento poblacional, de transporte, de uso de internet, climáticos; hasta mapas que resultan nada tradicionales, como mapas de olores en las calles, ruidos, de sombra de los edificios, distribución étnica o del salario dentro de una misma ciudad.

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

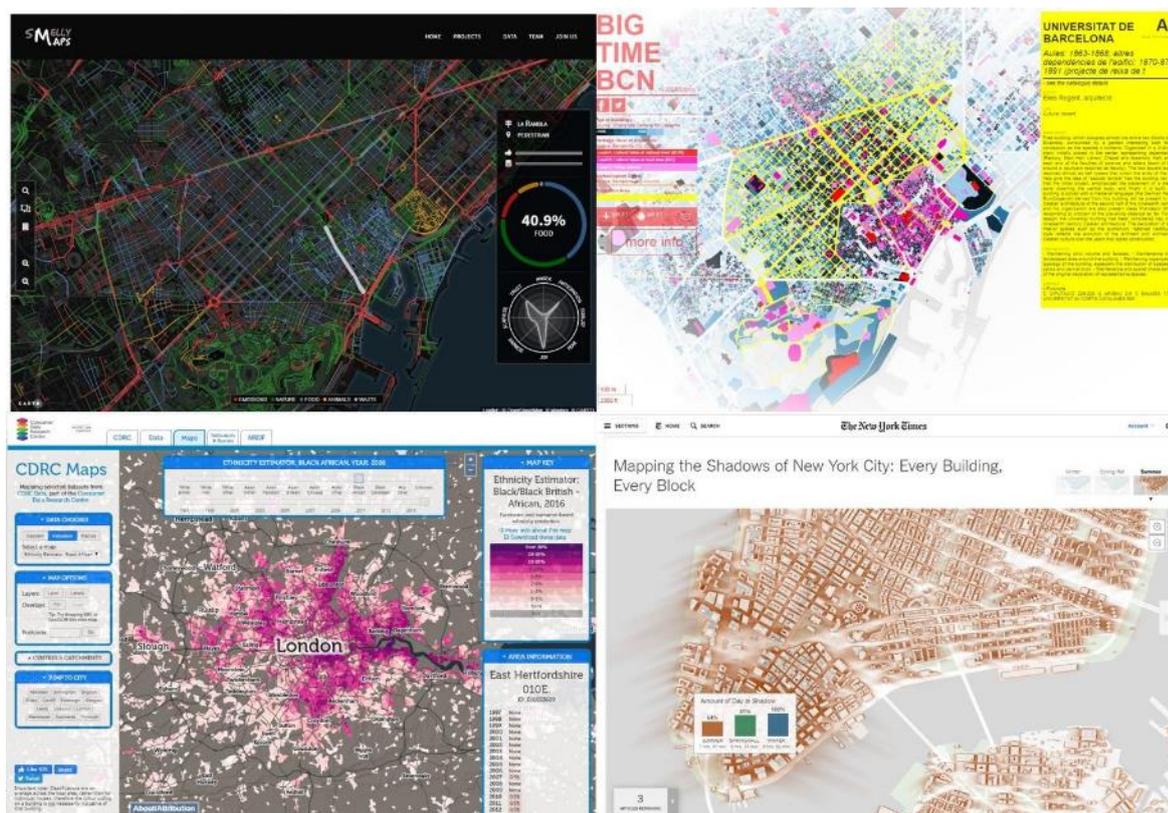


Figura 4.12. Arriba: SmellyMaps, BigTimeBCN. Abajo: Ethnicity Estimator, Shadows of NY.

Fuente: Elaboración propia a partir de diversas Webs - <https://www.nytimes.com/interactive/2016/12/21/upshot/Mapping-the-Shadows-of-New-York-City.html>, <http://goodcitylife.org/smellymaps/index.php>, [https://maps.cdrc.ac.uk/#/indicators/ee\\_baf/default/BTTTTFT/10/-0.1500/51.5200/](https://maps.cdrc.ac.uk/#/indicators/ee_baf/default/BTTTTFT/10/-0.1500/51.5200/), <http://bigtimebcn.300000kms.net/>.

Resulta interesante el hecho de que la mayoría de los mapas son de ciudades con morfología urbana compacta, en algunos casos se trata de ciudades que se han extendido a través de grandes superficies, sin embargo, continúan conservando, de cierta manera, esta compacidad. Las ciudades del modelo de crecimiento disperso, en cambio, no han sido representadas con la misma profusión y este trabajo, que centra su interés en la ciudad dispersa, puede aportar algo para revertir esta tendencia.

Una de las causas de la proliferación de cartografías de las últimas décadas ha sido la popularización de los **sistemas de información geográfica** (SIG o GIS, por sus siglas en inglés). El término SIG agrupa a un conjunto de herramientas que permite de almacenar, editar, analizar, y mostrar la información de diversa índole geográficamente referenciada. Estas herramientas permiten al usuario crear consultas interactivas sobre los datos almacenados, modificarlos, realizar análisis cruzados entre diversas categorías y crear mapas con sus resultados (Wikipedia, 2020).

Las cartografías generadas en tesis, elaboradas en ArcMap 10 (ESRI, 2015), parten de bases de datos GIS existentes de la ciudad de Hermosillo y de México. Tras un proceso de recolección de datos, dichas bases fueron enriquecidas con información referente a indicadores de densidad urbana, tipologías de vivienda y datos simulados sobre comportamiento energético.

## 4.2 ANÁLISIS DEL CENTRO URBANO, ÁREA DE ESTUDIO

Para hacer el análisis de este trabajo, se ha escogido un barrio de la ciudad de Hermosillo, en el estado de Sonora en México. El caso seleccionado es el centro de la ciudad. Existen varios motivos que hacen de esta zona un caso de estudio interesante para los objetivos de la tesis:

Es una zona de gran interés urbano: altamente concurrida, con atractivo turístico y comercial. Tiene la función de centro neurálgico de la ciudad, concentrando la mayoría de las líneas de autobús, por lo que durante el día presenta un elevado número de personas en sus calles. Al mismo tiempo presenta ciertas cualidades en su morfología y equipamiento urbano que representan un potencial a explotar.

Sin embargo, su dinamismo diurno desaparece durante las noches: al cerrar las tiendas, el área se transforma en un sitio inseguro para el peatón, es posible que esto se deba a la falta de vecinos que habiten esa zona.

El área de estudio presenta una densidad de población (hab/ha), por debajo del promedio de la ciudad. Por el contrario, es la zona más compacta de la ciudad, es decir, presenta los niveles más altos de densidad edificatoria ( $m^2/m^2$ ) y la mayor altura promedio.

Las características de la morfología urbana de esta zona escogida pueden ser las más adecuadas para establecer los criterios de diseño urbano futuro. El caso de estudio representa una oportunidad de sacar provecho de un tejido urbano que ya cuenta con los servicios públicos y la infraestructura necesaria para una buena calidad de vida urbana. El reto pendiente será ofrecer este lugar como un barrio para vivir en él y conseguir que las viviendas se sitúen en esta zona en lugar de en la periferia.

En este capítulo se van a exponer los estudios hechos sobre el caso de estudio que incluyen las siguientes secciones:

- Análisis del centro urbano, área de estudio
  - Walkability en el área de estudio
  - Elementos de la ciudad: patrimonio y equipamiento
  - Análisis de la densidad: poblacional, vivienda e indicadores de densidad edificatoria
  - Estudio de la radiación solar directa en el espacio público: la calle
- Replanteamiento del centro urbano.
  - Normativa vigente
  - Requisitos energéticos
  - Análisis de la densidad edificatoria: nuevos indicadores
  - Análisis de la densidad poblacional y residencial
  - Evaluación de la radiación solar directa en el nuevo espacio público

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

Delimitación de la zona de estudio (**Figura 4.13**):

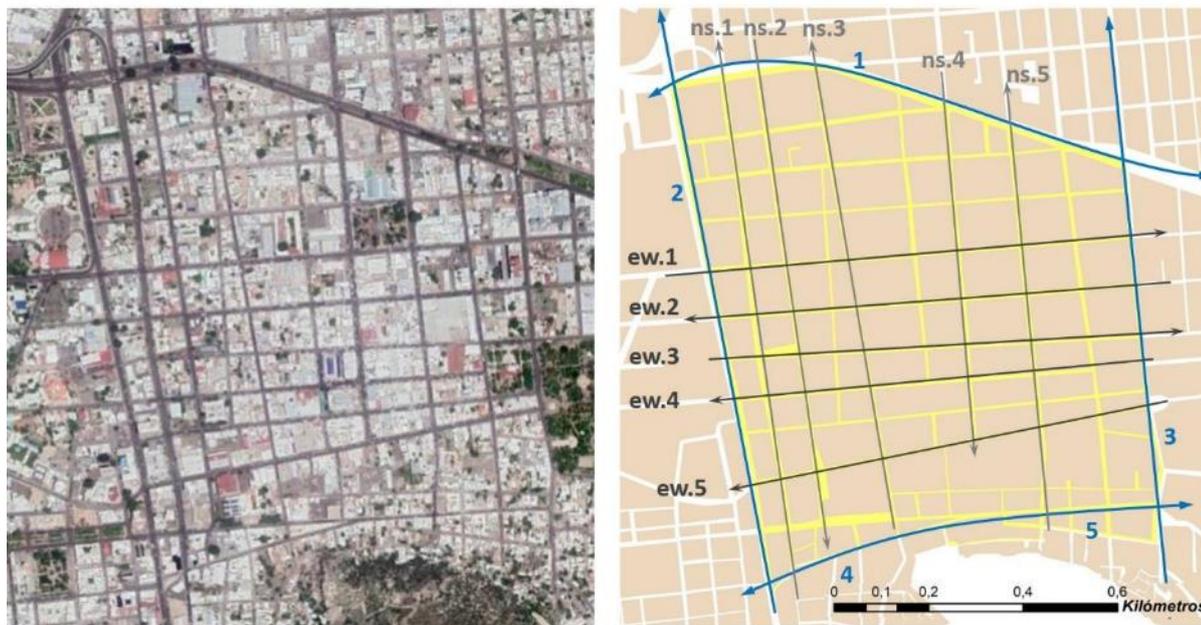


Figura 4.13. Área de estudio: a la izquierda una imagen satelital, a la derecha: sentido de calles principales.

Calles que delimitan el área de estudio:

1. Bulevar Luis Encinas, circulación en ambos sentidos. Orientación Este – Oeste (E-W).
2. Calle Rosales, circulación en ambos sentidos. Orientación Norte – Sur (N-S).
3. Calle Jesús García, circulación en un sentido. Orientación Norte – Sur (N-S).
4. Calle Sufragio Efectivo, circulación en un sentido. Orientación Este – Oeste (E-W).
5. Calle Obregón, circulación en un sentido. Orientación Este – Oeste (E-W).

Calles principales dentro del área de estudio, con orientación Norte – Sur y circulación en un sentido:

- ns.1. Calle Pino Suárez.
- ns.2. Calle General José María Yáñez.
- ns.3. Calle Garmendia.
- ns.4. Calle Mariano Matamoros.
- ns.5. Calle Benito Juárez.

Calles principales dentro del área de estudio, con orientación Este – Oeste y circulación en un sentido:

- ew.1. Calle Luis Donaldo Colosio.
- ew.2. Calle Doctor Alberto G. Noriega.
- ew.3. Calle Morelia.
- ew.4. Calle Monterrey.
- ew.5. Calle Aquiles Serdán.

### 4.2.1 Walkability del área de estudio

Las manzanas del área de estudio tienen una superficie de entre 0,12 ha – 2,13 ha (**Figura 4.14**). De acuerdo al trabajo realizado por Siskna (Siskna, 1997), la mayoría de las manzanas se encuentran dentro de un rango adecuado para pensar en la peatonalización del área de estudio (0,36 ha – 2 ha). El tamaño de las manzanas afecta el funcionamiento de la red peatonal, y puede llegar a influir en la comodidad y comportamiento del peatón: el nivel de *walkability* de una zona específica. Uno de los factores que más influye sobre la *walkability*, es la permeabilidad del tejido urbano, la cual se puede abordar desde un enfoque morfológico (tamaño y forma de las manzanas) y otro desde la interconexión de la red de calles.

El área de estudio presenta un tejido heterogéneo, con manzanas de diferentes tamaños y con recorridos que pocas veces superan los 110 m. Siskna (1997) concluye en su trabajo que la distancia óptima de los recorridos entre calles se encuentra en dos rangos, dependiendo del área de estudio: 50 – 70 m para una zona de intensa actividad peatonal, como un centro urbano comercial; 80 – 110 m ofrece una red de circulación apropiada para peatones y movimiento vehicular.

En la **Figura 4.14**, se muestra la distribución de las manzanas de acuerdo a su superficie y se han valorado los recorridos entre las intersecciones, de acuerdo a la distancia. Se han identificado gráficamente los recorridos: color verde para recorridos de < 110 m y color rojo para recorridos > 110 m.

Al analizar los resultados gráficamente, se observa que el 81% de las manzanas en el área de estudio se encuentran dentro del rango establecido por Siskna. En lo que se refiere a la distancia de los recorridos posibles entre calles, solo 13 (7%) exceden los 110 m de longitud, mientras que 178 recorridos (93%) se encuentran por debajo de los 110 m.

En la **Figura 4.14** se observa como los recorridos de mayor longitud se concentran en tres zonas, entre calles que surgen de la parte más antigua del área de estudio, proyectadas desde las faldas del cerro, cuando el trazado de las manzanas era irregular. Esto provoca que algunas calles se alejen entre sí, mientras que otras se acercan, por lo que la longitud de los recorridos entre estas calles aumenta o disminuye conforme se aleja de su origen.

En su estudio sobre la permeabilidad de distintas morfologías de tejidos urbanos, Pafka & Dovey (2017), hacen una comparación entre cinco morfologías básicas: manzanas achaflanadas (A), manzanas cuadradas (B), manzanas alargadas (C), manzanas grandes (D) y una mezcla heterogénea de manzanas (E). Llegan a la conclusión de que, de acuerdo a las medidas de permeabilidad existentes, la mezcla heterogénea tiene un mayor nivel de permeabilidad respecto al resto de tejidos.

Dentro de las diferentes medidas para evaluar la permeabilidad de un tejido urbano, algunas favorecen a un valor menor: perímetro promedio de manzana (m); superficie promedio de la manzana (ha). En el resto se considera positivo un valor elevado: la densidad de intersecciones (i/ha) y la densidad de la red (m/m<sup>2</sup>)

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
 LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.



Figura 4.14. Resultado del análisis de la superficie de manzanas y evaluación de los recorridos peatonales.

En la **Tabla 4.1** y en la **Figura 4.15**, se han colocado los tejidos analizados por Pafka & Dovey, (2017) y el tejido del área de estudio. Esto permite comparar su nivel de permeabilidad con diferentes morfologías básicas.

Tipo de Tejido	Perímetro Promedio (m)	Diagonal Promedio (m)	Superficie de Manzana Promedio (ha)	Densidad de Intersecciones (i/ha)	Densidad de Red (m/m <sup>2</sup> )
(A) Manzanas Achaflanadas	296	100	0,62	1,1	0,02
(B) Manzanas Cuadradas	320	113	0,64	1,1	0,02
(C) Manzanas Alargadas	640	283	1,12	0,7	0,02
(D) Manzanas Grandes	680	264	2,76	0,6	0,01
(E) Mezcla Heterogénea de Manzanas	256	93	0,52	1,6	0,02
Área de estudio	331	111	0,67	1,5	0,02

Tabla 4.1. Medidas de permeabilidad del área de estudio y de diferentes morfologías (Pafka & Dovey, 2017).

- **Perímetro promedio (m):** el área de estudio tiene un valor similar al tejido B, la diferencia radica en que las manzanas del área de estudio no son regulares, generando mayores perímetros.
- **Diagonal promedio (m):** el área de estudio tiene un valor similar al tejido B, sin embargo, su irregularidad produce un valor inferior.
- **Superficie de manzana promedio (m):** la irregularidad del área de estudio vuelve a tener un efecto importante, formando manzanas de gran tamaño, lo que aumenta el promedio de superficie, siendo superior a los tejidos A, B y E, y menor a los tejidos C y D.
- **Densidad de red (*Network Density*) (m/m<sup>2</sup>):** el área de estudio presenta valores iguales (0,02 m/m<sup>2</sup>) a la mayoría de tejidos, excepto el tejido D (0,01 m/m<sup>2</sup>).
- **Densidad de intersecciones (i/ha):** el valor del área de estudio es 1,51 i/ha, superior al de los tejidos A, B, C, D, pero, es inferior al tejido E con 1,6 i/ha. En este indicador, el área de estudio logra, por medio de una mezcla de diferentes tamaños y formas de manzanas, un valor más alto que los tejidos reticulares homogéneos (**Figura 4.16**).

UN NUEVO ENFOQUE EN LA PLANIFICACIÓN DE CIUDADES DE CLIMA CÁLIDO - SECO

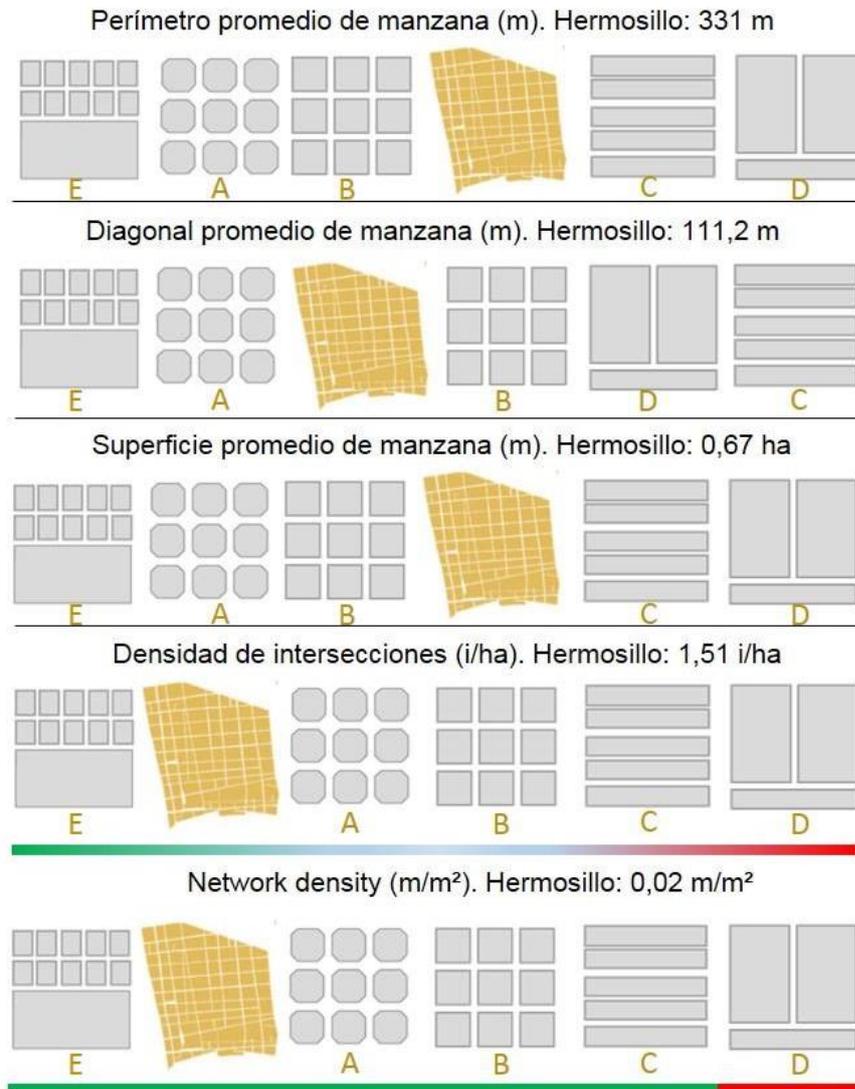


Figura 4.15. Desempeño de la permeabilidad del tejido del área de estudio con diferentes morfologías.

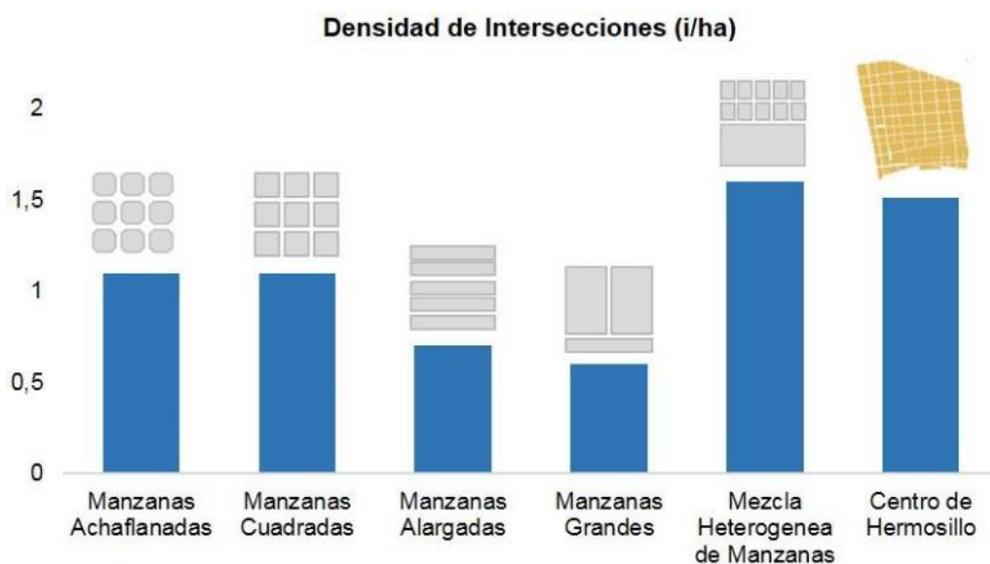


Figura 4.16. Comparativa del indicador densidad de intersecciones (i/ha) del área de estudio y los diferentes tejidos evaluados.

### 4.2.2 Elementos de la ciudad: patrimonio y equipamiento

El área de estudio presenta una concentración de servicios y equipamiento, centros de salud, escuelas de diferentes niveles, plazas y aparcamientos públicos (**Mapa 4.1**). Al ser una de las zonas más antiguas de la ciudad, cuenta con edificios patrimoniales y con la presencia del mercado municipal.

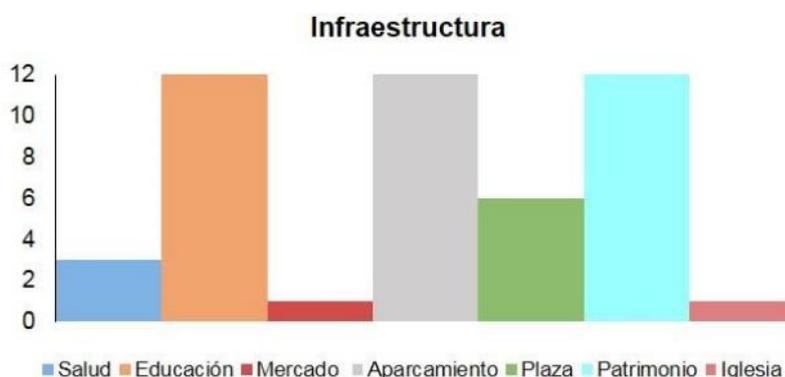


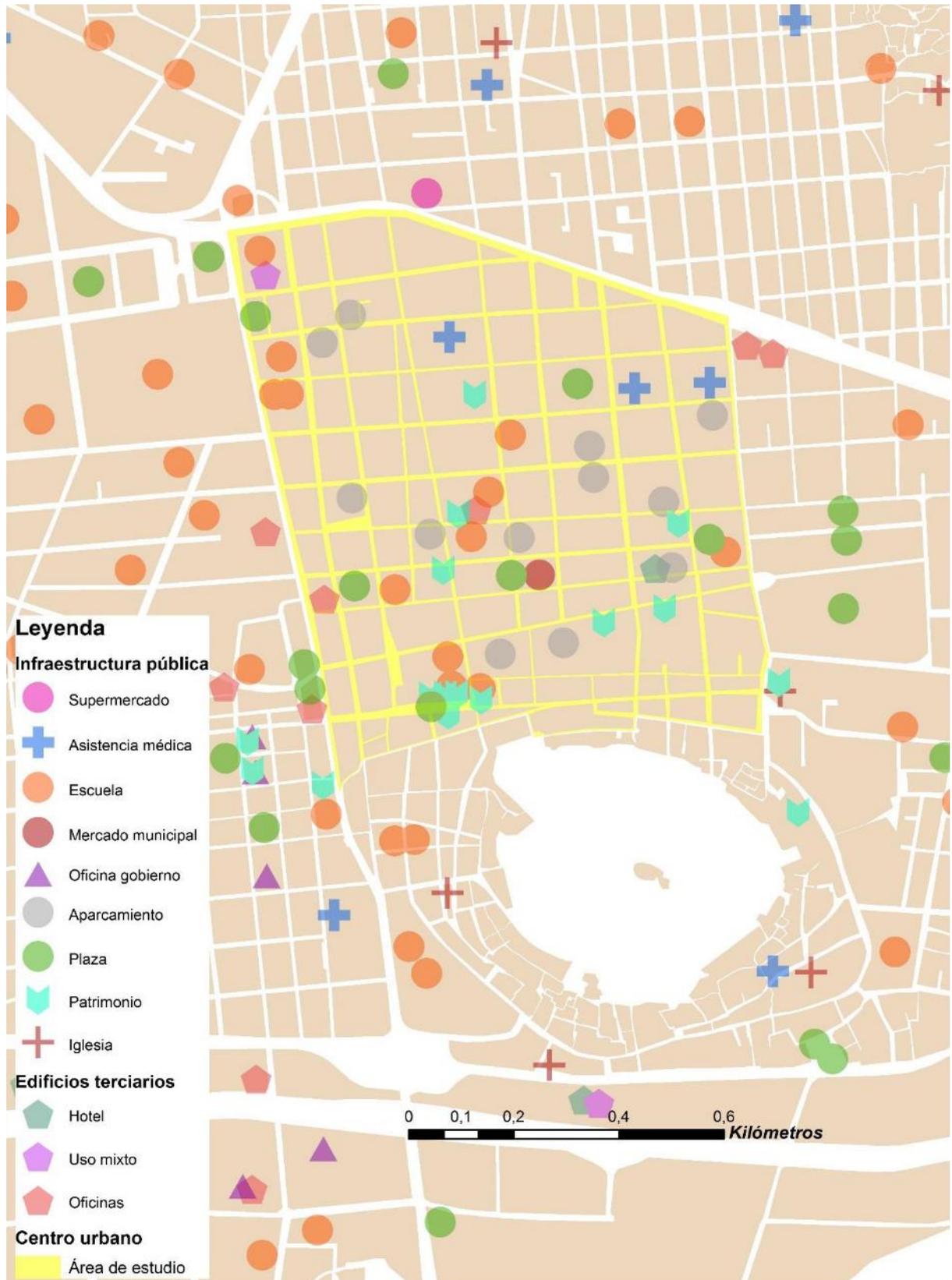
Figura 4.17. Número de elementos de cada tipo de infraestructura pública en el área de estudio.  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INEGI (2010).

En la **Figura 4.17**, sobresalen los centros educativos, aparcamiento y patrimonio. La presencia de centros educativos es un importante componente para la calidad de vida urbana. Los centros educativos con mayor presencia en el área de estudio son los de nivel profesional (7), seguido por preescolar (2), primaria (2) y bachillerato (1). Es decir, hay cinco centros educativos con alumnos menores de edad (en rangos de 0 – 12 y 15 – 18 años).

La presencia de centros escolares de nivel primaria y preescolar fomenta la generación de cohesión social. El hecho de que los padres lleven a sus hijos a la escuela genera la posibilidad de nuevas relaciones sociales con otros miembros dentro de la misma sociedad.

En el **Mapa 4.1** también se señalan como “edificios terciarios” a los edificios con una altura significativa (> 5 plantas), estos son considerados elementos representativos del área de estudio. Estos “hitos” o puntos de referencia son la torre de oficinas TELMEX (9 p) y el edificio Banca Cremi (6 p), el Museo Biblioteca de la Universidad de Sonora (5 p), el antiguo Hotel Laval (6 p).

Estos edificios se unen a otros “hitos” como el mercado municipal y la iglesia del Carmen. Las plazas son otros elementos importantes dentro del área de estudio, hay seis. Estos “nodos”, junto con el cruce de las principales calles del centro (calle Matamoros y calle Monterrey, junto al mercado municipal) forman parte de la imagen pública de la ciudad.



Mapa 4.1. Infraestructura pública y edificios terciarios (>5 plantas) en el área de estudio.  
Fuente: Elaboración propia con ArcGIS a partir de datos del INEGI (2010).

### 4.2.3 Análisis de la densidad: poblacional, vivienda y densidad edificatoria

#### **Densidad de población (hab/ha)**

La población del área de estudio es de 1.162 habitantes, es decir, concentra al 0,1% de la población total de la ciudad. Los habitantes se distribuyen en un área de 82 ha, con 100 manzanas que en total suman una superficie de 67 ha (81% del área de estudio). La densidad de población bruta del área de estudio es de 14 hab/ha (**Figura 4.18**), mientras que la densidad de población neta es de 21 hab/ha.

En el **Mapa 4.2** muestra con diferentes tonos de color, la densidad de población en cada manzana. Esto permite una lectura de la distribución geográfica de la población y se observa el efecto que provoca la baja centralidad en la ciudad, puesto que se constata que la zona del centro está menos habitada que sus alrededores.

La población se encuentra repartida en 69 manzanas, de las cuales sólo doce tienen una densidad mayor a 50 hab/ha (un poco superior al promedio de la ciudad, 47 hab/ha) y concentran a 435 habitantes (37% de la población del área de estudio). Los 727 habitantes que restan se encuentra distribuidos en 57 manzanas, mientras que las 31 manzanas que restan no tienen población, por lo que el promedio de habitantes por manzanas es de 12 personas.

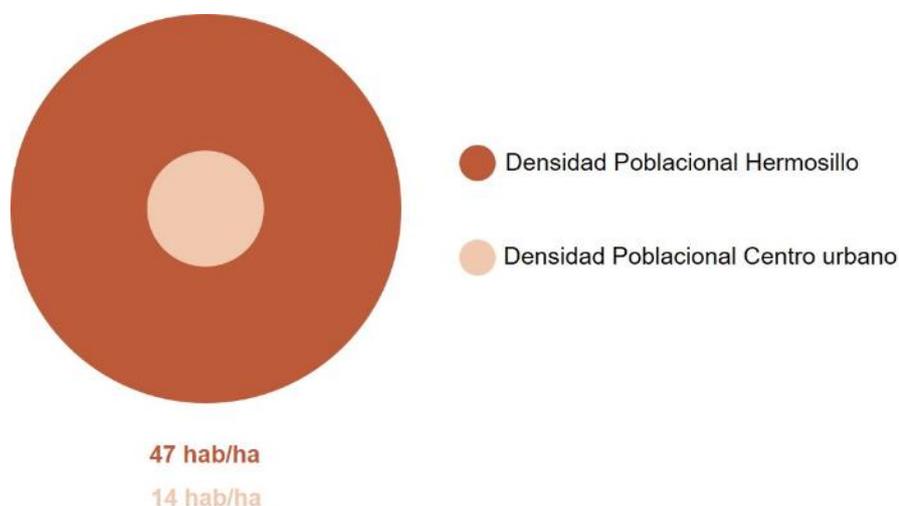
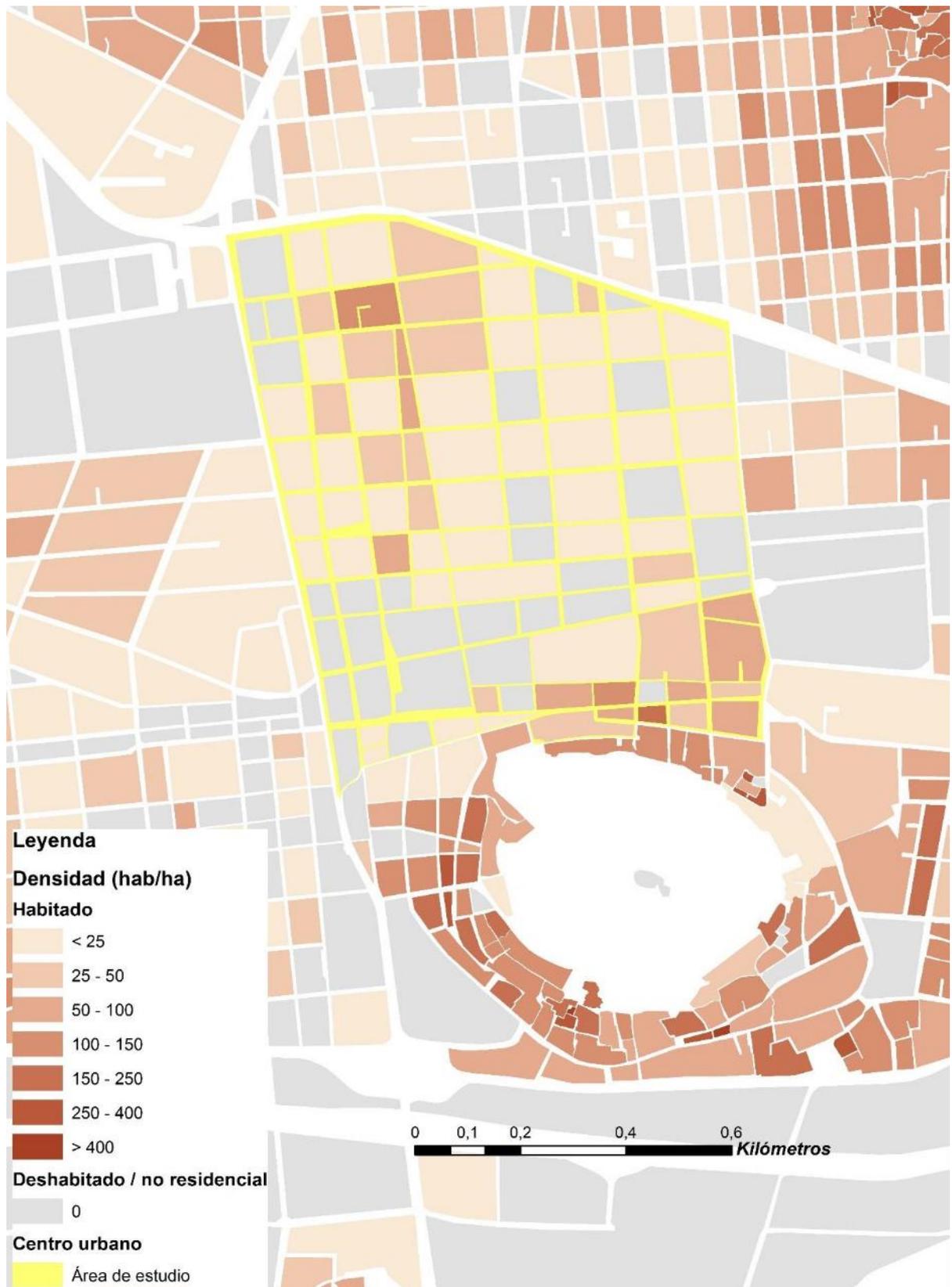


Figura 4.18. Relación entre la densidad de población bruta del área de estudio y la ciudad de Hermosillo.



Mapa 4.2. Densidad de población (hab/ha) distribuida por manzanas en el área de estudio.  
Fuente: Elaboración propia con ArcGIS a partir de datos del INEGI (2010).

### **Densidad de vivienda (viv/ha)**

Dentro del área de estudio hay 533 viviendas unifamiliares. Esto equivale a 111.227 m<sup>2</sup> de vivienda, lo que equivale al 13,5% de la superficie del área de estudio (**Figura 4.19**). Del total de viviendas, 49 se encuentran deshabitadas (13.978 m<sup>2</sup>, 9%) y dos se encuentran vandalizadas (165 m<sup>2</sup>, 0,3%). Es decir, existen 482 viviendas habitadas (97.075 m<sup>2</sup>, 90%).

En el **Mapa 4.3** se representa la distribución de la población a través de la identificación de las parcelas de uso habitacional. Esto ayuda a comprender la distribución de la densidad de población que se mostró en el **Mapa 4.2** (p.116) y al mismo tiempo brinda información sobre la configuración urbana del área de estudio.

De las 69 manzanas con viviendas, solo ocho tienen más de 15 viviendas. Estos valores de vivienda, junto con los de población, se traducen en una baja densidad de vivienda: 6,5 viv/ha, dando como resultado un promedio de dos habitantes por vivienda (el promedio de la ciudad es de 3 – 4 habitantes por vivienda (Alvarado, 2016; Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2016).

La huella residencial (m<sup>2</sup> de vivienda por habitante) en el área de estudio es muy elevada con respecto al promedio de la ciudad, 96 m<sup>2</sup>/hab contra 35 m<sup>2</sup>/hab. Es decir, es 2,7 veces más alto, un número que parece resaltar, sobre todo al considerar que el porcentaje de uso habitacional en el área de estudio es de solo el 13,5%.

A partir de los datos representados en el mapa de densidades, también se distinguen tres zonas diferentes: un área en el extremo noroeste y otra en el extremo sur este con mayor densidad de viviendas y una gran banda central prácticamente sin viviendas. Este reparto desigual de los usos de vivienda es un fenómeno frecuente en la ciudad dispersa (Muñiz et al., 2006). No se ha identificado la existencia de parcelas mixtas: no hay uso comercial y habitacional en una misma parcela.

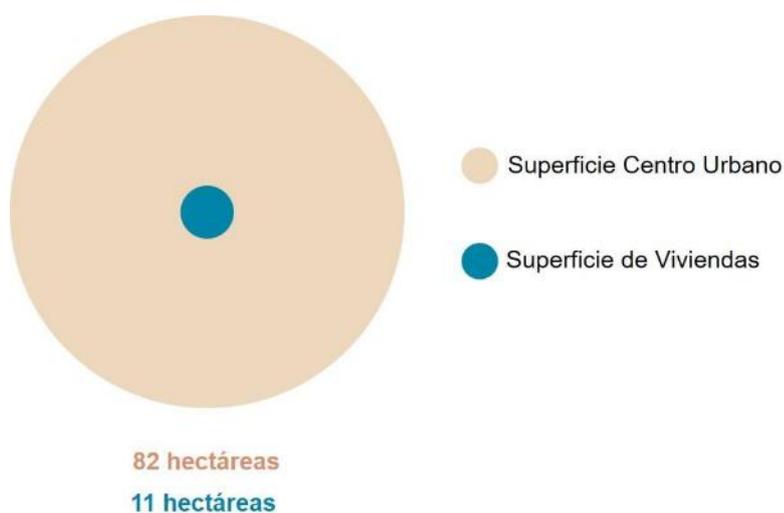
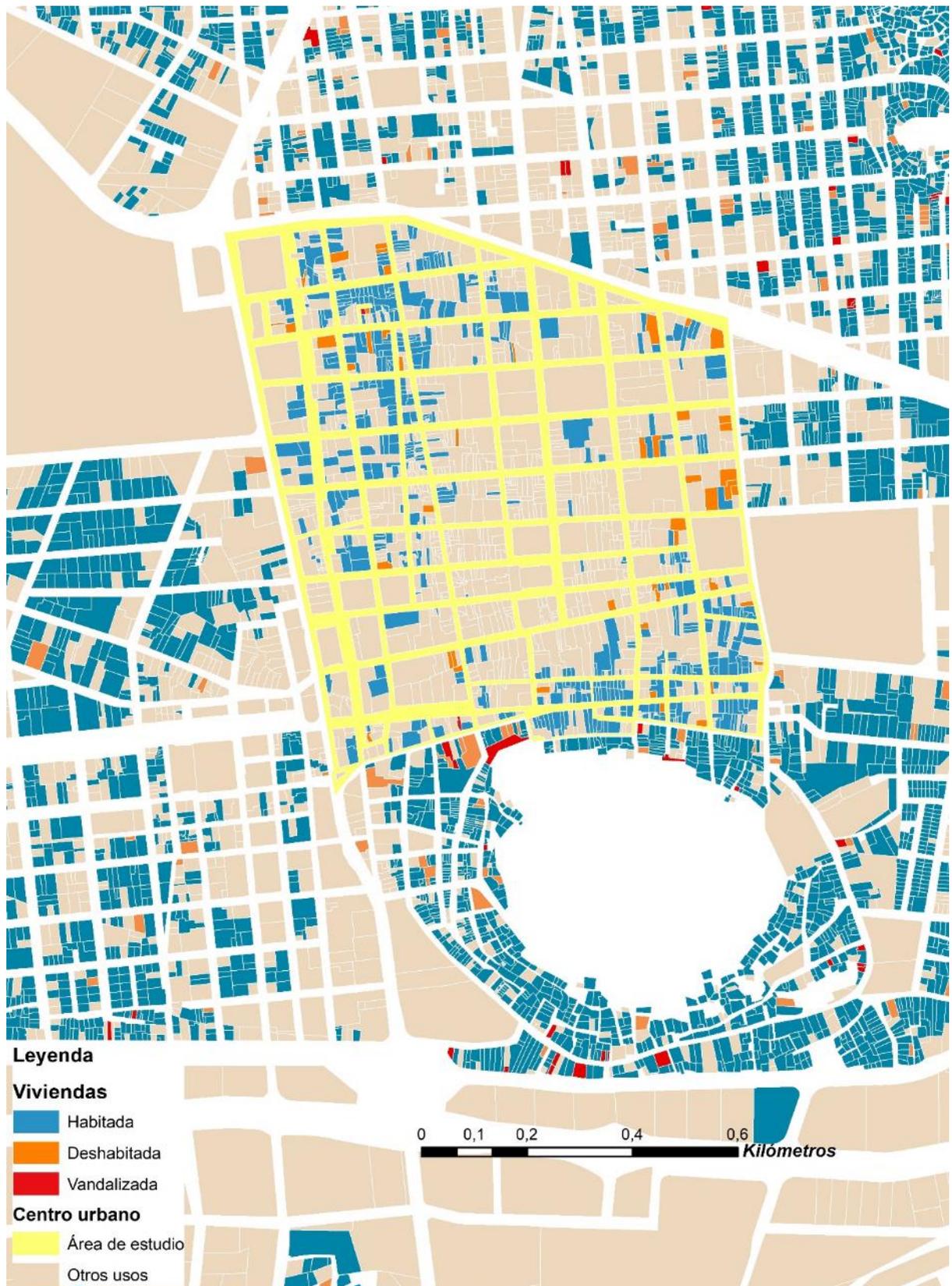


Figura 4.19. Relación entre la superficie de viviendas en el área de estudio y su superficie total.



Mapa 4.3. Distribución de viviendas en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con ArcGIS a partir de datos del H. Ayuntamiento de Hermosillo (2012a).

**Densidad edificatoria: GSI (Ground Space Index) ( $m^2/m^2$ )**

En el **Mapa 4.4** está representado el GSI (ocupación) del área de estudio por manzanas. Es decir, la relación entre la superficie ocupada por los edificios (huella) y la superficie de la manzana (**Figura 4.20**).

En este mapa se pueden identificar de manera rápida a cinco manzanas con un GSI menor a  $0,15 m^2/m^2$ , estas son plazas públicas. Las manzanas con un elevado GSI (arriba de  $0,75 m^2/m^2$ ) coinciden con las manzanas que tienen baja densidad de población, incluso, cinco de ellas no cuentan con habitantes (**Mapa 4.2** y **Mapa 4.3**). Estas se encuentran en la zona centro del área de estudio, justo alrededor del mercado municipal.

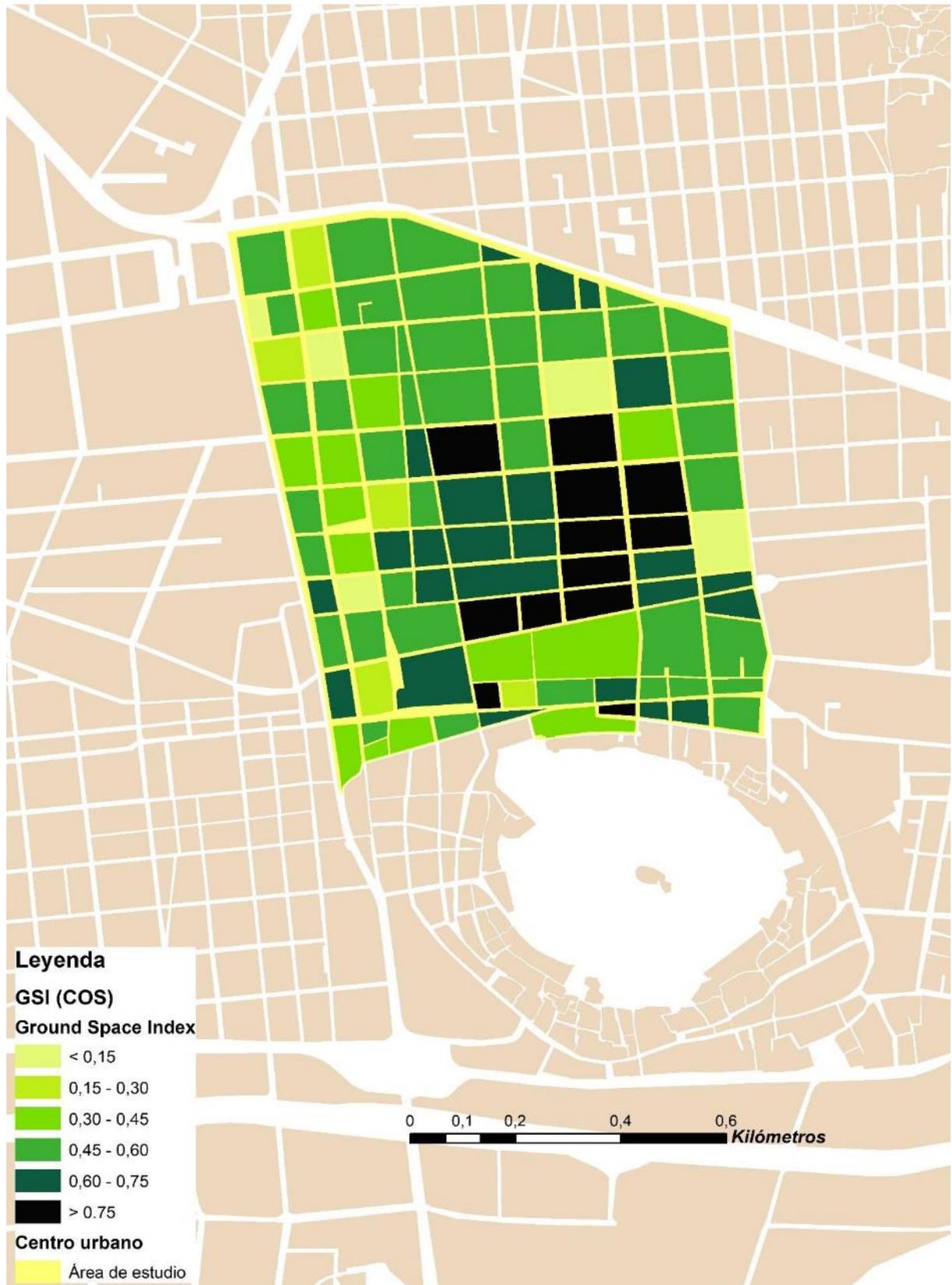
De acuerdo a los rangos utilizados en el **Mapa 4.4** para el indicador GSI, las manzanas que conforman el área de estudio quedan agrupadas de la siguiente manera:

- GSI  $< 0,15 m^2/m^2$ : 5 manzanas
- GSI  $0,15 - 0,30 m^2/m^2$ : 5 manzanas
- GSI  $0,30 - 0,45 m^2/m^2$ : 15 manzanas
- GSI  $0,45 - 0,60 m^2/m^2$ : 39 manzanas
- GSI  $0,60 - 0,75 m^2/m^2$ : 24 manzanas
- GSI  $> 0,75 m^2/m^2$ : 12 manzanas

El área de estudio presenta una huella de edificación bruta de  $357.406,95 m^2$  (35,74 ha), esto da como resultado que cada manzana tenga una huella edificatoria promedio de  $3.574 m^2$  (0,35 ha). Esto se traduce en un GSI bruto de  $0,44 m^2/m^2$ , mientras que el GSI de la manzana promedio es de  $0,54 m^2/m^2$ .



Figura 4.20. Relación entre la huella de edificación bruta en el área de estudio y su superficie total.



Mapa 4.4. Indicador GSI ( $m^2/m^2$ ) por manzanas dentro del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con ArcGIS a partir de datos del INEGI (2010) y del H. Ayuntamiento de Hermosillo (2012a).

**Densidad edificatoria: FSI (Floor Space Index) ( $m^2/m^2$ )**

En el **Mapa 4.5** está representado el indicador FSI (edificabilidad) de las manzanas que se encuentran en el área de estudio. Esto es, la relación entre la cantidad de  $m^2$  de techo edificables y la superficie de la manzana (**Figura 4.21**).

Este mapa tiene una distribución acorde al **Mapa 4.4**: las manzanas con el FSI más elevado (arriba de  $1,5 m^2/m^2$ ) se encuentran en la zona del centro, la zona comercial, donde hay poca población. Las zonas ocupadas por viviendas presentan valores de FSI más bajos (menores a  $1,0 m^2/m^2$ ), esto se debe en parte a que las viviendas son, en su mayoría, de una planta.

En el **Mapa 4.5** se puede ver que solo 23 manzanas tienen un FSI mayor a  $1,0 m^2/m^2$ , es decir, son las únicas manzanas que tienen una mayor cantidad de  $m^2$  de construcción en relación a su superficie. De acuerdo a los rangos utilizados para el indicador FSI, las manzanas que conforman el área de estudio quedan agrupadas de la siguiente manera:

- FSI  $< 0,5 m^2/m^2$ : 22 manzanas
- FSI  $0,5 - 1,0 m^2/m^2$ : 55 manzanas
- FSI  $1,0 - 1,5 m^2/m^2$ : 15 manzanas
- FSI  $1,5 - 2,0 m^2/m^2$ : 6 manzanas
- FSI  $2,0 - 3,0 m^2/m^2$ : 1 manzana
- FSI  $> 3,0 m^2/m^2$ : 1 manzana

El área de estudio cuenta con  $523.497 m^2$  (52,3 ha) de edificación bruta, es decir, si se repartiese esta cantidad a nivel de calle, seguirán habiendo 30 ha de espacio libre.

El FSI bruto es de  $0,64 m^2/m^2$ , mientras que el FSI de la manzana promedio es de  $0,80 m^2/m^2$ , este aumento se debe a que se deja de considerar la superficie de las calles en el cálculo del indicador.

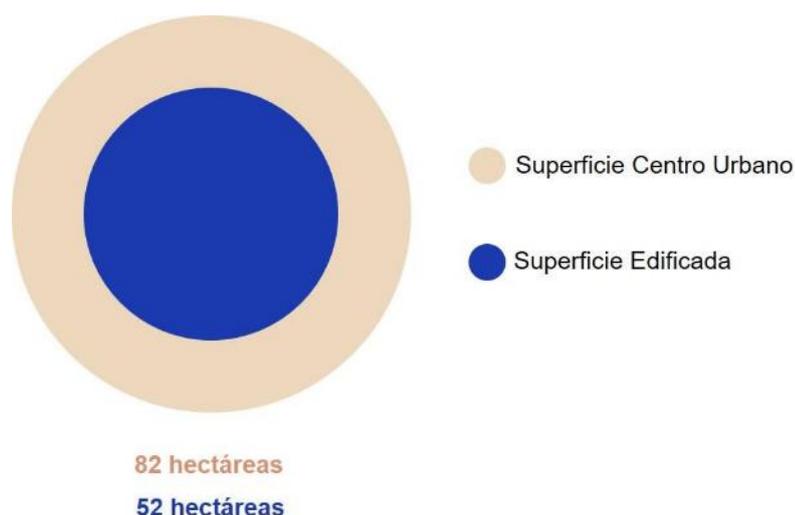
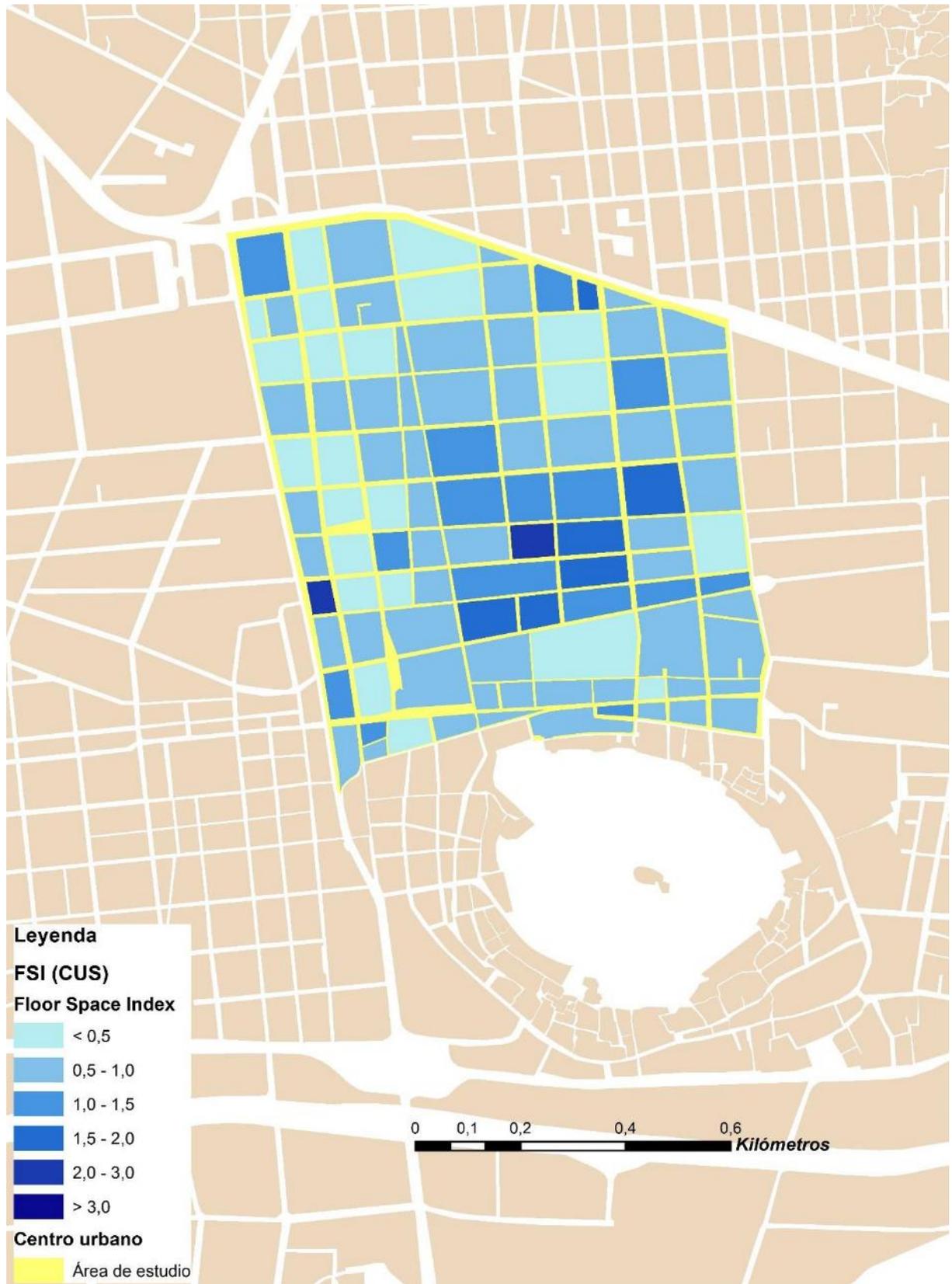


Figura 4.21. Relación entre la superficie edificada bruta en el área de estudio y su superficie total.



Mapa 4.5. Indicador FSI ( $m^2/m^2$ ) por manzanas dentro del área de estudio.  
Fuente: Elaboración propia con ArcGIS a partir de datos del INEGI (2010).

***Densidad edificatoria: L (Altura edificatoria)***

En el **Mapa 4.6** nos muestra el área de estudio considerando solamente el indicador L, el cual nos indica el número de plantas promedio de cada manzana. En este mapa se puede ver, como predominan las manzanas con L= 1 y L= 2, mientras que solo hay tres manzanas con una L mayor a 3 plantas.

De acuerdo a los rangos utilizados en el **Mapa 4.6** para el indicador FSI, las manzanas que conforman el área de estudio quedan agrupadas de la siguiente manera:

- L= 0 plantas: 4 manzanas
- L= 1 planta: 64 manzanas
- L= 2 plantas: 29 manzanas
- L= 3 plantas: 1 manzanas
- L= 4 plantas: 2 manzana

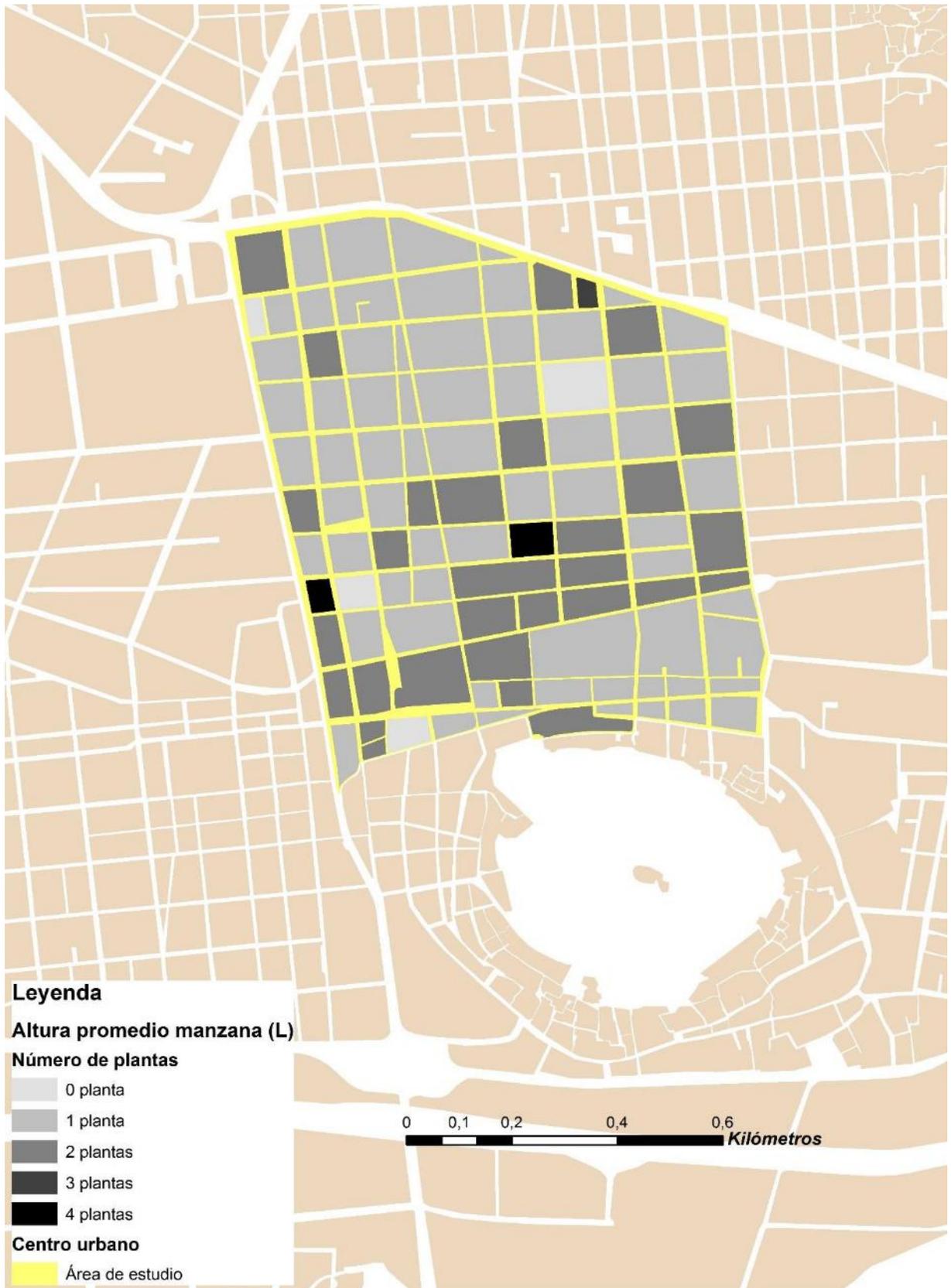
Este indicador está relacionado con los dos anteriores, ya que se obtiene de la relación FSI/GSI. Es decir, mientras la diferencia entre FSI y GSI sea mayor, el valor de L aumenta, por ejemplo, una manzana con FSI= 2 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> con un GSI= 0,50 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> tendrá un L de 4 plantas.

El valor bruto de L es de 1,46 niveles, mientras que el valor de L de la manzana promedio es de 1,44 niveles.

***Densidad edificatoria: OSR (Open Space Ratio) (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)***

El último indicador analizado es el OSR, también conocido como la amplitud del espacio libre a nivel de calle. Este indicador no sirve para los espacios abiertos, como las plazas.

El valor bruto de OSR es de 0,88 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, mientras que el valor de OSR de la manzana promedio es de 0,75 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>.



Mapa 4.6. Indicador L (Altura edificatoria) por manzanas dentro del área de estudio.  
Fuente: Elaboración propia con ArcGIS a partir de datos del INEGI (2010).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

**Densidad edificatoria: Spacemate**

El cálculo de estos indicadores de densidad, a nivel de tejido y a nivel de manzana, nos permite comparar, mediante el método del diagrama *Spacemate* (Berghauser Pont & Haupt, 2009), la situación actual del área de estudio con diferentes tejidos urbanos de ciudades referentes en urbanismo: Barcelona, Berlín, Londres, Madrid, París y Roma (**Figura 4.22**).

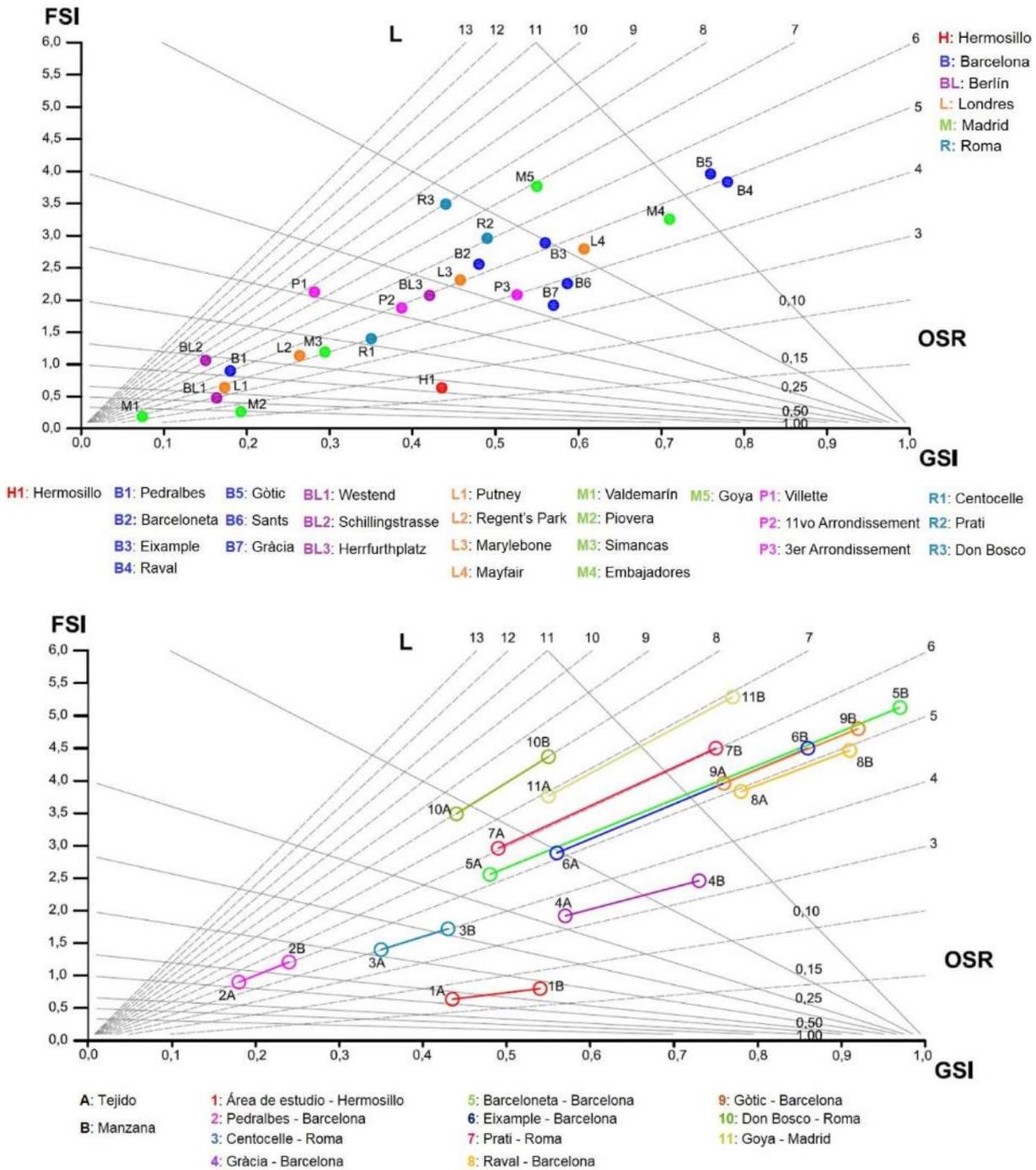


Figura 4.22. Diagramas *Spacemate* (Berghauser Pont & Haupt, 2009). Comparación de la densidad bruta (arriba) de diferentes tejidos de siete ciudades. Abajo, representación gráfica de la diferencia entre la densidad bruta y neta de diferentes tejidos de cuatro ciudades: Hermosillo, Barcelona, Madrid y Roma.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de (Morganti, 2013) y (Rodríguez-Álvarez, 2016).

La posición en la que se ubica el área de estudio, dentro del *Spacemate*, es de una configuración urbana tipo suburbano. Es decir, edificios de baja altura y un grado importante de espacio abierto.

En el *Spacemate* se puede ver de manera clara que la morfología urbana del área de estudio es distinta a la de las ciudades europeas. Si bien, hay tejidos como Valdemarín o Piovera en Madrid, que son de tipo suburbano, se ubican a las afueras de la ciudad. El caso del área de estudio se ubica en el centro urbano de la ciudad.

Si se compara el área de estudio, con los tejidos de los centros urbanos de las diferentes ciudades, surgen algunas observaciones:

1. La relación entre la huella del edificio y la superficie disponible (GSI), tiende a mantenerse sobre  $0,40 \text{ m}^2/\text{m}^2$ , llegando a estar cerca de  $0,80 \text{ m}^2/\text{m}^2$  en casos como el barrio de Embajadores en Madrid o el Barri Gòtic y el Raval en Barcelona. El área de estudio tiene un valor  $\text{GSI} = 0,44 \text{ m}^2/\text{m}^2$ .
2. Los centros urbanos densos mantienen una alta intensidad edificatoria (FSI) con valores entre  $2,0 \text{ m}^2/\text{m}^2$  y  $4,0 \text{ m}^2/\text{m}^2$ . Es decir, por cada  $\text{m}^2$  de la huella del edificio hay al menos dos  $\text{m}^2$  de edificación. El área de estudio tiene un valor  $\text{FSI} = 0,64 \text{ m}^2/\text{m}^2$ .
3. En los centros urbanos de ciudades con alta densidad edificatoria y de población, las edificaciones suelen tener más de cuatro plantas ( $L > 4$ ). El área de estudio tiene un valor  $L = 1,46$ .
4. Los valores de OSR (Open Space Ratio) en los centros urbanos europeos suelen ser bajos. Es decir, hay poco espacio abierto en relación al espacio construido. Los valores se mantienen debajo de  $0,37 \text{ m}^2/\text{m}^2$ . El área de estudio tiene un valor  $\text{OSR} = 0,88 \text{ m}^2/\text{m}^2$ .

Es decir, el área de estudio solo cuenta con uno de los cuatro indicadores ( $\text{GSI} = 0,44 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ) dentro de los rangos encontrados para centros urbanos.

En el caso del análisis a escala de manzana, los valores de los indicadores FSI, GSI y OSR aumentan en todos los casos. Este aumento es notable, sobretudo, en los tejidos homogéneos y con un valor alto de FSI, como el Eixample en Barcelona, Goya en Madrid o Prati en Roma. En estos casos se puede ver que existe una gran diferencia entre la densidad edificatoria bruta y la densidad edificatoria neta. En los casos con un valor de FSI bajo, la diferencia no es tan grande, el área de estudio se encuentra en este grupo.

Hasta aquí se han descrito las características de la forma urbana y de la población: densidad edificatoria, poblacional y distribución de las viviendas, a través del uso de mapas. Falta estudiar un tercer elemento: las condiciones climáticas, el sol. El estudio de la incidencia de la radiación solar sobre las calles permite evaluar el nivel de habitabilidad del espacio público, por lo tanto, podemos saber si se trata de una ciudad paseable o no.

#### 4.2.4 Análisis de la incidencia de la radiación solar directa en el espacio público: la calle

Se estudió el comportamiento del acceso solar a nivel de calle en dos escalas diferentes: la primera es la selección de dos calles tipo en base a la orientación de su trazado (N-S y E-W) y a la importancia que presentan para el peatón (mayor número de peatones). La segunda escala utilizada para este análisis es a nivel del área de estudio, analizando las irregularidades que presenta su morfología, como las intersecciones, las diferentes alturas, etc.

En la **Figura 4.23**, se presenta el área de estudio y las calles que se han elegido como las calles tipo, la calle Monterrey (ew.4) y la calle Mariano Matamoros (ns.4). En la **Figura 4.24** se muestra el aspecto real de la geometría de estas calles. La selección de calles y secciones específicas se ha hecho en base a diversos factores:

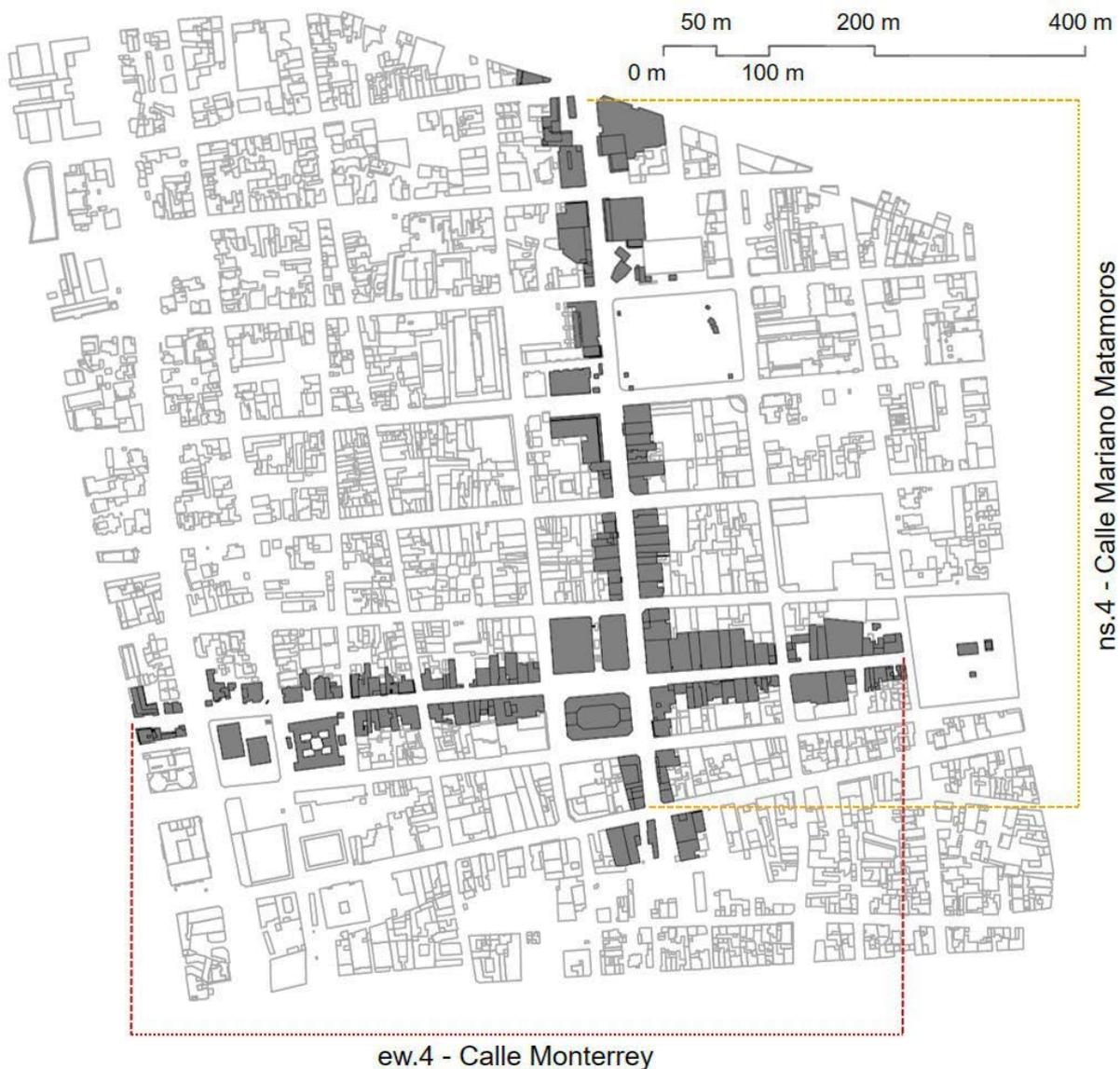


Figura 4.23. Área de estudio y calles seleccionadas para el análisis del acceso solar a nivel peatonal.

## UN NUEVO ENFOQUE EN LA PLANIFICACIÓN DE CIUDADES DE CLIMA CÁLIDO - SECO

- Desde el punto de vista de espacio urbano y público: cuentan con una importante presencia de peatones a lo largo del día, así como de vehículos privados y de transporte público. En su cruce se encuentra el Mercado Municipal junto a locales comerciales y un aparcamiento público. La calle Matamoros une la plaza principal del centro, el “Jardín Juárez”, con el Mercado Municipal; mientras que la calle Monterrey es un eje que une viviendas, la escuela primaria “Leona Vicario” y su plaza pública con la escuela preescolar del parque “El Mundito”.
- Desde el punto de vista morfológico: siguen el trazado más utilizado en la ciudad, Norte – Sur y Este – Oeste. Cruzan la zona más compacta del área de estudio, es decir, presentan el promedio de altura de edificación más alto y pocos espacios entre los edificios, ofreciendo la imagen más parecida a un cañón urbano. Sin embargo, estas calles presentan una relación de aspecto (h/w) promedio de aproximadamente 0,40, es decir, las calles tienen un ancho dos veces mayor a la altura de las edificaciones.



Figura 4.24. Imágenes de las diferentes secciones consideradas para definir las calles tipo. En rojo la calle Monterrey (ew.4) y en verde la calle Matamoros (ns.4). El punto ns.4 presenta una imagen del Jardín Juárez: en esta morfología urbana ya no se puede hablar de un cañón urbano.

Fuente: Elaboración propia en CAD, incluyendo imágenes de Google Maps.

### ***Efecto de la geometría del cañón urbano en el acceso solar en calles Este – Oeste***

En calles con orientación Este – Oeste existe una continua incidencia solar durante gran parte del año. Este es un efecto que se magnifica en latitudes cercanas a los trópicos, sobre todo durante los meses de la temporada de calor. Este comportamiento se puede ver en la **Figura 4.25** con los diagramas estereográficos.

La misma figura muestra el resultado de la simulación llevada a cabo durante el periodo de la temporada de calor (1 de mayo a 31 de octubre, 184 días). El modelo simulado es el de la situación urbana actual de la calle Monterrey (ew.4) y se ha considerado una precisión de mallado de 10 minutos.

Los resultados que se muestran son los valores de radiación solar directa (kWh/m<sup>2</sup> por día) y la cantidad de horas de sol directo para el día promedio de la temporada de calor. Éstos se encuentran en las dos columnas de la derecha de la **Figura 4.25**.

Como se puede observar en la columna correspondiente a la radiación solar directa, la configuración actual de la calle (orientación Este – Oeste y  $h/w= 0,37$ ) ocasiona que haya un elevado nivel de incidencia de la radiación solar directa durante esta temporada. La mayor parte de la calle presenta valores por encima de 5,20 kWh/m<sup>2</sup> por día.

Estos valores se reducen al acercarse al perímetro de las edificaciones ubicadas en el lado sur de la calle (fachadas orientadas al Norte), llegando a valores promedio que se mantienen en un rango de entre 2 – 3 kWh/m<sup>2</sup> por día.

A la derecha de ésta columna se encuentra la columna que corresponde a las horas de sol recibidas sobre la superficie de la calle Monterrey (ew.4) durante el día promedio. La mayor parte de la calle recibe entre 10 y 12 horas de sol directo (9:54 horas en promedio para el total de la superficie). La distribución en la superficie sigue el mismo comportamiento que la radiación solar directa.

El gráfico de la **Figura 4.26** muestra la evolución diaria de la radiación solar directa recibida sobre el suelo de la calle Monterrey (ew.4) a lo largo de la temporada de calor (kWh/m<sup>2</sup> por día). La línea discontinua representa la cantidad máxima diaria de radiación solar directa que un plano horizontal sin obstrucciones puede recibir en esta latitud (29N). La línea continua representa el promedio diario de radiación solar directa recibido por el suelo de la calle Monterrey (ew.4) considerando la obstrucción generada por las edificaciones.

UN NUEVO ENFOQUE EN LA PLANIFICACIÓN DE CIUDADES DE CLIMA CÁLIDO - SECO

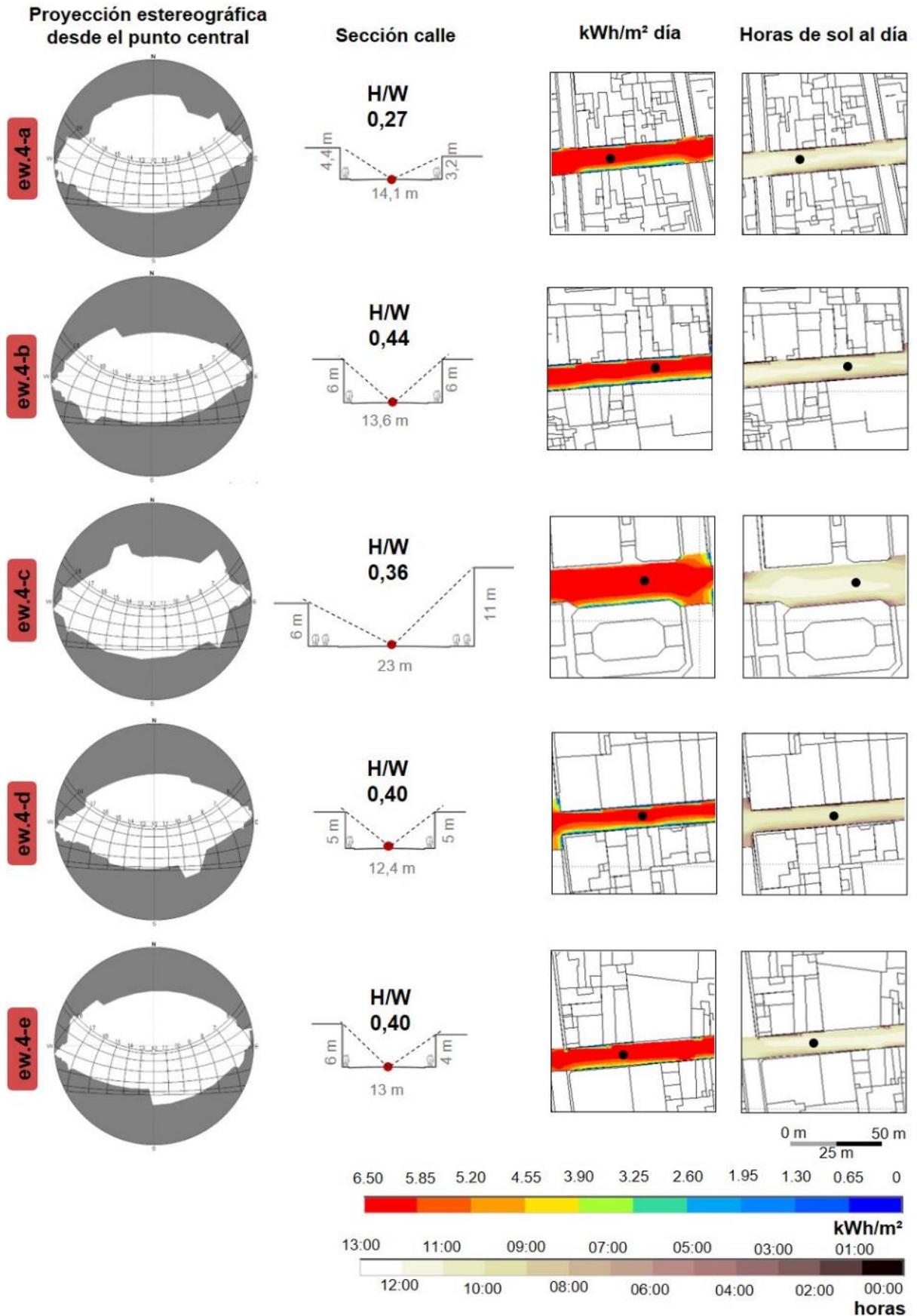


Figura 4.25. Radiación solar y horas de sol directo recibido el día promedio en la calle Monterrey (ew.4).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
 LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

El valor inicial de la curva, es decir, el valor del día 1 de mayo es de 6,07 kWh/m<sup>2</sup>, mientras que el valor más alto de radiación es de 6,69 kWh/m<sup>2</sup> (+10,2%) y se produce durante los días alrededor del 21 de junio. El valor más bajo es el del día 31 de octubre, 2,43 kWh/m<sup>2</sup> (-60%).

El porcentaje de reducción por las obstrucciones está representado con una línea punteada. Este valor se mantiene bajo y constante (entre el 9 y 12%) durante la mayor parte de la temporada y comienza a aumentar a partir del 1 de septiembre, pasando del 12% al 32% el 31 de octubre. Este comportamiento se debe a dos parámetros: la configuración urbana de la calle (una pequeña relación de aspecto y una orientación Este – Oeste, la cual coincide con el recorrido solar) y el ángulo solar, el cual se mantiene por encima de 69° de mayo a agosto para luego bajar hasta los 46° del 31 de octubre (01/05: 76°, 21/06: 84°, 01/07: 84°, 01/08: 79°, 01/09: 69°, 31/10: 46°).



Figura 4.26. Variación en la cantidad de radiación solar recibida (kWh/m<sup>2</sup> día) en la calle Monterrey (ew.4) durante la temporada de calor y su diferencia con respecto al valor máximo posible.

**Efecto de la geometría del cañón urbano en el acceso solar en calles Norte - Sur**

En calles con orientación Norte – Sur presentan un comportamiento distinto al de las calles Este – Oeste. En estas calles, la mayor cantidad de radiación se recibe al mediodía, este comportamiento es constante durante todo el año. La **Figura 4.27** presenta los diagramas estereográficos que muestran de manera gráfica este comportamiento.

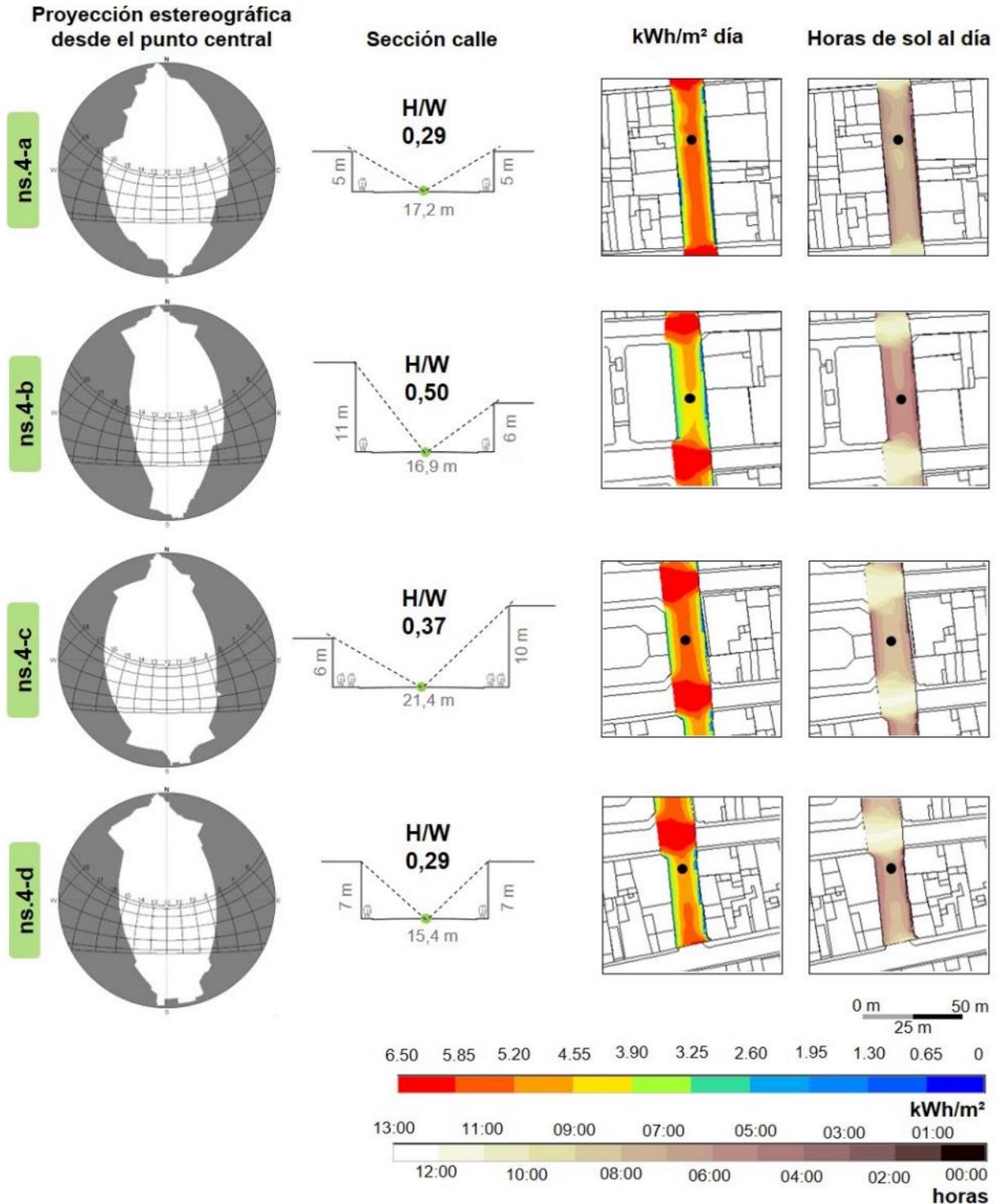


Figura 4.27. Radiación solar y horas de sol directo recibido el día promedio en la calle Matamoros (ns.4).

La **Figura 4.27** muestra los valores de radiación solar directa ( $\text{kWh/m}^2$  día) y la cantidad de horas de sol directo para el día promedio de la temporada de calor para la calle Matamoros. Estos resultados se muestran en las dos columnas de la derecha.

Al observar la distribución de la radiación solar en el suelo, se pueden ver que las zonas con mayores niveles de radiación son los cruces con las calles Este – Oeste y en zonas donde no hay edificaciones, por ejemplo, la plaza Jardín Juárez. La calle tiene una relación de aspecto promedio de  $h/w = 0,40$ , por lo que permite una alta incidencia de radiación solar directa.

La mayor parte de la superficie de la calle recibe una cantidad de radiación entre  $4,55 - 6,50 \text{ kWh/m}^2$  por día. A pesar de esto, hay zonas que reciben una menor cantidad de radiación, por ejemplo, cuando la calle presenta una relación de aspecto de  $h/w = 0,50$  los valores de radiación se mantienen en un rango de entre  $3,80 - 5,20 \text{ kWh/m}^2$  por día.

La columna de la derecha en la **Figura 4.27** contiene la distribución de las horas de sol directo sobre la superficie de la calle. La orientación de la calle se traduce en una menor cantidad de horas de sol directo (respecto a una calle Este – Oeste). La mayor parte la calle recibe entre 7 y 9 horas, los cruces con las calles Este - Oeste reciben entre 10 – 12 horas. La calle promedia 7:51 horas de sol directo en un día promedio de la temporada de calor).

El gráfico de la **Figura 4.28** es el equivalente al gráfico de la **Figura 4.26** de la calle Monterrey (ew.4). En él se puede observar como la calle Matamoros (ns.4) presenta una curva con un comportamiento similar.

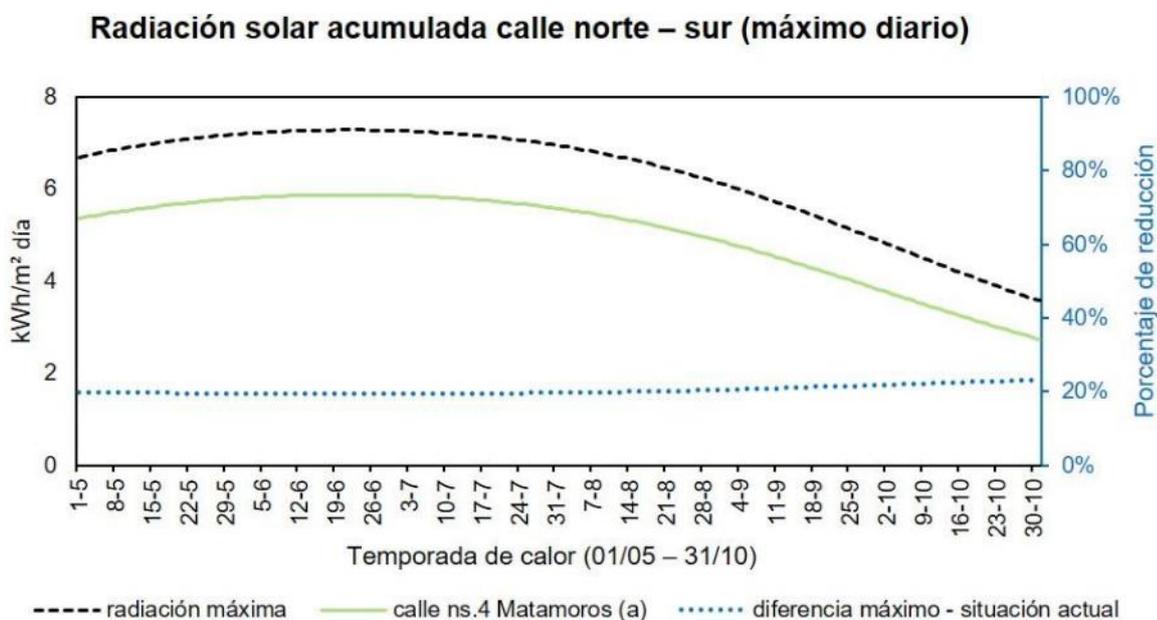


Figura 4.28. Variación en la cantidad de radiación solar recibida ( $\text{kWh/m}^2$  día) en la calle Matamoros (ns.4) durante la temporada de calor y su diferencia con respecto al valor máximo posible.

El valor para el día 1 de mayo es 5,37 kWh/m<sup>2</sup>, aumentando hasta 5,88 kWh/m<sup>2</sup> (+9,5%) durante los días que rodean el 21 de junio, a partir de este momento se comienza a descender hasta el valor para el día 31 de octubre, 2,74 kWh/m<sup>2</sup> (-49%).

Los porcentajes de reducción (línea punteada) se mantienen constantes a lo largo de la temporada de calor, en promedio, las obstrucciones representan una reducción del 20% con respecto al máximo posible de radiación solar directa. Estos valores varían entre el 20% y el 23%. Este comportamiento se debe principalmente a la orientación Norte – Sur de la calle, en este caso, la relación de aspecto (h/w) y el ángulo solar tienen poco peso en la variabilidad del porcentaje de reducción.

### ***Discusión de los resultados: comparativa de los niveles de radiación solar directa y horas de sol entre ambas calles***

Los valores que se han obtenido a partir de las simulaciones en Heliodon2 sitúan en 5,55 kWh/m<sup>2</sup> por día promedio la cantidad de radiación en la calle Monterrey (ew.4). En el caso de la calle Matamoros (ns.4), el valor correspondiente es 5,01 kWh/m<sup>2</sup> por día promedio.

En la **Figura 4.29** se muestra la diferencia entre la cantidad de radiación recibida por ambas calles. Al mismo tiempo, se encuentra representado el valor máximo que un plano horizontal sin obstrucciones puede recibir en la latitud 29N (6,3 kWh/m<sup>2</sup> por día), esto permite observar la reducción que se produce en la cantidad de radiación recibida, la cual es producida por las edificaciones de la calle.

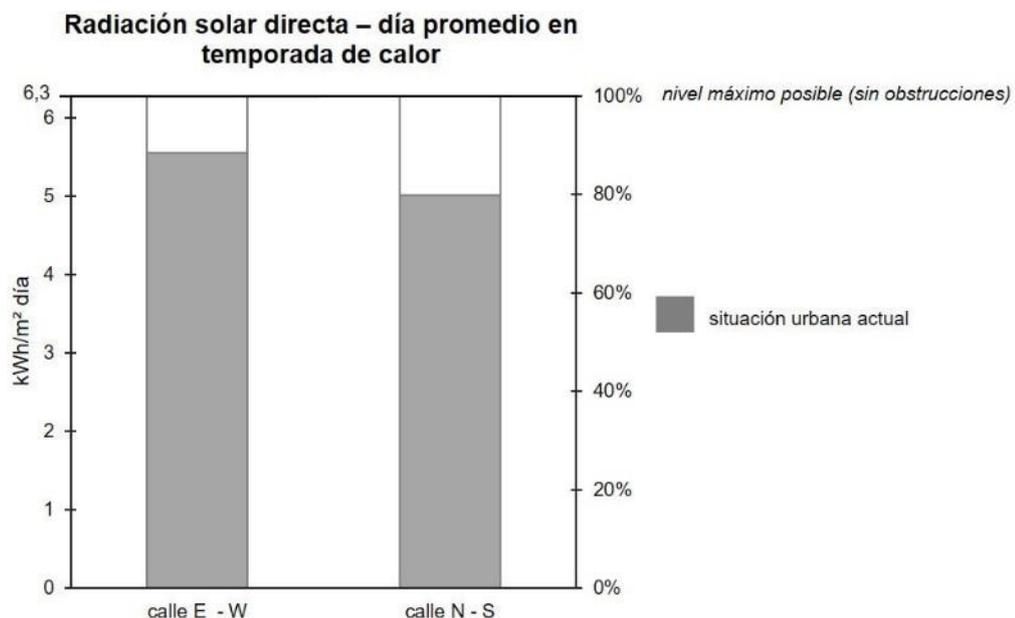


Figura 4.29. Radiación recibida el día promedio en las calles Monterrey (ew.4) y Matamoros (ns.4).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
 LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

La calle Monterrey, con orientación Este - Oeste, recibe el 88% de la máxima cantidad posible, esto significa una reducción de 0,70 kWh/m<sup>2</sup> (6,3 – 5,55 kWh/m<sup>2</sup> por día). La calle Matamoros, de orientación N-S, recibe el 80% del máximo posible, esto quiere decir la presencia de edificaciones significa una reducción de 1,3 kWh/m<sup>2</sup> (6,3 – 5,01 kWh/m<sup>2</sup> por día). La diferencia en la cantidad de radiación solar directa que reciben las calles Monterrey (Este – Oeste) y Matamoros (Norte – Sur) es en promedio 10%. Ambas calles presentan una relación de aspecto similar: h/w= 0,37 (Este – Oeste) y h/w= 0,40 (Norte – Sur), por lo que la diferencia en el nivel de radiación recibida se debe, principalmente, a la orientación que sigue el trazado de las calles.

En el gráfico de la **Figura 4.30** se compara la evolución diaria de la radiación recibida por ambas calles. En él, se aprecia como el porcentaje de diferencia se mantiene alrededor del 10% promedio (10 – 13%) a lo largo de la temporada de calor. Sin embargo, a partir del día 5 de octubre, la calle Monterrey comienza a recibir una menor cantidad de radiación directa con respecto a la calle Matamoros. Esto se debe, en parte, a una menor altura solar que permite que las edificaciones de la calle Este - Oeste proyecten una sombra mayor a las sombras proyectadas por los edificios de la calle Norte - Sur.

En cuanto a la cantidad de horas de sol directo que se recibe en ambas calles, el valor máximo que un plano horizontal sin obstrucciones puede recibir es de 12.9 horas (12:54).

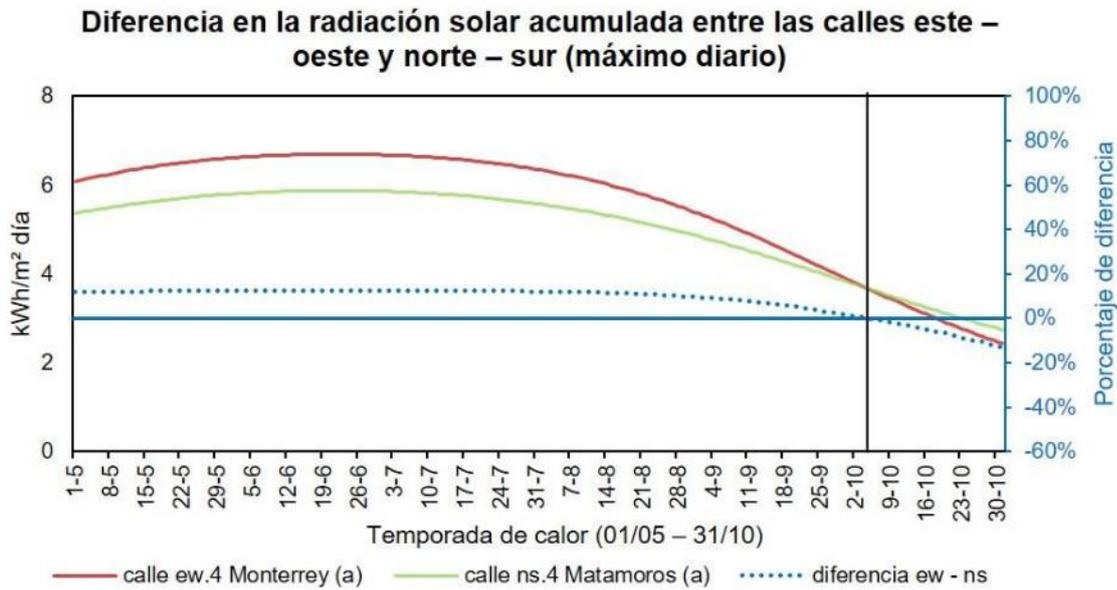


Figura 4.30. Diferencia en la variación de la cantidad de radiación recibida en las calles Monterrey (ew.4) y Matamoros (ns.4).

En la **Figura 4.31** se muestran los valores promedio de ambas calles. La calle Monterrey (ew.4) recibe en el día promedio 9,9 horas (9:54), es decir, existe una reducción de 3 horas (recibe el 77% del valor máximo). La calle Matamoros (ns.4) presenta un promedio de horas de sol de 7,85 horas (7:51), esto equivale a una reducción es 5,05 horas (5:03), por lo que recibe el 61% del valor de un plano sin obstrucciones.

La calle Matamoros (ns.4) recibe alrededor de un 21% menos de horas de sol directo que la calle Monterrey (ew.4). De manera que, el trazado de las calles juega un papel decisivo en la cantidad de horas de sol directo que recibe cada una de las calles.

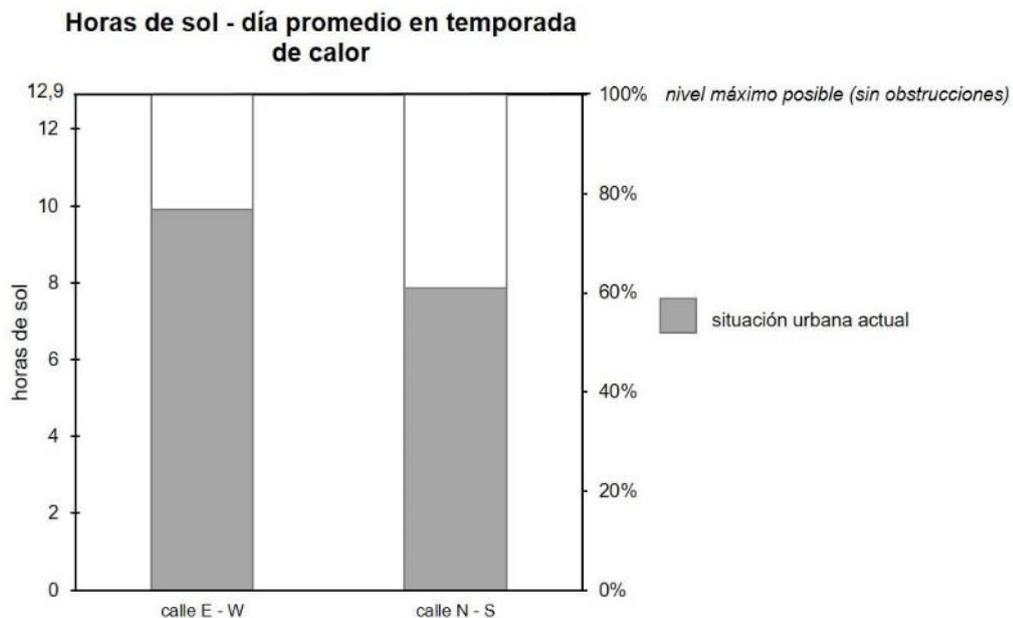


Figura 4.31. Cantidad de horas de sol en el día promedio en las calles Monterrey (ew.4) y Matamoros (ns.4).

### ***Efecto de la morfología urbana en el acceso solar en la red de calles dentro del área de estudio***

Como se ha mencionado, el área de estudio está formada por una red de calles que siguen un trazado reticular, sin embargo, presenta algunas irregularidades como diferentes secciones de calle y tamaños de manzana, las cuales, en algunos casos tienen formas irregulares.

Las calles siguen, en su mayoría, un trazado Este – Oeste y Norte – Sur. El ancho éstas calles es muy variable, las calles E-W se mantienen entre 8,4 y 21,4 m de ancho, mientras que las calles N-S lo hacen entre 4,4 y 21,4 m. A pesar de esto, la mayoría de las calles mantienen una altura promedio de las edificaciones entre una o dos plantas.

En la **Figura 4.32** se observa como las calles E-W presentan una distribución de la radiación sobre la calle más uniforme, a la vez que alcanzan niveles promedio de radiación más altos que las calles N-S. Esta diferencia se mantiene en la mayoría de las calles N-S, con excepción de la calle Pino Suárez (ns.1), la cual tiene el mayor ancho de calle dentro de área de estudio, presentando, al mismo tiempo, pocas edificaciones de más de una planta.

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

La simulación del área de estudio nos permite ver que, en las calles N-S, los cruces con las calles E-W son las zonas que presentan los niveles más altos de radiación (sin considerar las secciones de las calles que no presentan obstrucciones).

Al comparar la **Figura 4.32** con los mapas de densidad edificatoria y de alturas promedio, son las zonas que presentan valores más altos en estos parámetros las que reciben una menor cantidad de radiación solar directa a nivel de calle, sobretodo en calles N-S.

La configuración urbana del área de estudio ocasiona que cada metro cuadrado de su red de calles reciba en promedio 5,23 kWh/m<sup>2</sup> durante el día promedio de la temporada de calor. Es decir, la red recibe en promedio el 83% del valor máximo posible que un plano horizontal sin obstrucciones puede recibir (6,3 kWh/m<sup>2</sup>).

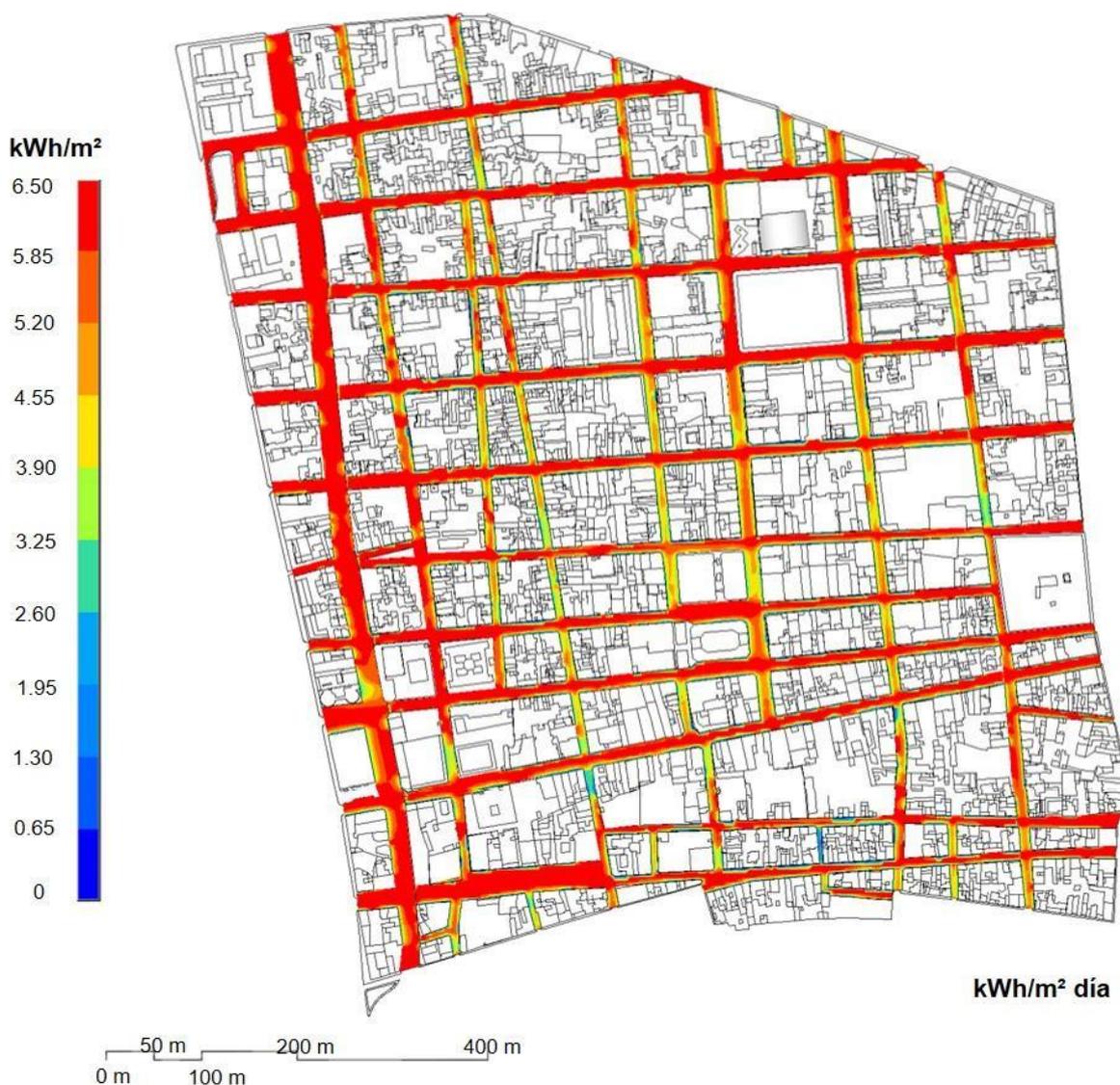


Figura 4.32. Distribución de la radiación solar directa en la red de calles del área de estudio. Día promedio de la temporada de calor.

## UN NUEVO ENFOQUE EN LA PLANIFICACIÓN DE CIUDADES DE CLIMA CÁLIDO - SECO

La **Figura 4.33** presenta la distribución de horas de sol directo durante el día promedio, parámetro complementario a la cantidad de radiación directa recibida que aporta información sobre la habitabilidad del espacio exterior. Al igual que se ha visto en los resultados individuales de cada calle, las que siguen una orientación Norte – Sur presentan una cantidad menor de horas con respecto a las calles Este – Oeste, con excepción de la calle Pino Suárez (ns.1). Al igual que en la imagen que muestra la distribución de la radiación, son los cruces de las calles las zonas que reciben la mayor cantidad de horas de sol directo.

En esta imagen se ve, de manera más clara, como la zona con mayor densidad edificatoria y altura promedio se encuentra más oscura, es decir, con menos horas de sol directo. Las calles E-W se mantienen en promedio entre 10 y 12 horas, mientras que las calles N-S se encuentran entre 7 y 9 horas. Esto significa que las calles N-S son habitables en promedio 3 horas más que las E-W.



Figura 4.33. Distribución de las horas de sol directo en la red de calles del área de estudio. Día promedio de la temporada de calor.

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

A modo de resumen, la **Figura 4.34** se muestra la evolución en la cantidad diaria de radiación promedio que recibe por  $1 \text{ m}^2$  la red de calles entre mayo y octubre (184 días), en una situación sin obstrucciones y en su situación actual. En este gráfico se observa como el porcentaje de reducción de radiación debido a las edificaciones, representado por la diferencia entre el valor máximo posible y el recibido, varía entre 16 – 33 %. La reducción promedio durante la temporada es de 20%.

Estos valores límites se dan los días 21 de junio y 31 de octubre, cuando el ángulo de inclinación solar se encuentra en el momento más alto y el más bajo de la temporada, respectivamente, ocasionando sombras cortas en el verano y más largas al acercarse al invierno.

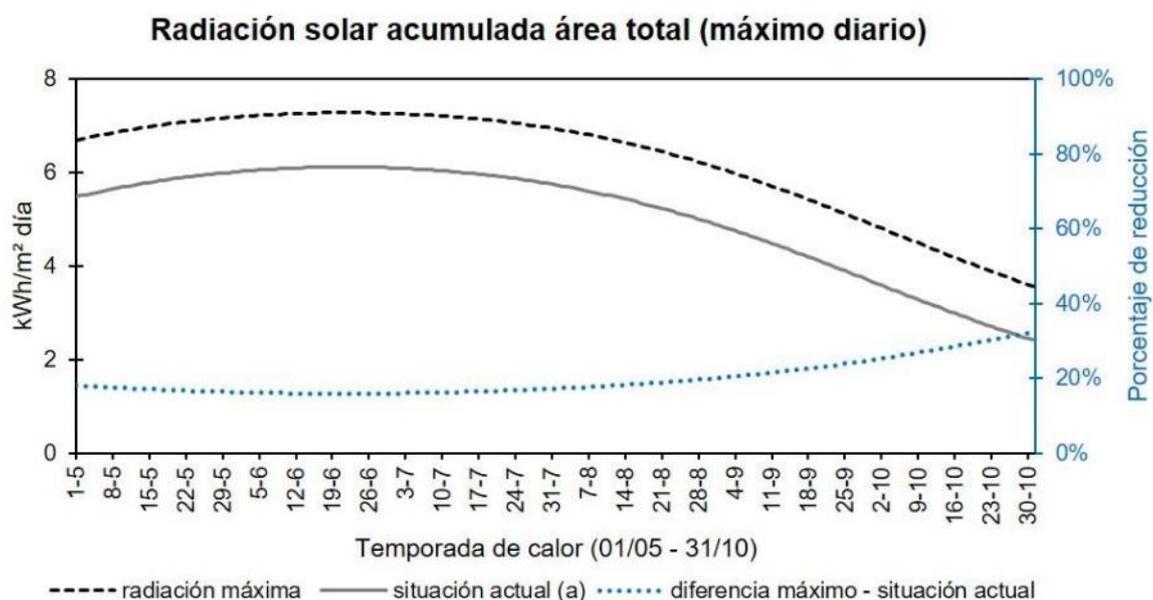


Figura 4.34. Variación en la cantidad de radiación solar recibida ( $\text{kWh/m}^2$  día) en la red de calles, durante la temporada de calor y su diferencia con respecto al valor máximo posible.

### 4.3 NUEVO ENFOQUE / CRITERIOS PARA LA REORDENACIÓN DEL CENTRO URBANO DE HERMOSILLO

El centro de urbano de Hermosillo presenta una serie de características que lo convierten en un área con una baja densidad de población y edificatoria. Se ha comprobado mediante simulaciones energéticas que su configuración urbana actual no permite la creación de sombra suficiente en el espacio público, por el contrario, permite que haya elevados niveles en la radiación solar directa en la calle durante la mayor parte del día, en la temporada de calor.

Para dar una respuesta a esta situación y considerando el análisis en esta tesis, se propone reordenar el área de estudio mediante un proceso de densificación edificatoria en vertical, esto es, un apilamiento urbano. A través de este planteamiento se podría ofrecer nuevas edificaciones destinadas a vivienda para una población urbana que continúa alejándose del centro hacia la periferia de la mancha urbana, extendiendo la ciudad sobre el territorio.

Al mismo tiempo, es una posible solución al problema planteado por la configuración urbana actual del área de estudio. Aumentar la altura de los edificios podría reducir, significativamente, el acceso solar en la calle, y mejorar la calidad de vida en el espacio público. La estrategia resulta adecuada para una ciudad como Hermosillo, que ha sufrido sequías hidrológicas prolongadas y problemas de abastecimiento de agua (Navarro-Navarro & Moreno Vázquez, 2016), lo que provoca que la protección solar a través de vegetación resulte difícil de alcanzar.

#### 4.3.1 Normativa vigente

En la normativa vigente existen pocas referencias tanto a la densificación urbana como a límites de altura máxima para la edificación en Hermosillo. Sin embargo, estas referencias existentes son importantes y entran dentro del marco de esta tesis. Estas regulaciones son a nivel de parcela, se deben de considerar como uno de los lineamientos principales a seguir.

La primera referencia se encuentra dentro del *Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Hermosillo* (H. Ayuntamiento de Hermosillo, 2014). En este documento, se establecen los valores máximos permitidos dentro del centro urbano para dos indicadores de densidad edificatoria: el Coeficiente de Uso de Suelo o edificabilidad (CUS, ahora en adelante referido como FSI) y el Coeficiente de Ocupación del Suelo u ocupación (COS, ahora en adelante referido como GSI). El valor máximo de FSI es de 2,70 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> y el valor máximo de GSI es de 0,90 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. El mismo documento, señala que la altura máxima en niveles, en el área de estudio, queda condicionada al *Programa de Mejoramiento y Conservación del Centro Urbano de Hermosillo*, a cargo del IMPLAN (Instituto Municipal de Planeación).

El *Reglamento de Construcción y Normas Técnicas Complementarias para el Municipio de Hermosillo* es el otro documento que hace referencia a la altura máxima permitida de un edificio. En el capítulo E (Integración al contexto e imagen urbana), artículo 39 se menciona: "Ningún edificio podrá tener una altura mayor a 1,5 veces el ancho de la vialidad (caso A), en caso de ubicarse en una esquina, se tomará en cuenta la vialidad de mayor anchura. Para las parcelas que tengan frente a plazas o jardines, el alineamiento opuesto para los fines de este artículo se localizará a 5 m de distancia hacia dentro del alineamiento de la acera opuesta" (caso B) (H. Ayuntamiento de Hermosillo, 2012b), ver **Figura 4.35**.

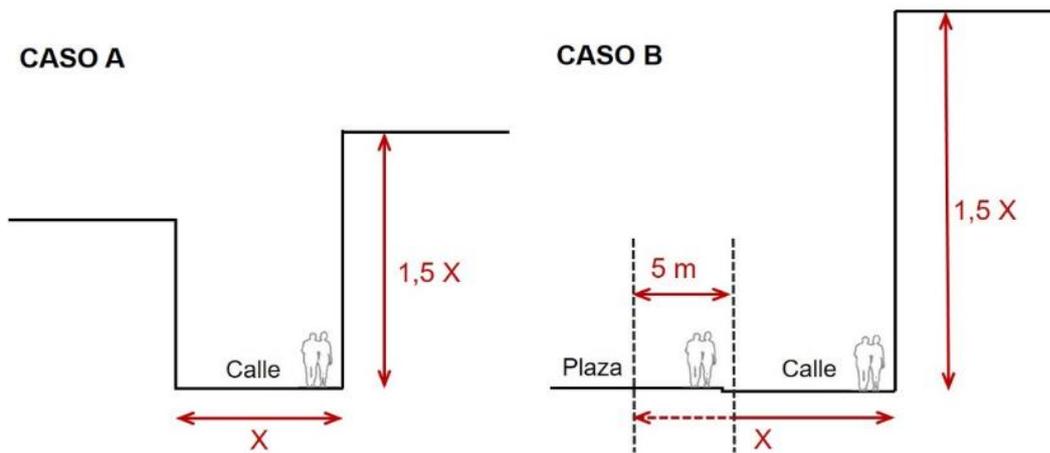


Figura 4.35. Representación gráfica del artículo 38 del Reglamento de Construcción de Hermosillo.

### 4.3.2 Condiciones de asoleo recomendables para el espacio público

Actualmente, en el área de estudio, la calle “tipo” Este – Oeste (Monterrey ew.4) tiene un ancho de 15,2 m, el ancho de la calle “tipo” Norte – Sur (Matamoros ns.4) es de 17,7 m. Como se muestra en el **Mapa 4.6** (p.124), la mayoría de las edificaciones son de una planta, con alturas de entre 3 y 7 m, con algunas excepciones. Es decir, las calles “tipo” tienen una relación de aspecto promedio de  $h/w= 0,40$ , (calle Matamoros), y  $h/w= 0,37$  (calle Monterrey). Una relación de aspecto tan pequeña se asocia con altos factores de vista de cielo (SVF) como muestra la **Figura 4.36**, los cuales influyen de manera directa en los intercambios radiativos con el cielo.

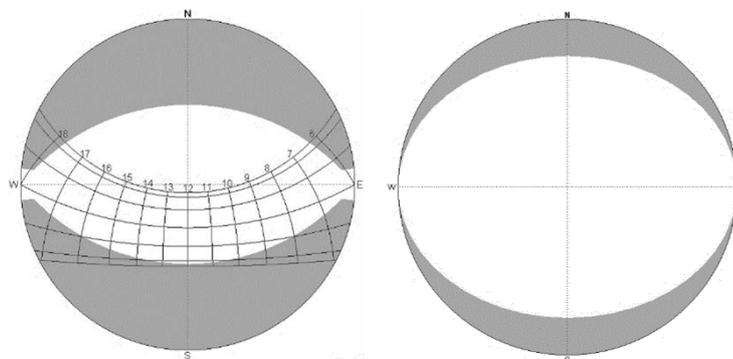


Figura 4.36. A la izquierda: proyección estereográfica desde un punto al centro de un cañón urbano semi-infinito con una relación de aspecto  $h/w= 0,4$ . A la derecha: proyección ortográfica del mismo punto, con un  $SVF= 78,2\%$ .

Las calles Este – Oeste, reciben la mayor cantidad de radiación solar directa durante todo el año. Por lo tanto, si se busca reducir la cantidad de radiación solar directa en las calles, se debe de considerar a éstas como la situación más desfavorable. A su vez, el día 21 de junio es el momento más crítico, cuando la radiación directa incide de manera más rasante.

La configuración urbana actual del área de estudio provoca que en las calles Este - Oeste haya poca sombra para el peatón. Actualmente, en el momento más crítico (12:00 del 21 de junio), existe un “corredor de sombra” de 0,45 m en el caso menos favorable (altura edificio de 4,4 m), un espacio que resulta escaso para el tránsito de más de una persona. No obstante,

## UN NUEVO ENFOQUE EN LA PLANIFICACIÓN DE CIUDADES DE CLIMA CÁLIDO - SECO

el caso “más favorable” no produce un incremento significativo: 0,65 m (altura edificio de 6 m). En la **Figura 4.37** se encuentra representada la sección promedio de la calle tipo Este - Oeste.

Esta tesis propone que, en ciudades en este tipo de clima, se ha de crear un “corredor de sombra” que tenga como mínimo un ancho de entre 1 - 2 m a nivel de piso en la situación más crítica (calle Este - Oeste, 21 de junio) (**Figura 4.38**). Esto podría generar espacio suficientemente para que dos personas caminen simultáneamente, protegidos de la radiación solar durante el momento de mayor incidencia.

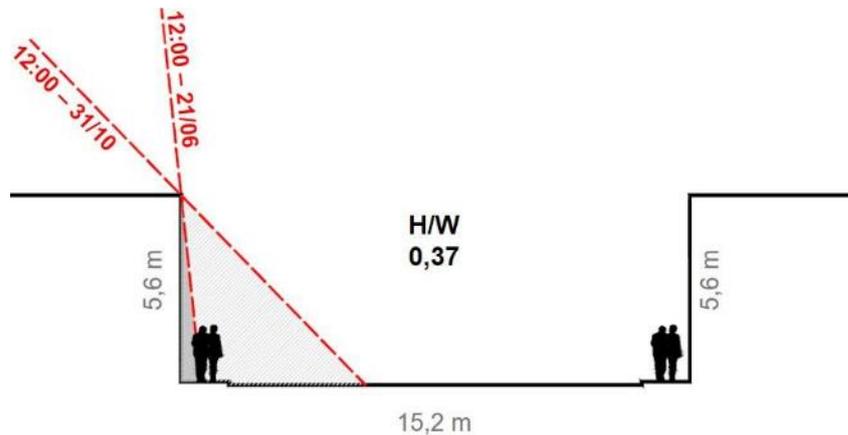


Figura 4.37. Esquema de la sección promedio de la calle Este - Oeste. En rojo se encuentra el ángulo solar para el mediodía del 21 de junio y 31 de octubre. Se genera un corredor de sombra de 0,60 m.

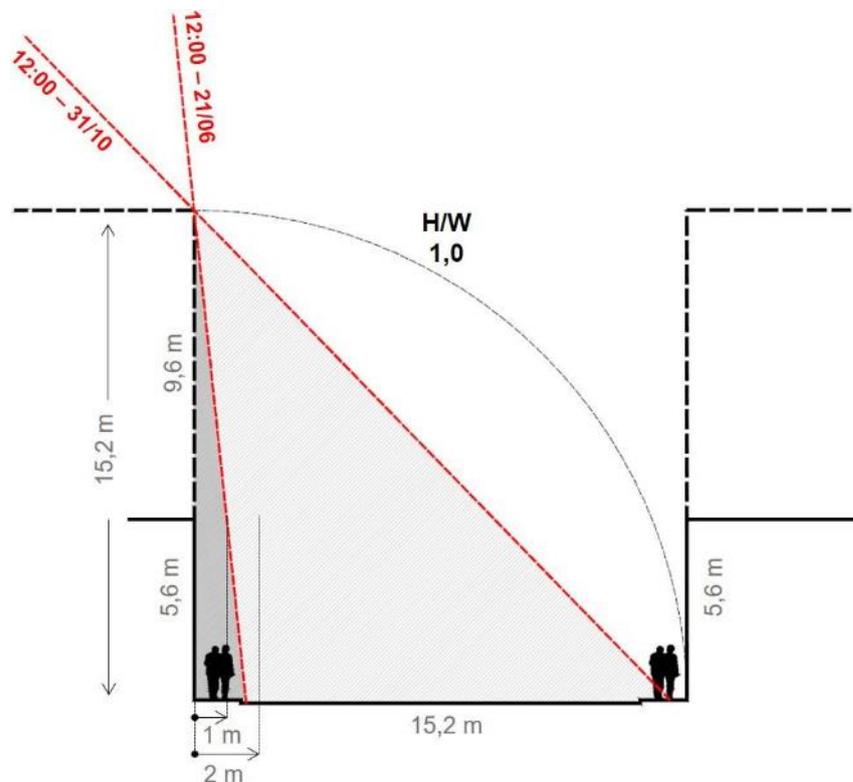


Figura 4.38. Esquema de la sección propuesta una calle Este - Oeste. En rojo se encuentra el ángulo solar para el mediodía del 21 de junio y 31 de octubre. Se genera un corredor de sombra de 1,60 m.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

Una relación de aspecto con un valor que ronde  $h/w=1$  permite la creación de un «corredor de sombra mínimo» en el momento más crítico. Por otro lado, se logra proveer de sombra a la mayoría (96%) de la superficie horizontal de la calle al llegar el día 31 de octubre. Es decir, la dimensión de la sombra proyectada, por la propia forma de la ciudad, variaría dentro de un rango de 1,60 – 14,70 m durante el mediodía a lo largo de la temporada de calor. Al mismo tiempo, se estaría reduciendo el intercambio radiativo con el cielo al reducir los altos valores de factor de vista de cielo en la superficie de la calle (**Figura 4.39**).

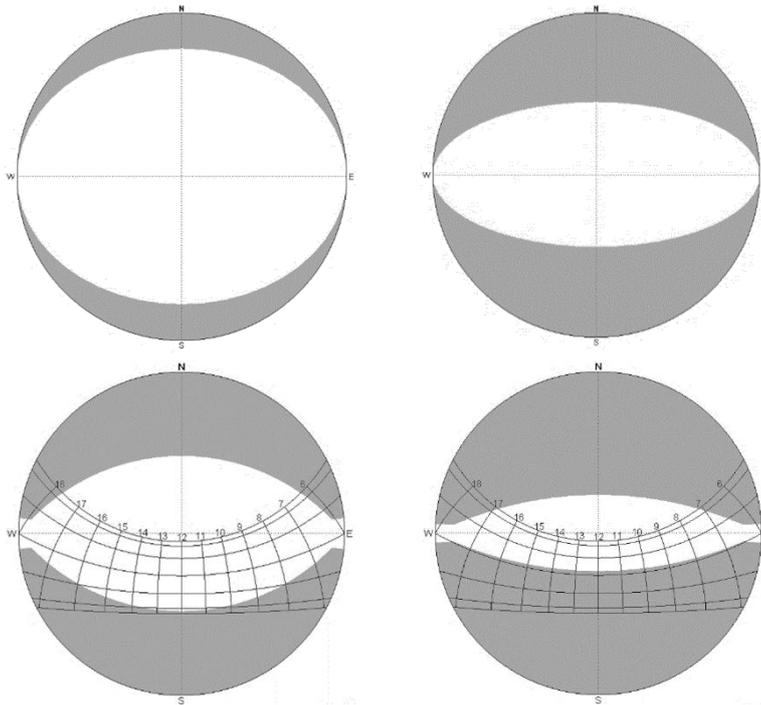


Figura 4.39. Comparativa de las proyecciones estereográficas y ortográficas de un cañón urbano semi-infinito con una relación de aspecto  $h/w=0,4$  y otro con  $h/w=1$ . El punto ubicado al centro del cañón urbano de la izquierda tiene un SVF de 78,2%, mientras que el de la derecha tiene un SVF de 45%, una reducción mayor al 30%.

### 4.3.3 Modelado de un prototipo de reordenación del centro urbano de Hermosillo

Para llevar a cabo este enfoque, se ha optado por un modelo de ordenación de alineación vial. Este tipo de modelo permite observar de manera rápida la superficie ocupada por la edificación y la superficie libre.

La finalidad de este modelo es la representación gráfica de los distintos indicadores y facilitar la comprensión de estos, al presentar una situación urbana acorde a estos nuevos valores.

En cuanto a las dimensiones y configuración de los *nuevos bloques*, las plantas bajas son de uso comercial y tienen una altura de 5 m, las plantas superiores son de uso residencial y tienen una altura de 3 m, espacio suficiente para las instalaciones de iluminación y aire acondicionado, entre otras. Estas medidas limitan la altura (h) de los edificios a módulos, por ejemplo, un edificio con planta baja y una planta superior es  $PB5+P3= 8$  m, este es el valor mínimo, ya que la parcela mixta es necesaria. Esto significa que los *nuevos bloques* aumentan su altura (h) en 3m por planta añadida, teniendo como punto de partida 8 m.

Para definir la altura de cada *nuevo bloque* se han considerado los siguientes aspectos:

- El ancho (w) de la calle E-W con la cual limita la manzana "A". Se toma como referencia ya que la sombra proyectada por el bloque es en esta dirección durante gran parte del año. Si una calle tiene un ancho (w) de 14 m, el bloque tendrá una altura (h) de 14 m, es decir  $PB5+3P3$ , será un bloque de cuatro niveles.
- Cuando el valor del ancho (w) de la calle E-W se encuentra entre el de dos módulos, por ejemplo, entre 14 y 17m, se utiliza la combinación de módulos con el valor más próximo a la medida de la calle. Por ejemplo: si una calle E-W mide 16,5 m, el bloque tendrá 17 m de altura (h) (5 niveles), mientras que, si la calle tiene un ancho (w) de 15,1 m, el edificio tendrá 14 m de altura (h) (4 niveles).
- Cuando una manzana "A" se encuentra entre dos calles N-S angostas (y una de ellas tiene un ancho  $w < 10$  m), se utiliza una combinación de módulos anterior a la de los bloques en las manzanas "B" y "C" con las que, en conjunto, forma las calles N-S. Por ejemplo, si las manzanas vecinas B y C tienen bloques 14 m de altura (h) ( $PB5+3P3$ ), la altura (h) del bloque en la manzana "A" será de 11 m ( $PB5+2P3$ ). Esto se hace con el fin de evitar que las calles N-S tengan una relación de aspecto que se exceda notablemente de la buscada  $h/w = 1$ .
- Cuando la calle E-W separa a una manzana "A" de una plaza se sigue la normativa vigente (artículo 39, caso B). La altura (h) del bloque en la manzana "A" tiene un valor máximo de 1,5 veces el ancho (w) de la calle E-W + 5 m por tratarse de una plaza. Por ejemplo, una calle E-W tiene un ancho (w) de 10 m y separa a una manzana "A" de una plaza, la altura (h) máxima del bloque es  $((10+5) \times 1,5) = 22,5$  m, por lo que se ha de utilizar un número de módulos que no supere este valor, en este caso sería:  $PB5+5P3= 20$  m de altura (h).

### 4.3.4 Evaluación del comportamiento de la radiación solar en el nuevo espacio público

Para evaluar la efectividad del modelo de apilamiento urbano propuesto, se ha repetido el proceso de evaluación que se hizo en el análisis del comportamiento de la radiación con la situación urbana actual. Este proceso de evaluación se ha hecho a dos escalas distintas: la primera a escala de calle, comparando la geometría propuesta de las calles tipo E-W y N-S con su geometría actual (**Figura 4.40**). La segunda a escala del área de estudio, comparando la morfología urbana propuesta con la situación actual.

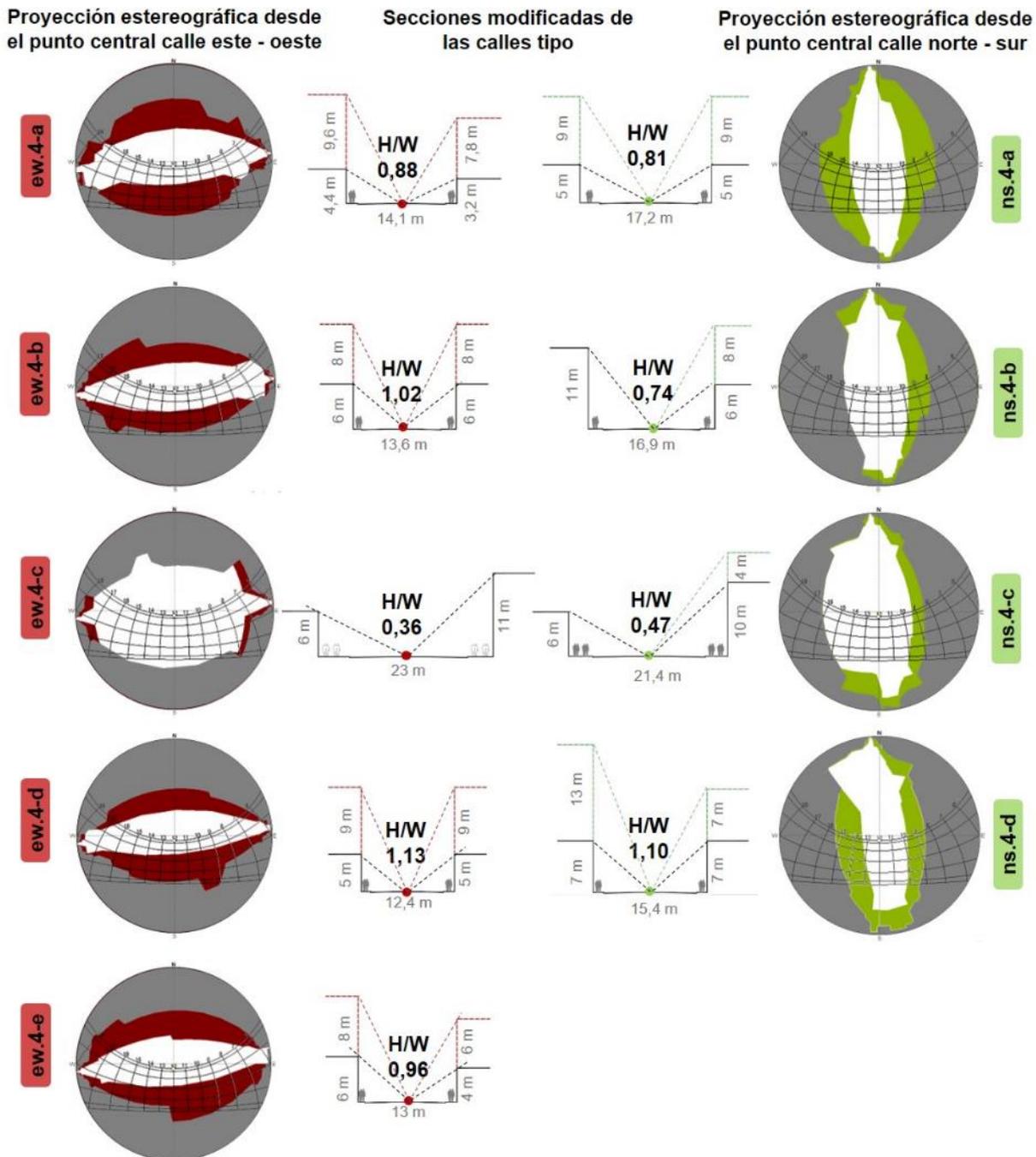


Figura 4.40. Diagramas estereográficos y secciones de las calles Monterrey (ew.4) y Matamoros (ns.4).

**Efecto de la nueva geometría del cañón urbano en el acceso solar en calles Este – Oeste**

Como se ha mencionado, las calles con una orientación Este – Oeste presentan una continua incidencia solar a lo largo del día. La situación urbana actual de la calle Monterrey (ew.4) permite niveles elevados de radiación solar sobre una gran parte de su superficie.

Siguiendo la normativa urbana vigente y los requisitos energéticos que se han propuesto en esta tesis, se ha modificado la situación urbana actual de la calle para lograr pasar de una relación de aspecto (h/w) promedio de 0,37 a un valor alrededor de 1. Estas modificaciones impactan de manera directa en la incidencia solar, reduciéndola. Este efecto ya se puede ver en los diagramas estereográficos en la **Figura 4.40**.

Las **Figura 4.41** y **Figura 4.42** muestran los resultados de la simulación de la propuesta de cambio de relación de aspecto (h/w). La simulación se ha hecho durante el periodo de la temporada de calor (1 de mayo a 31 de octubre, 184 días). El cálculo del modelo simulado de la calle Monterrey.ew4 es considerando una precisión de malla de 10 minutos.

En la **Figura 4.41** se compara la propuesta (imagen inferior) con la situación actual (imagen superior). La distribución de la radiación solar sobre el suelo de la propuesta tiene un nivel de uniformidad menor, en la que ya no domina el color rojo y se puede ver el efecto de la sombra de los edificios ubicados en la parte sur de la calle. La propuesta tiene una relación de aspecto promedio de  $h/w = 0,87$  (situación actual,  $h/w = 0,37$ ).



Figura 4.41. Resultados de la simulación de radiación solar que recibe la calle Monterrey (ew.4) durante la temporada de calor.

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

El valor de la relación de aspecto que presenta la propuesta se debe en parte a que en la calle existen edificios que no pueden ser modificados, por ejemplo, el mercado municipal o uno de los centros de educación primaria.

A pesar de que existen zonas en las que los niveles de radiación no presentan una modificación aparente, se ha logrado ampliar el rango de los valores de radiación: la mayor parte de la superficie presenta valores menores a los anteriores, se ha pasado de un rango de 5,20 – 6,50 kWh/m<sup>2</sup> por día a uno de 3,90 – 6,50 kWh/m<sup>2</sup> por día. Al mismo tiempo, se ha logrado extender la sombra cercana a los edificios (con valores promedio inferiores a 3 kWh/m<sup>2</sup> por día) y se amplió el rango anterior de 2 - 3 kWh/m<sup>2</sup> por día a 1,6 - 3 kWh/m<sup>2</sup> por día.

En **Figura 4.42** se muestra la cantidad de horas de sol directo que recibe la calle. La imagen inferior es la de la propuesta, mientras que la imagen superior es de la situación actual. Al comparar ambas, se observa la reducción en la cantidad de horas de sol directo que recibe la calle Monterrey (ew.4) gracias al aumento en la altura de los edificios. La mayor parte de la superficie de la calle recibe entre 8 y 10 horas de sol directo (8:20 horas en promedio para el total de la superficie).



Figura 4.42. Resultados de la simulación de la cantidad de horas de sol directo que recibe la calle Monterrey (ew.4) durante la temporada de calor.

El gráfico de la **Figura 4.43** compara la evolución diaria de la radiación solar recibida (kWh/m<sup>2</sup> día) en la situación actual (a) de la calle Monterrey (ew.4) y con los cambios de la propuesta (p). A su vez, muestra el porcentaje de reducción que representa la implementación de la propuesta.

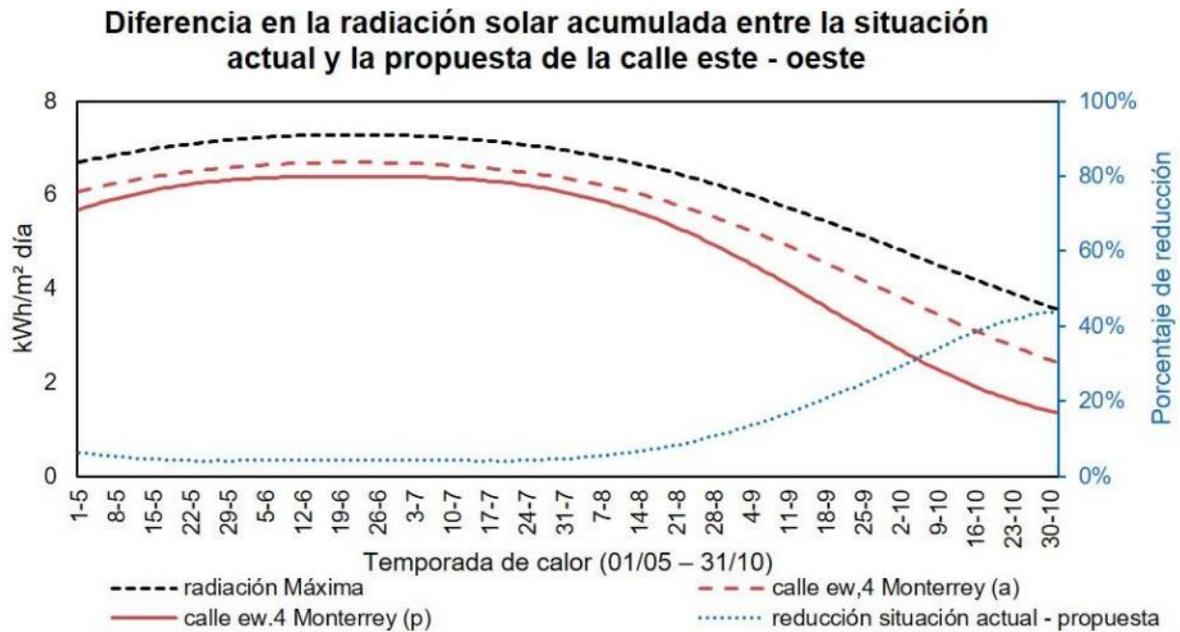


Figura 4.43. Comparativa entre la propuesta (p) de la calle Monterrey ew.4 y su situación actual.

El valor inicial de la curva para la propuesta (p), es decir, el día 1 de mayo es de 5,69 kWh/m<sup>2</sup> día (-6,3% menos que en la situación actual (a)), mientras que el valor más alto de radiación es de 6,40 kWh/m<sup>2</sup> (-4,3% que (a)) y se produce durante los días alrededor del 21 de junio. El valor más bajo es el del día 31 de octubre, 1,36 kWh/m<sup>2</sup> (-44% con (a)).

### ***Efecto de la nueva geometría del cañón urbano en el acceso solar en calles Norte – Sur***

Las calles con una orientación Norte – Sur, en esta latitud (29N), promedian, niveles de radiación inferiores a los de una calle Este – Oeste con la misma relación de aspecto. No obstante, una calle Norte - Sur con una relación de aspecto pequeña ( $h/w= 0,40$ ) alcanza elevados niveles de radiación solar en su superficie.

Lo que se pretende con la geometría propuesta, es disminuir la incidencia solar que existe entre media mañana y media tarde. El efecto de la geometría ya se puede observar en los diagramas estereográficos (ver **Figura 4.40**, p.146).

La imagen de la derecha en la **Figura 4.44** muestra una reducción significativa en los niveles de radiación recibida al compararla con la situación actual en la imagen de la izquierda. Con la propuesta se reduce la radiación en todas las zonas de la calle, incluso en los cruces de calle. Los cruces de calle son las zonas con los valores más altos de radiación solar.

Debido a la existencia de una plaza pública y distintos edificios que no pueden ser modificados, la nueva relación de aspecto promedio de la calle es de  $h/w= 0,79$  (situación actual,  $h/w= 0,40$ ).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

Una gran parte de la calle recibe, en promedio, una cantidad de radiación de entre 1,95 – 3,90 kWh/m<sup>2</sup> por día, cuando en la situación actual recibe entre 4,55 – 6,50 kWh/m<sup>2</sup> por día. La propuesta ha tenido poco efecto en las zonas de los cruces con calles Este - Oeste, donde se mantienen valores entre 4,55 – 6,50 kWh/m<sup>2</sup> por día.

A pesar de esto, se ha logrado extender la sombra en las zonas cercanas a los edificios, presentando, en algunos casos, valores inferiores a 2,5 kWh/m<sup>2</sup> por día en puntos ubicados a 4 m de separación del edificio. La calle Matamoros tiene una ligera inclinación de 5° hacia el Oeste con respecto al Norte, esto ocasiona que la sombra sobre la zona peatonal Oeste de la calle sea mayor a la zona este.

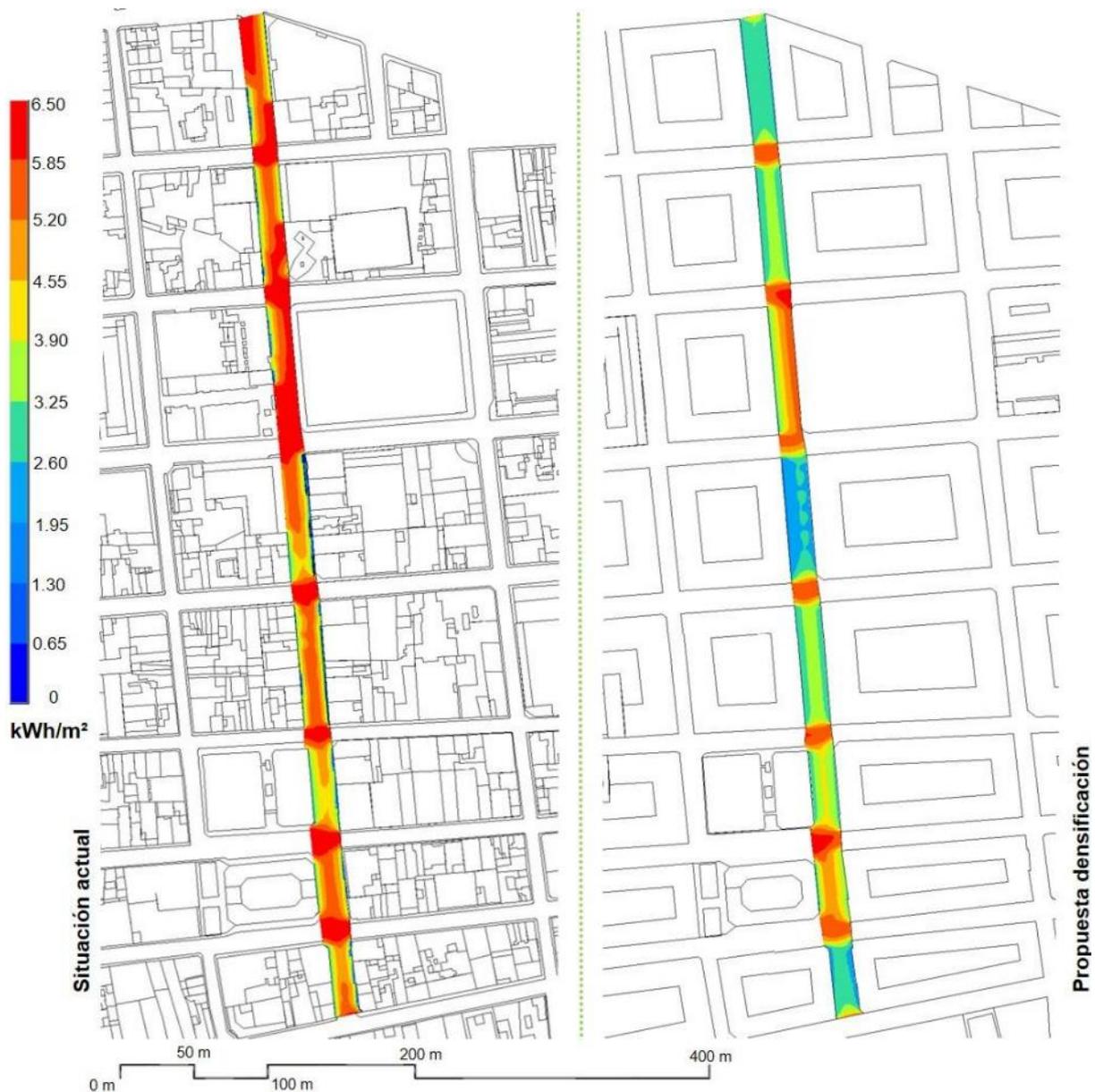


Figura 4.44. Resultados de la simulación de radiación solar que recibe la calle Matamoros (ns.4) durante la temporada de calor.

Al comparar la situación actual, en la imagen de la izquierda en la **Figura 4.45** con la de la propuesta, en la imagen de la derecha, se puede ver la reducción de las horas de sol directo que se consigue al aumentar la altura de los edificios.

La mayor parte la calle recibe entre 3 y 7 horas, mientras que los cruces con las calles Este - Oeste reciben entre 8 y 10 horas. La calle recibe un promedio de 5:18 horas de sol directo durante el día promedio.

La zona de la plaza pública es, después de los cruces de calles, la que presenta la mayor cantidad de horas de sol directo. Sin embargo, el hecho de implementar la propuesta genera una ligera reducción de horas a partir del mediodía, momento en el que los niveles de radiación se encuentran en su punto más elevado.

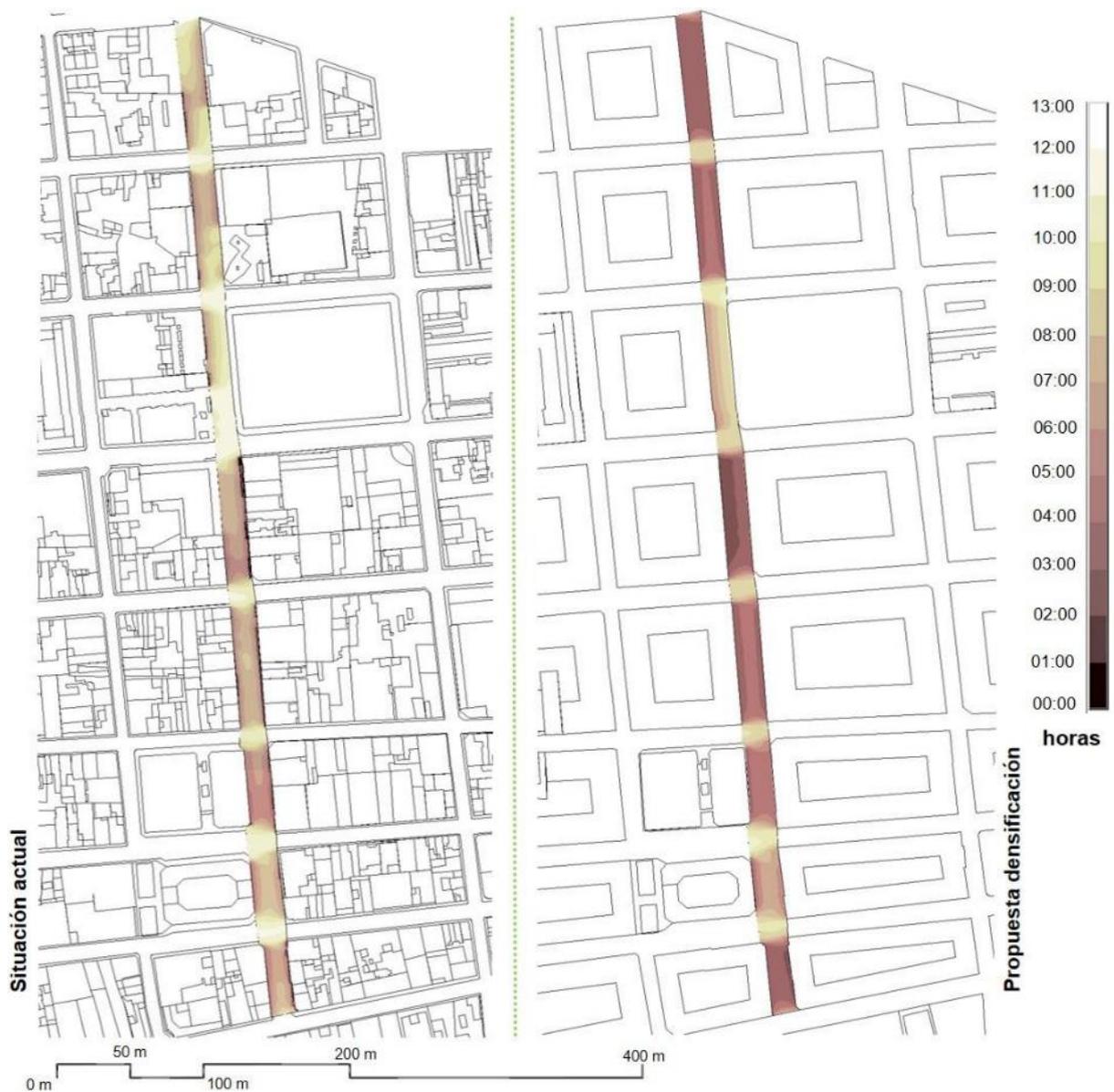


Figura 4.45. Resultados de la simulación de la cantidad de horas de sol directo que recibe la calle Matamoros (ns.4) durante la temporada de calor.

En el gráfico de la **Figura 4.46**, al igual que en la **Figura 4.43** (p.149), se muestra una comparación entre la evolución diaria de la radiación solar recibida (kWh/m<sup>2</sup> día) en la situación actual (a) de la calle Matamoros (ns.4) y con los cambios de la propuesta (p). A su vez, se ha graficado el porcentaje de reducción que representa la implementación de la propuesta.

La propuesta (p) tiene un valor de 4,03 kWh/m<sup>2</sup> día para el 1 de mayo, esto representa una reducción con respecto a la situación actual (a) del 25%. El valor más alto de radiación es de 4,44 kWh/m<sup>2</sup> (-25% que (a)) y se produce durante los días alrededor del 21 de junio. El día 31 de octubre tiene el valor más bajo, 1,91 kWh/m<sup>2</sup> (-30% con (a)). Los porcentajes de reducción se mantienen constantes, en promedio, la geometría propuesta (p) representan una reducción del 25,7% con respecto a la situación urbana actual (a). Estos valores varían entre el 24% y el 30%.

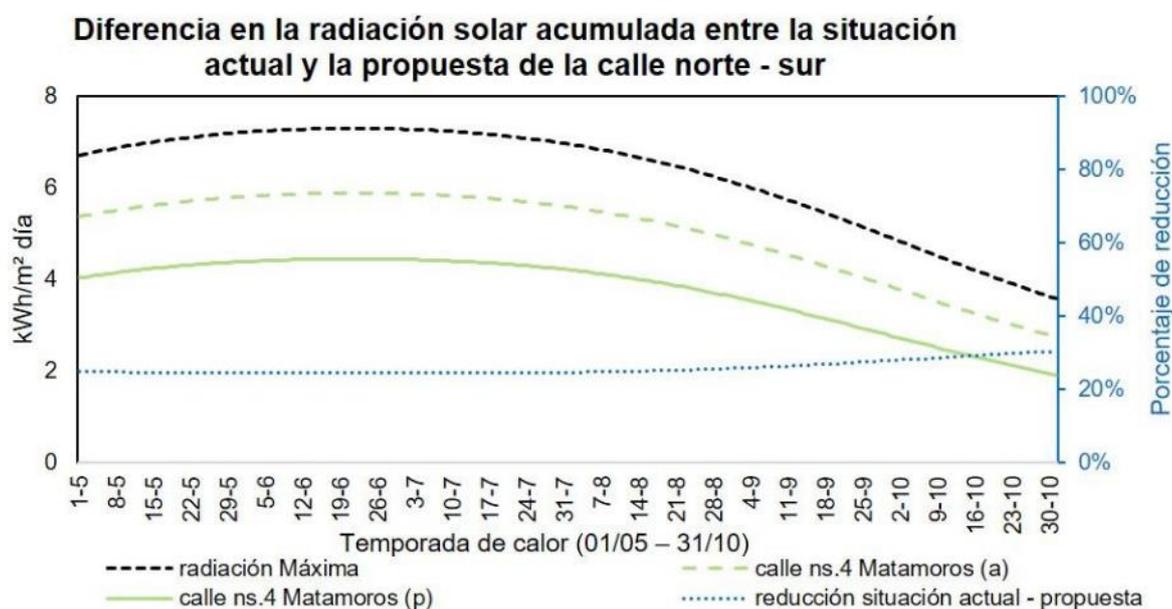


Figura 4.46. Comparativa entre la propuesta (p) de la calle Matamoros ns.4 y su situación actual.

**Discusión de los resultados: comparativa de los niveles de radiación solar directa y horas de sol entre estado actual y propuesta para ambas calles**

Los valores obtenidos a través de las simulaciones en Heliodon2 muestran que la propuesta tiene diferentes niveles de efectividad. La calle Monterrey, con orientación E-W y una relación de aspecto promedio de h/w= 0,87, tiene un valor de 4,99 kWh/m<sup>2</sup> por día. La calle Matamoros, que sigue una orientación N-S y una relación de aspecto promedio de h/w= 0,79, recibe un promedio de 3,74 kWh/m<sup>2</sup> por día.

Los valores de radiación recibida (kWh/m<sup>2</sup> por día) en las calles analizadas se encuentran representados gráficamente en la **Figura 4.47**. En este gráfico se muestra y compara la cantidad de radiación en promedio que reciben ambas calles. Se hace una comparación de las dos situaciones analizadas, tomando como referencia la cantidad máxima de radiación que recibe un plano horizontal sin obstrucciones en la latitud 29N (6,30 kWh/m<sup>2</sup> por día).

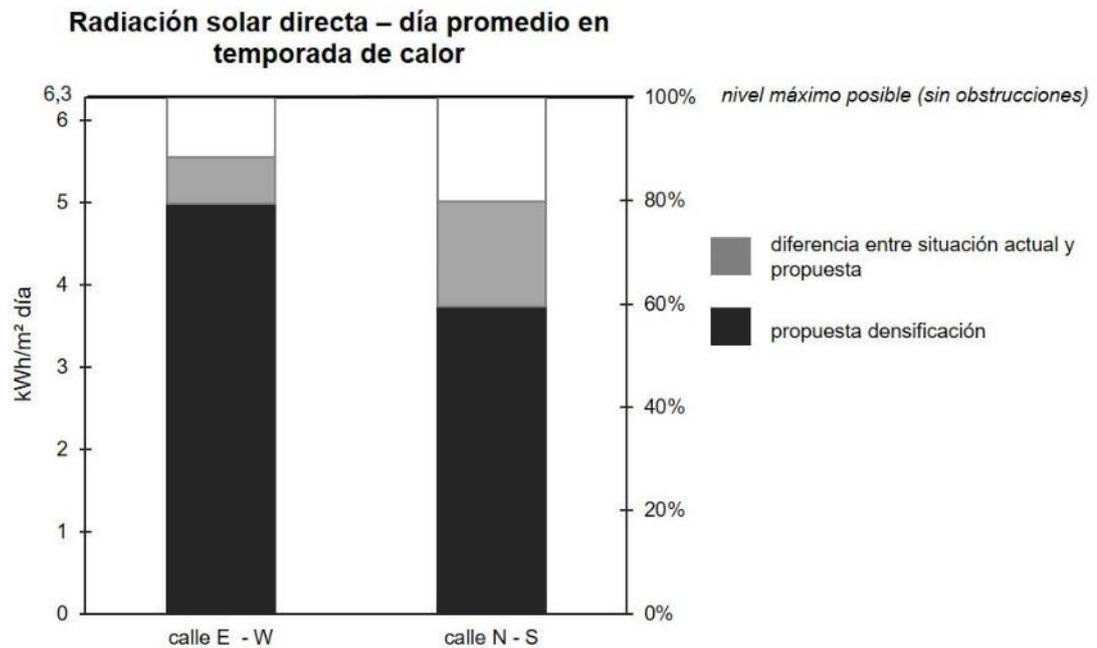


Figura 4.47. Radiación recibida el día promedio en las calles Monterrey (ew.4) y Matamoros (ns.4).

La situación actual de la calle Monterrey (orientación E-W y  $h/w = 0,37$ ) recibe el 88% de la máxima cantidad posible, es decir, las obstrucciones reducen  $0,75 \text{ kWh/m}^2$  ( $6,30 - 5,55 \text{ kWh/m}^2$  por día). El porcentaje de radiación que recibe la misma calle con la propuesta, es el 79% del máximo posible. Por lo que el hecho de aumentar la relación de aspecto a  $h/w = 0,87$  se traduce en dejar de recibir, en promedio,  $1,31 \text{ kWh/m}^2$  por día ( $6,30 - 4,99 \text{ kWh/m}^2$ ). Cuando ambas situaciones son comparadas entre sí, la propuesta logra reducir alrededor del 10% la cantidad de radiación promedio recibida en la situación actual ( $5,55$  a  $4,99 \text{ kWh/m}^2$  por día).

En el caso de la situación actual de la calle Matamoros (N-S y  $h/w = 0,40$ ), recibe el 80% con respecto al máximo posible, esto equivale a una reducción promedio de  $1,29 \text{ kWh/m}^2$  por día ( $6,3 - 5,01 \text{ kWh/m}^2$ ). La propuesta, con una relación de aspecto promedio de  $h/w = 0,79$ , recibe el 60% del máximo posible, es decir, reduce en promedio  $2,56 \text{ kWh/m}^2$  por día ( $6,3 - 3,74 \text{ kWh/m}^2$ ). Al comparar ambas situaciones, la propuesta consigue reducir en 25% la cantidad de radiación promedio recibida en la situación actual ( $5,01$  a  $3,74 \text{ kWh/m}^2$  por día)

En el gráfico de la **Figura 4.48** se compara la evolución diaria de la radiación recibida en las calles con la geometría propuesta. El porcentaje de diferencia promedio durante la temporada de calor (184 días) entre ambas calles es del 25%. En el gráfico se muestra cómo esta diferencia se mantiene arriba del 30% durante 106 días, entre el 20 y 30% durante 41 días, y en menos del 20% por el resto de días.

A partir del día 2 de octubre, la calle Monterrey (E-W) comienza a recibir una menor cantidad de radiación directa con respecto a la calle Matamoros (N-S). En la situación actual, este cambio se produce el día 5 de octubre.

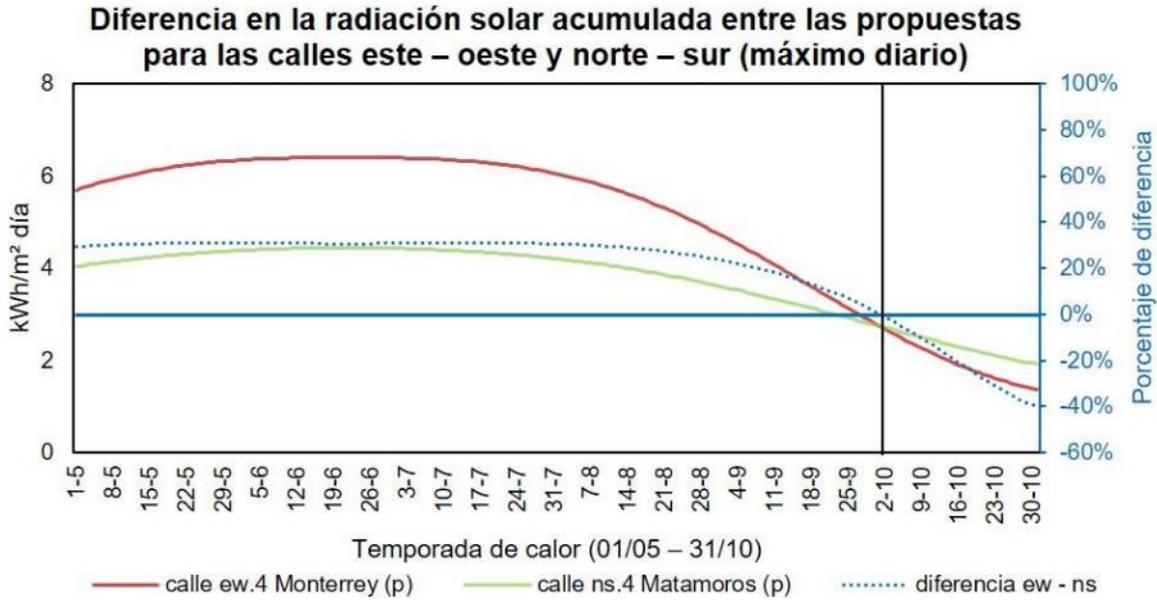


Figura 4.48. Diferencia en la variación de la cantidad de radiación recibida en las propuestas para las calles Monterrey (ew.4) y Matamoros (ns.4).

La cantidad de horas de sol directo que reciben las calles analizadas se ha representado en el gráfico de la **Figura 4.49**. Este gráfico es similar al de la **Figura 4.47**, compara la cantidad de horas de sol directo que se recibe durante el día promedio en las dos situaciones analizadas. Se ha tomado como referencia a la cantidad máxima de horas de sol directo que recibe un plano horizontal sin obstrucciones en la latitud 29N (12,9 horas, 12:54).

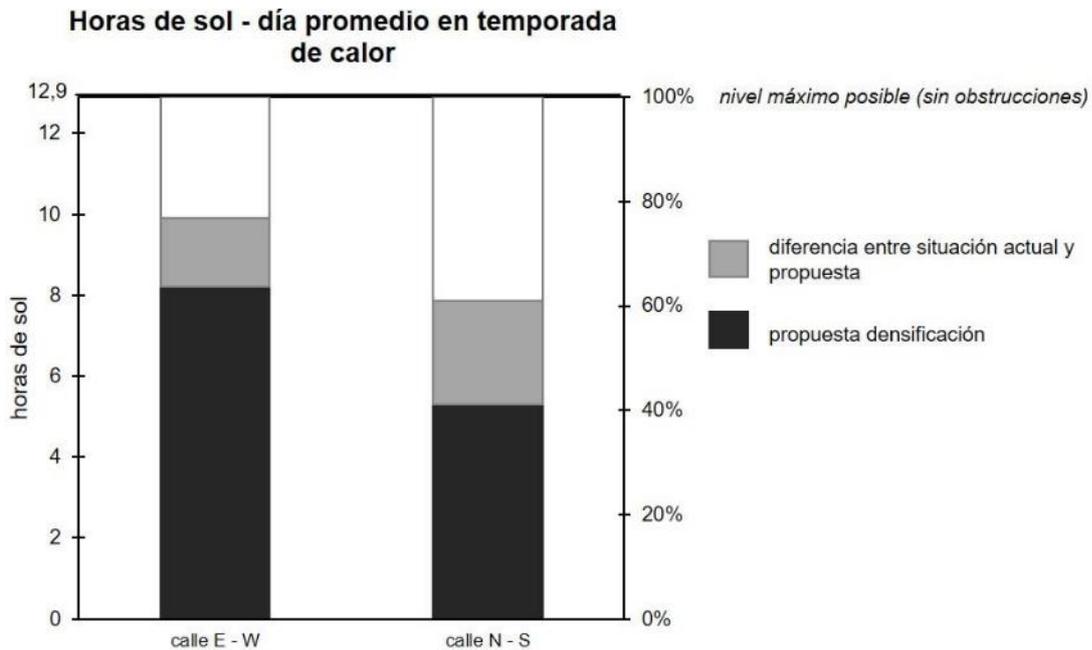


Figura 4.49. Cantidad de horas de sol directo por día promedio en las calles Monterrey (ew.4) y Matamoros (ns.4).

Actualmente, en la calle Monterrey se reciben en promedio 9,9 horas (9:54), esto significa que la obstrucción de los edificios ocasiona una reducción de 3 horas con respecto al máximo posible. Aumentar la altura de los edificios permite pasar de una reducción de 3 horas a una de 4,7 horas (4:42), por lo que la calle recibe 8,2 horas (8:12). La nueva geometría logra reducir 1,7 horas (1:42) con respecto a la situación actual, un 17% menos.

La calle Matamoros presenta una cantidad de horas inferior a la calle Monterrey. En su situación actual recibe 7,85 horas (7:51), es decir, deja de recibir 5,05 horas (5:03) del máximo posible. Con la altura propuesta, la calle recibe en promedio 5,3 horas (5:18), esto significa una reducción de 7,6 horas (7:36) con respecto al máximo. Al comparar ambas situaciones, la propuesta reduce 2.55 horas (2:33) de la situación actual (32% menos de horas de sol directo).

La diferencia entre la cantidad de horas de sol directo que se recibe en ambas calles, una vez aplicada la propuesta, es de 2.9 horas (2:54). La diferencia entre ambas calles es del 35%, es decir, la diferencia se ha incrementado en un 14% con respecto a la situación urbana actual.

Al analizar estos valores, se puede decir que, en una latitud cercana al trópico (29N), los tipos de geometría existentes y los propuestos tienen una mayor eficacia en calles con una orientación Norte – Sur. Sin embargo, en el caso de la calle con orientación Este – Oeste, el aumentar la altura de los edificios no deja de resultar beneficioso. La calle Monterrey pasa de recibir, en promedio, el 90% de la radiación solar máxima a recibir el 80%, este valor es similar al de la situación actual de la calle Matamoros. Con la propuesta, la calle Matamoros pasa a recibir del 80% al 60% de la radiación solar máxima promedio. Esta reflexión también aplica en cuanto a la reducción de horas de sol directo. La propuesta de la calle Monterrey reduce 17%, mientras que la propuesta para la calle Matamoros el 32%.

***Efecto de la nueva morfología urbana en el acceso solar en la red de calles dentro del área de estudio: comparativa con estado actual***

A escala de tejido urbano, el área de estudio ha sufrido una reconfiguración urbana mediante la implementación de la propuesta. Se ha aumentado la altura de la edificación en todas las manzanas que lo permiten. Para llevarlo a cabo, se ha considerado el ancho de la calle de la que forman parte. Se ha buscado lograr una relación de aspecto con un valor alrededor de 1.

Lo primero que se observa en la **Figura 4.50** es como el color rojo (valores > 5,85 kWh/m<sup>2</sup>) ha dejado de ser el dominante, hay a una mayor presencia del color azul y verde (valores entre 1,30 – 3,90 kWh/m<sup>2</sup>). Este cambio es más evidente en las calles Norte – Sur. El comportamiento energético de la red de calles es similar al del estado actual: las calles Este – Oeste presentan mayores valores de radiación con respecto a las calles Norte – Sur; al mismo tiempo, las calles Este – Oeste presentan una distribución de la radiación solar más uniforme sobre su superficie.

En la **Figura 4.50** es posible detectar las manzanas en las que hay edificios con valor patrimonial o plazas públicas. Al no poder ser modificadas, las calles de las cuales forman tienen presentan zonas con altos niveles de radiación (valores entre 5,85 – 6,50 kWh/m<sup>2</sup> por día). Esto sucede tanto en calles Norte – Sur como calles Este – Oeste.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

La nueva configuración urbana permite reducir la cantidad de radiación diaria promedio, la red de calles pasa de recibir 5,23 kWh/m<sup>2</sup> a recibir 3,85 kWh/m<sup>2</sup>. Esto significa una reducción del 26% con respecto a su situación actual. La geometría urbana propuesta, representa una reducción del 36% con respecto a la cantidad máxima de radiación que una superficie horizontal sin obstrucciones recibe en esta latitud (6,30 kWh/m<sup>2</sup> por día).

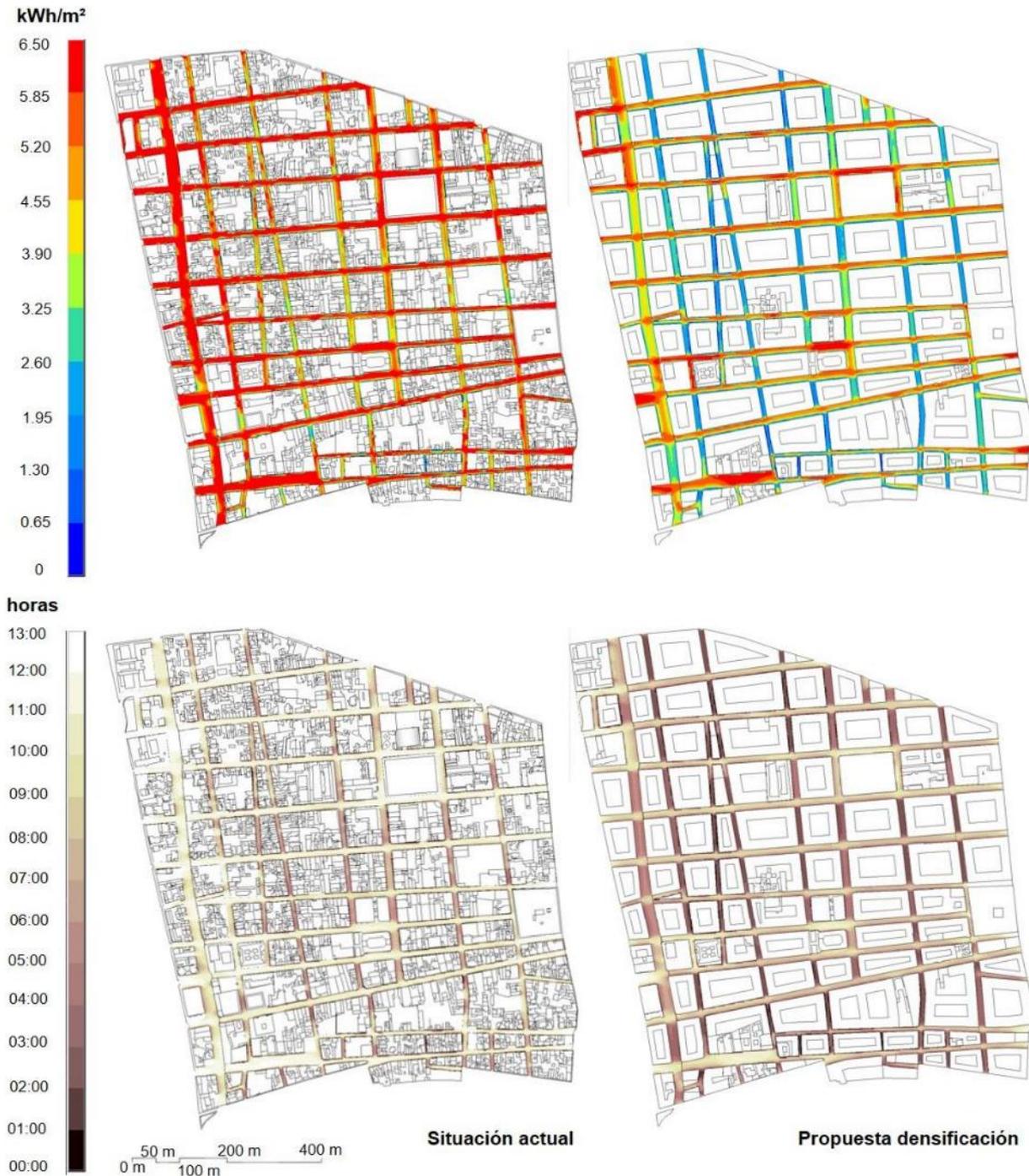


Figura 4.50. Distribución de la radiación solar directa y horas de sol directo en la red de calles del área de estudio en el día promedio.

## UN NUEVO ENFOQUE EN LA PLANIFICACIÓN DE CIUDADES DE CLIMA CÁLIDO - SECO

En cuanto a la cantidad de horas de sol directo que recibe la red de calles en el área de estudio, los resultados de la propuesta presentan una distribución con mayor uniformidad que en la situación urbana actual. Las calles Norte – Sur reciben una menor cantidad que las calles Este – Oeste. A pesar de esto, y debido a la geometría propuesta, las calles Este – Oeste reciben una cantidad de horas de sol directo similar a la recibida en la situación actual por las calles Norte – Sur.

En la **Figura 4.50** se puede observar esta diferencia, al mismo tiempo, sobresalen los cruces entre calles Norte – Sur y Este – Oeste como las zonas que reciben una mayor cantidad de horas de sol. Con la propuesta, las calles Este – Oeste tienen en promedio de 8 a 10 horas de sol directo, mientras que las calles Norte – Sur tienen entre 3 y 7 horas.

El grafico en la **Figura 4.51** muestra la evolución en la cantidad diaria de radiación que recibe, en promedio, un metro cuadrado de la red de calles en un periodo de 184 días (1/05 – 31/10).

En este gráfico se representa el porcentaje de reducción que se produce por la implementación de la propuesta (p) con respecto a la situación actual (a). Esta diferencia se mantiene entre 19 – 30% durante la mayor parte de la temporada (1/05 – 3/09, 126 días). Sin embargo, la diferencia se duplica de 30% a 62% en un lapso de 58 días (4/09 – 31/10).

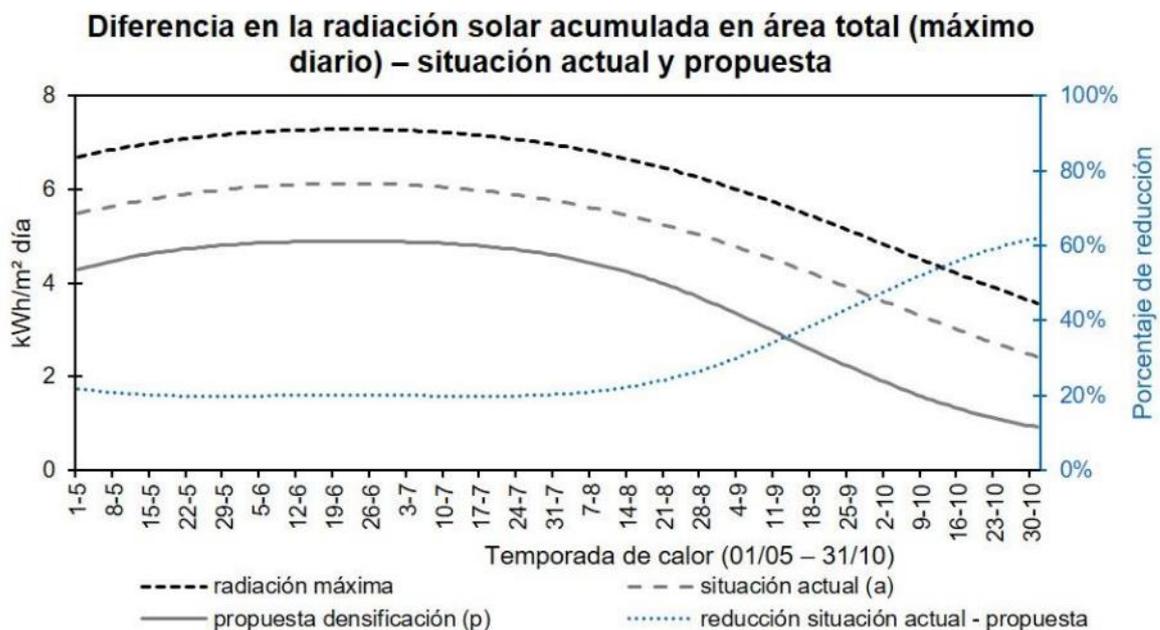


Figura 4.51. Variación en la cantidad de radiación solar recibida (kWh/m² día) en la red de calles, durante la temporada de calor y su diferencia con respecto al valor máximo posible.

#### **4.3.5 La nueva densidad edificatoria y poblacional tras el replanteamiento del centro urbano**

Los cambios propuestos en busca de reducir la radiación solar directa en las calles significan un replanteamiento del área de estudio: se ha de pasar por un proceso de densificación en horizontal, al rellenar los lotes baldíos, y uno vertical o “apilamiento”. Para este último, se ha de implementar el uso de la parcela mixta como unidad básica.

Este apilamiento tiene un efecto directo, tanto en la densidad edificatoria, como en la densidad de población dentro del área de estudio. Este proceso de densificación debe de estar sujeto a la normativa vigente, que hace mención directa a dos de los indicadores de densidad analizados: el GSI y el FSI. Los requisitos impuestos en esta tesis (nueva geometría de la calle para controlar el acceso solar), también se encuentran ligados a esta normativa.

Al implementar esta propuesta, se logran aumentar todos los indicadores de densidad (con excepción del OSR). El primer indicador es el *Ground Space Index* (GSI), por medio de la propuesta se ha logrado pasar de un GSI *bruto*= 0,43 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> a 0,54 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, y de un GSI *neto*= 0,54 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> a 0,66 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. (**Anexo 4.1**)

El *Floor Space Index* (FSI) junto a la Altura edificatoria (L) son los indicadores que más se han visto afectados por la propuesta, ya que están directamente relacionados con el hecho de aumentar la altura de los edificios. El primero pasa de valor de FSI *bruto*= 0,64 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> a 1,73 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> y de un FSI *neto*= 0,8 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> a 2,12 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. En cuanto al segundo indicador, anteriormente se ha señalado que las edificaciones en Hermosillo son de baja altura, de una o dos plantas, a través de la propuesta, se ha cambiado esa tendencia en el área de estudio, se ha pasado de L *bruto*= 1,46 a 3,22 y de un L *neto*= 1,44 a 3,21. (**Anexo 4.1**)

En cuanto al *Open Space Ratio* (OSR), se ha disminuido el valor de este indicador, el cual era considerado alto para un centro urbano. Se ha pasado de OSR *bruto*= 0,88 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> a 0,26 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> y de un OSR *neto*= 0,75 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> a 0,31 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. En otras palabras, se ha logrado disminuir la cantidad de espacio abierto (**Anexo 4.1**)

Para comparar la nueva situación urbana del área de estudio con la situación actual, y con diferentes tejidos de ciudades consideradas ejemplos de urbanismo, se han colocado los indicadores de densidad dentro del *Spacemate* en la **Figura 4.52**.

En el *Spacemate* se puede observar como la ubicación del área de estudio se desplaza con respecto a su situación actual, tanto en densidad bruta como en densidad neta. El hecho de aplicar la propuesta de esta tesis, consigue que la zona del *Spacemate* a la que se desplaza el área de estudio, pase de ser la zona destinada a densidades *suburbanas* a la zona de densidad *urbana – altamente urbana*, una zona más adecuada para un centro urbano.

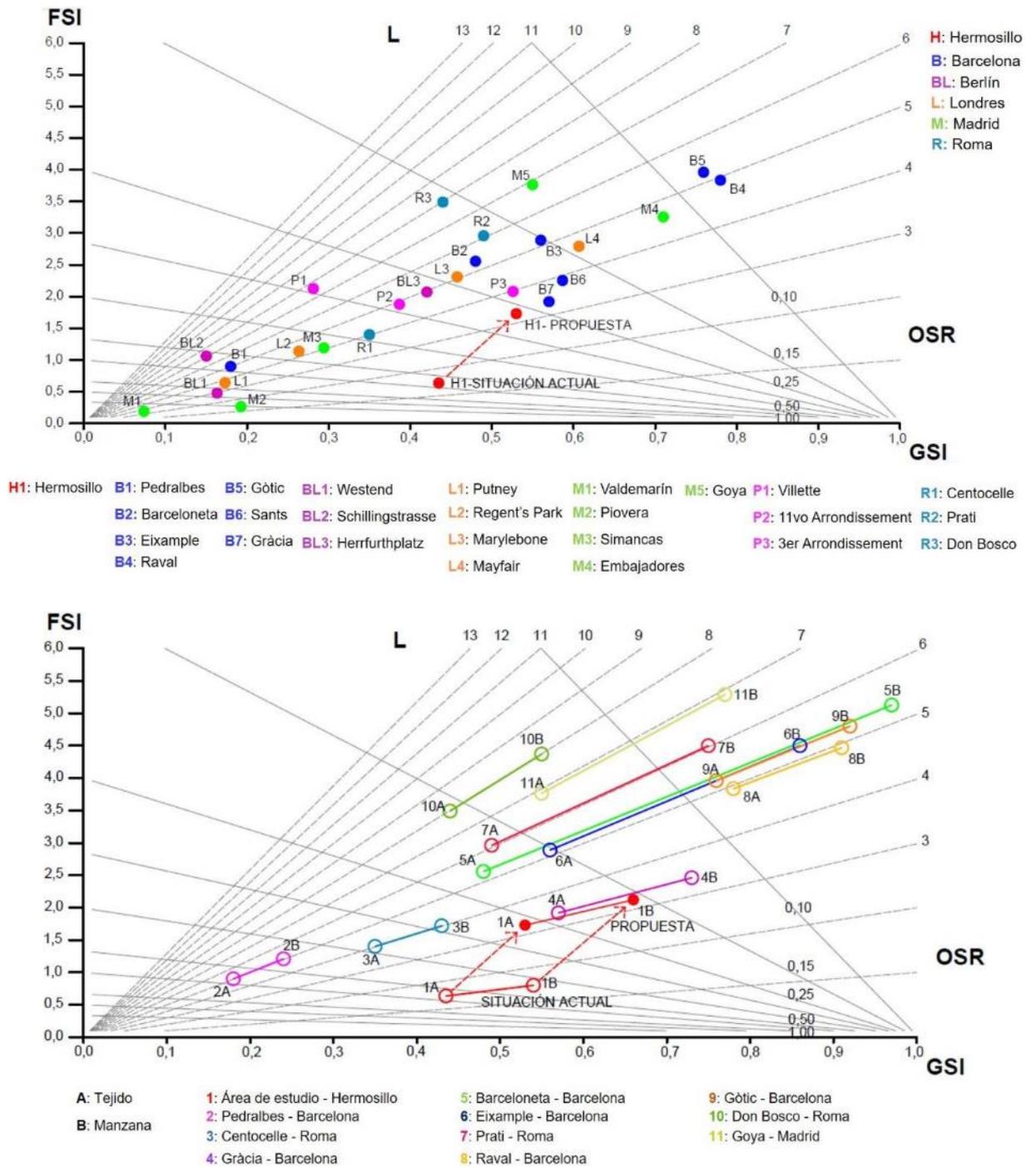


Figura 4.52. *SpaceMates* (Berghauser Pont & Haupt, 2009). Arriba: desplazamiento de la densidad bruta del área de estudio. Abajo: diferencia entre densidad neta y bruta del área de estudio (situación actual y propuesta).

Fuente: Elaboración propia, incorporando datos de (Morganti, 2013) y (Rodríguez-Álvarez, 2016).

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

El incremento en la densidad edificatoria favorece un incremento de la población dentro del área de estudio. Este incremento se puede lograr mediante el apilamiento de viviendas sobre las plantas bajas.

Existen diferentes maneras de obtener la nueva población en el área de estudio. En esta tesis, se ha optado por una manera sencilla, pero que da una perspectiva del alcance que se puede tener.

Para este cálculo, se ha considerado, la nueva superficie residencial en el área de estudio, el tamaño de la vivienda promedio en Hermosillo (parcela de 120 m<sup>2</sup>), el tamaño de la familia promedio (3 - 4 miembros), la huella residencial promedio (35 m<sup>2</sup>/hab). (**Anexo 4.2**)

El replanteamiento del centro podría dar cabida a 23.413 habitantes, esto significa una nueva densidad de población de 285 hab/ha (6 veces superior a la densidad promedio de la ciudad), en el gráfico de la **Figura 4.53** se compara la nueva densidad del área de estudio con la anterior y con la de los distintos tejidos urbanos con los que se ha comparado en densidad edificatoria.

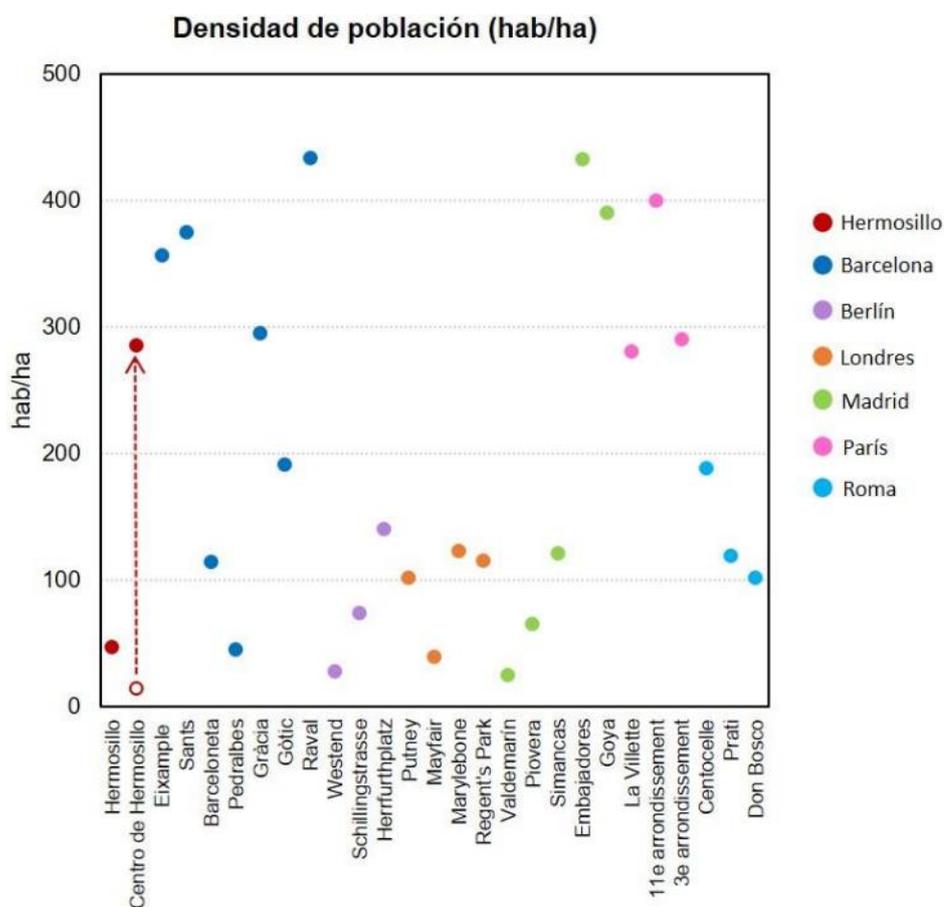


Figura 4.53. Densidad de población en los distintos tejidos analizados en el *Spacemate*.

## RESUMEN DE CAPÍTULO

En este capítulo, se ha hecho un análisis de la situación actual del centro urbano de Hermosillo en diferentes aspectos: *walkability*, densidad de población y edificatoria, y la incidencia de la radiación solar en el tejido urbano. El análisis se hizo mediante el uso de diferentes cartografías (CAD, GIS) y simulaciones energéticas del comportamiento de la radiación solar directa en el espacio público con Heliodon2. A partir del análisis, fue posible elaborar una propuesta de reordenamiento del centro, de la cual se han podido extraer diferentes conclusiones sobre el efecto producido por llevar a cabo un proceso de densificación mediante un apilamiento.

Mediante el análisis de la *walkability*, se observó que el área de estudio presenta un tejido de tipo heterogéneo que combina manzanas de diferentes tamaños y cierta irregularidad. A través de cartografía en CAD, se evaluaron diferentes aspectos que indican el nivel de permeabilidad de un tejido (distancias entre intersecciones, perímetro y superficies de manzanas, densidad de intersecciones, etc.). El tejido del área de estudio tiene recorridos que favorecen al peatón, por lo tanto, una intervención urbana a este nivel parece no ser necesaria.

A través del análisis cartográfico en GIS se observó que la baja densidad de población (14 hab/ha) se debe principalmente a una baja presencia de viviendas (533 viviendas, equivalentes al 13,5% del área de estudio). Con estos mapas se confirma el efecto de baja centralidad y la ausencia de parcelas mixtas: no hay uso comercial y habitacional en una misma parcela. En lo que respecta a la distribución de la densidad edificatoria, la cartografía creada ha permitido identificar las manzanas con mayor ocupación del suelo (GSI), mayor edificabilidad (FSI) y mayor altura promedio (L). La zona que presenta los valores más altos en estos indicadores es al mismo tiempo la zona con la menor densidad de población. En cuanto al indicador de la amplitud del espacio libre a nivel de calle (OSR), el área de estudio tiene un valor de casi 1 m<sup>2</sup> espacio libre por cada m<sup>2</sup> de espacio construido. De acuerdo a un análisis posterior con el método gráfico de *Spacemate*, los valores de estos indicadores de densidad edificatoria, colocan al área de estudio en una categoría de densidad equivalente a un área suburbana, muy alejada de los valores típicos de centros urbanos de ciudades de morfología compacta.

Esta configuración urbana genera calles con relaciones de aspecto pequeñas ( $h/w \approx 0,40$ ) con un trazado de orientación norte-sur y este-oeste. De acuerdo a las simulaciones realizadas, la cantidad de energía que incide sobre la red de calles es de 5,23 kWh/m<sup>2</sup> por día durante la temporada de calor. Se tomaron dos de las calles principales del área de estudio para hacer un análisis de la radiación solar incidente sobre la calle. Las simulaciones muestran que la calle este-oeste recibe 5,55 kWh/m<sup>2</sup> por día promedio y, en la calle norte-sur, este valor corresponde a 5,01 kWh/m<sup>2</sup> por día.

Estos resultados resaltan el impacto que tiene la baja densidad edificatoria y la configuración urbana del área de estudio, tanto en la densidad poblacional y su distribución, como en la calidad del espacio público de una ciudad con un clima cálido-seco. Por lo tanto, en este capítulo se hizo una propuesta de reordenamiento del área de estudio a través de un proceso de densificación. Se aplicó el concepto de ciudad intensificada propuesta en el capítulo 3 (lotes

de uso mixto + relleno de lotes baldíos + apilamiento de viviendas), lográndose efectos positivos en diferentes aspectos.

Para llevar a cabo este plan de reordenamiento, fue necesario considerar la normativa de edificación vigente y establecer unas condiciones mínimas de sombra para el espacio público en los momentos más críticos. Tomando en cuenta ambos aspectos, se llegó a la conclusión de que se debía conseguir calles con una relación de aspecto con un valor alrededor a  $h/w=1$ . Este nuevo modelo urbano fue simulado tanto en las calles tipo como a nivel del tejido. La calle este-oeste, paso de una relación de aspecto promedio de 0,37 a 0,87, consiguiendo una reducción promedio del 10% en la radiación solar directa, mientras que en la calle norte-sur la relación de aspecto promedio pasó de 0,40 a 0,79, produciendo una reducción del 25%.

Una de las conclusiones de este capítulo es que la geometría propuesta permite la creación de sombra en el espacio público a través de la propia forma urbana, algo necesario en ciudades con este clima. Se logró la creación de «corredores de sombra» a lo largo del día, y se pasó de recibir entre 7 – 12 horas de sol directo en el día promedio, a recibir entre 3 – 10. Esta reducción es del 17% en la calle este-oeste y del 32% en la calle norte-sur.

Desde el punto de vista de la densidad poblacional y edificatoria, los resultados obtenidos muestran que con la reconfiguración del área de estudio se alcanzan valores de densidad edificatoria similares a los de otros centros urbanos y tejidos de ciudades de morfología compacta. Se logra pasar de una densidad «suburbana» a una «urbana – altamente urbana». Al mismo tiempo, se logró que este aumento edificatorio se traduzca en un aumento del espacio destinado a la vivienda, y con ello, en un aumento de la densidad de población, pudiendo alcanzar 285 hab/ha (6 veces el promedio de la ciudad actual).

De acuerdo a lo expuesto en este capítulo, un replanteamiento del centro urbano de la ciudad podría permitir una desaceleración en el crecimiento de la mancha urbana. Otros efectos positivos de un «apilamiento de viviendas» en el centro urbano podrían ser la diversificación de los usos de suelo en la zona, la reducción de las distancias, favoreciendo los recorridos peatonales. Esto podría traducirse en una reducción del consumo de la energía vinculado al transporte y a la infraestructura urbana.

**CAPITULO 5**  
**REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE REFRIGERACIÓN:**  
**LA VIVIENDA EN ALTURA**

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

## 5.1 CONSUMO ENERGÉTICO

### 5.1.1 México

Los sectores que tienen el mayor consumo a nivel nacional son el de transporte, industrial y residencial. El alto consumo de este último, se debe a la necesidad del uso de refrigeración en algunos lugares del país. México es un país productor de petróleo, ocupa la decimoprimer posición a nivel mundial (US Energy Information Administration, 2017), por lo que los hidrocarburos son su principal fuente de energía (**Figura 5.1**). De acuerdo al World Energy Balance 2018, México es el decimosexto productor de energía a nivel mundial.

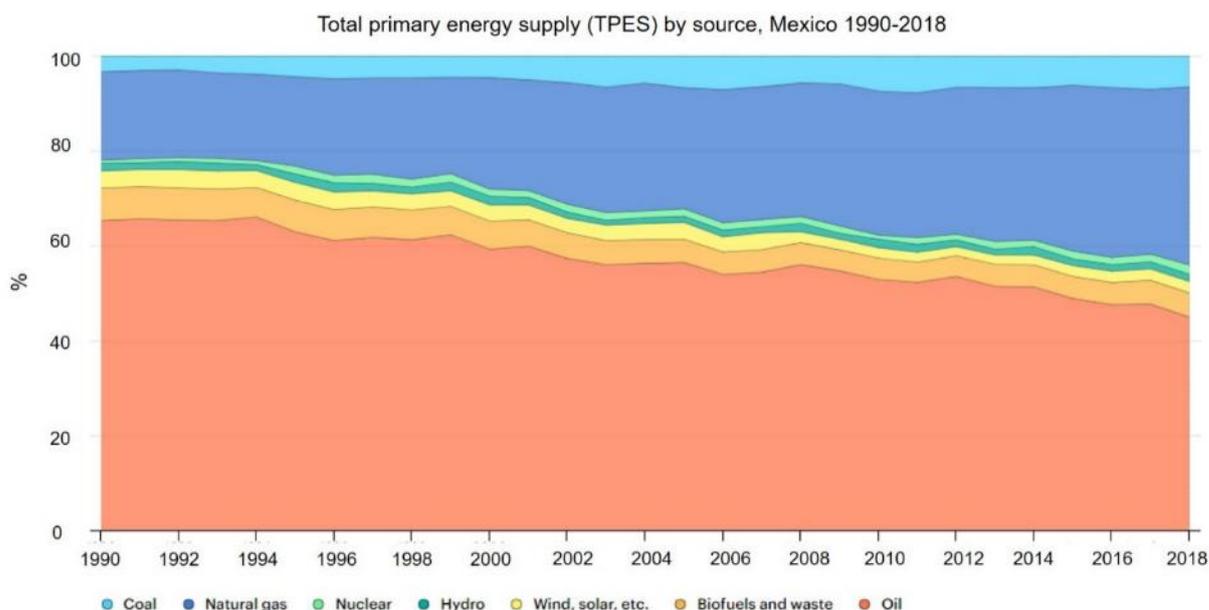


Figura 5.1. Suministro total de energía primaria por fuentes, México 1990-2018.

Fuente: <https://www.iea.org/countries/mexico>.

De acuerdo a la Secretaría de Energía (SENER), en el 2017, los hidrocarburos aportaron el 84% a la producción de energía primaria, una reducción del 11% con respecto al 2016. La producción de fuentes no fósiles de energía primaria pasó del 10% al 11% (Secretaría de Energía, 2018).

De acuerdo al Balance Nacional de Energía 2017 (Secretaría de Energía, 2018), el consumo de energía per cápita fue de 74.89 GJ, 0,2% mayor al 2016. En los últimos diez años, el consumo de energía per cápita aumento 0,2% en promedio anual. Sin embargo, la producción de energía primaria disminuyó en 8,9%.

México ha incrementado la demanda de importaciones año a año. En 2017, se importaron 4.417,61 PJ, un 10,6% más que en 2016, principalmente en gasolinas, naftas y gas seco (Secretaría de Energía, 2018).

El país tiene un índice de independencia energética<sup>6</sup> de 0,76, es decir, la energía producida es 24% menor a la energía que se consume. En los últimos diez años ha disminuido en un promedio anual de 5%.

En la **Figura 5.2** se desglosa el consumo energético total en sectores, el primer lugar lo ocupa el sector del transporte con el 44% del consumo, seguido por el sector industrial (35%), el residencial, comercial y público (17,6%) y el agropecuario (3,4%) (Secretaría de Energía, 2018).

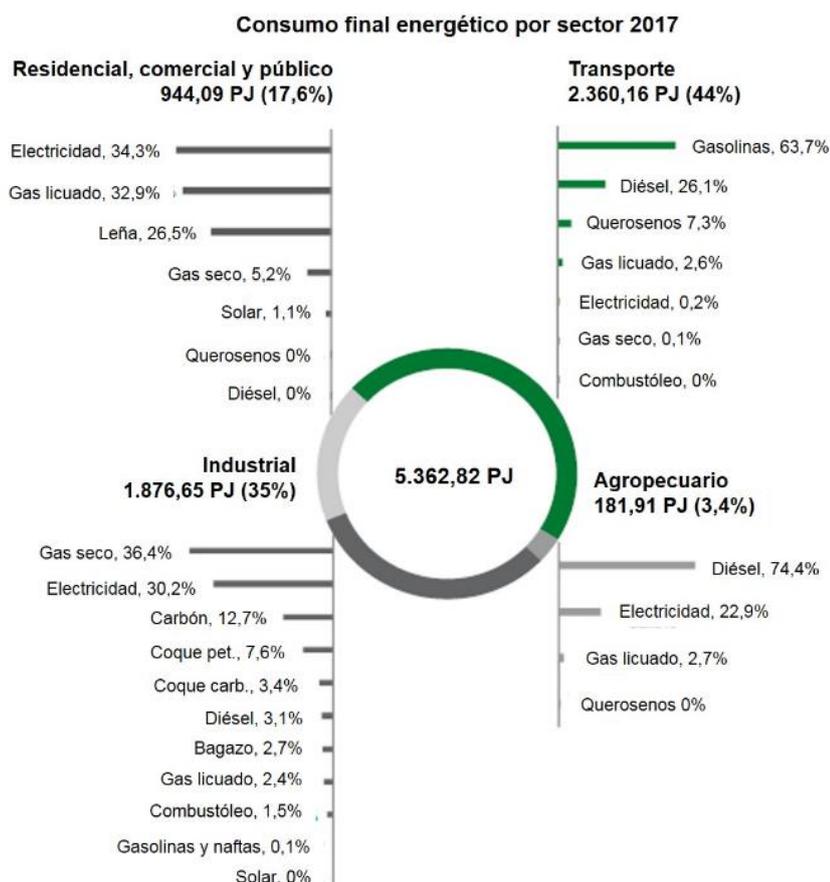


Figura 5.2. Consumo energético anual y fuentes de energía por sectores en México.  
 Fuente: Balance Nacional de Energía 2017 (Secretaría de Energía, 2018).

### 5.1.2 Sonora - Hermosillo

Durante el 2010 en Sonora, el consumo eléctrico anual por persona se encontraba muy por encima de la media nacional, 3.466 kWh/hab mientras que la media nacional era de 1.733 kWh/hab. El consumo estatal de energía fue de 232,6 PJ, produciendo un consumo final, al quitar la energía de transformación, de 139,3 PJ (COEES, 2010).

<sup>6</sup> Índice de independencia energética: índice utilizado a nivel internacional para medir, de forma general, el grado en que un país puede cubrir su consumo de energía derivado de su producción; si este es mayor a uno, se considera que el país es independiente energéticamente (Secretaría de Energía, 2018).

## REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE REFRIGERACIÓN: LA VIVIENDA EN ALTURA

El consumo por sectores quedaba repartido de la siguiente manera: en primer lugar, el sector del transporte con el 61,1%, seguido por el sector industrial (19,9%), residencial, comercial y público (16,3%) y el agropecuario (2,7%) (COEES, 2010).

En el 2013, Hermosillo tuvo un consumo total de 3,3 millones de MWh (30% del consumo total de Sonora). El consumo de electricidad anual per cápita era de 3.866,7 kWh. En transporte público y privado, el consumo anual de energía per cápita fue de 5.370,5 kWh (Secretaría de Energía, 2015). En el 2014, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) coloca a Hermosillo como uno de los municipios con mayor consumo a nivel nacional (H. Ayuntamiento de Hermosillo, 2018). Actualmente, el consumo anual de electricidad de una vivienda promedio en Hermosillo es de 4.945 kWh/año, la media anual nacional es de 1.600 kWh/año. De acuerdo a CFE, Hermosillo es el segundo municipio a nivel nacional con el mayor incremento de consumo residencial de electricidad durante el verano (**Figura 5.3**), solo detrás de Mexicali (H. Ayuntamiento de Hermosillo, 2018).



Figura 5.3. Consumo de electricidad del sector residencial de Hermosillo.

Fuente: H. Ayuntamiento de Hermosillo, 2018.

Tanto a nivel nacional como en Hermosillo, los sectores con el mayor consumo energético son el de transporte y el residencial, comercial y público. Dentro del sector de transporte, el vehículo privado representa el 90% del consumo total. Dentro del sector residencial, comercial y público, la parte residencial representa el 80% (Secretaría de Energía, 2018). Este comportamiento se ve potenciado en ciudades como Hermosillo, debido en parte, a sus condiciones geográficas y urbanas. Esto se repite, sobre todo, en las regiones noroeste y noreste de México, al ser las que presentan las temperaturas más extremas (INEGI, 2018).

En el marco de esta tesis, y considerando que México no es un país energéticamente independiente, estos sectores adquieren gran importancia. Esta tesis busca generar estrategias, tanto a nivel urbano como arquitectónico, para reducir la demanda energética ya que, si se logra una mejora sustancial en el consumo energético de viviendas de ciudades como Hermosillo, la influencia en el balance nacional será importante.

## **5.2 LA VIVIENDA ACTUAL EN HERMOSILLO**

El modelo de vivienda dominante en Hermosillo, es la vivienda unifamiliar aislada. La principal característica de una vivienda aislada, en relación a su comportamiento energético, es la superficie de exposición a la radiación, ya que no tiene entidades colindantes. Esta tipología se repite en todos los niveles socioeconómicos, ya sea en fraccionamientos cerrados o en lotes colonias dentro de la ciudad.

En los últimos años, han comenzado a surgir, de manera puntual, desarrollos plurifamiliares en altura. Sin embargo, estos no son vistos como una opción para la mayoría de los habitantes de Hermosillo, lo cual podría deberse a una cuestión económica y social. Este tipo de crecimiento urbano está destinado a un mercado de un poder adquisitivo superior a la media.

De hecho, la población joven sigue optando por una vivienda unifamiliar aislada en fraccionamientos cerrados. No obstante, es posible que esta tipología de vivienda no sea la más adecuada para un clima como el de Hermosillo, pudiendo estar relacionada con un mayor consumo de energía por el uso de sistemas de acondicionamiento térmico.

El análisis de estas tipologías de viviendas en el contexto de Hermosillo, evaluando su comportamiento térmico y la demanda energética de refrigeración de cada una, podría aportar argumentos para la implementación de una nueva política de vivienda, que fomente la construcción de vivienda plurifamiliar en altura.

Este análisis podría ser de interés para ciudades con un clima cálido – seco y con una presencia mayoritaria de este tipo de viviendas. Este estudio es relevante en el caso de Hermosillo, ya que el sector residencial es, después del sector de transporte, el sector que más consume energía, sobre todo durante la temporada de calor.

### **5.2.1 Características de las viviendas de Hermosillo**

En esta tesis se han analizado las características de diferentes tipologías de vivienda que existen en Hermosillo: unifamiliar aislada y plurifamiliar en altura. Para este análisis se han considerado las viviendas construidas después de 1990.

Estas características pueden ser clasificadas dentro de dos grupos: las características espaciales y las características térmicas. Las características espaciales incluyen la superficie habitable ( $m^2$ ) y el volumen habitable ( $m^3$ ). Las características térmicas son:

- **Superficie de piel ( $m^2$ ) y superficie de piel por unidad de volumen ( $m^2/m^3$ ) y color.**
- **El coeficiente de adosamiento y de asentamiento de la vivienda**
- **Superficie de vidrio ( $m^2$ ) y superficie de vidrio por unidad de volumen ( $m^2/m^3$ )**
- Masa térmica (MJ/K) y su relación con el volumen habitable (MJ/K/ $m^3$ )
- **Transmitancia térmica global ( $W/m^2K$ )**
- Robustez: efusividad térmica ( $J/m^3K$ )
- **Radiación solar promedio recibida al día por unidad de volumen ( $kWh/m^3$  por día) por tipologías de vivienda (unifamiliar aislada de una y dos plantas, vivienda en altura)**

En este capítulo se prestará especial interés a las características relacionadas con el *apilamiento de vivienda* (resaltadas en negrita en la lista anterior). Para más información sobre las demás características, ver **Anexo A5.1**.

### Características espaciales

La superficie habitable es la característica utilizada para catalogar la categoría de los dos tipos de viviendas. Las viviendas unifamiliares aisladas quedan distribuidas en cinco categorías: vivienda mínima ( $32 < \text{área} \leq 45 \text{ m}^2$ ), vivienda popular ( $45 < \text{área} \leq 60 \text{ m}^2$ ), vivienda de interés social ( $60 < \text{área} \leq 90 \text{ m}^2$ ), vivienda de interés medio ( $90 < \text{área} \leq 120 \text{ m}^2$ ) y vivienda residencial ( $\text{área} > 120 \text{ m}^2$ ). Dentro de estas categorías, podemos encontrar viviendas de 1 o 2 plantas. En este análisis, que tomo las categorías del trabajo de Irene Marincic (Marincic et al., 2011), se dejó fuera al «pie de casa», al no ser considerados como representativo de la vivienda en Hermosillo (**Figura 5.5**) (**Anexo A5.1.1**). En el caso de la vivienda plurifamiliar en altura, todas son consideradas como vivienda residencial ( $\text{área} > 90 \text{ m}^2$ ). Consideradas así por el sector socioeconómico al que están destinadas. En la **Figura 5.4** se pueden ver las tipologías de vivienda existentes en la ciudad: la de plurifamiliar en torre y plurifamiliar en bloque lineal.

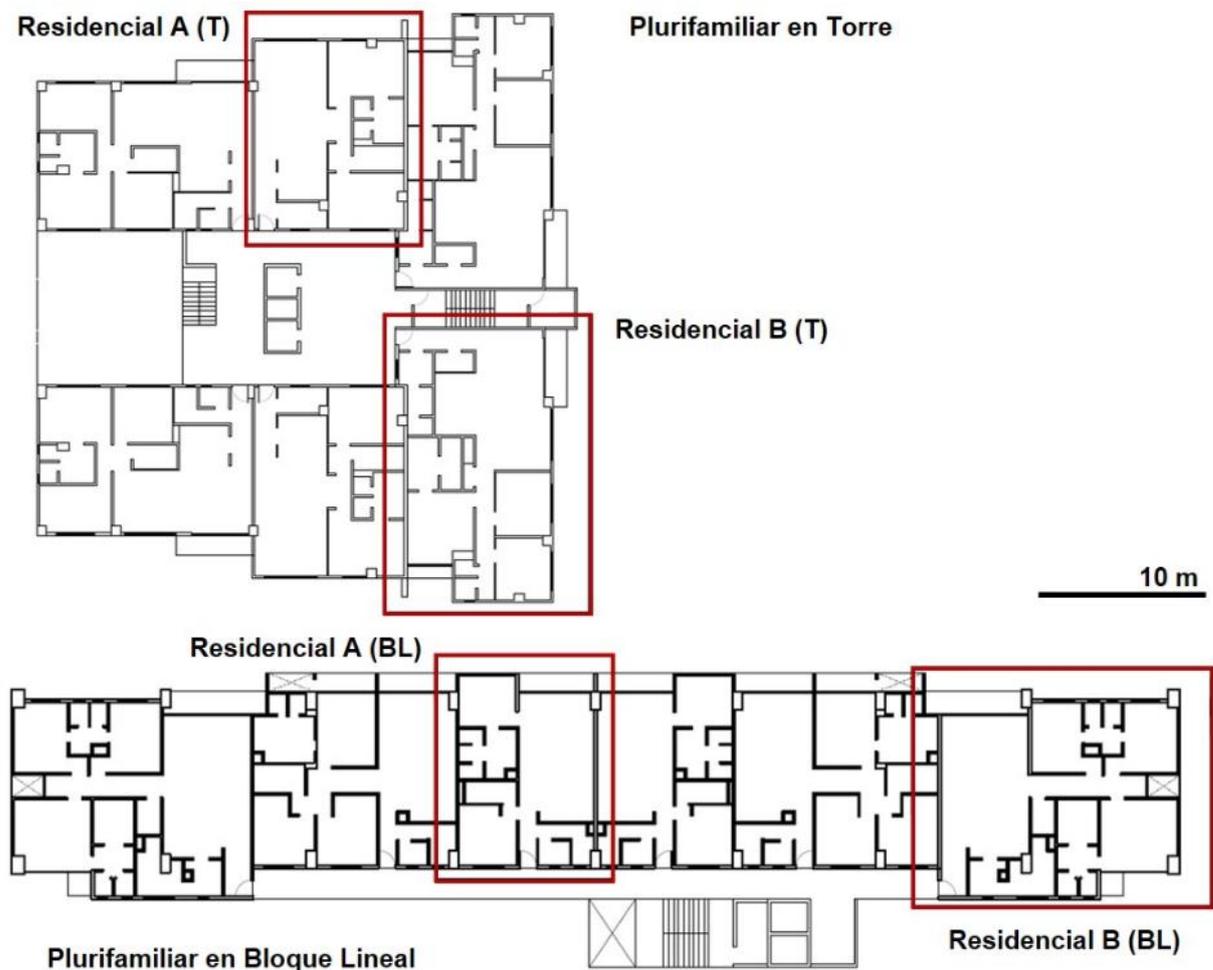


Figura 5.4. Tipologías de viviendas plurifamiliares en altura, en torre y en bloque lineal.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
**LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

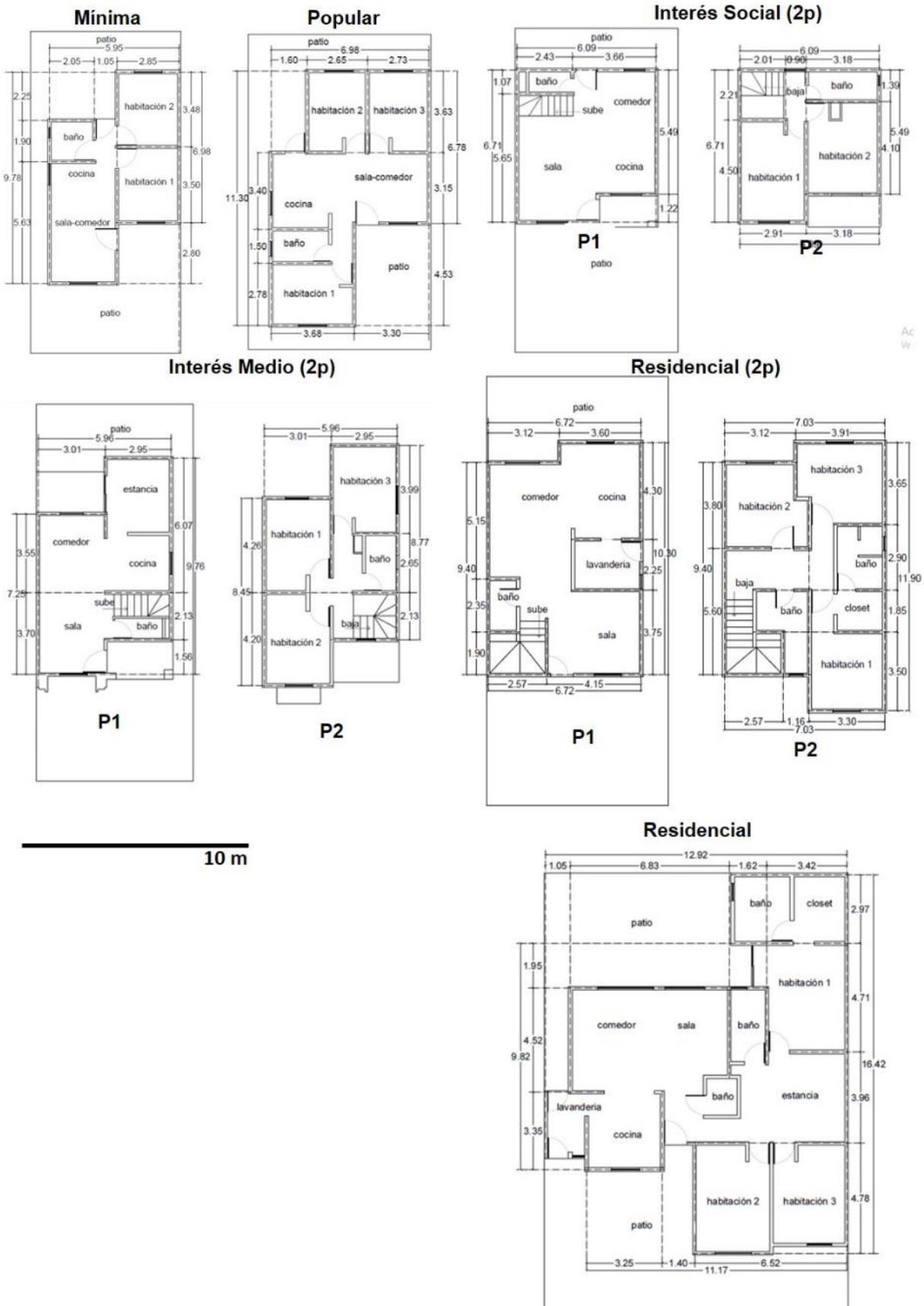


Figura 5.5. Tipologías de viviendas unifamiliares aisladas de una y dos plantas (2p).

## REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE REFRIGERACIÓN: LA VIVIENDA EN ALTURA

En la **Figura 5.6** se han representado de manera gráfica la superficie de las viviendas seleccionadas para este análisis: **seis viviendas del tipo unifamiliar aislada** (vivienda mínima, popular, interés social de dos plantas, de interés medio de dos plantas y dos de nivel residencial, de una y dos plantas) y **cuatro en edificio plurifamiliar** (dos viviendas residenciales en torre y dos en un bloque lineal). La superficie habitable de las viviendas se mantiene entre 40,9 – 155,9 m<sup>2</sup>.

La vivienda residencial B (Bloque) tiene la mayor superficie habitable (155,9 m<sup>2</sup>). Mientras que la vivienda residencial A (Bloque), con 90,1 m<sup>2</sup> tiene una superficie menor a la de la vivienda de interés medio (2p) que tiene 92,5 m<sup>2</sup>. El promedio de superficie habitable de las viviendas de nivel residencial es de 132 m<sup>2</sup>, el resto de viviendas promedia 65 m<sup>2</sup>.

El volumen habitable depende la altura interior. El Reglamento de Construcción de Hermosillo establece, como mínimo, una altura interior libre de 2,40 m (H. Ayuntamiento de Hermosillo, 2012b). La altura interior de las viviendas mínima, popular y de interés social es de 2,50 m. Las viviendas de interés medio y de nivel residencial, tienen una altura de 2,65 m. Las viviendas en plurifamiliares tienen una altura interior de 2.60 m, utilizan plafones para permitir el paso de instalaciones. En la **Figura 5.7** se muestra el volumen habitable de cada vivienda.

De nueva cuenta, la vivienda residencial B (Bloque) tiene el mayor volumen habitable (405 m<sup>3</sup>). El promedio de volumen habitable para las viviendas de nivel residencial es de 346 m<sup>3</sup>, el promedio para el resto de viviendas es de 166 m<sup>3</sup>.

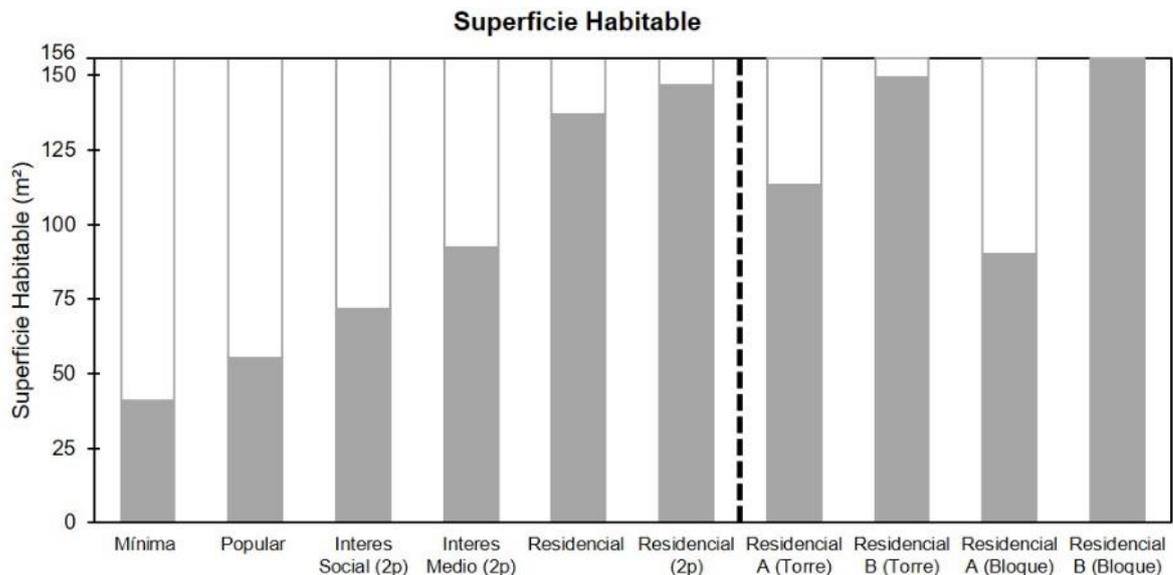


Figura 5.6. Superficie habitable de las viviendas analizadas. A la derecha: viviendas en altura.

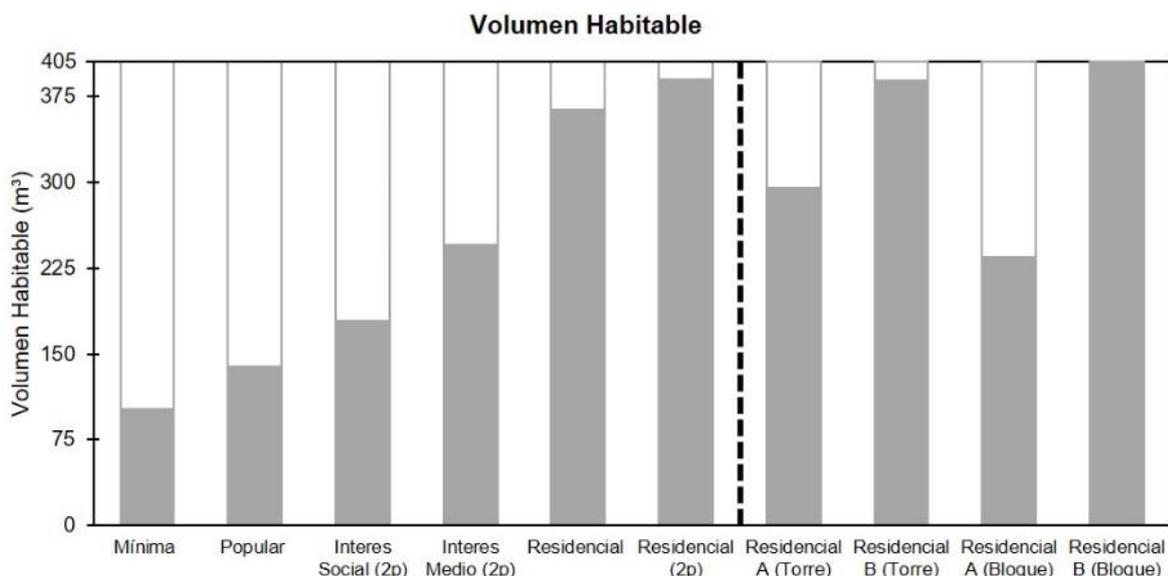


Figura 5.7. Volumen habitable de las viviendas analizadas. A la derecha: viviendas en altura.

### Características térmicas

La superficie de piel es la envolvente física de la vivienda, separa el interior del exterior. En este caso, las viviendas unifamiliares aisladas tienen una mayor superficie de piel en contacto con el exterior, respecto a las viviendas en plurifamiliares en altura. En la **Figura 5.8** se muestra la superficie de piel de cada vivienda por unidad de volumen habitable ( $f = m^2/m^3$ ).

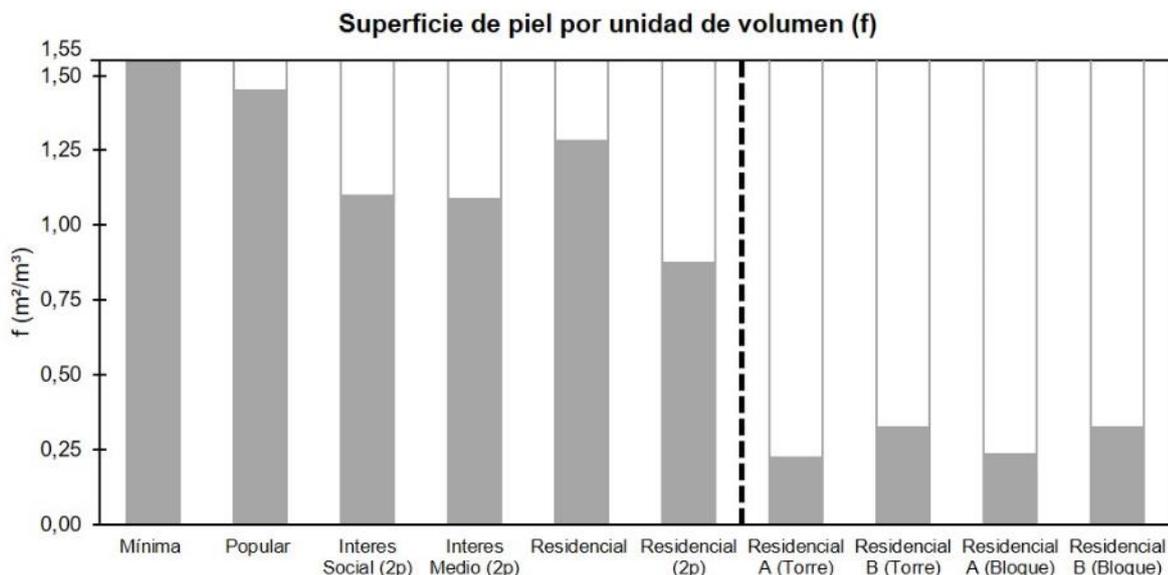


Figura 5.8. Superficie de piel por unidad de volumen de las viviendas analizadas. A la derecha: viviendas en altura.

En el gráfico se puede observar la diferencia que existe entre las viviendas unifamiliares aisladas y las viviendas plurifamiliares en altura. Esto se debe a que las viviendas unifamiliares

**REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE REFRIGERACIÓN: LA VIVIENDA EN ALTURA**

tienen un coeficiente de adosamiento<sup>7</sup> de 0, es decir, no existe una construcción vecina a la vivienda. Esto provoca que la superficie de piel en contacto con el exterior sea mayor. Las viviendas plurifamiliares tienen coeficientes de adosamiento que entre 0,72 – 0,82.

Otro aspecto importante que está relacionado con la superficie de piel, es el coeficiente de asentamiento<sup>8</sup>. Las viviendas unifamiliares tienen un coeficiente de asentamiento que se mantiene entre 0,20 y 0,30. Las viviendas plurifamiliares no se encuentran asentadas sobre el terreno, por lo tanto, su coeficiente es de 0.

En la **Figura 5.8**, se observa que la superficie de piel por unidad de volumen habitable ( $m^2/m^3$ ) es mayor en viviendas de una planta que en viviendas con dos plantas. La vivienda mínima con  $1,55 m^2/m^3$ , tiene el valor más alto, seguida por la vivienda popular con  $1,45 m^2/m^3$  y la vivienda residencial  $1,28 m^2/m^3$ , estas tres viviendas son de una planta. Las viviendas de dos plantas tienen valores inferiores: vivienda de interés social (2p)  $1,10 m^2/m^3$ , seguida por la vivienda de interés medio (2p) con  $1,09 m^2/m^3$  y la vivienda residencial (2p) con  $0,88 m^2/m^3$ .

Estos valores nos dan una idea de la compactidad de las viviendas unifamiliares aisladas. En otras palabras, las viviendas de dos plantas, al tener una proporción entre superficie de piel y volumen habitable menor a las del resto de viviendas unifamiliares, tienen una mayor compactidad. Sucede lo mismo al comparar las viviendas en plurifamiliares con las unifamiliares aisladas, las primeras son más compactas.

En cuanto al color de la piel de las viviendas, todas cuentan con cubiertas de color blanco, es decir, un color con un alto valor de reflectancia a la radiación solar. En el caso de los muros, la mayoría de las viviendas cuenta con colores de tonalidades claras (**Figura 5.9**).



Figura 5.9. Colores en las diferentes viviendas en Hermosillo: paredes de un color claro y cubiertas blancas.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Otro aspecto importante, relacionado con la piel de la vivienda, es la superficie de vidrio. Este aspecto es de especial importancia en climas como el de Hermosillo, con altos niveles de

<sup>7</sup> Coeficiente de adosamiento (ad): superficie adosada/superficie global, (adimensional)

<sup>8</sup> Coeficiente de asentamiento (as): superficie asentada/superficie global, (adimensional) (Coch & Serra, 1995)

radiación solar a lo largo de la temporada de calor. Este valor suele aumentar de acuerdo a la superficie habitable. Esto sucede tanto en las viviendas unifamiliares como en las viviendas en plurifamiliares. En el caso de las viviendas unifamiliares, la vivienda residencial (2p) es una excepción, tiene una superficie de vidrio (9,54 m<sup>2</sup>) que la ubica entre el valor de vivienda de interés social (2p) (8,84 m<sup>2</sup>) y de la vivienda de interés medio (2p) (13,06 m<sup>2</sup>) (**Anexo A5.1**).

El conjunto de viviendas aisladas tiene, en promedio, una superficie de vidrio de 9,86 m<sup>2</sup>. En el caso de las viviendas en plurifamiliares, éste es de 20,41 m<sup>2</sup> (una proporción 2:1 respecto a las viviendas aisladas).

A pesar de esto, si se analiza la superficie de vidrio por unidad de volumen habitable (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), como en la **Figura 5.10**, las viviendas unifamiliares destinadas a una población más vulnerable económicamente tienen, en promedio, una mayor superficie de vidrio por unidad de volumen que las viviendas de nivel residencial (0,049 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> – 0,035 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>).

En el caso de las viviendas plurifamiliares, la vivienda en bloque lineal promedia una mayor proporción de vidrio por volumen habitable respecto a las viviendas en torre (0,075 – 0,044 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>). La vivienda residencial A (Bloque), aun siendo la de menor superficie de las cuatro analizadas, tiene el valor más alto en este parámetro.

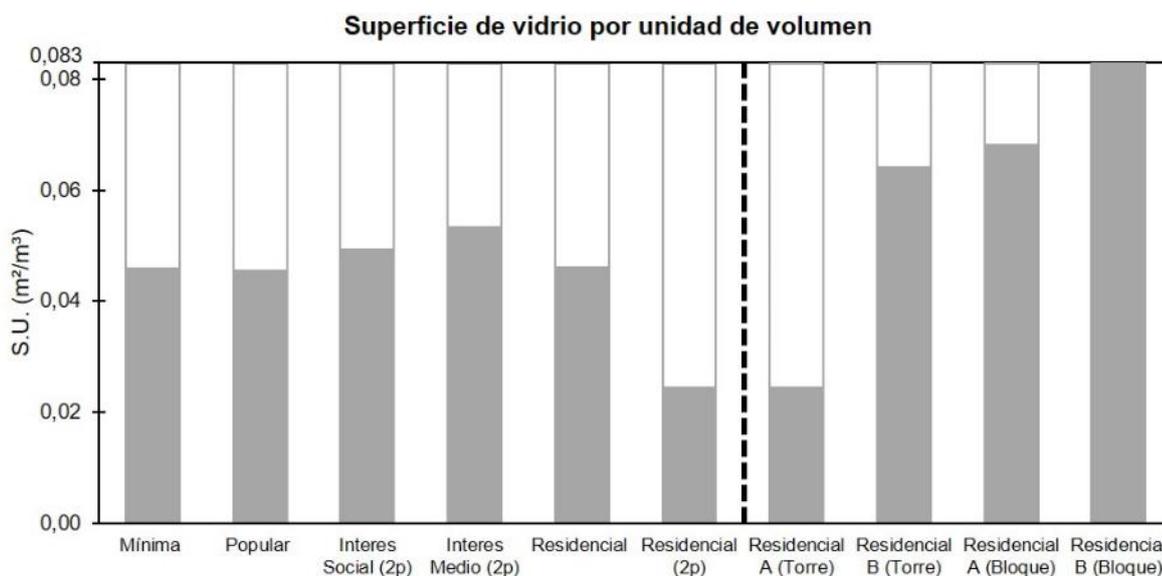


Figura 5.10. Superficie de vidrio por unidad de volumen en las viviendas analizadas. A la derecha: viviendas en altura.

En la **Figura 5.11** se muestra el valor transmitancia térmica global ( $U = W/m^2K$ ) de las viviendas. En este gráfico se puede ver una diferencia entre los sistemas constructivos de las viviendas unifamiliares y el de las viviendas en plurifamiliares. Las primeras utilizan muros de ladrillo o de bloques de concreto sin aislamiento térmico. En el caso de las viviendas plurifamiliares, se utilizan sistemas prefabricados hechos a base de paneles de EPS.

Las viviendas unifamiliares tienen una transmitancia térmica global de entre 1,82 – 2,23  $W/m^2K$ . Las viviendas plurifamiliares se encuentran entre 0,93 – 1,44  $W/m^2K$ . Las viviendas de interés social (2p) y de interés medio (2p) tienen el valor de transmitancia térmica más elevado (2,23  $W/m^2K$  y 2,14  $W/m^2K$ ). Las viviendas en torre tienen el valor de transmitancia más alto de las plurifamiliares en altura (1,42  $W/m^2K$  en promedio).

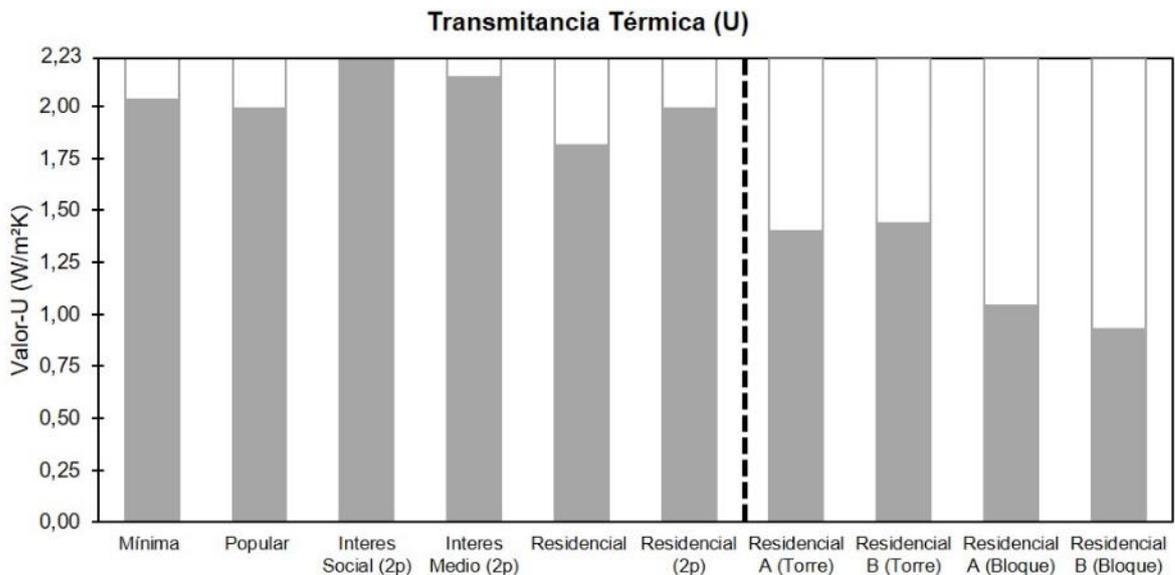


Figura 5.11. Valor de la transmitancia global de cada vivienda analizada. A la derecha: viviendas en altura.

La última característica térmica analizada es la radiación solar directa que recibe la vivienda. La cantidad recibida varía de acuerdo a la configuración de la vivienda. Para observar estas diferencias, se ha hecho un análisis con una vivienda de 100  $m^2$  (10 x 10 m) y 260  $m^3$  ( $h = 2,60$  m) en diferentes configuraciones. La **Figura 5.12** muestra estas configuraciones: vivienda unifamiliar aislada de una planta (UA-1P), vivienda unifamiliar de dos plantas (UA-2P), vivienda plurifamiliar en torre (una vivienda por planta, PL-1P) y vivienda plurifamiliar en torre (cuatro viviendas por planta, PL-1P4) (**Anexo A5.1.2**).

La vivienda UA-1P recibe la mayor cantidad de radiación directa diaria promedio por unidad de volumen habitable (2,6  $kWh/m^3$  día). Al compararla con la vivienda UA-2P, se observa que al reducir la cubierta a la mitad se disminuye 30% la radiación recibida. No obstante, para cuantificar el verdadero peso de la cubierta, en esta latitud (29N), se ha comparado la vivienda UA-1P con la vivienda en plurifamiliar PL-1P: La vivienda de la torre recibe el 25% del total de radiación directa que recibe la vivienda aislada.

El hecho de no recibir radiación en la cubierta representa una disminución del 75% de la radiación directa diaria promedio recibida.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

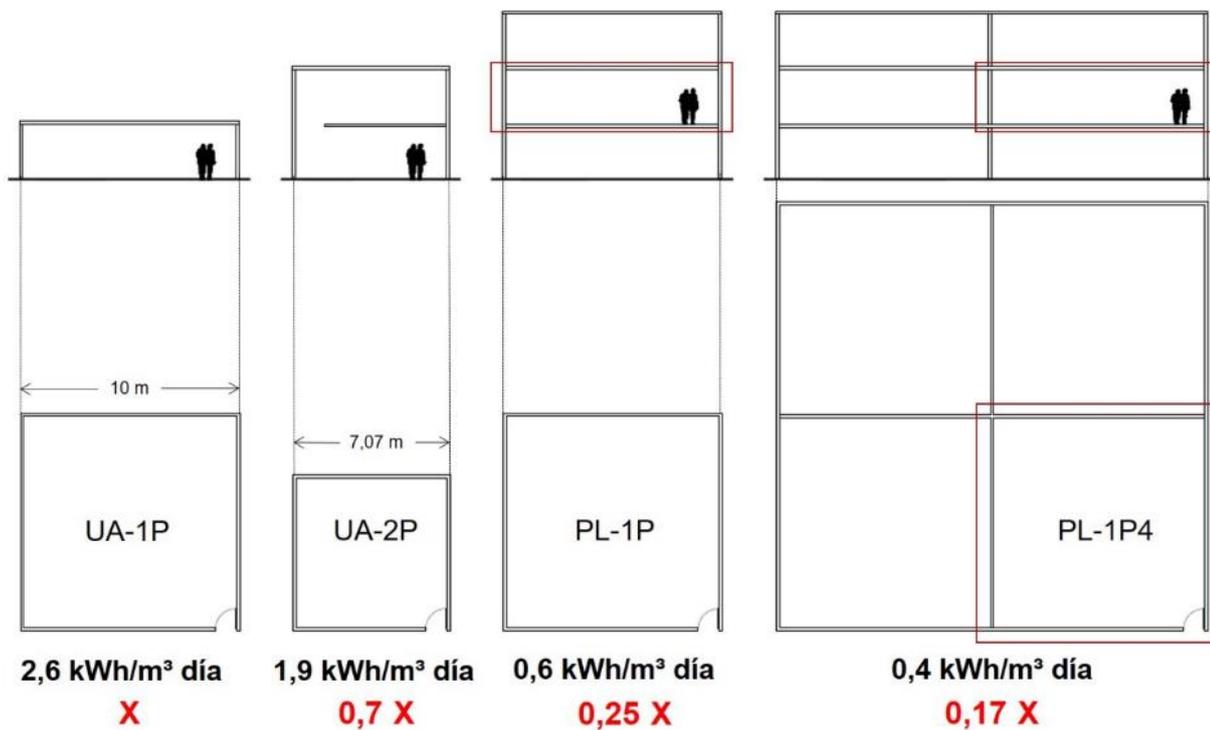


Figura 5.12. Cantidad de radiación solar directa recibida de acuerdo a distintas configuraciones de viviendas.

### 5.2.2 Distribución cartográfica de las tipologías de vivienda

Una gran parte del área urbana que ha crecido a partir de 1990 es destinada a vivienda unifamiliar. En el **Mapa 5.1** se muestra la distribución de las diferentes tipologías de vivienda (en tonos azules la unifamiliar aislada y puntos verdes la plurifamiliar en altura). La tipología de viviendas unifamiliares se encuentra dividida en las diferentes categorías analizadas (residencial, interés medio, interés social y mínima – popular). También se muestran las viviendas construidas en asentamientos irregulares o de autoconstrucción (unifamiliar irregular).

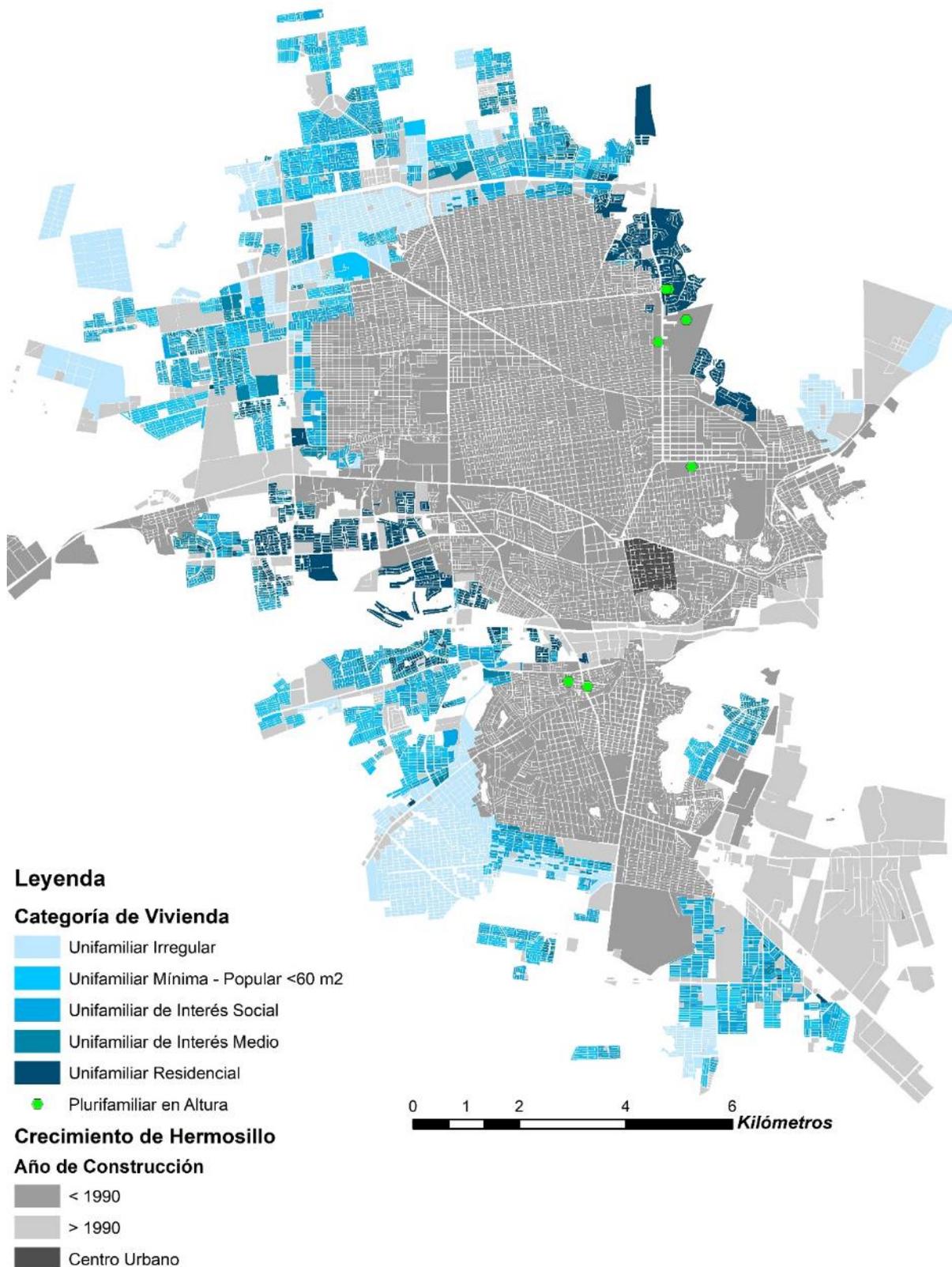
A partir de 1990 se han construido 8.847.103 m<sup>2</sup> (884, ha) destinados a vivienda unifamiliar de diferentes estratos sociales. Estos quedan repartidos de la siguiente manera:

- Residencial: 1.722.540 m<sup>2</sup> (172,2 ha) – 19,4%
- Interés Medio: 1.079.899 m<sup>2</sup> (107,9 ha) – 12,2%
- Interés Social: 3.671.662 m<sup>2</sup> (367,1 ha) – 41,5%
- Mínima – Popular: 1.551.521 m<sup>2</sup> (155,1 ha) – 17,5%
- Irregular: 821.481 m<sup>2</sup> (82,1 ha) – 9,2 %

La categoría que tiene una mayor presencia y al mismo tiempo concentra la mayor cantidad de habitantes es la de interés social (150.895 habitantes). En este aspecto, es seguida por las viviendas mínima y popular con 81.665 habitantes. La vivienda irregular tiene una población de 46.231 habitantes, las viviendas de interés medio y residencial tienen 20.920 y 21.423 habitantes.

Estas viviendas tienen una población total de 321.134 habitantes, es decir, el 40% de la población de Hermosillo (812.229 habitantes). Sin embargo, dentro de este grupo de viviendas, las destinadas a los sectores más vulnerables de la sociedad son las que concentran la mayor cantidad de habitantes. Las viviendas de interés social, popular, mínima e irregular tienen una población de 278.791 habitantes. Es decir, el 87% de la población que habita en las viviendas construidas después de 1990 es vulnerable en aspectos económicos y energéticos.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**



Mapa 5.1. Distribución de los diferentes tipos de vivienda construidos a partir de 1990 en Hermosillo.

### 5.3 COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR AISLADA

Para llevar a cabo una evaluación del comportamiento térmico de las diferentes viviendas mencionadas, se han considerado las cinco categorías: mínima, popular, interés social de dos plantas, interés medio de dos plantas y residencial de una y de dos plantas. Es decir, seis viviendas unifamiliares.

Los resultados se han obtenido a través de simulaciones energéticas realizadas durante la temporada de calor (mayo a octubre). Estas simulaciones han sido validadas a través de un trabajo de mediciones realizado en viviendas de interés social y popular en la ciudad de Hermosillo durante el mes de agosto (**Anexo A5.2.3**).

El parámetro que se ha seleccionado, para llevar a cabo la evaluación y comparación del comportamiento térmico de las viviendas, es la temperatura del aire interior. Este parámetro ha sido evaluado a manera de promedio mensual y promedio diario para cada uno de los casos analizados.

#### 5.3.1 Comportamiento térmico de la vivienda unifamiliar aislada en régimen libre

En este apartado se describe el comportamiento térmico de las viviendas en régimen libre. Este análisis tiene la finalidad de observar las diferencias que presentan viviendas entre sí en función de su configuración, p. ej., viviendas de una o dos plantas, sistema constructivo de muros (bloque de hormigón o ladrillo) (**Anexo A5.1.1, A5.2.2 y A5.3.1**).

La **Figura 5.13** muestra la temperatura media (TM) mensual del aire interior de las seis viviendas analizadas. Al describir el gráfico, las seis viviendas se agrupan en dos categorías: una planta (en tonos grises) y dos plantas (en tonos azules).

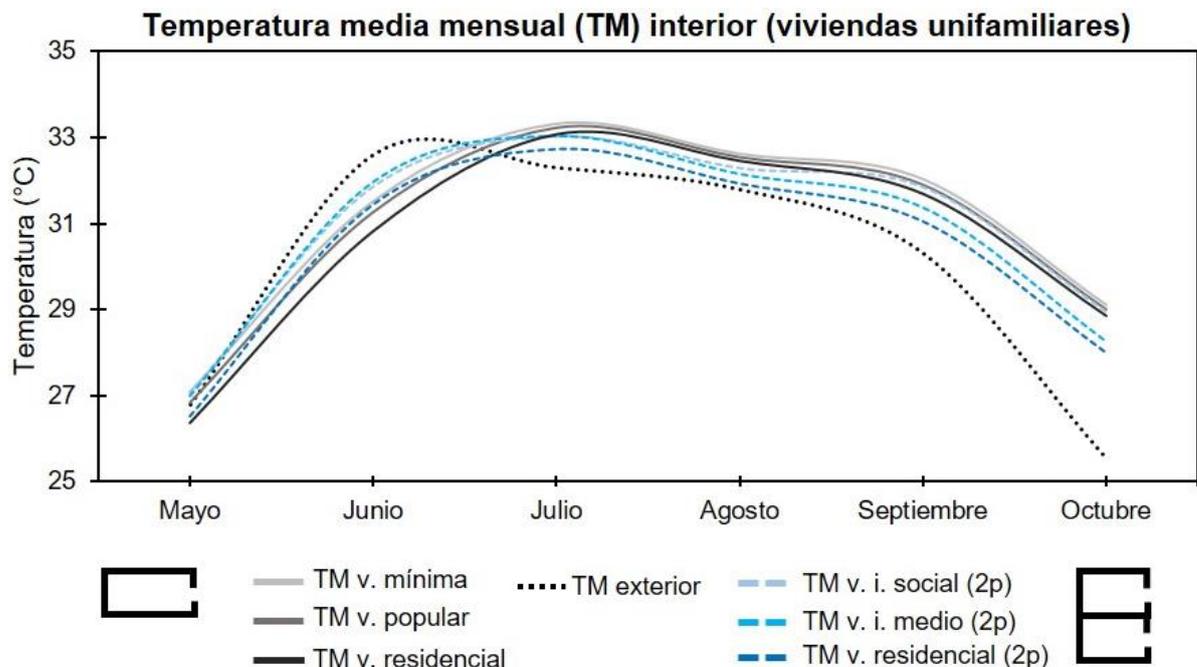


Figura 5.13. Comportamiento de la temperatura media mensual del aire interior en viviendas unifamiliares (temporada de calor).

## **PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

Como se puede ver, la temperatura del aire interior de las viviendas se mantiene en un rango de 0,5°C – 1,2°C. En consecuencia, existen momentos en los que las líneas de temperatura se acercan y tocan, y otros momentos en los que se cruzan.

Durante mayo, el grupo de viviendas de categoría residencial tienen las temperaturas medias más bajas. De hecho, tanto la vivienda residencial de una planta como de dos (2p) se encuentran por debajo de la temperatura exterior: residencial 26,4°C (-0,4°C) y residencial (2p) 26,5°C (-0,3°C). Del resto de viviendas, la vivienda mínima tiene la temperatura media mensual más elevada con 27,1°C (+0,3°C), mientras que la de menor temperatura es la vivienda popular con 26,8 (+0°C). Tanto la vivienda de interés social (2p) y como la vivienda de interés medio (2p) tienen una temperatura media de 27°C (+0,2°C). La diferencia entre la vivienda con la temperatura media más alta y la de menor es de 0,7°C.

En junio, todas las viviendas tienen una temperatura media interior por debajo de la temperatura exterior. La vivienda residencial tiene la menor temperatura, 30,8°C (-1,8°C). La de mayor temperatura interior es la vivienda de interés medio (2p) con 32°C (+0,6°C), una diferencia de 1,2°C. En promedio, tanto en mayo como en junio, las viviendas de una planta tienen una temperatura menor que las de dos plantas. Esto se debe, en parte, al intercambio de calor que sucede a través del suelo, que mantiene una temperatura inferior a la temperatura exterior (producto de la inercia térmica del terreno).

A partir de julio, se observa un cambio en la posición de las viviendas. Las viviendas de dos plantas pasan a ser las de menor temperatura: la vivienda residencial (2p) y de interés medio (2p). La vivienda de interés social (2p) alterna posición con la vivienda residencial de una planta: en julio y agosto es más fresca, en septiembre y octubre la vivienda residencial lo es.

Este cambio en las temperaturas interiores se debe a un calentamiento del terreno, que provoca una reducción en el flujo de calor de la vivienda a través del suelo. La vivienda de menor temperatura media interior es la residencial (2p) con 32,7 (+0,4°C) y la de mayor temperatura es la vivienda mínima con 33,3°C (+1), una diferencia de 0,6°C.

En agosto, la temperatura media de todas las viviendas disminuye, pero a pesar de esto, la diferencia entre la vivienda de menor temperatura interior y la de mayor temperatura se incrementa. De nueva cuenta, la vivienda residencial (2p) y mínima son las de menor y mayor temperatura con 31,9°C (+0,1°C) y 32,6°C (+0,8°C), una diferencia de 0,7°C.

En los siguientes dos meses, se mantiene un comportamiento similar de las temperaturas interiores. La vivienda mínima es la de mayor temperatura con 32°C (+1,7°C) y 29,1°C (+3,5°C), la vivienda residencial (2p) es la de menor temperatura: 31°C (+0,7°C) y 28°C (+2,4°C). Octubre es el mes en el que se producen las mayores diferencias entre la temperatura interior y la temperatura exterior (entre 2,4°C – 3,5°C). El efecto producido por la inercia térmica del terreno se ve más claro durante este mes. En este caso, la diferencia entre la temperatura del terreno y la exterior provoca que el flujo de calor sea en sentido contrario: en dirección del terreno al interior de la vivienda, por consiguiente, las viviendas de una planta se encuentran más calientes.

**REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE REFRIGERACIÓN: LA VIVIENDA EN ALTURA**

La **Figura 5.14** muestra los resultados diarios de la temperatura de aire interior ( $T.a.i$ ) de cada vivienda, en cada mes. Estos resultados brindan un panorama más detallado del comportamiento térmico de las viviendas. En los gráficos se puede observar los cambios diarios en la temperatura de aire interior promedio y la diferencia entre ésta y la temperatura exterior ( $T.ex$ ).

Como se ha dicho, junio es el mes que tiene la temperatura exterior media más elevada. Sin embargo, el mes que presenta los picos de temperatura promedio diaria más elevados es julio ( $36,1^{\circ}\text{C}$ ), seguido por junio ( $35^{\circ}\text{C}$ ) y agosto ( $34,7^{\circ}\text{C}$ ). Durante los meses de julio y agosto, es cuando las viviendas presentan las temperaturas interiores más elevadas.

Las viviendas tienen un comportamiento térmico que cambia durante la temporada de calor. Cuando el valor de la temperatura exterior se acerca al valor de la temperatura interior; las temperaturas interiores de las seis viviendas suelen acercarse entre sí. Sin embargo, cuando la temperatura exterior tiene un pico, ya sea superior o inferior a la temperatura del aire interior, las temperaturas interiores de las viviendas tienden a separarse. En este momento, es cuando se producen las mayores diferencias tanto entre las viviendas de una y dos plantas como en las viviendas de categoría residencial y el resto.

En mayo, durante 12 días, todas las viviendas llegan a presentar una  $T.a.i$  por debajo de la temperatura exterior. En la primera mitad del mes, las viviendas de dos plantas presentan valores de temperatura interior inferiores a los de las viviendas de una planta. Sin embargo, esta tendencia comienza a cambiar entre el 11 y 14 de mayo, y se mantiene con pocos cambios el resto del mes. La diferencia diaria entre la vivienda de mayor y la de menor temperatura interior se mantiene, a lo largo del mes, entre  $0,6^{\circ}\text{C}$  –  $1,4^{\circ}\text{C}$ . El pico más alto de las temperaturas interiores se da en la vivienda de interés social (2p) con  $29,2^{\circ}\text{C}$  y el pico más bajo es de  $22,6^{\circ}\text{C}$  en la vivienda residencial (2p).

La diferencia entre viviendas de una y dos plantas se incrementa durante junio. A pesar de esto, las seis viviendas tienen una temperatura interior inferior a la exterior en 22 días. La vivienda residencial tiene la menor  $T.a.i$  del mes con  $28,9^{\circ}\text{C}$ , mientras que las viviendas de interés social (2p) y de interés medio (2p) tienen la más alta con  $30^{\circ}\text{C}$ . La diferencia diaria de entre la vivienda de mayor y menor temperatura interior se mantiene entre  $0,8^{\circ}\text{C}$  –  $1,6^{\circ}\text{C}$ .

En julio se reduce la diferencia diaria entre las viviendas con la temperatura más alta y la más baja, se mantiene entre  $0,2^{\circ}\text{C}$  –  $1^{\circ}\text{C}$ . Se comienza a ver un cambio de tendencia entre las viviendas de una y dos plantas: cuando hay picos en la temperatura exterior, sobre todo por debajo del promedio mensual, las viviendas de una planta tienden a mantener una temperatura interior superior. La cantidad de días en los que todas las viviendas se encuentran por debajo de la temperatura exterior disminuye a 7. La vivienda con el pico más alto de temperatura es la vivienda mínima con  $35,5^{\circ}\text{C}$  y la del pico más bajo es la residencial (2p) con  $30,6^{\circ}\text{C}$ .

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

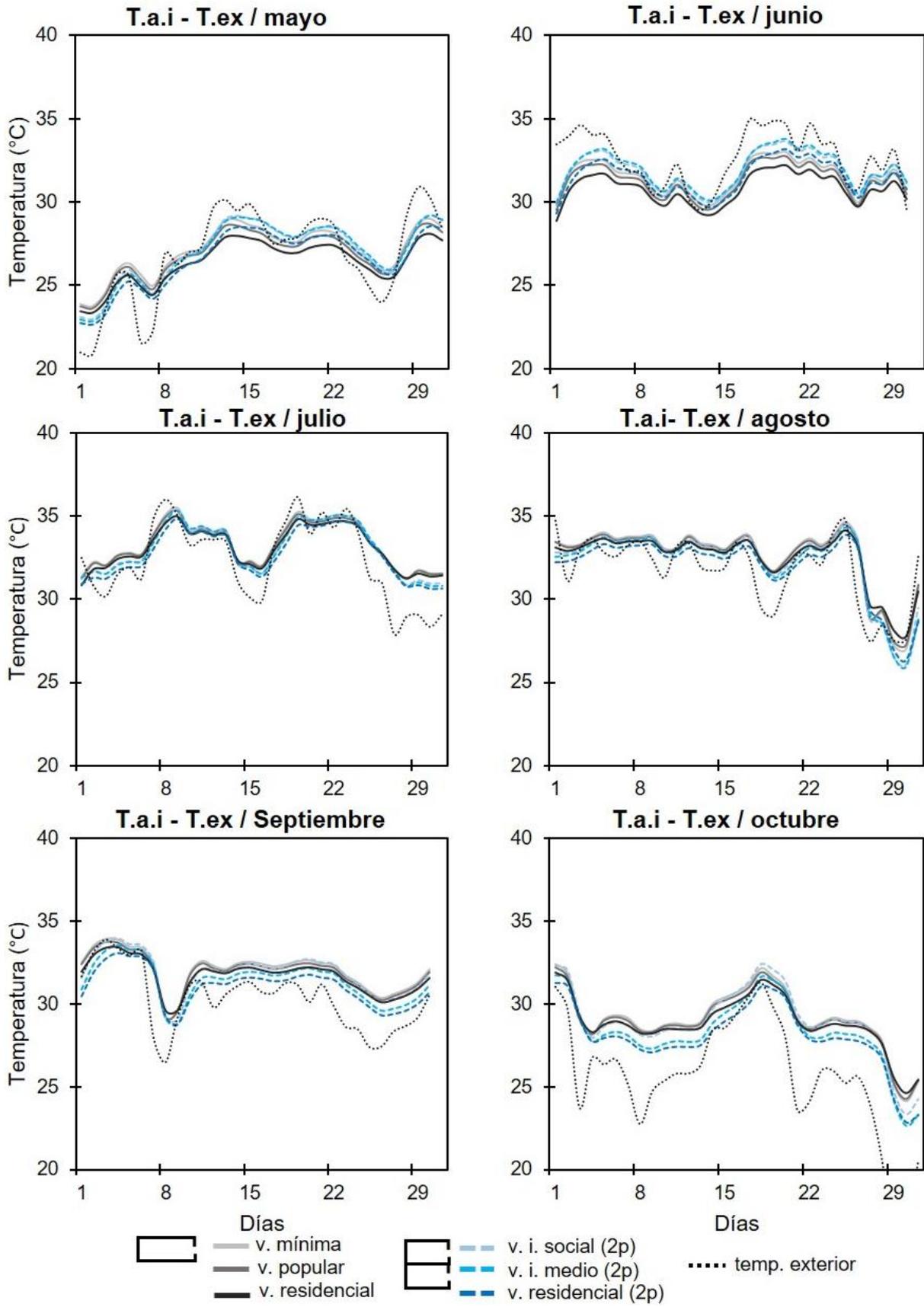


Figura 5.14. Comportamiento diario de la temperatura media del aire interior de las seis viviendas unifamiliares.

**REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE REFRIGERACIÓN: LA VIVIENDA EN ALTURA**

Durante agosto, la temperatura interior de las viviendas es menor que en julio. A pesar de esto, la temperatura interior se mantiene, de manera constante, por encima de la temperatura exterior gran parte del mes. De hecho, el grupo de viviendas se encuentra por debajo de la temperatura exterior solo durante 5 días. Esto produce un alto nivel de estrés térmico en el interior de las viviendas, mientras se comienza a ver una mayor diferencia entre viviendas de una y dos plantas.

La diferencia diaria entre la vivienda con la temperatura máxima y la vivienda con la temperatura mínima es de entre  $0,4^{\circ}\text{C}$  –  $2,2^{\circ}\text{C}$ . La vivienda mínima tiene la temperatura interior más alta, alcanza los  $35,5^{\circ}\text{C}$ , seguida por la de interés social (2p), interés medio (2p) y popular. Las viviendas residencial y residencial (2p) son las únicas que se mantienen por debajo de  $35^{\circ}\text{C}$  ( $34,9^{\circ}\text{C}$  y  $34,8^{\circ}\text{C}$ ). En cuanto a la menor temperatura interior diaria, ésta se produce en la vivienda residencial (2p) con  $30,6^{\circ}\text{C}$ .

El comportamiento térmico de las viviendas durante septiembre es similar al de agosto. No obstante, en ningún día de septiembre se logra que la temperatura interior del conjunto de viviendas se encuentre por debajo de la temperatura exterior. La vivienda residencial (2p) lo está por 9 días, la de interés social (2p) e interés medio (2p) 5 días, la residencial en 3 días y la popular en 1 día. La diferencia diaria entre los casos extremos se encuentra entre  $0,5^{\circ}\text{C}$  –  $2^{\circ}\text{C}$ . El valor diario de la temperatura interior más alto es el de las viviendas mínima y de interés social (2p) con  $33,9^{\circ}\text{C}$ . El menor valor es el de la vivienda de interés medio (2p) con  $28,7^{\circ}\text{C}$ .

Octubre es el mes que presenta las temperaturas exteriores más bajas, a pesar de esto, en cuanto a la temperatura de aire interior, se encuentra por detrás de mayo. Debido tanto a la inercia del terreno como de la vivienda, durante octubre, la temperatura del aire promedio en la mayoría de las viviendas se mantiene por encima de la temperatura exterior. La vivienda residencial de dos plantas constituye la única excepción a esta tendencia, permaneciendo durante cuatro días más fresca que el ambiente exterior.

La diferencia diaria entre la vivienda de menor y la de mayor temperatura interior es de entre  $0,3^{\circ}\text{C}$  –  $2,2^{\circ}\text{C}$ . Las viviendas de dos plantas, residencial (2p) y de interés medio (2p) son las únicas que llegan a bajar de los  $23^{\circ}\text{C}$  ( $22,8^{\circ}\text{C}$  y  $22,6^{\circ}\text{C}$ ). La vivienda mínima y la de interés social (2p) tienen el valor diario de temperatura interior más alto ( $32,4^{\circ}\text{C}$ ).

Para profundizar en el análisis del comportamiento de la temperatura interior de las viviendas, se han tomado los meses de julio y agosto, los meses más críticos. En éstos meses se alcanzan las temperaturas interiores más altas de la temporada de calor. La **Figura 5.15** muestra y compara, con mayor detalle, el comportamiento térmico de las viviendas analizadas.

Este gráfico representa los rangos en los que se mueven las temperaturas interiores, graficando simultáneamente la temperatura media (TM), temperatura media máxima (TMM) y temperatura media mínima (TMm) de cada vivienda.

Como se ha dicho, durante julio existe una diferencia de  $0,6^{\circ}\text{C}$  entre la temperatura media de la vivienda mínima y de la vivienda residencial (2p). Dicho de otra manera, todas las viviendas se encuentran dentro de este margen. A pesar de esto, al observar los rangos en los que se

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
 LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

mueve la temperatura media, es cuando se puede ver, de manera más clara, las diferencias entre las viviendas.

La amplitud de los rangos de cada vivienda son los siguientes: vivienda mínima 3,2°C (+1,6°C, -1,6°C); vivienda popular 3,3°C (+1,6°C, -1,7°C); vivienda de interés social (2p) 2,9°C (+1,4°C, -1,5°C); vivienda de interés medio (2p) 2,6°C (+1,2°C, -1,4°C); vivienda residencial 3,0°C (+1,4°C; -1,6°C) y vivienda residencial (2p) 2,4°C (+1,1°C, -1,3°C).

En agosto, la temperatura media interior de las viviendas disminuye, no obstante, se produce un incremento en los rangos de temperatura de todas las viviendas: vivienda mínima 3,3°C (+1,6°C, -1,7°C); vivienda popular 3,5°C (+1,7°C, -1,8°C); vivienda interés social (2p) 3,1°C (+1,5°C, -1,6°C); vivienda interés medio (2p) 2,7°C (+1,3°C, -1,4°C); vivienda residencial 3,1°C (+1,5°C, -1,6°C) y vivienda residencial (2p) 2,4°C (+1,1°C, -1,3°C).

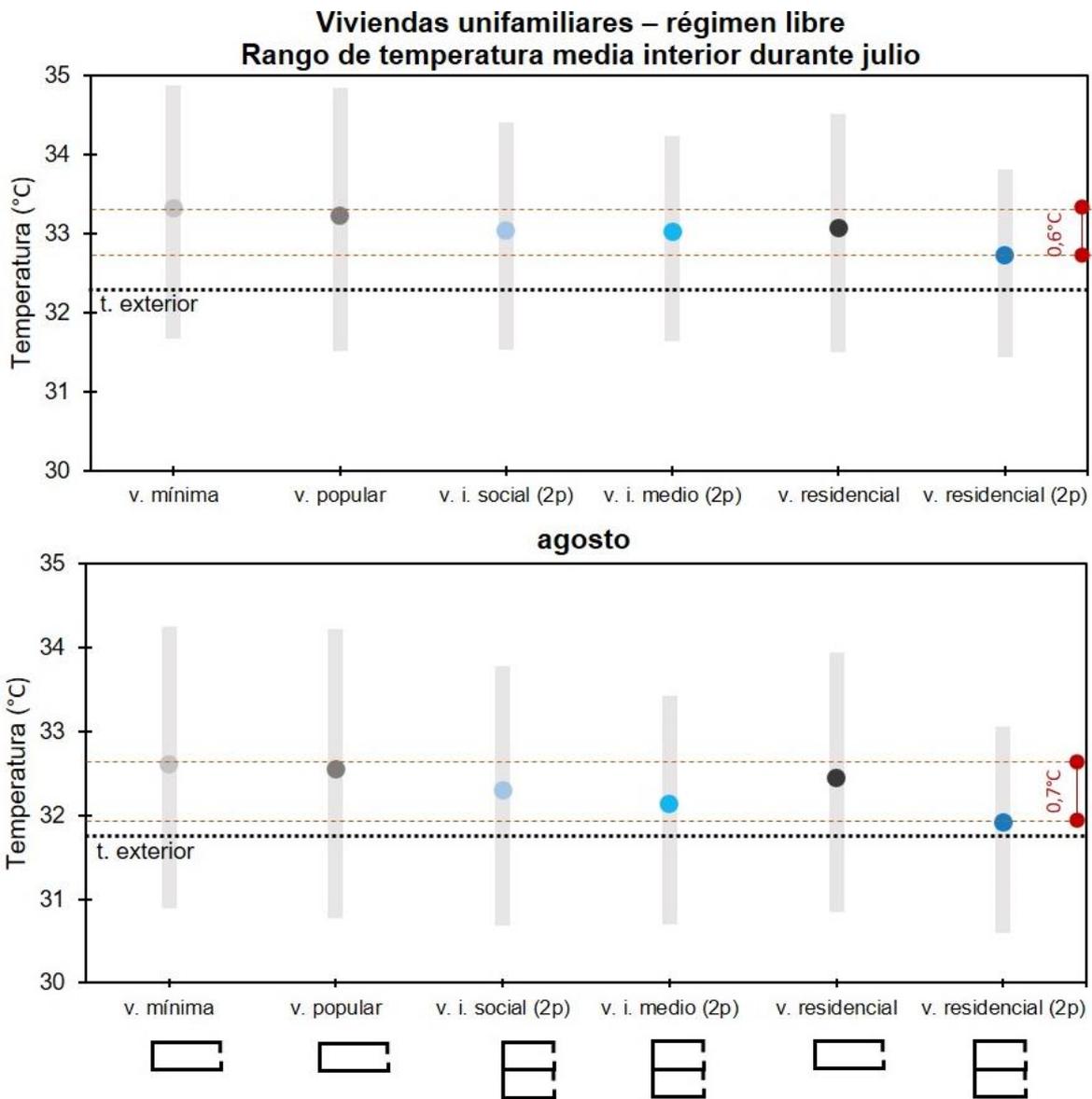


Figura 5.15. Rangos de temperatura media interior de las viviendas durante julio y agosto.

**REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE REFRIGERACIÓN: LA VIVIENDA EN ALTURA**

De estos gráficos se pueden extraer varias conclusiones:

- Durante los meses más cálidos, las viviendas de una planta tienen la temperatura media más elevada (respecto a las viviendas de dos plantas).
- Las viviendas de una planta tienen rangos de temperatura mayores. Tienen el mayor aumento de temperatura media interior, pero, a la vez, son las que tienden a reducirla más. En algunos casos se sitúan debajo de viviendas de dos plantas, p. ej. en julio.
- Las viviendas de dos plantas tienen un rango de temperatura media menor: se calientan menos, pero se enfrían menos.
- La vivienda mínima y la vivienda popular tienen los rangos de temperatura media más amplios. Son las viviendas que alcanzan las temperaturas más elevadas. Sin embargo, en ningún momento son las viviendas con la menor temperatura media mínima.

### **5.3.2 Comportamiento de la demanda de refrigeración en la vivienda unifamiliar aislada**

En este apartado se muestran los resultados de las simulaciones llevadas a cabo para obtener la demanda de refrigeración de las viviendas unifamiliares aisladas. El periodo considerado para las simulaciones es la temporada de calor (mayo – octubre). Durante esta temporada, CFE (Comisión Federal de Electricidad) activa la denominada “tarifa de verano”, que reduce el costo de la energía eléctrica domiciliar, la cual aumenta de manera considerable durante esta temporada en regiones con un clima como el de Hermosillo.

Los parámetros base utilizados para las simulaciones de demanda energética (la ocupación, horarios, materiales constructivos) son los mismos utilizados en las simulaciones en régimen libre (**Anexo A5.2.2**). En cuanto a los parámetros exclusivos de la simulación de la demanda de refrigeración, se ha establecido la temperatura de consigna en 26°C. Para asignar esta temperatura se ha tomado en cuenta la temperatura neutral para condiciones de confort interior en un clima como el de Hermosillo: 32,2°C  $\pm$ 2,5°C en verano y 26,9°C  $\pm$ 2,9°C en invierno (en un rango restringido), estos valores aumentan cuando se habla de un rango expandido: 32,2°C  $\pm$ 4,9°C para verano y 26,9°C  $\pm$ 5,8°C durante el invierno (Marincic et al., 2012).

En la **Figura 5.16** se muestran los resultados de la demanda mensual de las viviendas. Los resultados muestran la cantidad total de energía necesaria por mes en términos absolutos (kWh/mes) y por unidad de volumen habitable (kWh/m<sup>3</sup>/mes). Este último valor es útil para hacer una comparación adecuada entre las viviendas. Los resultados diarios se detallan en **Anexo A5.3.2**.

En el gráfico se observa cómo la demanda total **en mayo** (kWh/mes) tiene un comportamiento de acuerdo a la temperatura interior de las viviendas. Si las viviendas son separadas en dos grupos en función de su estrato social (residenciales y el resto), se observa que en ambos grupos las viviendas de dos plantas tienen la mayor demanda. La vivienda mínima es la excepción, es la vivienda que se calienta más, pero al ser un 50% más pequeña que la vivienda de interés social (2p), tiene la menor demanda durante toda la temporada. La vivienda con la mayor demanda en mayo, es la de interés medio (2p) con 226 kWh/mes.

**Durante junio** este comportamiento se mantiene: las viviendas de dos plantas de cada grupo se mantienen como las de mayor demanda energética. La demanda aumenta entre 3,4 – 4 veces en el primer grupo, mientras que, en las viviendas residenciales la demanda aumenta entre 4,7 – 5 veces con respecto a la demanda en mayo. La vivienda residencial (2p) es la de mayor demanda con 1.061,18 kWh/mes, seguida por la residencial (977 kWh/mes), interés medio (2p) (903,1 kWh/mes), interés social (2p) (670,3 kWh/mes).

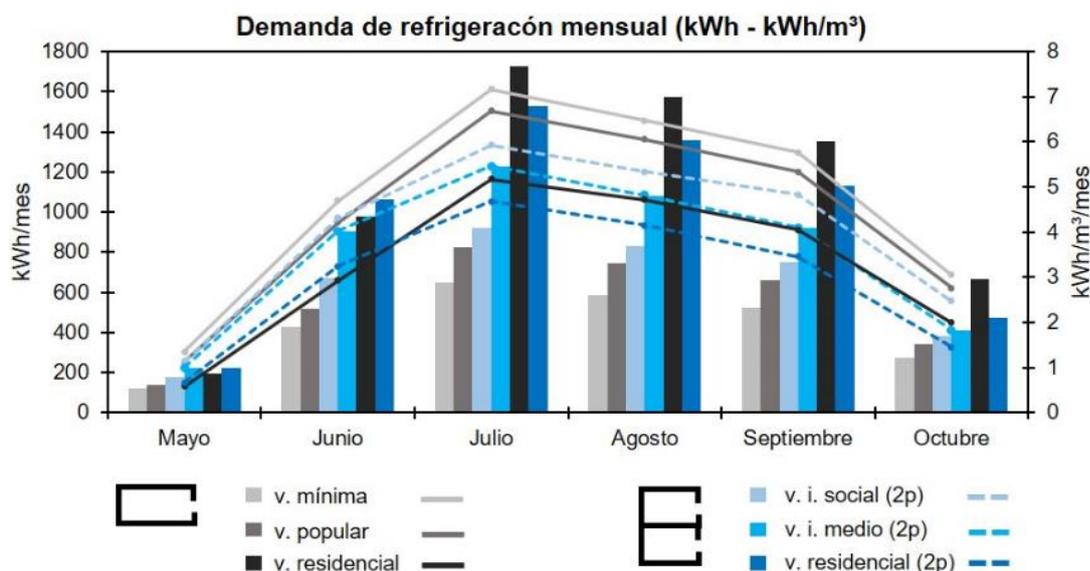


Figura 5.16. Demanda mensual de refrigeración de las viviendas durante la temporada de calor.

**A partir de julio** se produce un cambio entre las viviendas de categoría residencial: la vivienda residencial de una planta se convierte en la de mayor demanda (1724,7 kWh/mes), mientras que la residencial (2p) tiene una demanda mensual de 1530.5 kWh/mes. Dentro del otro grupo de viviendas, las de dos plantas se mantienen como las que tienen la mayor demanda mensual: la vivienda de interés medio (2p) y la de interés social (2p) con 1.225,8 kWh/mes y 921,8 kWh/mes respectivamente. La vivienda mínima tiene demanda de 651,7 kWh/mes y la popular una de 852,8 kWh/mes. Julio es el mes con la mayor demanda de refrigeración, la demanda de las viviendas aumenta entre 1,3 – 1,8 veces con respecto a junio.

**En el resto de la temporada de calor**, la vivienda residencial se mantiene como la de mayor demanda energética: 3.596,2 kWh (agosto 1576,1 kWh/mes, septiembre 1.351,9 kWh/mes, octubre 668,1 kWh/mes). Es seguida por la vivienda residencial (2p): 2.966,4 kWh (-18%) (agosto 1.358,50 kWh/mes, septiembre 1.132,2 kWh/mes, octubre 475,7 kWh/mes).

En el segundo grupo de viviendas, la de interés medio es la de mayor demanda: 2.410,4 kWh (agosto 1.080,3 kWh/mes, septiembre 919,2 kWh/mes y octubre 410,9 kWh/mes). Le sigue la vivienda de interés social (2p) con 1.968 kWh (agosto 830,5 kWh/mes, septiembre 752,4 kWh/mes y octubre 385,1 kWh/mes). La demanda de la vivienda popular es de 1.748,2 kWh (agosto 747,4 kWh/mes, septiembre 658,6 kWh/mes y octubre 342,2 kWh/mes), mientras que para la vivienda mínima se necesita de 1.389,6 kWh (agosto 588,2 kWh/mes, septiembre 524,1 kWh/mes y octubre 277,3 kWh/mes).

**REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE REFRIGERACIÓN: LA VIVIENDA EN ALTURA**

Estos resultados son útiles para obtener el costo económico que representa el uso de refrigeración en las distintas viviendas. Sin embargo, resulta difícil compararlos entre sí al tratarse de viviendas de diferentes tamaños, por lo que esta comparación podría resultar poco fiable. El relacionar la demanda (kWh/mes) con la unidad de volumen habitable ( $m^3$ ) resulta un enfoque más adecuado para llevar a cabo una comparación.

En la misma **Figura 5.16** se observa cómo al utilizar este indicativo (kWh/ $m^3$ /mes), la vivienda mínima es la que requiere de más energía por unidad de volumen habitable ( $m^3$ ) durante todos los meses de la temporada de calor, mientras que es la vivienda que tiene el menor consumo total (kWh/mes). En contraparte, las viviendas residenciales, de una y dos plantas, son las que tienen los mayores consumos totales, sin embargo, son las que necesitan una menor cantidad de energía por unidad de volumen habitable ( $m^3$ ).

La **Figura 5.17** resume estos resultados. El primer gráfico muestra la demanda total de refrigeración (kWh/año) de toda la temporada de calor por cada una de las viviendas. En este gráfico se puede ver como la demanda aumenta de acuerdo a que sube la categoría de la vivienda, por lo tanto, su tamaño:

- **Vivienda mínima: 2.591,4 kWh/año**
- Vivienda popular: 3.234 kWh/año
- Vivienda de interés social (2p): 3.737,5 kWh/año
- Vivienda de interés medio (2p): 4.765,3 kWh/año
- **Vivienda residencial: 6.495,2 kWh/año**
- Vivienda residencial (2p): 5.780 kWh/año

En el caso de las viviendas residenciales, tiene mayor peso la diferencia entre una y dos plantas. Al reducir la superficie de contacto con el suelo, la vivienda de dos plantas tiene una menor demanda energética.

El segundo gráfico muestra la demanda de refrigeración por unidad de volumen habitable de cada vivienda para toda la temporada (kWh/ $m^3$ /año). En este gráfico se puede ver como las viviendas destinadas a los sectores económicamente más vulnerables, son las que tienen una mayor demanda para mantener refrigerado 1  $m^3$ .

- **Vivienda mínima: 28,5 kWh/ $m^3$ /año**
- Vivienda popular: 26,2 kWh/ $m^3$ /año
- Vivienda de interés social (2p): 24 kWh/ $m^3$ /año
- Vivienda de interés medio (2p): 21,3 kWh/ $m^3$ /año
- Vivienda residencial: 19,5 kWh/ $m^3$ /año
- **Vivienda residencial (2p): 17,7 kWh/ $m^3$ /año**

Esto quiere decir, que por cada  $m^3$ , una vivienda mínima requiere de 1,6 veces más energía para refrigerar y mantener la misma temperatura interior que una vivienda residencial de dos plantas (volumen habitable: 102,3  $m^3$  - 389  $m^3$ , respectivamente).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

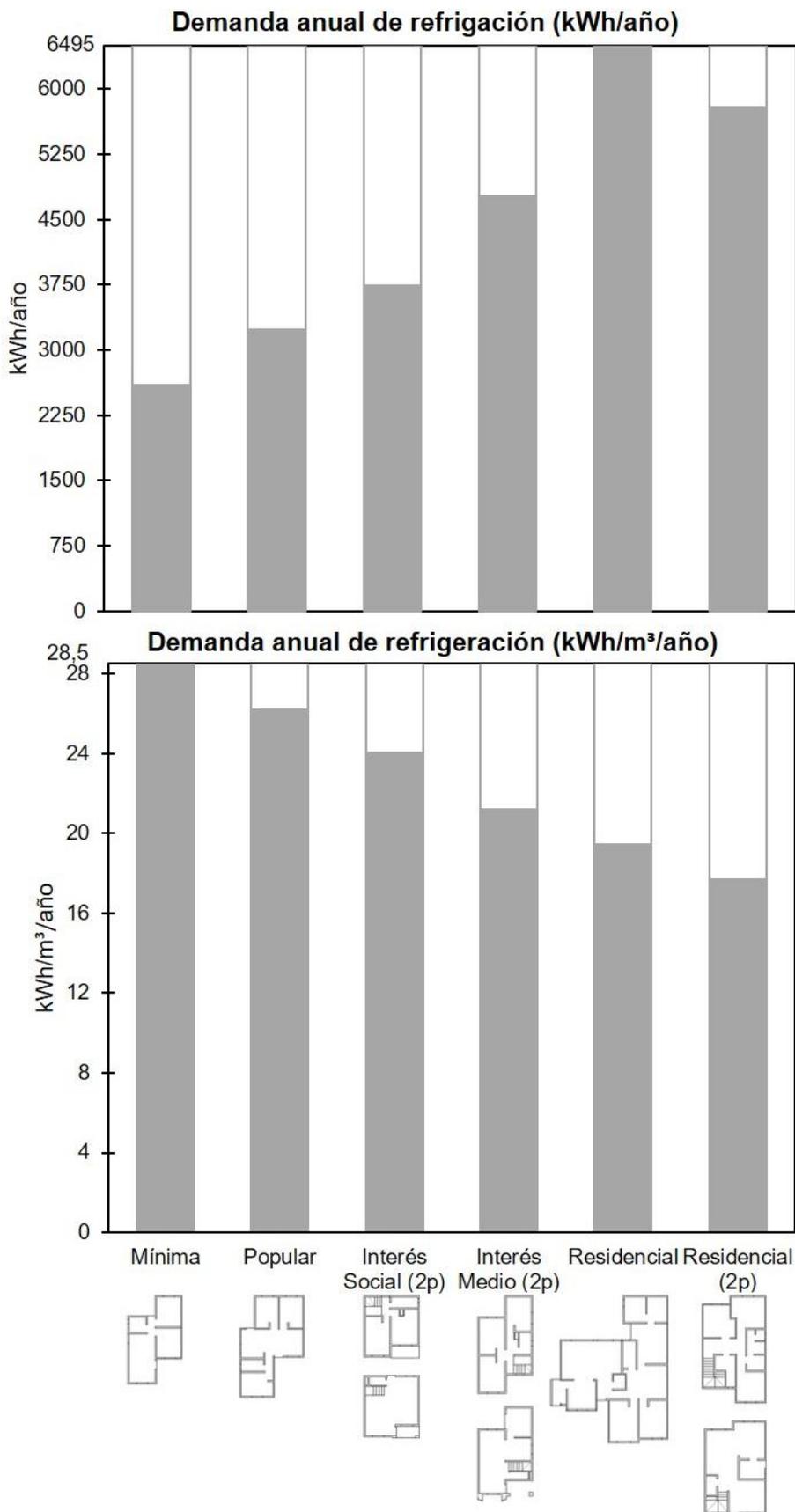


Figura 5.17. Demanda de refrigeración anual de las viviendas unifamiliares. Arriba: kWh/año; Abajo: kWh/m³/año.

### 5.3.3 Distribución de las tipologías de vivienda por demanda energética de refrigeración

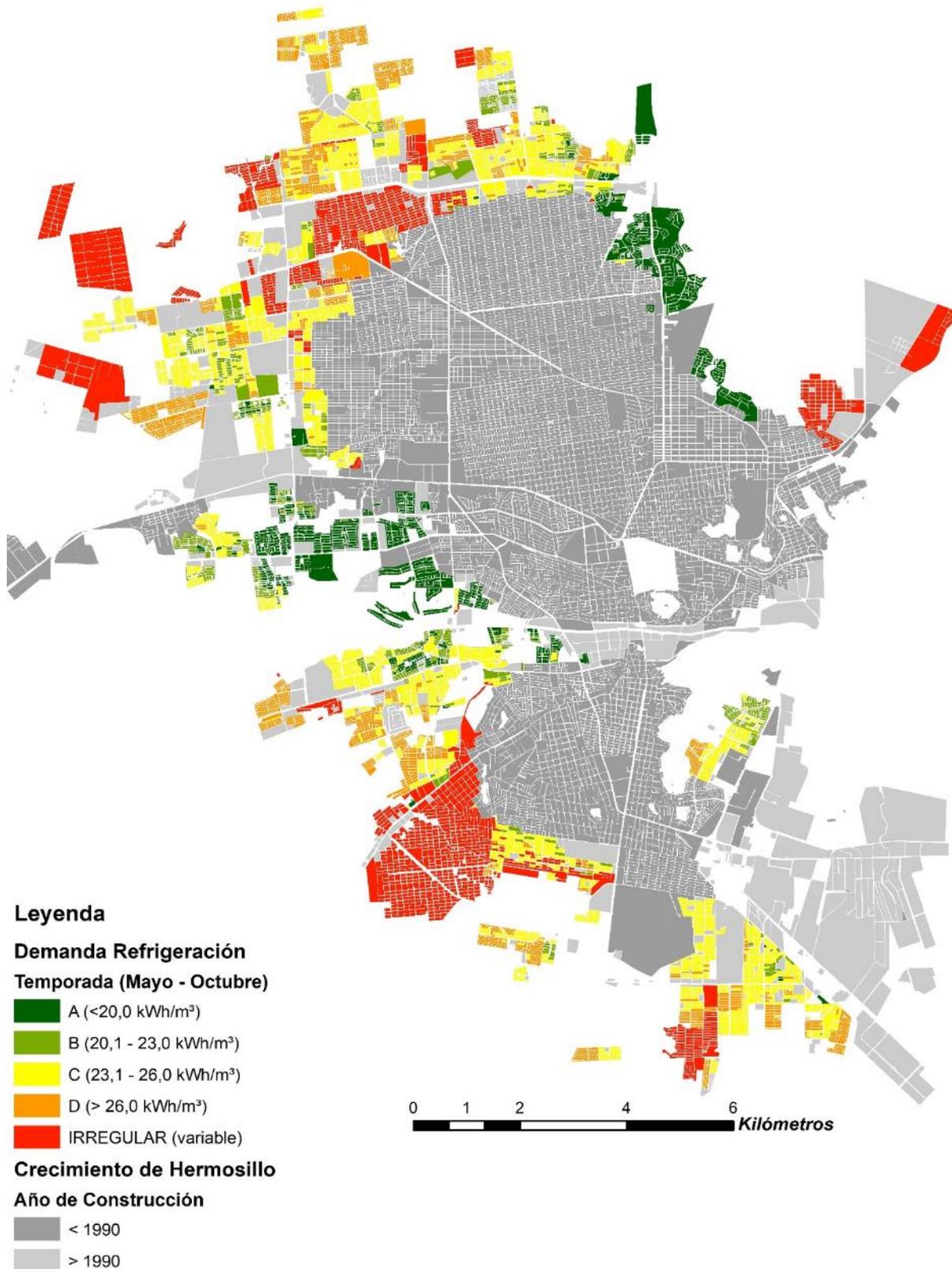
En este apartado se presenta de manera gráfica, una escala de calificación de la demanda de refrigeración de las distintas viviendas unifamiliares aisladas, construidas en Hermosillo a partir de 1990. Esta escala consta de cinco calificaciones y se ha elaborado a partir de los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para la temporada de calor (mayo – octubre). La escala queda de la siguiente manera:

- Calificación A (demanda menor a 20 kWh/m<sup>3</sup>/año). De todo el parque de viviendas analizadas, son las de menor demanda. En esta calificación se incluyen las viviendas residenciales.
- Calificación B (demanda entre 20,1 – 23 kWh/m<sup>3</sup>/año). Dentro de esta calificación se encuentran las viviendas de interés medio.
- Calificación C (demanda entre 23,1 – 26 kWh/m<sup>3</sup>/año). En esta calificación se encuentran las viviendas de interés social.
- Calificación D (demanda superior a 26 kWh/m<sup>3</sup>/año). En esta calificación es para las viviendas con la mayor demanda de refrigeración. Dentro de ella se encuentran las viviendas mínima y popular.
- IRREGULAR (demanda variable). Se incluye al resto de viviendas que no se encuentran dentro de las cinco categorías analizadas. Son viviendas de autoconstrucción, en las cuales los materiales de construcción varían tanto de una vivienda a otra como en la misma vivienda, el tamaño de las viviendas es altamente variado. Por lo general, son viviendas que se han construido en invasiones y que, en algunos casos, carecen de conexión legal a la red municipal de electricidad. Por estos motivos, estas viviendas han sido excluidas del análisis.

Esto significa que alrededor de 150.000 habitantes tienen una vivienda con una calificación C y cerca de 82.000 con una calificación D. Estos habitantes representan el 72% de la población de viviendas construidas después de 1990. Una población que es vulnerable económicamente.

El **Mapa 5.2** muestra la distribución de las viviendas evaluadas. Cada color representa una de las calificaciones dentro de la escala de demanda de refrigeración. Como se puede ver, los colores que más abundan son el amarillo y naranja (calificación C y D). Al tratarse de un mapa de manzanas, el color rojo sobresale, sin embargo, en cantidad de metros cuadrados de vivienda, es inferior al resto de categorías (p.186).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**



Mapa 5.2. Distribución de los diferentes tipos de vivienda construidos a partir de 1990 en Hermosillo según su calificación de demanda de refrigeración.

### 5.3.4 Mejora térmica de una vivienda unifamiliar popular de una planta

La vivienda popular es, junto con la vivienda mínima, irregular y de interés social, el grupo de viviendas con mayor presencia en Hermosillo. Tal y como se ha mencionado, este grupo concentra el 87% de la población en viviendas construidas después de 1990. Una gran parte de esta población vive con ingresos inferiores a tres salarios mínimos (Enríquez Acosta & Bernal Salazar, 2013; H. Ayuntamiento de Hermosillo, 2018), por lo que es considerada como población vulnerable económica y energéticamente.

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta esta población es el alto coste que supone el uso de refrigeración en sus viviendas. En numerosos casos, los hogares no pueden permitirse el uso de estos sistemas de acondicionamiento, por lo que es del interés de esta tesis proponer soluciones arquitectónicas que resulten eficientes y económicas para este tipo de hogares.

Normalmente, cuando se intenta mejorar el confort térmico en un edificio, lo primero que viene a la mente es «mejorar» su envolvente mediante el uso de aislamiento térmico. Sin embargo, el uso de esta estrategia en un clima como el de Hermosillo, no es la mejor opción en viviendas que no cuentan con refrigeración.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de simulaciones del comportamiento energético de una vivienda popular. Se ha comparado el comportamiento térmico de la vivienda, durante la temporada de calor, al utilizar diferentes niveles de aislamiento térmico en la envolvente y el uso de protecciones solar en las ventanas.

El estudio se ha llevado a cabo en cuatro diferentes casos: en el primero, se ha simulado la vivienda en estado actual, es decir, solamente tiene aislamiento térmico en la cubierta (caso A). En caso B, se han modificado las características de la envolvente, agregando aislamiento en sus planos verticales (cubierta + muros + ventanas). El caso C es el que presenta el mayor nivel de aislamiento térmico (cubierta + muros + ventanas + suelo). El caso D, solamente considera el añadir protección solar en las ventanas a la vivienda en su estado actual (cubierta + protección solar) (**Anexo A5.3.3**).

La geometría, materiales, orientación y la distribución arquitectónica del modelo son la tipología predominante. El modelo base tiene muros de bloque de hormigón hueco ( $U=2,54$  W/m<sup>2</sup>K). La cubierta es de vigueta y bovedilla de EPS con una capa de compresión de hormigón reforzado ( $U=0,25$  W/m<sup>2</sup>K). La vivienda suele tener una altura interior de 2,5 m. El color de la cubierta es blanco, y el de los muros, un color en tono claro (**Anexo 5.2.2**).

El material más utilizado en las ventanas es un cristal simple de 4 mm ( $U=5,8$  W/m<sup>2</sup>K) y carpintería a base de aluminio natural. Estas características hacen de las ventanas un importante punto de intercambio energético entre el interior y el exterior de la vivienda, sobre todo de radiación solar directa.

El modelo está localizado en una parcela de 8 x 14 m, 112 m<sup>2</sup>, la distancia de separación entre viviendas es de 0,9 m. Normalmente, todas las viviendas tienen una cochera y patio trasero. La falta de vegetación en este tipo de desarrollos habitacionales es común (**Figura 5.18**).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**



Figura 5.18. A la izquierda: cubiertas blancas. A la derecha: imagen de la vivienda popular, colores claros.  
Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

En la

**Figura 5.19** se muestran los resultados de los cuatro casos simulados. Se encuentran representada la temperatura media mensual (TM) interior a lo largo de la temporada de calor. En este gráfico se puede ver que, durante los meses de mayo y junio, el caso B (cubierta + muros + ventanas) tiene la menor temperatura media (25,9°C y 29,7°C). Sin embargo, durante julio, los casos B y D (cubierta + protección solar) tienen la misma temperatura media (32,8°C). El resto de la temporada de calor (agosto, septiembre y octubre), el caso D tiene la menor temperatura media (32,1°C, 31,4°C y 28,4°C).

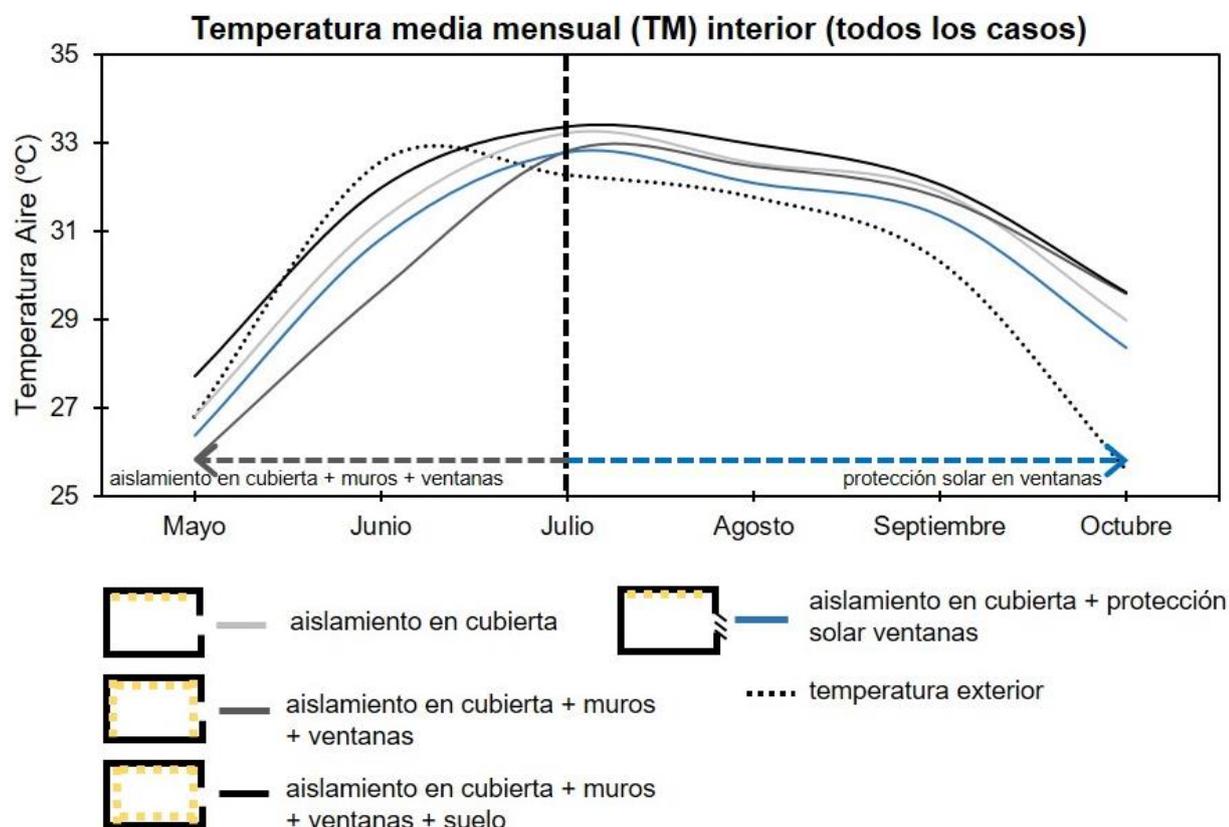


Figura 5.19. Comportamiento de la temperatura media mensual interior en los diferentes casos analizados.

**REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE REFRIGERACIÓN: LA VIVIENDA EN ALTURA**

Durante toda la temporada de calor, el caso C (cubierta + muros + ventanas + suelo) es el que tiene las temperaturas medias más altas (mayo: 27,7°C, junio: 32°C, julio: 33,4°C, agosto: 33°C, septiembre: 32,1°C). En octubre comparte posición con el caso B, llegando a los 29,6°C. El caso A (cubierta) siempre se encuentra por debajo del caso C (mayo: 26,8°C, junio: 31,3°C, julio: 33,2°C, agosto: 32,5°C, septiembre: 31,9°C y en octubre: 29°C).

La **Figura 5.20** muestra los gráficos con las temperaturas medias diarias correspondientes a cada uno de los meses de la temporada de calor, aportando detalles que son difíciles de observar con promedios mensuales. Por ejemplo, al comienzo de mayo, las temperaturas del aire interior (*T.a.i*) de los diferentes casos se encuentran todas en un rango de 1,3°C. Sin embargo, este rango llega a ser de hasta 2,5°C conforme avanza el mes (diferencia entre caso B y C). Los casos A y D se mantienen con una diferencia constante de alrededor de medio grado. Los casos A, B y D se encuentran la mayor parte de los días por debajo de la temperatura exterior (17, 23 y 20 días); el caso C solo lo está por 8 días.

Durante junio hay un comportamiento térmico similar, la diferencia entre los casos B y C continua y se incrementa alrededor de 3°C. La diferencia entre los casos A y D se mantiene alrededor de medio grado. A diferencia de lo que sucede en mayo, durante junio la temperatura interior diaria de los cuatro casos se mantiene por debajo de la temperatura exterior durante la mayor parte del mes: el caso A por 27 días, el caso B 30 días, el caso C 29 días y el caso D por 19 días.

En julio, los valores de la temperatura del aire interior de los cuatro casos se mantienen en un rango máximo de 1,5°C. Durante este mes, los casos B y D presentan un comportamiento térmico similar. El caso D alcanza temperaturas interiores superiores a las del caso B (34,9°C – 34,1°C), pero en promedio tiene una temperatura más baja. En este mes el caso A se encuentra por debajo de la temperatura exterior en 8 días, el caso B en 15, el caso C en 8 y el caso D en 10 días.

En agosto, los días con temperaturas interiores por debajo de las exteriores se reducen en los casos con mayor nivel de aislamiento: El caso B baja a 12, mientras que el caso C a 5 días. En el caso A se mantiene por debajo de la temperatura exterior en 8 días y el caso D por 14 días. Los casos A y D presentan las *T.a.i* diarias más bajas, mientras que el caso B es el que eleva menos su temperatura interior.

Durante los siguientes dos meses, el caso D se mantiene como el que presenta las menores temperaturas interiores, con excepción de la primera semana de septiembre. En septiembre se reduce la cantidad de días con temperaturas interiores inferiores a las exteriores: en el caso A 1 día; caso B 5 días; caso C 4 días y caso D en 6 días. En octubre, solamente el caso D logra tener un día con una temperatura interior menor a la exterior.

Estos resultados nos permiten ver cómo el caso A y el caso D (ambos con el mismo nivel de aislamiento, en cubierta) tienen el mismo comportamiento térmico durante toda la temporada de calor, y mantienen una diferencia de temperatura interior promedio diaria que no llegó a 1°C.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

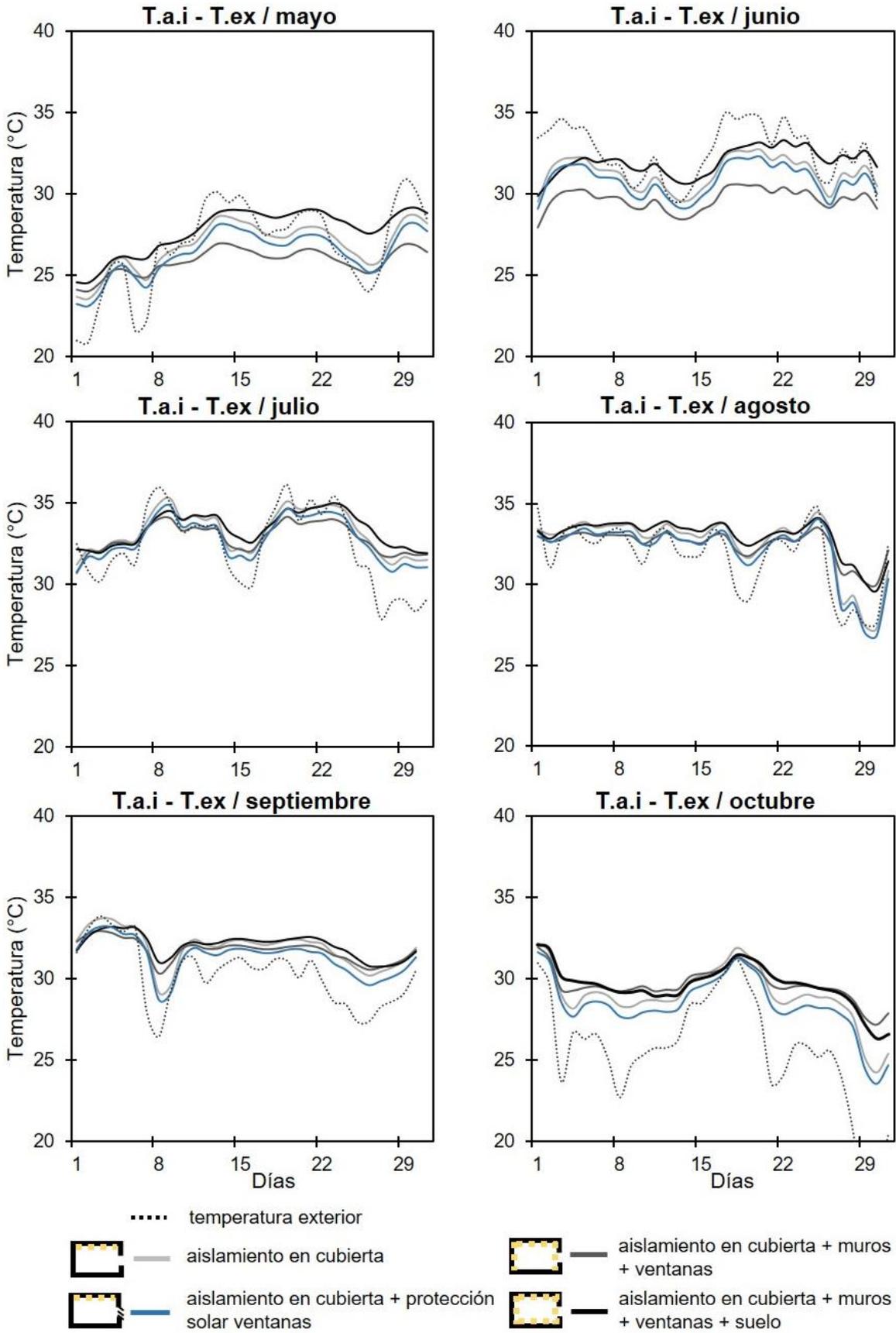


Figura 5.20. Comportamiento diario de la temperatura del aire interior en los diferentes casos analizados

## REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE REFRIGERACIÓN: LA VIVIENDA EN ALTURA

La **Figura 5.21** permite ver con más detalle el comportamiento térmico de los distintos casos durante el mes de agosto, cuando el caso D (cubierta + protección solar) tiene las menores temperaturas. Para poder ver la efectividad del aislamiento térmico y de la protección solar y el cómo afectan la temperatura interior de la vivienda, se ha optado por mostrar el rango en el que se desplaza el valor de la temperatura media interior.

El utilizar este gráfico permite ver más allá de la temperatura media (TM), ya que se han incluido la temperatura media máxima (TMM) y la temperatura media mínima (Tm) del mes de agosto, un mes que presenta temperaturas interiores muy cálidas y constantes.

El caso D tiene la menor TM con  $32,1^{\circ}\text{C}$ , existe una diferencia de  $0,9^{\circ}$  con el caso C ( $33^{\circ}\text{C}$ ). Por lo tanto, dentro de este rango inferior a un grado, se encuentran los casos A y B. Los rangos de temperatura son los siguientes: para el caso A es de  $3,5^{\circ}\text{C}$  ( $+1,7$ ,  $-1,8$ ), el rango del caso B es  $3,1^{\circ}\text{C}$  ( $+1,5$ ,  $-1,6$ ), para el caso C es  $3,2^{\circ}\text{C}$  ( $+1,5$ ,  $-1,7$ ) y el caso D tiene un rango de  $3^{\circ}\text{C}$  ( $+1,5$ ,  $-1,5$ ).

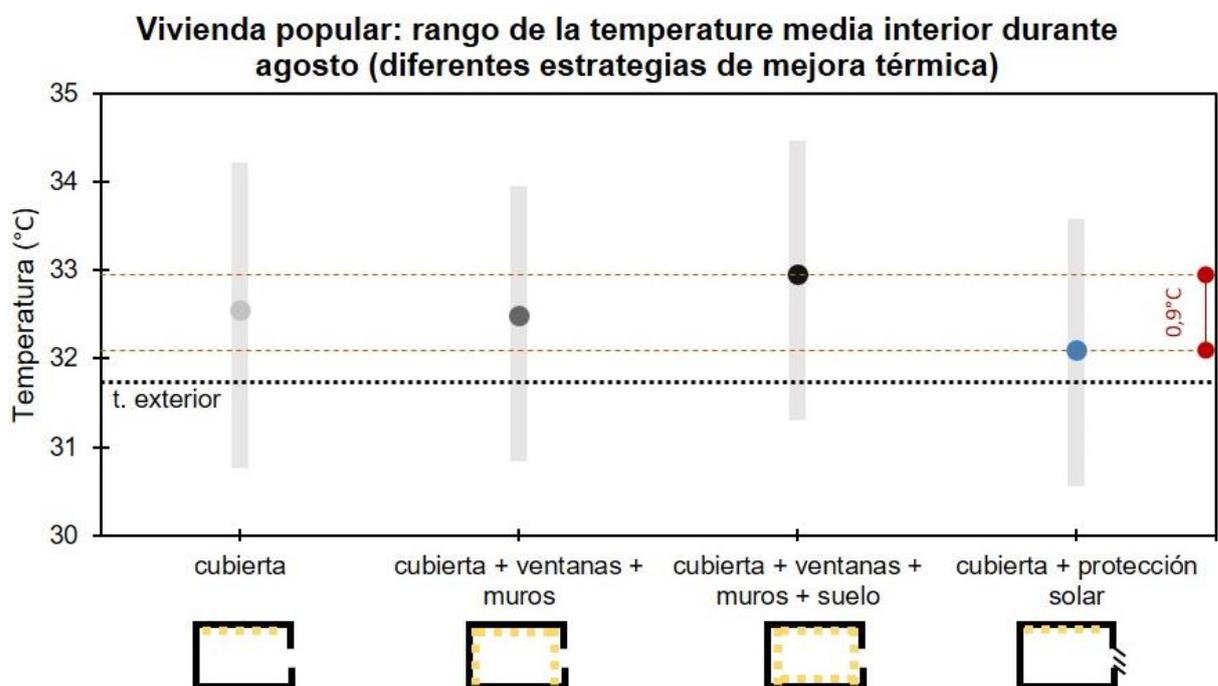


Figura 5.21. Rangos de temperatura media interior de los distintos casos analizados durante el mes de agosto.

Esto quiere decir, que el hecho de utilizar aislamiento térmico en la totalidad de la envolvente (caso C) en condiciones de régimen libre resulta contraproducente en un clima como el de Hermosillo, ya que presenta la temperatura media más alta, y también alcanza un valor de temperatura máxima superior al resto de casos. Esto se suma al hecho de que también presenta el valor de temperatura media mínima más alto.

En los casos A y B, el comportamiento térmico es similar, sin embargo, el mayor porcentaje de aislamiento en la envolvente del caso B ocasiona que el rango de la temperatura media interior sea menor que en el caso A. Por lo tanto, al tener una misma TM de  $32,5^{\circ}\text{C}$ , el caso B tiene un valor de TMM menor que el caso A ( $34,2^{\circ}\text{C}$  -  $34^{\circ}\text{C}$ ), y la diferencia entre sus valores de Tm es de menos de  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Por lo que se podría decir, que el caso B es ligeramente superior al caso A, en cuanto a desempeño térmico durante el mes de agosto.

El caso D es el que tiene la menor  $T_M$  con  $32,1^\circ\text{C}$  y el menor rango de temperaturas. Debido a estas condiciones, es el caso que tiene la menor  $T_{MM}$  y la  $T_{Mm}$  más baja. En lo que respecta al valor de  $T_{MM}$  con respecto a los demás casos, se encuentra de la siguiente manera: caso A ( $-0,6^\circ\text{C}$ ), caso B ( $-0,4^\circ\text{C}$ ) y caso C ( $-0,9^\circ\text{C}$ ). En cuanto al valor de  $T_{Mm}$ , se encuentra de la siguiente manera: caso A ( $-0,2^\circ\text{C}$ ), caso B ( $-0,3^\circ\text{C}$ ) y caso C ( $-0,8^\circ\text{C}$ ).

Para entender el comportamiento de la temperatura interior en cada uno de los casos analizados, es necesario observar el comportamiento de los distintos intercambios energéticos que se dan a través de la envolvente de la vivienda (ganancias y pérdidas).

La **Figura 5.22** muestra cómo se ven modificados estos intercambios dependiendo de la estrategia de mejora utilizada (diferentes niveles de aislamiento térmico y la protección solar en ventanas).

Analizando el gráfico que representa la vivienda en su estado base (caso A: aislamiento en cubierta), podemos identificar los tres elementos principales por los que se producen la mayoría de intercambios energéticos: los muros, el suelo, y las ventanas (ganancias por radiación solar directa). Estos tres elementos representan el 93% del total de los intercambios durante la temporada de calor.

A través de las ventanas se producen tanto intercambios energéticos por conducción (ganancias o pérdidas) como ganancias por radiación solar directa (onda corta). Este último no se ve afectado por el actuar de los demás componentes de la envolvente. Por esta razón, el hecho de proteger las ventanas de la radiación solar directa resulta una estrategia efectiva para reducir las ganancias térmicas.

El uso de vidrios con un menor valor de transmitancia térmica ( $5,8 - 3,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) reduce 61% la cantidad de energía que entra en la vivienda ( $A= 1726 \text{ kWh} - B$  y  $C= 668 \text{ kWh}$ , durante toda la temporada de calor). Sin embargo, utilizar una protección solar al exterior de la ventana la reduce en 88% respecto al caso A ( $D=202 \text{ kWh}$  en toda la temporada).

Los intercambios por conducción de las ventanas y de los muros si están relacionados con las ganancias/perdidas del suelo y cubierta. Este comportamiento se puede ver de manera clara en junio. Durante este mes, en el caso A, la vivienda pierde por el suelo una cantidad ligeramente superior de energía a la ganada por el resto de la envolvente. En el caso B, las ganancias por muros y ventanas con aislamiento térmico son menores, por lo tanto, las pérdidas por el suelo también lo son, sin embargo, estas son superiores a las ganancias. En el caso C, que cuenta con aislamiento en toda la envolvente, sus pérdidas y ganancias se reducen e igualan, por lo tanto, mantiene una temperatura interior similar a la temperatura exterior ( $T_M$  exterior=  $32,6^\circ\text{C}$ ; caso C=  $32^\circ\text{C}$ ). El caso D presenta un comportamiento similar al caso A, pero con ganancias y pérdidas menores, de tal forma que, logra mantener una temperatura interior inferior. Durante junio, el caso B es el que presenta la temperatura interior más baja, seguido por el caso D.

REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE REFRIGERACIÓN: LA VIVIENDA EN ALTURA

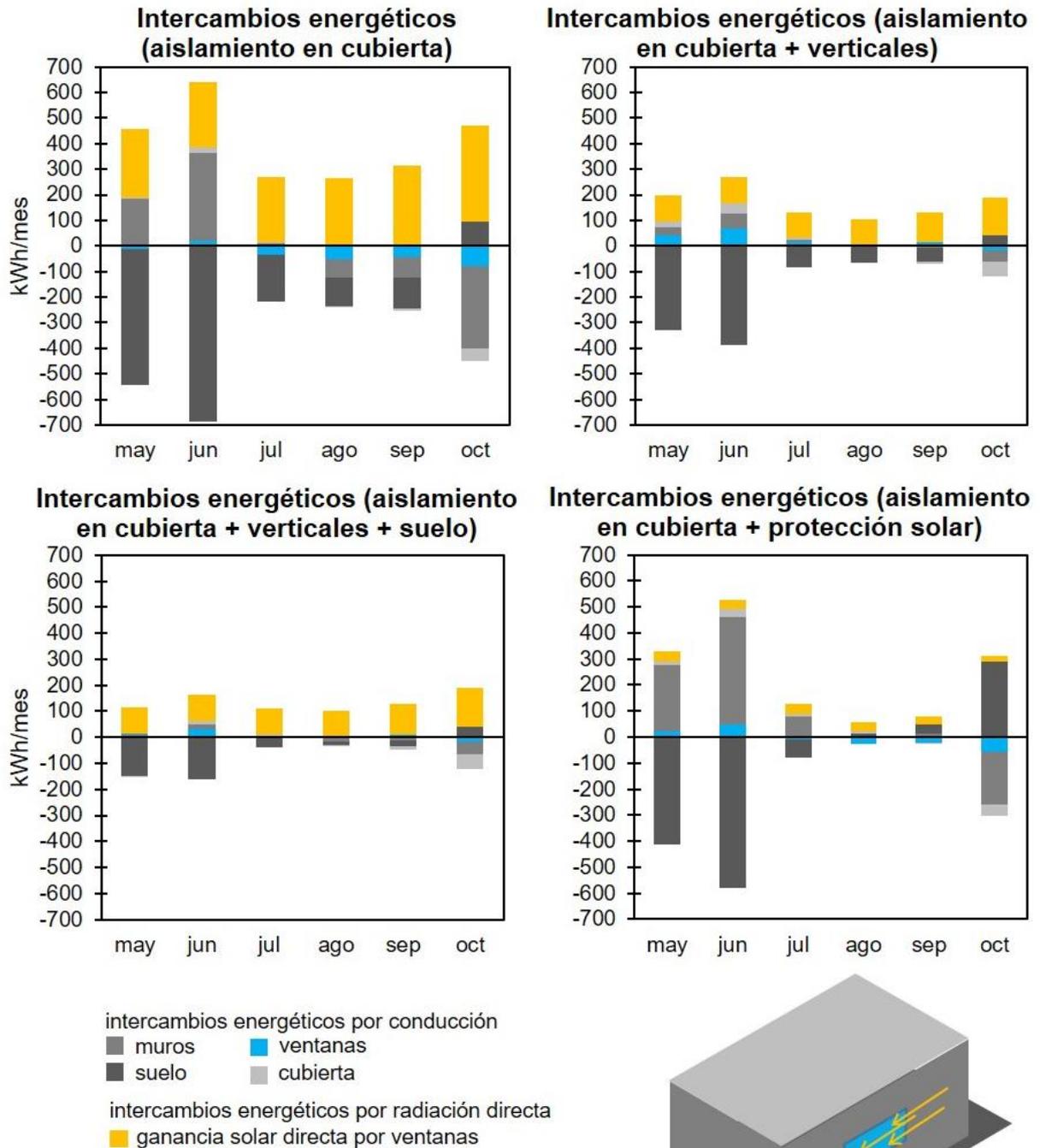


Figura 5.22. Intercambios energéticos por la envolvente de los cuatro casos analizados.

Cuando la temperatura interior es menor a la temperatura exterior, la vivienda tiene ganancias energéticas a través de la envolvente por conducción (e infiltración). Aunque esto ocurre en los cuatro casos, dichas ganancias son menores en los casos con mayor nivel de aislamiento térmico (B y C). Este comportamiento cambia cuando la temperatura interior es mayor a la exterior. Este cambio se puede ver a partir de julio, cuando las pérdidas a través del suelo disminuyen, produciendo un flujo de calor opuesto en los muros y ventanas: comienzan a ceder calor hacia el exterior.

## **PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

Este cambio en el intercambio de calor de la vivienda con el suelo es causado por la inercia térmica del terreno. Cuando la vivienda cede calor a través del suelo, reduce la temperatura interior, en consecuencia, se facilita el flujo de calor hacia el interior de la vivienda a través de los muros y ventanas. Cuando la temperatura del terreno es superior a la exterior, el intercambio de calor entre la vivienda y el suelo disminuye, esto provoca que las temperaturas interiores aumenten.

Durante los siguientes tres meses, conforme la temperatura del terreno aumenta, se produce un comportamiento térmico distinto en cada uno de los casos:

En el caso A, los muros, ventanas y la cubierta comienzan a tener un balance negativo: las pérdidas en onda larga son superiores a las ganancias. En agosto y septiembre, el flujo de calor por el suelo disminuye, mientras que la ganancia solar directa por ventanas se mantiene, incluso, éstas son superiores a las pérdidas.

En los casos B y C, al contar con aislamiento térmico, éstas pérdidas son menos significativas, ambos casos tienen la misma ganancia solar directa (inferior al caso A), no obstante, el caso B tiene mayores pérdidas por la envolvente al no tener aislamiento en el suelo. Este detalle ocasiona que el caso B tenga una temperatura interior inferior al caso C y al caso A.

En el caso D, único caso con protecciones solares en ventanas, tiene pocas ganancias solares directas, por lo que no logra un aumento de temperatura superior a la del terreno. Esto ocasiona que el flujo de calor a través del suelo sea en sentido contrario, en otras palabras, este flujo se convierte en una ganancia térmica, al igual que el que se produce a través de los muros. En este caso, las pérdidas por las ventanas son las únicas de la envolvente. El caso D es el que tiene menos pérdidas por la envolvente, a pesar de ello, es el caso con menores ganancias. Es el caso con la menor temperatura interior media durante agosto y septiembre.

Durante el mes de octubre, el terreno tiene una temperatura superior a la interior de las viviendas. Por esta razón, todos los casos tienen ganancias térmicas a través del suelo. El caso D es el que tiene la mayor ganancia, seguido por el caso A. No obstante, ésta ganancia se compensa con las pérdidas producidas a través de los demás elementos de la envolvente. Estos casos son los que tienen menor temperatura interior media: 28,4°C y 29°C.

Los casos B y C se comportan de la misma manera durante este mes, ambos casos tienen ganancias a través del suelo semejantes. Tienen pérdidas similares a través de los demás elementos de la envolvente y una misma ganancia solar directa (onda corta), de tal modo que, ambos casos tienen una temperatura media interna de 29,6°C.

## 5.4 COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA VIVIENDA PLURIFAMILIAR EN ALTURA

Actualmente en Hermosillo, el modelo de vivienda plurifamiliar en altura que tiene mayor presencia es la torre. Por esta razón, se ha optado por evaluar el comportamiento térmico y energético de dos viviendas residenciales que se encuentran en una misma torre: vivienda residencial A (torre) (113 m<sup>2</sup> de superficie y 295,1 m<sup>3</sup> de volumen habitable) y la vivienda residencial B (torre) (149,5 m<sup>2</sup> y 388,7 m<sup>3</sup>).

Estos resultados han sido obtenidos al simular el comportamiento térmico de las viviendas durante la temporada de calor (mayo a octubre). Al igual que en la evaluación de las viviendas unifamiliares aisladas, la temperatura del aire interior ha sido el parámetro utilizado para llevarla a cabo.

### 5.4.1 Comportamiento térmico de la plurifamiliar en altura en régimen libre

En este apartado se muestran los resultados de las simulaciones de las viviendas plurifamiliares en régimen libre. Al llevar a cabo una comparación de estos resultados, permite evaluarlos teniendo en cuenta la configuración cada vivienda. En este caso, ambas viviendas forman parte de la misma torre, por lo tanto, comparten el mismo tipo de construcción y materialidad de su envolvente. A pesar de esto, presentan diferencias que tienen gran peso en el comportamiento térmico, como es el caso de la orientación de cada vivienda.

La vivienda residencial A tiene sus fachadas con una orientación norte – sur, la fachada sur se encuentra protegida de la radiación solar directa por el propio edificio. La vivienda residencial B tiene sus fachadas orientadas al sur y al este (se ubica en una esquina del edificio) (p.170).

En la **Figura 5.23** se muestran los resultados de ambos casos. En el gráfico se observan las temperaturas medias (TM) interiores durante la temporada de calor. Entre ambas viviendas existe una diferencia que se mantiene constante entre 2,5°C – 2,9°C a lo largo de la temporada.

La temperatura media de la vivienda residencial B se encuentra por encima de la temperatura de la vivienda residencial A durante toda la temporada. Otra diferencia es el hecho de que la vivienda residencial A tiene una temperatura media que se encuentra por debajo de la temperatura media exterior en cuatro de los seis meses de la temporada: mayo 26,6°C (-0,3°C), junio 31,6°C (-1,0°C), julio 32,4°C (+0,1°C), agosto 31,7°C (-0,1°C), septiembre 30,3°C (-0,1°C) y octubre 27,4°C (+1,9°C).

La vivienda residencial B no logra tener una temperatura media por debajo de la temperatura media exterior en ningún mes: mayo 29,4°C (+2,6°C), junio 34,3°C (+1,8°C), julio 34,9°C (+2,6°C), agosto 34,2°C (+2,4°C), septiembre 32,7°C (+2,4°C) y octubre 30,1°C (+4,5°C).

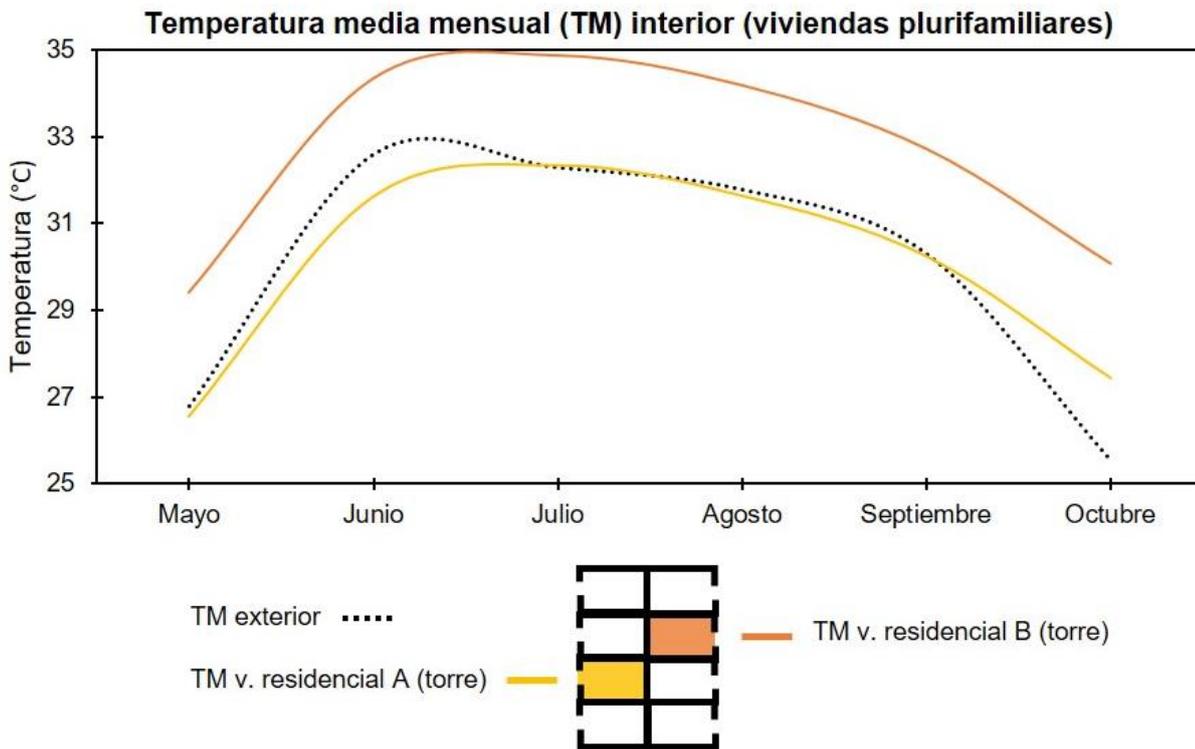


Figura 5.23. Comportamiento de la temperatura media mensual interior en viviendas plurifamiliares (temporada de calor).

La **Figura 5.24** presenta los gráficos correspondientes al comportamiento diario de la temperatura de aire interior (*T.a.i*). Estos gráficos aportan un mayor detalle y permiten ver los cambios que se producen diariamente en las temperaturas interiores y exteriores (*T.ex*).

A diferencia del comportamiento de la temperatura interior de las viviendas unifamiliares, la temperatura interior de las viviendas plurifamiliares tiene un comportamiento más estable y poco influenciado por los cambios diarios en la temperatura exterior.

Durante mayo, la vivienda residencial A se encuentra por debajo de la temperatura exterior en 19 días, mientras que la vivienda residencial B lo está solo en un día. La diferencia entre las temperaturas interiores de ambas viviendas se mantiene entre 2°C – 3,2°C, con la vivienda B siempre con una temperatura mayor. El pico más alto en las temperaturas interiores es de 28,6°C en la residencial A y de 31,6 en la residencial B. Los picos de temperatura más bajos son de 23°C para la residencial A y 24,9°C para la vivienda residencial B.

En junio, el comportamiento de la temperatura interior de las viviendas tiene una estabilidad mayor respecto a mayo, y una diferencia entre ellas de entre 2,4°C – 3°C. Las viviendas comienzan el mes con la temperatura interior en su pico más bajo: residencial A con 29,3°C y residencial B con 32,3°C. Terminan el mes con 31,7°C y 34,1°C respectivamente. El pico más alto de *T.a.i* es 33,1°C en el caso de la vivienda residencial A y de 35,8°C en la vivienda residencial B. En cuanto a la cantidad de días en los que las viviendas muestran una temperatura interior inferior a la exterior, la residencial A cuantifica 19, la residencial B lo está por 5 días.

**REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE REFRIGERACIÓN: LA VIVIENDA EN ALTURA**

A lo largo de julio hay una mayor variación en la temperatura interior de las viviendas, a pesar de que la diferencia entre la temperatura inicial y final de las viviendas es menor a  $1,2^{\circ}\text{C}$  en ambos casos (residencial A ( $32^{\circ}\text{C} - 30,9^{\circ}\text{C}$ ), residencial B ( $34,4^{\circ}\text{C} - 33,2^{\circ}\text{C}$ )). La diferencia entre las dos viviendas se mantiene en un rango entre  $2,3^{\circ}\text{C} - 2,8^{\circ}\text{C}$ , ligeramente menor al rango de junio. El pico más alto de la temperatura interior es de  $33,7^{\circ}\text{C}$  en la vivienda residencial A y de  $36,5^{\circ}\text{C}$  en la residencial B y los picos menores concuerdan con la temperatura final del mes. La vivienda residencial A se encuentra por debajo de la temperatura exterior en 17 días, la vivienda residencial B en 3 días.

Durante el mes de agosto, la temperatura interior de la vivienda residencial A se mantiene por debajo de la temperatura exterior en 18 días, la residencial B no logra estarlo en ningún día. El comportamiento de la temperatura interior se mantiene estable, con excepción de la última semana del mes, cuando existe una caída prolongada de la temperatura exterior, esto provoca que entre las temperaturas iniciales y finales del mes haya una diferencia de alrededor de  $2^{\circ}\text{C}$ : residencial A ( $32,1^{\circ}\text{C} - 30,1^{\circ}\text{C}$ ) y residencial B ( $34,5^{\circ}\text{C} - 32,6^{\circ}\text{C}$ ). La temperatura interior de las viviendas se mantiene con una diferencia entre ambas de  $2,1^{\circ}\text{C} - 2,7^{\circ}\text{C}$ .

En los siguientes dos meses, la temperatura interior de las viviendas tiene comportamientos distintos. Durante septiembre, el comportamiento es más estable, mientras que, en octubre, y debido a cambios de hasta  $15^{\circ}\text{C}$  en la temperatura exterior, las viviendas tienen un comportamiento más cambiante.

En septiembre, la vivienda residencial A tiene una temperatura del aire interior que se mantiene entre  $28,8^{\circ}\text{C} - 31,4^{\circ}\text{C}$ , mientras que la temperatura interior de la vivienda residencial B se encuentra entre  $31,4^{\circ}\text{C} - 34,1^{\circ}\text{C}$ . La diferencia entre la temperatura interior de las viviendas se mantiene entre  $2,2^{\circ}\text{C} - 2,7^{\circ}\text{C}$ .

En septiembre, la vivienda residencial A se mantiene por 17 días con una temperatura interior por debajo de la temperatura exterior, la vivienda residencial B solo en uno. En octubre, estos días se reducen: la residencial A pasa a 7 días y la residencial B a ningún día.

En octubre, vuelve a haber días donde las temperaturas de ambas viviendas están, al mismo tiempo, por debajo de los  $30^{\circ}\text{C}$  (14 días, en mayo fueron 12). La vivienda residencial A mantiene una temperatura interior entre  $24,3^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ . En la vivienda residencial B, la temperatura interior se mantiene entre  $27,3^{\circ}\text{C} - 32,4^{\circ}\text{C}$ . La diferencia de temperaturas entre ambas viviendas se mantiene entre  $2,3^{\circ}\text{C} - 3^{\circ}\text{C}$ .

Los resultados permiten ver que, a pesar de que existe una diferencia notable entre la temperatura del aire interior de ambos casos, éstas tienen un comportamiento similar. Éste es ocasionado por el uso de aislamiento térmico en la envolvente. La diferencia de temperaturas que existe se debe a una disimilitud en las ganancias por radiación solar directa, ocasionada por la diferente orientación de cada una de las viviendas.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

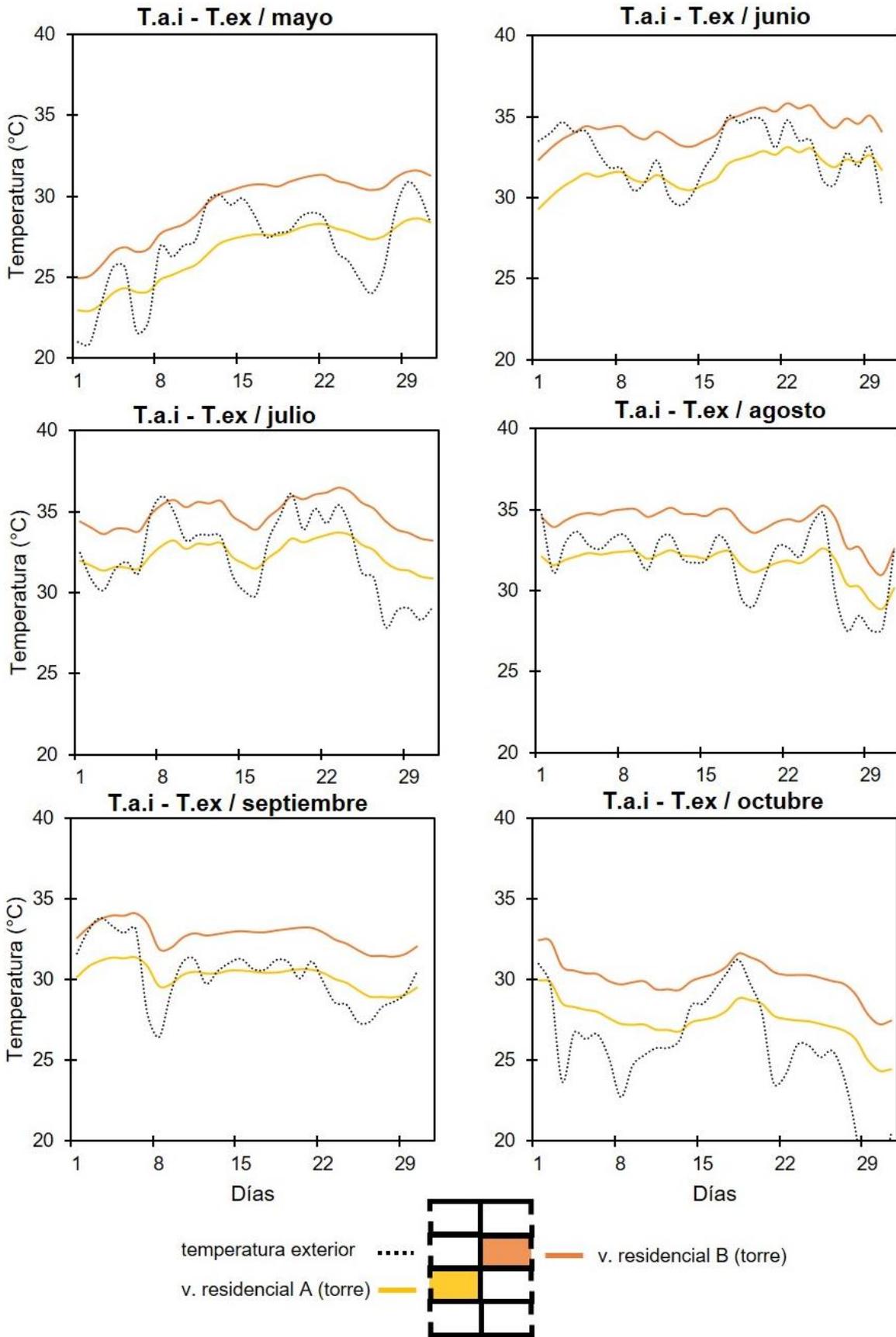


Figura 5.24. Comportamiento diario de la temperatura media del aire interior de las viviendas plurifamiliares.

### 5.4.2 Comportamiento de la demanda de refrigeración en la vivienda plurifamiliar en altura

En este apartado se muestran los resultados de las simulaciones realizadas para obtener la demanda de refrigeración de las viviendas plurifamiliares en altura.

El periodo considerado para las simulaciones es la temporada de calor (mayo – octubre). La temperatura de consigna utilizada, es la misma que en las viviendas unifamiliares: 26°C. Los parámetros base utilizados para las simulaciones de demanda energética, en cuanto a la ocupación, horarios, materiales constructivos son los mismos utilizados en las simulaciones en régimen libre (**Anexo A.5.2.2**).

En la **Figura 5.25** se representan de manera gráfica, los resultados de la demanda mensual de las dos viviendas. Estos resultados muestran la cantidad total de energía mensual necesaria para satisfacer la demanda de refrigeración en términos absolutos (kWh/mes) y por unidad de volumen habitable (kWh/m<sup>3</sup>/mes).

Los resultados muestran que, a lo largo de la temporada de calor, la vivienda residencial A (torre) mantiene la menor demanda de refrigeración. En mayo (mes con las temperaturas interiores más bajas), se produce la mayor diferencia entre demandas: la vivienda residencial B tiene una demanda por m<sup>3</sup> que es 2,5 veces superior a la que tiene la vivienda residencial A. La menor diferencia es durante julio (mes con las temperaturas interiores más altas): la vivienda residencial B tiene una demanda por m<sup>3</sup> 1,4 veces mayor.

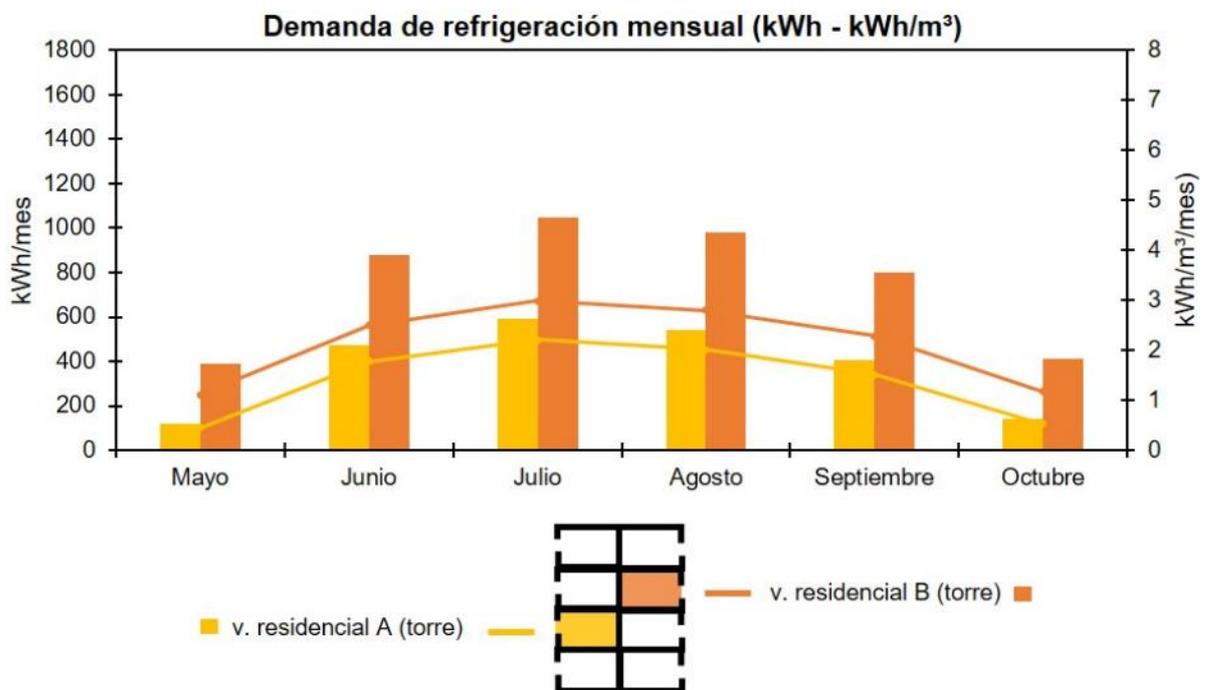


Figura 5.25. Demanda mensual de refrigeración de las viviendas plurifamiliares durante la temporada de calor.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

El mes con mayor demanda en ambos casos es julio: residencial A= 592,3 kWh/mes y residencial B= 1.047,8 kWh/mes (+177%). Mayo es el mes con la menor demanda: residencial A= 118,8 kWh/mes y residencial B= 388,6 kWh/mes (+327%). La demanda de refrigeración se comporta de acuerdo a los resultados obtenidos de las simulaciones para las viviendas en régimen libre.

La demanda de refrigeración durante la temporada de calor para las viviendas plurifamiliares en altura queda de la siguiente manera:

La vivienda residencial A tiene una demanda total de 2.272,6 kWh/año, mientras que la demanda total por volumen habitable es de 8,5 kWh/m<sup>3</sup>/año.

La vivienda residencial B, tiene una demanda total de refrigeración de 4.502,8 kWh/año, la demanda por volumen habitable es 12,8 kWh/m<sup>3</sup>/año.

La vivienda residencial B (torre) tiene una demanda total 2 veces superior a la vivienda residencial A (torre). No obstante, al comparar la demanda por unidad de volumen habitable, esta diferencia disminuye a 1,5.

## 5.5 COMPARATIVA DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR AISLADA Y LA VIVIENDA PLURIFAMILIAR EN ALTURA.

En este apartado se hace una comparación del comportamiento térmico de las viviendas unifamiliares y plurifamiliares en régimen libre, y una comparación de la demanda de refrigeración de estas viviendas durante la temporada de calor.

Para llevar a cabo esta comparación se han seleccionado dos viviendas unifamiliares de dimensiones similares a las viviendas plurifamiliares: la vivienda de interés medio (2p) con una superficie habitable de 92,5 m<sup>2</sup> y un volumen habitable de 266,8 m<sup>3</sup>, estas dimensiones son comparables a las de la vivienda residencial A (torre) (113,5 m<sup>2</sup> y 295 m<sup>3</sup>). En el caso de la vivienda Residencial B (torre), con una superficie de 149,5 m<sup>2</sup> y un volumen habitable de 388,7 m<sup>3</sup>, se ha seleccionado la vivienda residencial de una planta, con 137 m<sup>2</sup> y 363 m<sup>3</sup>.

La envolvente de las viviendas unifamiliares es de la misma materialidad, al igual que la materialidad de la envolvente entre las viviendas plurifamiliares. Esto se ha hecho con el fin de disminuir el número de variantes en la comparación.

### 5.5.1 Comparativa del comportamiento térmico de la vivienda unifamiliar aislada y la vivienda plurifamiliar en altura en régimen libre

En la **Figura 5.26**, se muestran los resultados de los meses de julio y agosto, que son en los que las viviendas tienen las temperaturas interiores más elevadas. Esta comparación se ha hecho mediante los rangos de temperatura interior que presenta cada vivienda (TMM, TM y TMm).

En el gráfico correspondiente a julio, se puede ver que entre la vivienda con menor TM interior y la de mayor temperatura, hay una diferencia de aproximadamente 2,5°C (residencial A (torre) con 32,4°C y residencial B (torre) con 34,9°C). Esta diferencia se debe a la diferente orientación y ubicación de la vivienda. La diferencia es igual en los dos meses.

Las temperaturas medias de las viviendas unifamiliares se encuentran entre estos dos valores, se mantienen en la parte inferior de este rango, cercanas a la vivienda residencial A (torre). La vivienda de interés medio (2p) tiene una temperatura media de 33°C y la vivienda residencial de 33,1°C. Se mantienen entre 0,5°C – 1°C sobre la vivienda residencial A (torre) y entre 1,5°C – 2°C por debajo de la temperatura media de la vivienda residencial B (torre).

En lo que se refiere a los rangos de la temperatura interior de las viviendas, la vivienda de interés medio (2p) tiene un rango similar al de la vivienda residencial A (torre). En la primera hay una TMM de 34,2°C y una TMm de 31,6°C (2,6°C de diferencia), en la segunda vivienda la diferencia entre la TMM (33,4°C) y la TMm (31,1°C) es de 2,4°C.

La vivienda unifamiliar residencial de una planta tiene una TMM de 34,5°C y una TMm de 34,5°C (una diferencia de 3°C). La vivienda residencial B (torre) tiene una TMM de 36,4°C y una TMm de 32,9°C (una diferencia de 3,5°C). Estas viviendas son las que presentan los rangos de temperatura más amplios y alcanzan temperaturas más altas. A pesar de esto, la

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
 LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

TMm de la vivienda unifamiliar residencial es ligeramente inferior a la TMm de las viviendas de interés medio y residencial B (torre).

El segundo gráfico muestra el comportamiento térmico de las viviendas durante agosto. La vivienda residencial A (torre) tiene la menor TM (31,65°C) y la residencial B (torre) la más alta (34,2°C). En este mes, los rangos de temperatura de las viviendas unifamiliares se amplían con respecto a julio, no obstante, las temperaturas en los extremos son menores. En el caso de las viviendas plurifamiliares, los rangos se reducen, efecto causado por el aislamiento térmico.

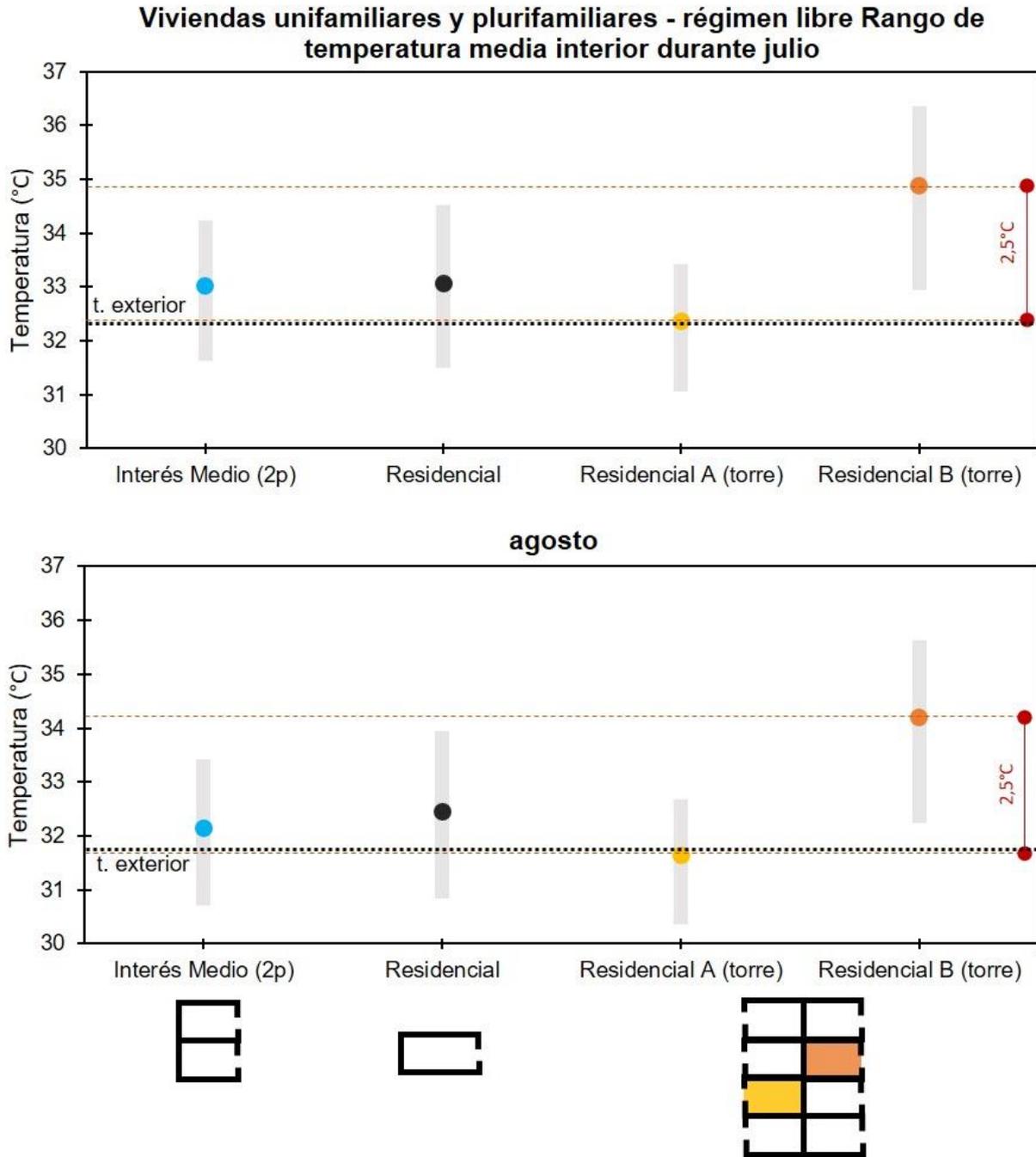


Figura 5.26. Comparativa de los rangos de temperatura media interior de las viviendas unifamiliares y plurifamiliares durante julio y agosto.

### 5.5.2 Comparativa del comportamiento de la demanda de refrigeración de la vivienda unifamiliar aislada y la vivienda plurifamiliar en altura

En cuanto a la demanda de refrigeración, las diferencias entre las viviendas unifamiliares aisladas y plurifamiliares en altura son notables. Entre la vivienda de interés medio (2p) y la vivienda residencial A (torre), la última tiene una demanda total 50% menor (proporción 1:2). En el caso de las viviendas de mayores dimensiones, la vivienda residencial de una planta y la vivienda residencial B (torre), la segunda tiene una demanda total 30% menor (aun cuando esta se calienta más en régimen libre).

En el primer gráfico de la **Figura 5.27** se muestra la demanda total de refrigeración (kWh/año) de toda la temporada de calor por cada una de las viviendas:

- Vivienda de interés medio (2p): 4.765,3 kWh/año
- **Vivienda residencial: 6.495,2 kWh/año**
- **Vivienda residencial A (torre): 2.272,6 kWh/año**
- Vivienda residencial B (torre): 4.502,5 kWh/año

El segundo gráfico muestra la demanda de refrigeración por unidad de volumen habitable de cada vivienda para toda la temporada (kWh/m<sup>3</sup>/año). En este gráfico se puede ver como las viviendas unifamiliares también son las que tienen una mayor demanda para mantener refrigerado 1 m<sup>3</sup>. La diferencia que se produce, es que la vivienda de interés medio pasa a ser la de mayor demanda de refrigeración.

- **Vivienda de interés medio (2p): 21,3 kWh/m<sup>3</sup>/año**
- Vivienda residencial: 19,5 kWh/m<sup>3</sup>/año
- **Vivienda residencial A (torre): 8,5 kWh/m<sup>3</sup>/año**
- Vivienda residencial B (torre): 12,8 kWh/m<sup>3</sup>/año

Por lo tanto, la diferencia de demanda de refrigeración de una vivienda unifamiliar aislada con la de una vivienda plurifamiliar en altura de dimensiones similares con aislamiento térmicamente, puede llegar a ser de alrededor 2,5 veces mayor.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

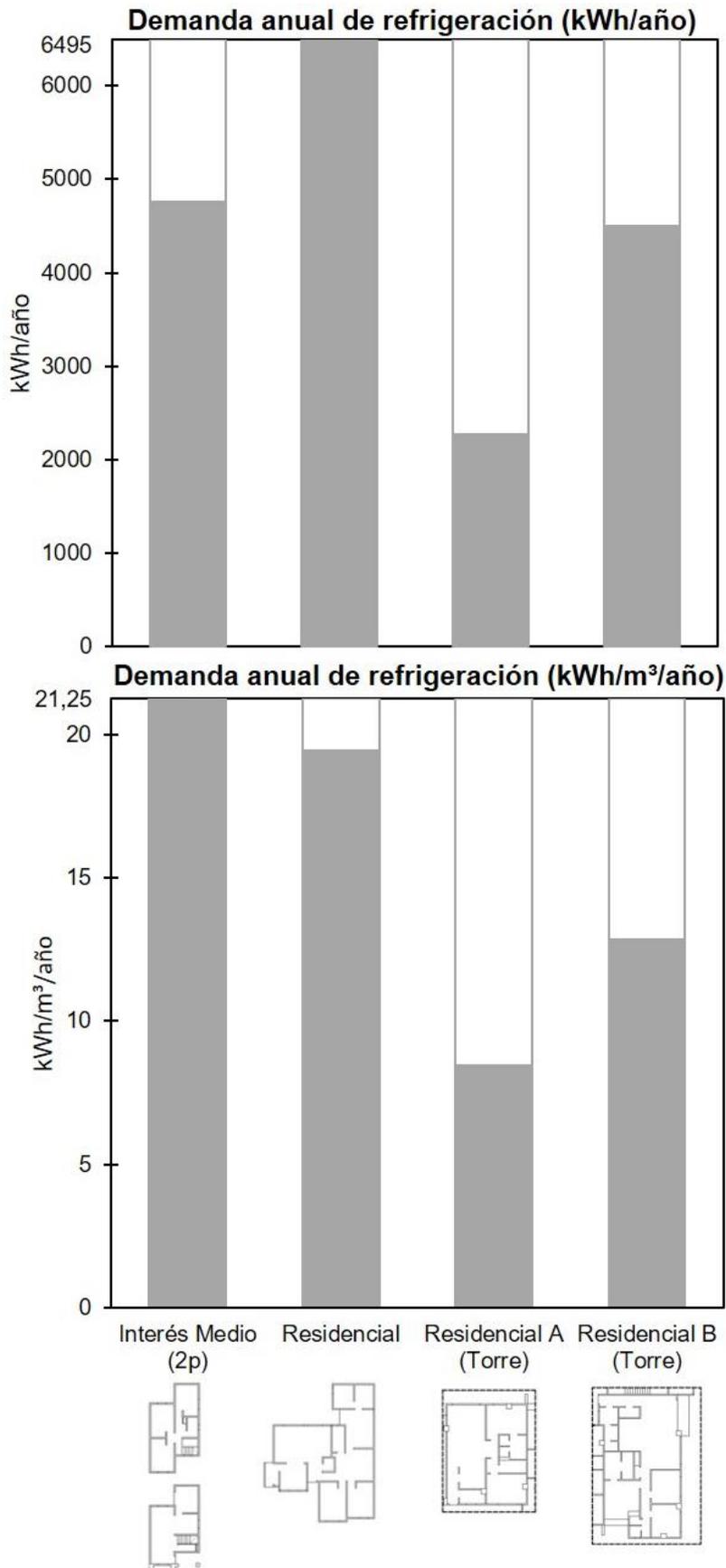


Figura 5.27. Comparativa de la demanda de refrigeración anual de las viviendas unifamiliares y plurifamiliares.  
Arriba: kWh/año; Abajo: kWh/m³/año.

## REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE REFRIGERACIÓN: LA VIVIENDA EN ALTURA

En la **Figura 5.28** se muestra la relación entre la demanda de refrigeración y cuatro de las características térmicas de todas las viviendas analizadas: superficie de piel por unidad de volumen habitable ( $f$ ), la transmitancia de la envolvente y los coeficientes de asentamiento y adosamiento. Estas características tienen en común una relación con el principio de densificación y apilamiento de la vivienda.

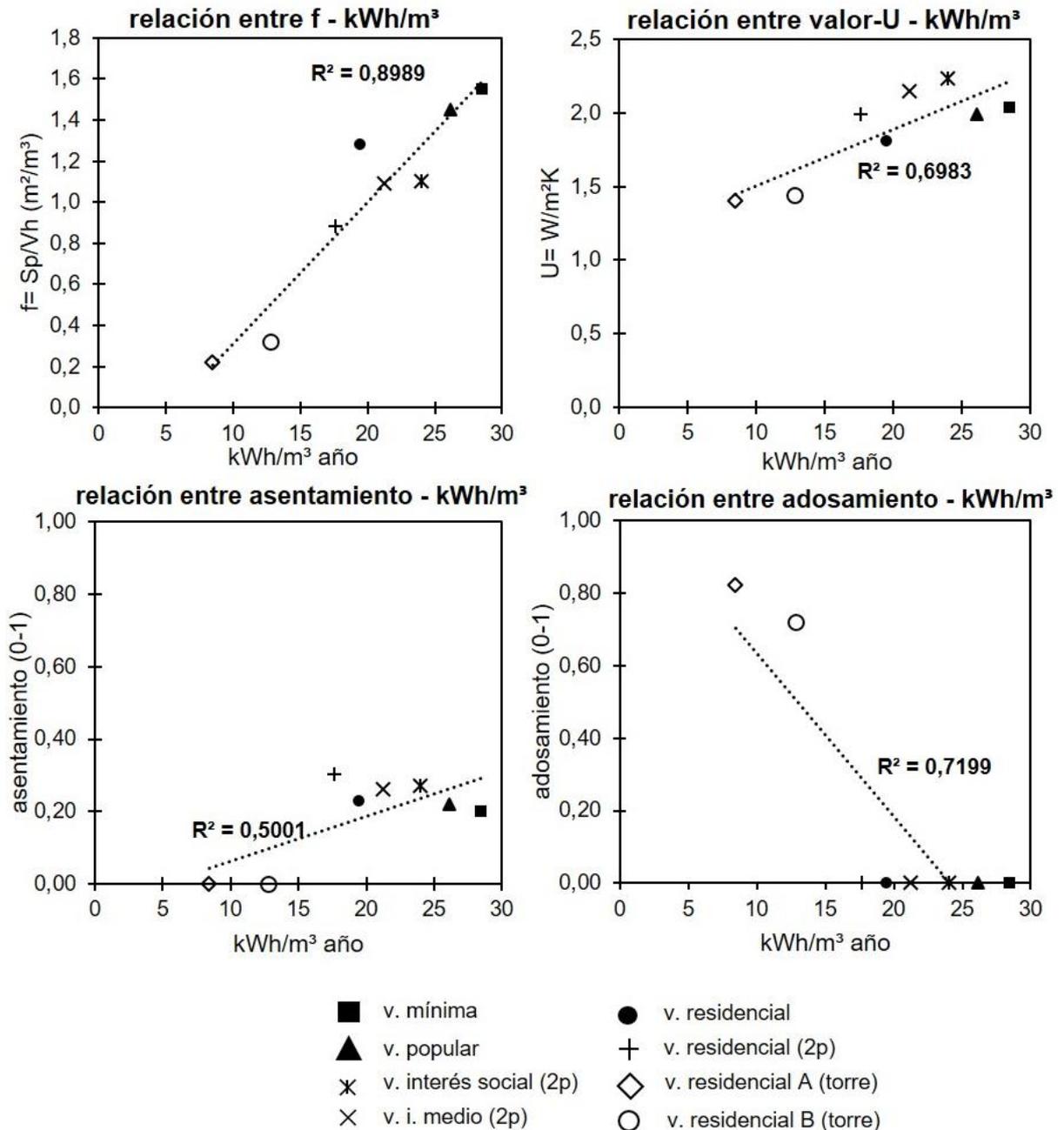


Figura 5.28. Relación entre diferentes indicadores de características térmicas de las viviendas con la demanda de refrigeración (kWh/m<sup>3</sup>año)

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

Entre la demanda ( $\text{kWh/m}^3/\text{año}$ ) y la superficie de piel por unidad de volumen ( $f$ ) ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ), existe una correlación positiva ( $r^2= 0,8989$ ). Es decir, un mayor valor de  $f$  produce una mayor demanda energética. Por su configuración, las viviendas unifamiliares tienen el mayor valor de  $f$  ( $0,88 \text{ m}^2/\text{m}^3 - 1,55 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ). El valor de  $f$  en las viviendas plurifamiliares es de entre  $0,22 \text{ m}^2/\text{m}^3 - 0,32 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , por lo tanto, tienen una menor demanda. En el gráfico, las viviendas unifamiliares se dividen en dos grupos: viviendas de una y de dos plantas. La vivienda mínima y la vivienda popular tienen la mayor demanda.

La transmitancia térmica global de la envolvente ( $U= \text{W/m}^2\text{K}$ ) también presenta una correlación positiva con la demanda de refrigeración ( $r^2= 0,6983$ ). A medida que el valor de la transmitancia disminuye, la demanda también lo hace. En este estudio, los grupos de viviendas tienen valores de transmitancia similares: las viviendas unifamiliares se mantienen entre  $U= 1,81 - 2,23 \text{ W/m}^2\text{K}$ , y las viviendas plurifamiliares de entre  $1,40 - 1,44 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

La vivienda residencial de una planta ( $U= 1,81 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) se aleja del resto de valores del grupo de viviendas unifamiliares de una planta, esto se debe al hecho de que su cubierta representa el 34% de la envolvente. La cubierta de las seis viviendas tiene el mismo valor de transmitancia ( $U= 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), no obstante, en el resto de las viviendas unifamiliares, la cubierta representa entre el 18,2 – 27,5 % de la envolvente. Por consiguiente, el valor global de transmitancia térmica se reduce. Esto es un aspecto decisivo para la demanda de refrigeración.

El coeficiente de adosamiento y la demanda de refrigeración tienen una correlación negativa ( $r^2= 0,7199$ ). A un mayor valor del coeficiente de adosamiento, le corresponde una menor demanda de refrigeración. El grupo de viviendas plurifamiliares tienen un coeficiente de adosamiento de entre 0,73 y el 0,82, que se corresponden con una demanda de entre  $12,83 \text{ kWh/m}^3/\text{año}$  y  $8,47 \text{ kWh/m}^3/\text{año}$ . Esta correlación no se puede establecer en las viviendas unifamiliares debido a que su coeficiente de adosamiento es de 0.

El coeficiente de asentamiento, a diferencia del coeficiente de adosamiento, tiene una correlación positiva ( $r^2=0,5001$ ) con la demanda de refrigeración: un mayor grado de asentamiento se relaciona con una menor demanda de refrigeración. Las viviendas plurifamiliares en altura tienen un coeficiente de asentamiento de 0. El coeficiente de asentamiento de las viviendas unifamiliares varía entre 0,20 – 0,30. Las viviendas de dos plantas tienen un mayor coeficiente de asentamiento (0,26 – 0,30) y las viviendas de una planta tienen un coeficiente de entre 0,20 – 0,23. Se vuelve a constatar que, la vivienda residencial de una planta tiene un comportamiento distinto al resto de las viviendas de una planta.

**REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE REFRIGERACIÓN: LA VIVIENDA EN ALTURA**

Finalmente, en la **Figura 5.29** se muestra y compara la demanda de refrigeración de las seis viviendas unifamiliares y las dos viviendas plurifamiliares. El primer gráfico muestra la demanda total (kWh/año), el segundo gráfico muestra la demanda total por unidad de volumen habitable (kWh/m<sup>3</sup>/año).

De estos gráficos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las viviendas unifamiliares aisladas tienen una mayor demanda que las viviendas plurifamiliares en altura. En el caso de la vivienda residencial A (torre), tanto la demanda total (kWh/año) como la demanda total por unidad de volumen habitable (kWh/m<sup>3</sup>/año) es menor al resto de viviendas. La vivienda residencial B (torre) tiene una demanda total solamente inferior a las viviendas de interés medio (2p), residencial y residencial (2p). A pesar de esto, su demanda total por volumen habitable es inferior a la de todas las viviendas unifamiliares aisladas.
- En el grupo de las viviendas unifamiliares, al dividirlo entre viviendas de una y dos plantas, las segundas son las que tienen una menor demanda por unidad de volumen habitable. La excepción es la vivienda residencial de una planta, que tiene una demanda por m<sup>3</sup> mayor a la vivienda residencial (2p), pero inferior al resto de viviendas de otras categorías.
- Las viviendas unifamiliares destinadas a la población económicamente más vulnerable (mínima – popular) requieren de una mayor cantidad de energía (hasta 1,6 veces más) para refrigerar el mismo espacio que una vivienda categoría residencial. Al ser comparadas con las viviendas plurifamiliares, esta cantidad aumenta hasta 3,4 veces más.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

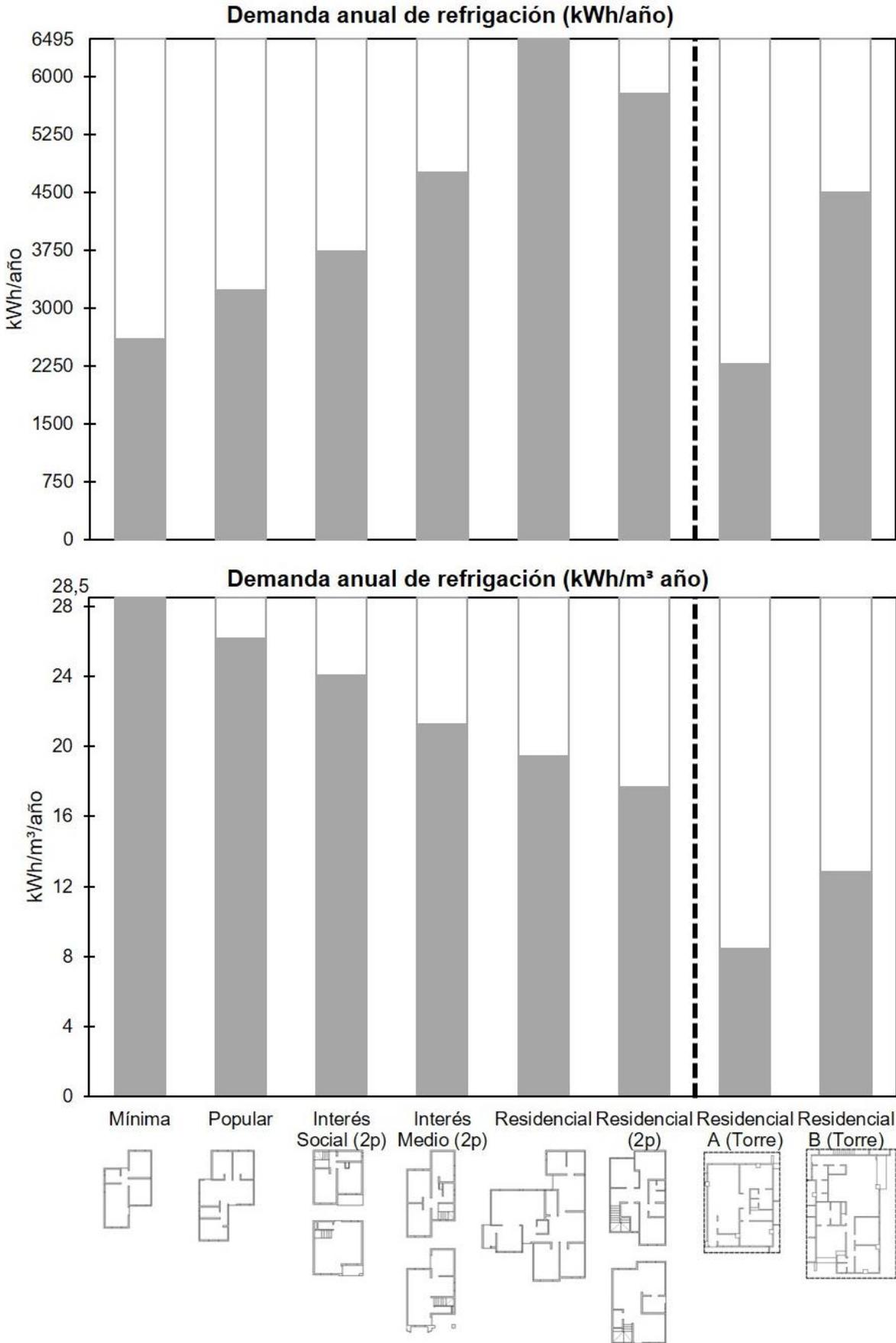


Figura 5.29. Comparación de la demanda de refrigeración entre viviendas unifamiliares y plurifamiliares.

## RESUMEN DE CAPÍTULO

En este capítulo, se ha evaluado y comparado el comportamiento térmico y la demanda energética de refrigeración de dos tipologías de vivienda: las viviendas unifamiliares aisladas (de una y dos plantas) y las viviendas plurifamiliares en altura. Este análisis se ha hecho mediante simulaciones energéticas en *DesignBuilder*, tanto en régimen libre (pasivo), como con refrigeración (activo).

Para llevar a cabo las simulaciones, se han modelado diferentes categorías de viviendas de tipología unifamiliar: vivienda mínima, vivienda popular, vivienda de interés social (dos plantas), vivienda de interés medio (dos plantas) y vivienda residencial (una y dos plantas). En el caso de las viviendas plurifamiliares, estas son de categoría residencial.

Este análisis queda dividido en cuatro partes:

- Comportamiento energético de la vivienda unifamiliar aislada.
- Comportamiento energético de la vivienda plurifamiliar en altura.
- Comparativa del comportamiento energético de la vivienda unifamiliar aislada y la vivienda plurifamiliar en altura.
- La mejora térmica de una vivienda unifamiliar popular de una planta.

Las simulaciones muestran que un mayor nivel de compacidad (dos plantas) en la vivienda unifamiliar aislada se traduce en una temperatura media inferior (en comparación con viviendas de una planta). Las viviendas de una planta presentan una mayor oscilación en la temperatura interior. Otro resultado importante es el hecho de que las viviendas destinadas a sectores económicos bajos (vivienda mínima y popular) son las que tienen las temperaturas interiores más altas durante la temporada de calor. Este efecto también se observó en los resultados de las simulaciones de la demanda de refrigeración: la vivienda residencial de dos plantas tiene una demanda de 17,7 kWh/m<sup>3</sup>/año, mientras que la demanda de refrigeración de la vivienda mínima es de 28,5 kWh/m<sup>3</sup>/año.

En un edificio plurifamiliar en altura de tipo torre, se compararon dos viviendas (A y B) con el mismo sistema constructivo, pero diferente orientación. Las simulaciones muestran que, debido al uso de aislamiento térmico, ambas viviendas tienen una temperatura estable y poco influenciada por los cambios diarios de temperatura exterior. Sin embargo, existe una diferencia de entre 2,5°C y 2,9°C en su temperatura media mensual. Esta diferencia se produce por la orientación de las viviendas y la falta de protecciones solares. La vivienda residencial A está orientada al norte, y la vivienda residencial B al sur-este, por lo que tiene mayores ganancias por radiación solar directa, y presenta una mayor temperatura interior en todo momento. Este comportamiento se repite al comparar el comportamiento de la demanda de refrigeración de estas viviendas: la vivienda residencial A tiene una demanda de 8,5 kWh/m<sup>3</sup>/año y la vivienda residencial B tiene una demanda de 12,8 kWh/m<sup>3</sup>/año (1,5 veces superior).

Para realizar la comparación del comportamiento térmico entre las viviendas unifamiliares y las viviendas plurifamiliares, se seleccionaron dos viviendas unifamiliares (de una y dos

plantas) y las dos viviendas plurifamiliares. Se simularon los meses de julio y agosto, en los cuales se presentan las temperaturas interiores más altas. En este caso, la temperatura media mensual más alta se alcanza en julio en la vivienda residencial B (torre) (34,9°C), seguida por la vivienda residencial (1p) (33,1°C), vivienda de interés medio (2p) (33°C) y por último la vivienda residencial A (torre) con 32,4°C. En cuanto a la demanda de refrigeración, se observó una diferencia notable entre las dos tipologías de vivienda, incluso tratándose de viviendas con dimensiones similares. La demanda de una vivienda unifamiliar aislada puede llegar a ser de alrededor de 2,5 veces superior a la demanda de la vivienda plurifamiliar en altura. Esto refuerza el efecto positivo que plantea el enfoque de apilamiento propuesto en el capítulo 4.

Otro de los objetivos de esta tesis es el analizar el comportamiento térmico de la vivienda social actual, en un escenario en la que un hogar no puede contar con sistemas de refrigeración. En este capítulo se realizó un análisis comparativo, y se comprobó que el uso de protecciones solares representa una ligera mejora en la temperatura interior con respecto al uso de aislamiento térmico en la envolvente. Este es un punto relevante, debido a que este tipo de viviendas, destinado a un sector económicamente vulnerable de la sociedad, podría lograr mejorar su nivel de confort interior con una inversión menor a la que representa el uso de aislamiento térmico.

## **CONCLUSIONES**

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

## CONCLUSIONES FINALES

La alta radiación solar presente en ciudades de clima cálido – seco es el factor climático con mayor influencia en el comportamiento energético, tanto del espacio público como del espacio interior de las viviendas. Por lo tanto, la creación de sombra será una estrategia fundamental para mejorar las condiciones ambientales de los dos ámbitos.

En este tipo de clima es poco realista recurrir a una vegetación frondosa para sombrear ya que necesita una cantidad de agua considerable para subsistir, en un lugar donde escasea. Por esta razón se plantea la creación de sombra a partir de la propia morfología urbana, es decir utilizar los edificios como protecciones solares para crear un espacio público más confortable.

El modificar la geometría de las calles, buscando una relación de aspecto con un valor cercano a  $h/w=1$  en estas latitudes, generaría “corredores de sombra”, incluso en algunos momentos críticos, brindando refugio al peatón. La evaluación realizada a partir de simulaciones y mediciones hechas “in situ” lo confirman.

La estrategia que se propone de compactar la ciudad apilándola, también es positiva desde el punto de vista del consumo energético interior de las viviendas refrigeradas. Como se ha visto en el capítulo 5, la vivienda plurifamiliar en altura resulta una buena estrategia para reducir la demanda energética, utilizando correctamente el aislamiento térmico.

Pero a pesar de las condiciones climáticas extremas que hacen muy necesario el uso de refrigeración, una parte de la población no puede permitirse la instalación y mantenimiento del aire acondicionado. La tipología edificatoria donde vive esta parte de la población acostumbra a ser una vivienda unifamiliar aislada de interés social (entre 60 – 90 m<sup>2</sup>) como se ha visto en el capítulo 5. En este tipo de construcción, la mejora que puede aportar el aislamiento térmico es mucho menor que en el caso de la vivienda plurifamiliar climatizada.

Las simulaciones realizadas muestran que, para la tipología de vivienda unifamiliar aislada, la utilización de protecciones solares en las ventanas puede aportar las mismas mejoras energéticas que la colocación de aislamiento, con un coste mucho menor.

## **INVESTIGACIONES FUTURAS**

En la presente investigación se ha estudiado la relación entre la forma de la ciudad y la densidad con la sostenibilidad. Esto se ha hecho desde tres escalas distintas: a escala de ciudad, a escala de barrio y a escala de edificio. Sin embargo, los resultados obtenidos, lejos de terminar con el tema, muestran el camino para desarrollar nuevas líneas de investigación.

El trabajo realizado en esta tesis tiene la finalidad de servir como guía, y establecer nuevos criterios de crecimiento urbano en ciudades que, como Hermosillo, se encuentran en un clima cálido-seco y siguen un modelo de crecimiento de ciudad dispersa.

La implementación de soluciones como las de esta tesis, podría ayudar a solucionar parte de los problemas relacionados con el consumo energético de las ciudades del noroeste de México. Al mismo tiempo, podrían ayudar a solucionar una parte de la problemática social, al dotar de una mayor habitabilidad al espacio público, lo cual permitiría disminuir la dependencia del uso automóvil.

Continuando con la dinámica de esta tesis, las futuras líneas de investigación han de ser en diferentes escalas:

- A escala de ciudad: Trabajar con SIG y crear una serie de parámetros que permitan la definición de zonas de oportunidades en las ciudades para la generación de subcentros o nodos. Paralelamente, desarrollar un sistema de parametrización del apilamiento en ciudades dispersas de clima cálido-seco. Parámetros como la altura, forma, orientación, uso y ocupación del suelo.
- A escala de barrio: En esta tesis se ha abordado la escala de barrio a partir de un modelado morfológico del tejido, sin embargo, se ha pasado de un modelo morfológico a un modelo tipológico para llevar a cabo la modificación de la forma urbana. Esto se ha hecho debido a que un modelo tipológico facilita la aplicación de la normativa, ya que permite la parametrización de aspectos como la altura y el ancho de calle. En el futuro, se ha de trabajar en propuestas que consideren las irregularidades de las calles, tanto verticales como horizontales, ya que la creación de irregularidades permite la creación de sombra.
- A escala de edificio: La presente investigación se enfocó en la evaluación del comportamiento energético de las viviendas, a través del apilamiento y la implementación de estrategias de mejora energética como el aislamiento y la protección solar de ventanas. En investigaciones futuras se pretende analizar el uso de la inercia térmica en combinación con el aislamiento en climas cálidos-secos. A su vez, se ha de trabajar en definir perfiles de usuario que permitan dimensionar adecuadamente las instalaciones de refrigeración en las viviendas.

## REFERENCIAS

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

## A

- Al-Sallal, K. A. (1996). Solar access/shading and building form: Geometrical study of the traditional housing cluster in Sana'a. *Renewable Energy*, 8(1–4), 331–334. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88872-0](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88872-0)
- Alalouch, C., Al-Saadi, S., AlWaer, H., & Al-Khaled, K. (2019). Energy saving potential for residential buildings in hot climates: The case of Oman. *Sustainable Cities and Society*, 46(December 2018). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101442>
- Aleksandrowicz, O., Zur, S., Lebendiger, Y., & Lerman, Y. (2020). Shade maps for prioritizing municipal microclimatic action in hot climates: Learning from Tel Aviv-Yafo. *Sustainable Cities and Society*, 53(August 2019), 101931. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101931>
- Ali-Toudert, F. (2005). *Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate*. Universität Freiburg.
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41(2), 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.013>
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2007). Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy*, 81(6), 742–754. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.10.007>
- AlKhaled, S., Coseo, P., Brazel, A., Cheng, C., & Sailor, D. (2020). Between aspiration and actuality: A systematic review of morphological heat mitigation strategies in hot urban deserts. *Urban Climate*, 31(April 2019). <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100570>
- Alpuche Cruz, M. G., González, I., Ochoa de la Torre, J. M., Marincic, I., Duarte, A., & Valdenebro, E. (2014). Influence of Absorptance in the Building Envelope of Affordable Housing in Warm Dry Climates. *Energy Procedia*, 57, 1842–1850. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.048>
- Alvarado, E. (2016, April 6). Un 96.8% de mexicanos vive en familia: INEGI. *El Imparcial*. Retrieved from <https://www.elimparcial.com/sonora/hermosillo/Un-96.8-de-mexicanos-vive-en-familia-Inegi-20160306-0069.html>
- Angel, S., M. Blei, A., Parent, J., Lamson-Hall, P., Galarza, N., L. Civco, D., ... Thom, K. (2016). *Atlas of Urban Expansion - 2016 Edition, Volume 1: Areas and Densities*. Retrieved from <http://www.lincolnst.edu/subcenters/atlas-urban-expansion/>
- Antequera, L. (1991). *Arte y astronomía: evolución de los dibujos de las constelaciones*. Universidad Complutense de Madrid.
- Arellano Ramos, B., & Roca, J. (2010). El urban sprawl, ¿Un fenómeno de alcance planetario? Los ejemplos de México y España. *ACE: Architecture, City and Environment*, 4(12), 115–147. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2099/8556>
- Arnfield, A. J. (1990a). Canyon geometry, the urban fabric and nocturnal cooling: A simulation approach. *Physical Geography*, 11(3), 220–239. <https://doi.org/10.1080/02723646.1990.10642404>
- Arnfield, A. J. (1990b). Street design and urban canyon solar access. *Energy and Buildings*, 14(2), 117–131. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(90\)90031-D](https://doi.org/10.1016/0378-7788(90)90031-D)
- Arnfield, A. J., & Mills, G. M. (1994). An analysis of the circulation characteristics and energy budget of a dry, asymmetric, east-west urban canyon. II. Energy budget. *International Journal of Climatology*, 14(3), 239–261. <https://doi.org/10.1002/joc.3370140302>
- ASHRAE. (2013). *ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, GA.

## B

- Baiocchi, V., Lelo, K., Milone, M. V., Mormile, M., & Tanga, E. (2013). Knowing the past for managing the present: A comparison between historical cartography and satellite images for the study of Rome's city centre. *Geographia Technica*, (1), 17–27.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

- Bairoch, P., & Goertz, G. (2006). Factors of urbanisation in the Nineteenth century developed countries. *Urban Studies*, 23(4), 285–305. <https://doi.org/10.1080/00420988620080351>
- Batty, M. (2009). Defining Density. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(4), 571–572. <https://doi.org/10.1068/b3604ed>
- Batty, M., Besussi, E., & Chin, N. (2003). *Traffic, urban growth and suburban sprawl*. Retrieved from University College London website: [http://www.casa.ucl.ac.uk/working\\_papers/paper70.pdf](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper70.pdf)
- BBC. (2000). Ice age star map discovered. Retrieved January 15, 2020, from BBC News website: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/871930.stm>
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1), 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Beckers, B., & Rodríguez, D. (2009). Helping architects to design their personal daylight. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 5(7), 467–477.
- Beckers, Benoit. (2009). Manual de Heliodon. Retrieved January 1, 2019, from [http://heliodon.net/downloads/Heliodon2\\_User\\_Guide\\_2009\\_es\\_02\\_11.pdf](http://heliodon.net/downloads/Heliodon2_User_Guide_2009_es_02_11.pdf)
- Beckers, Benoit. (2013). Solar energy at urban scale. In Benoit Beckers (Ed.), *Solar Energy at Urban Scale*. <https://doi.org/10.1002/9781118562062>
- Beckers, Benoit, & Masset, L. (2006). Heliodon 2. *Software and User Guide*. Retrieved from <http://heliodon.net/heliodon/index.html>
- Beckers, Benoit, Rodríguez, D., Antalucha, E., & Batoz, J.-L. (2010). About solar energy simulation in the urban framework: The model of Compiègne. *3rd International Congress Bauhaus SOLAR*, (November), 1–5.
- Beltrán Lloris, M. (1972). Los grabados ruprestres de Bedolina (Valcamonica). *BCSP*, III, 121–158.
- Berghauser Pont, M., & Haupt, P. (2009). *Space, density and urban form* (Technische Universiteit Delft). Retrieved from <http://resolver.tudelft.nl/uuid:0e8cdd4d-80d0-4c4c-97dc-dbb9e5eee7c2>
- Biljecki, F., Ledoux, H., & Stoter, J. (2016). An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 59, 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005>
- Blakely, E. J., & Snyder, M. G. (1999). *Fortress America: Gated Communities in the United States* (1999th ed.; Brookings Institution Press, Ed.).
- Bliss, L. (2016). This Old Map: Da Vinci's City Plan, 1502. Retrieved August 30, 2020, from Bloomberg CityLab website: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-04-22/this-old-map-da-vinci-s-plan-of-imola-1502>
- Bourbia, F., & Awbi, H. . (2004a). Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate. *Renewable Energy*, 29(2), 291–301. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00171-X](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00171-X)
- Bourbia, F., & Awbi, H. B. (2004b). Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate Part 1: Air and surface temperature measurements. *Renewable Energy*, 29(2), 249–262. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00170-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00170-8)
- Boyko, C. T., & Cooper, R. (2011). Clarifying and re-conceptualising density. *Progress in Planning*, 76(1), 1–61. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2011.07.001>
- Breheny, M. (1996). Centrists, decentrists and compromisers: Views on the future of urban form. In E. Burton, M. Jenks, & K. Williams (Eds.), *The compact city. A sustainable urban form?* (1996th ed., pp. 13–35). Oxford: Spon Press. Taylor & Francis Group.
- Burchell, R. W., Shad, N. A., Listokin, D., Phillips, H., & Downs, A. (1998). *Costs of sprawl -- revisited. Final report*. United States.
- Burdett, R., & Deyan, S. (2011). *Living in the Endless City* (Phaidon Press, Ed.). London.
- Burton, E. (2002). Measuring urban compactness in UK towns and cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 29(2), 219–250. <https://doi.org/10.1068/b2713>

## C

- Calderón, R., Arredondo, J. A., Gallegos, R., & Mayagoitia, F. (2011). Electrical consumption and co2 reduction using saving systems and thermal insulation applied to dwellings in arid lands of Mexico. *Informacion Tecnologica*, 22(2), 69–78. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000200008>
- Cerdà, I. (1867). *Teoría general de la urbanización y aplicación de sus principios y doctrinas a la reforma y ensanche de Barcelona. Tomo I* (1968th ed.; I. de E. F. 1968- 1971, Ed.). Madrid: Imprenta Española.
- Cheng, V., Steemers, K., Montavon, M., & Compagnon, R. (2006). Urban form, density and solar potential. *PLEA 2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland*, (September), 12–18. Geneva.
- Choay, F. (1994). Le règne de l'urbain et la mort de la ville. *La Ville, Art et Architecture En Europe, 1870-1993*, 26–35.
- Churchman, A. (1999). Disentangling the concept of density. *Journal of Planning Literature*, 13(4), 389–411. <https://doi.org/10.1177/08854129922092478>
- Coch, H. (1998). Bioclimatism in vernacular architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2(1–2), 67–87. [https://doi.org/10.1016/s1364-0321\(98\)00012-4](https://doi.org/10.1016/s1364-0321(98)00012-4)
- Coch, H., Crespo, I., & Serra-Coch, G. (2016). Morfología urbana mediterránea. *ACE: Architecture, City and Environment*, 11(32), 113–134. <https://doi.org/10.5821/ace.11.32.4835>
- Coch, H., & Serra, R. (1995). *Arquitectura y energía natural* (1st ed.; Universitat Politècnica de Catalunya, Ed.). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- COEES. (2010). Balance de Energía del Estado de Sonora 2010. In *Comisión de Energía del Estado de Sonora*. Retrieved from <http://www.coees.sonora.gob.mx/images/descargas/Energias-Renovables/Balance-de-energia-Sonora-2010.pdf>
- Comisión de Energía del Estado de Sonora (COEES). (2020). Tarifas Eléctricas CFE. Retrieved August 29, 2020, from <http://www.coees.sonora.gob.mx/eficiencia-energetica/contenido-eficiencia/tarifas-electricas-cfe.html>
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2020). Tarifas Domésticas. Retrieved August 29, 2020, from <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/Tarifa1F.aspx>
- Compagnon, R. (2004). Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and Buildings*, 36(4), 321–328. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.009>
- Curreli, A. (2016). *El acceso solar a la escala del tejido urbano. El enfoque morfológico y el método de análisis comparativo aplicados al caso de Barcelona*. (Universitat Politècnica de Catalunya). Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/96302>
- Curreli, A., & Coch, H. (2013). 3D geometrical modelling and solar radiation at urban scale - morphological or typological digital mock-ups? In J.-L. Scartezzini (Ed.), *CISBAT 2013 Proceedings Vol I. Cleantech for Smart Cities and Buildings* (pp. 1029–1034). <https://doi.org/10.5075/epfl-infoscience-190600>
- Curreli, A., Serra-Coch, G., Isalgue, A., Crespo, I., & Coch, H. (2016). Solar Energy as a Form Giver for Future Cities. *Energies*, 9(7), 544. <https://doi.org/10.3390/en9070544>

## D

- Dabaieh, M., Wanas, O., Hegazy, M. A., & Johansson, E. (2015). Reducing cooling demands in a hot dry climate: A simulation study for non-insulated passive cool roof thermal performance in residential buildings. *Energy and Buildings*, 89, 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.034>
- Davis, D., Vera, F., Tomateo, C., Silva, J., Santa María, J., Segovia, R., ... Sánchez, R. (2017). *Rethinking Hermosillo*. Retrieved from <http://www.implanhermosillo.gob.mx/estudios-2/>
- De Boeck, L., Verbeke, S., Audenaert, A., & De Mesmaeker, L. (2015). Improving the energy performance of residential buildings: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 960–975. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.037>
- DesignBuilder Software Ltd. (2016). *Design Builder*. Retrieved from <https://designbuilder.co.uk/>

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

- Dovey, K., & Pafka, E. (2014). The urban density assemblage: Modelling multiple measures. *Urban Design International*, 19(1), 66–76. <https://doi.org/10.1057/udi.2013.13>
- Downs, A. (1999). Some realities about sprawl and urban decline. *Housing Policy Debate*, 10(4), 955–974. <https://doi.org/10.1080/10511482.1999.9521356>
- Duarte Aguilar, A. (2003). Historia urbana de Hermosillo: 4 fragmentos, una ciudad. In *Fiestas Del Pitic*. Retrieved from <https://docplayer.es/16110754-El-colegio-de-sonora-historia-urbana-de-hermosillo-4-fragmentos-una-ciudad.html>

## E

---

- El-Deeb, K., El-Zafarany, A., & Sherif, A. (2012). Effect of building form and urban pattern : On energy consumption of residential buildings in different desert climates. *Proceedings - 28th International PLEA Conference on Sustainable Architecture + Urban Design: Opportunities, Limits and Needs - Towards an Environmentally Responsible Architecture, PLEA 2012*, (November), 1–7.
- Elkin, T., McLaren, D., & Hillman, M. (1991). *Reviving the City: Towards Sustainable Urban Development* (Friends of the Earth with Policy Studies Institute, Ed.). London.
- Enríquez Acosta, J., & Bernal Salazar, S. (2013). Vulnerabilidad social y vivienda en Sonora, México. *Estudios Regionales En Economía, Población y Desarrollo. Cuadernos de Trabajo de La UACJ, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez*, 17, 2–38. Retrieved from <https://econpapers.repec.org/paper/cjzca41cj/17.htm>
- Erell, E. (2011). Urban Microclimate. In *Urban Microclimate*. <https://doi.org/10.4324/9781849775397>
- ESRI. (2015). *ArcMap*. Retrieved from <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/>
- Eßer, K. (2011). City Weathers in Aachen during the 1800s. In M. Hebbert, V. Jankovic, & B. Webb (Eds.), *City weathers. Meteorology and urban design 1950-2010* (2011th ed., pp. 99–103). Retrieved from <http://orca.cf.ac.uk/id/eprint/65932>
- Ewing, R., & Rong, F. (2008). The Impact of urban form on US energy use. *Housing Policy Debate*, 19(1), 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.213>

## F

---

- Forsyth, A., & Southworth, M. (2008). Cities afoot - Pedestrians, walkability and urban design. *Journal of Urban Design*, 13(1), 1–3. <https://doi.org/10.1080/13574800701816896>
- Foruzanmehr, A. (2017). *Thermal Comfort in Hot Dry Climates*. <https://doi.org/10.4324/9781315527130>
- Friess, W. A., Rakhshan, K., Hendawi, T. A., & Tajerzadeh, S. (2012). Wall insulation measures for residential villas in Dubai: A case study in energy efficiency. *Energy and Buildings*, 44(1), 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.005>
- Frumkin, H. (2002). Urban Sprawl and Public Health. *Public Health Reports*, 117(3), 201–217. [https://doi.org/10.1016/S0033-3549\(04\)50155-3](https://doi.org/10.1016/S0033-3549(04)50155-3)

## G

---

- Galindo Duarte, M., Pérez Tello, C., Benites Zamora, J. L., Santos Gómez, M. A., & Leyva Camacho, O. (2008). Sistema De Protección Del Aislamiento E Impermeabilización De Techos Evaluación De Viviendas Del Desierto. *Energética*, (40), 5–12.
- Galster, G., Hanson, R., Ratcliffe, M. R., Wolman, H., Coleman, S., & Freihage, J. (2001). Wrestling Sprawl to the Ground: Defining and measuring an elusive concept. *Housing Policy Debate*, 12(4), 681–717. <https://doi.org/10.1080/10511482.2001.9521426>
- García-Bellido, J. (2000). Ildefonso Cerdá y el nacimiento de la Urbanística: la primera propuesta disciplinar de su estructura profunda. *Scripta Nova*, 4(55–78). Retrieved from <https://revistes.ub.edu/index.php/ScriptaNova/article/view/190/167>
- García-Nevado, E. (2019). *Termografía del cañón urbano. Uso de la perspectiva para una evaluación térmica global de la calle* (Universitat Politècnica de Catalunya). Retrieved from <http://hdl.handle.net/2117/132766>

- García-Nevado, E., Pages-Ramon, A., & Coch, H. (2016). Solar access assessment in dense urban environments: The effect of intersections in an urban canyon. *Energies*, 9(10), 796. <https://doi.org/10.3390/en9100796>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (Quinta Edi). Ciudad de México: Instituto de Geografía - UNAM.
- Gehl, J. (2010). *Cities for people* (2nd ed.). Washington DC: Island Press.
- Gehl, J. (2011). *Life between buildings: Using public space* (6th ed.; Island Press, Ed.). <https://doi.org/10.1016/j.ejcb.2006.01.005>
- Giancola, E., Soutullo, S., Olmedo, R., & Heras, M. R. (2014). Evaluating rehabilitation of the social housing envelope: Experimental assessment of thermal indoor improvements during actual operating conditions in dry hot climate, a case study. *Energy and Buildings*, 75, 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.010>
- Giovagnorio, I., & Chiri, G. M. (2016). The Environmental Dimension of Urban Design: A Point of View. In *Sustainable Urbanization: Vol. i* (p. 13). <https://doi.org/10.5772/62883>
- Golany, G. S. (1996). Urban design morphology and thermal performance. *Atmospheric Environment*, 30(3), 455–465. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00266-9](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00266-9)
- Gomez-Azpeitia, L. G., Bojórquez-Morales, G., Ruiz, R. P., Marincic, I., González, E., & Tejeda, A. (2014). Extreme Adaptation to Extreme Environments in Hot Dry, Hot Sub-humid and Hot Humid Climates in Mexico. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 8(8), 929–942. <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2014.08.001>
- Grageda Bustamante, A. (2003). *Seis expulsiones y un adiós: despojos y exclusiones en Sonora* (Plaza y Valdes, Ed.). Ciudad de México.
- Güneralp, B., Zhou, Y., Ürge-Vorsatz, D., Gupta, M., Yu, S., Patel, P. L., ... Seto, K. C. (2017). Global scenarios of urban density and its impacts on building energy use through 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(34), 8945–8950. <https://doi.org/10.1073/pnas.1606035114>
- Gupta, V. (1984). Solar radiation and urban design for hot climates. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 11(4), 435–454. <https://doi.org/10.1068/b110435>
- Gupta, V. (1987). Thermal Efficiency of Building Clusters: An Index For Non Air-Conditioned Buildings in Hot Climates. In *Energy and Urban Built Form* (pp. 133–145). <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-00891-4.50012-9>
- Gutiérrez Corrales, A. A. (2015). Abreviaturas del poder porfirista en el espacio urbano hermosillense. *Región y Sociedad*, 28(65), 45–79. <https://doi.org/10.22198/rys.2016.65.a357>

## H

---

- H. Ayuntamiento de Hermosillo. (2012a). *Catastro Hermosillo*. Hermosillo, México: Ayuntamiento de Hermosillo.
- H. Ayuntamiento de Hermosillo. (2012b). *Reglamento de construcción y normas técnicas complementarias* (p. 120). p. 120. Hermosillo: H. Ayuntamiento de Hermosillo.
- H. Ayuntamiento de Hermosillo. (2014). *Programa de desarrollo urbano del centro de población de Hermosillo* (p. 285). p. 285. Retrieved from <http://www.implanhermosillo.gob.mx/programas-2/>
- H. Ayuntamiento de Hermosillo. (2016). *Programa de desarrollo metropolitano de Hermosillo* (p. 341). p. 341. Hermosillo: H. Ayuntamiento de Hermosillo.
- H. Ayuntamiento de Hermosillo. (2018). *Hermosillo a escala humana. Ciudad diversificada, innovadora y sostenible*. Retrieved from <http://www.implanhermosillo.gob.mx/wp-content/uploads/2018/08/plandeaccion-AC-31-07-2018-Digital.pdf>
- Hammad, F., & Abu-Hijleh, B. (2010). The energy savings potential of using dynamic external louvers in an office building. *Energy and Buildings*, 42(10), 1888–1895. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.024>
- Haughton, G., & Hunter, C. (1994). Sustainable Cities. In Routledge (Ed.), *Regional Development and Public Policy. Regions and Cities* (2004th ed.). London.

## I

---

- Idris, Y. M., & Mae, M. (2017). Anti-insulation mitigation by altering the envelope layers' configuration. *Energy and Buildings*, 141, 186–204. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.025>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1990). XI Censo general de población y vivienda 1990. Retrieved August 15, 2019, from Censos y Censos de Población y Vivienda website: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1990/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Mapa Digital de México. Retrieved August 30, 2020, from <https://www.inegi.org.mx/temas/mapadigital/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). *Referencias geográficas y extensión territorial de México*. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). *Principales resultados de la Encuesta Intercensal 2015 Sonora*. Retrieved from [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018a). *Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2018* (2018th ed.). Retrieved from [www.inegi.org.mx/](http://www.inegi.org.mx/)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018b). *Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2018* (2018th ed.). Retrieved from [www.inegi.org.mx/](http://www.inegi.org.mx/)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018c). Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) 2018. Retrieved August 29, 2020, from <https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/>
- IPCC. (2014). Climate Change 2014. Synthesis Report. In Core Writing Team, R. K. Pachauri, & L. Meyer (Eds.), *Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC.
- Isaac, M., & van Vuuren, D. P. (2009). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy*, 37(2), 507–521. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.051>

## J

---

- Jacobs, J. (1961). *The death and life of Great American Cities*. Madrid: Capitan Swing Libros.
- Johnson, G. T., & Watson, I. D. (1984). The Determination of View-Factors in Urban Canyons. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2), 329–335. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0329:TDOVFI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0329:TDOVFI>2.0.CO;2)

## K

---

- Kántor, N., & Unger, J. (2011). The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment — the mean radiant temperature. *Open Geosciences*, 3(1), 90–100. <https://doi.org/10.2478/s13533-011-0010-x>
- Katz, P. (1994). *The New Urbanism: Toward an Architecture of Community* (McGraw-Hill Education, Ed.). New York.
- Kolaitis, D. I., Malliotakis, E., Kontogeorgos, D. A., Mandilaras, I., Katsourinis, D. I., & Founti, M. A. (2013). Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings. *Energy and Buildings*, 64, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.004>
- Krishan, A. (1996). The habitat of two deserts in India: hot-dry desert of Jaisalmer (Rajasthan) and the cold-dry high altitude mountainous desert of Leh (Ladakh). *Energy and Buildings*, 23(3), 217–229. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00947-7](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00947-7)
- Krüger, E., Pearlmutter, D., & Rasia, F. (2010). Evaluating the impact of canyon geometry and orientation on cooling loads in a high-mass building in a hot dry environment. *Applied Energy*, 87(6), 2068–2078. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.034>

## L

- Lagarda, I. (2008). *Historia de Hermosillo: origen, fundo legal, antiguos ejidos*. (2015th ed.; I. Lagarda, Ed.). Retrieved from <http://www.ssh.org.mx/portfolio-item/historia-de-hermosillo-origen-fundo-legal-antiguos-ejidos/>
- Lagarda, I. (2016). *Hermosillo. Historia de la ciudad*. Retrieved from <http://www.ssh.org.mx/2016/09/25/hermosillo-historia-de-la-ciudad/>
- Lelo, K. (2014). A GIS Approach to Urban History: Rome in the 18th Century. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 3(4), 1293–1316. <https://doi.org/10.3390/ijgi3041293>
- LEMA. (2019). Laboratorio de Energía, Medio Ambiente y Arquitectura. Retrieved August 30, 2019, from <https://lema-arq.unison.mx/>
- Liu, B. Y. H., & Jordan, R. C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4(3), 1–19. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(60\)90062-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(60)90062-1)
- López-Ordóñez, C., Crespo, I., & Roset, J. (2018). Condiciones ambientales del espacio público de ciudades dispersas en clima desértico - cálido. In J. Monclús & C. Diéz (Eds.), *Proceedings of ISUF-H 2018. Ciudad y formas urbanas: perspectivas transversales*. (pp. 117–128). <https://doi.org/10.26754/uz.9788417358839>
- López-Ordóñez, C., Crespo, I., & Roset, J. (2019). Reestructurando la ciudad: conteniendo la expansión urbana y reduciendo el acceso solar en las calles de una ciudad cálida y desértica. *International Conference Virtual City and Territory*, (13), 1–14. <https://doi.org/10.5821/ctv.8540>
- Lopez-Ordoñez, C., Crespo, I., Roset, J., & Coch, H. (2020). Urban Growth vs Density : The case of a low – density and hot desert climate city. *PLEA2020 : Planning Post Carbon Cities*. A Coruña.
- López-Ordóñez, C., Crespo, I., Roset, J., & Coch, H. (2020). The Role of Thermal Insulation in the Architecture of Hot Desert Climates. In J. Littlewood, R. Howlett, A. Capozzoli, & L. Jain (Eds.), *Sustainability in Energy and Buildings. Smart Innovation, Systems and Technologies* (Vol. 163, pp. 433–444). [https://doi.org/10.1007/978-981-32-9868-2\\_37](https://doi.org/10.1007/978-981-32-9868-2_37)
- López Levi, L., & Rodríguez Chumillas, I. (2005). Evidencias y discursos del miedo en la ciudad: Casos mexicanos. *Scripta Nova*, 9(194 (54)). <https://doi.org/ISSN: 1138-9788>
- Loredo López, J. L. (2002). *Origenes poblacionales en Sonora siglos XVII y XVIII : estudio de caso La Santísima Trinidad del Pitic*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Low, S. M. (2003). *Behind the Gates: Life, Security, and Pursuit of Happiness in Fortress America* (1st ed.; Routledge, Ed.). <https://doi.org/10.4067/S0250-71612003008700008>
- Lynch, K. (1960). *The Image of the City* (1990th ed.). Boston: The M.I.T. Press.
- Lynch, K. (1984). *Good city form*. The M.I.T. Press.

## M

- Marincic, I., Ochoa de la Torre, J. M., Alpuche Cruz, M. G., Duarte Aguilar, A., Vargas, L., González, I., ... Huelsz, G. (2011). La construcción actual de viviendas en Hermosillo y su adecuación al clima por medios pasivos. *Memorias Del XXXV Congreso Nacional de Energía Solar ANES*, 189–193. Chihuahua: ANES.
- Marincic, I., Ochoa de la Torre, J. M., & Del Río, J. A. (2012). Confort térmico adaptativo dependiente de la temperatura y la humedad. *ACE: Architecture, City and Environment*, 07(20), 27–46. <https://doi.org/10.5821/ace.v7i20.2572>
- Martin, L., & March, L. (1972). *Urban Space and Structures* (2010th ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Matos Moctezuma, E. (2001). Reflexiones acerca del plano de Tenochtitlan publicado en Nuremberg en 1524. *Caravelle*, 76(1), 183–195. <https://doi.org/10.3406/carav.2001.1296>
- Mawromatis, C. (2002). Movilidad en los suburbios dispersos y el nuevo urbanismo en los Estados Unidos de América: ¿Importación irreflexiva desde Chile? *Revista de Urbanismo*, 5, 1–24. Retrieved from <http://revistaurbanismo.uchile.cl>

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

- Medina, C. (2007). De Tenochtitlan a Uppsala – La historia del Mapa de México. *Coloquio de Cultura Mexicana*, 1–9. Retrieved from [http://www.naua.se/Mexico07/Pub/Documentos/Carmen\\_Medina\\_P.pdf](http://www.naua.se/Mexico07/Pub/Documentos/Carmen_Medina_P.pdf)
- Méndez Sainz, E. (1997). *Ciudad Fragmentaria* (Instituto Sonorense de Cultura, Ed.). Hermosillo.
- Méndez Sainz, E. (2004). Vecindarios defensivos latinoamericanos. Los espacios prohibitorios de la globalización. *Perspectivas Urbanas*, (4), 1–17. <https://doi.org/ISSN: 1695-534X>
- Middel, A., Häb, K., Brazel, A. J., Martin, C. A., & Guhathakurta, S. (2014). Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*, 122, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.004>
- Milenio Digital. (2019, June 12). Hermosillo rompe récord y se convierte en la ciudad más caliente del mundo. *Milenio*. Retrieved from <https://www.milenio.com/virales/hermosillo-se-convierte-en-la-ciudad-mas-caliente-del-mundo>
- Mohajeri, N., Gudmundsson, A., Kunckler, T., Upadhyay, G., Assouline, D., Kämpf, J. ., & Scartezzini, J. L. (2019). A solar-based sustainable urban design: The effects of city-scale street-canyon geometry on solar access in Geneva, Switzerland. *Applied Energy*, 240(August 2018), 173–190. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.014>
- Mohajeri, N., Upadhyay, G., Gudmundsson, A., Assouline, D., Kämpf, J., & Scartezzini, J.-L. (2016). Effects of urban compactness on solar energy potential. *Renewable Energy*, 93, 469–482. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.053>
- Montavon, M., Scartezzini, J., & Compagnon, R. (2004). Solar Energy Utilisation Potential of three different Swiss Urban Sites. *Schweizerisches Status-Seminar*, (September), 503–510.
- Morganti, M. (2013). *Sustainable Density* (Universitat Politècnica de Catalunya). Retrieved from <http://hdl.handle.net/10803/365041>
- Morganti, M., Salvati, A., Coch, H., & Cecere, C. (2017). Urban morphology indicators for solar energy analysis. *Energy Procedia*, 134(October), 807–814. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.533>
- Mumford, L. (1938). The Culture of Cities. In *The Journal of Land & Public Utility Economics* (1970th ed., Vol. 14). Orlando: Harcourt Brace Jovanovic, Publishers.
- Mumford, L. (1961). *The City in History: Its Origins, Its Transformations, and Its Prospects* (1961st ed.). New York: Harcourt, Brace and World.
- Muñoz, I., Garcia, M. A., & Calatayud, D. (2006). *SPRAWL. Definición, causas y efectos* (No. 3). Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2043845>

## N

---

- Najbjerg, T. (n.d.). The Severan Marble Plan of Rome (Forma Urbis Romae). Retrieved August 30, 2020, from Stanford Digital Forma Urbis Romae Project website: <https://formaurbis.stanford.edu/docs/FURmap.html>
- Navarro-Navarro, L. A., & Moreno Vázquez, J. L. (2016). Cambios en el paisaje arbolado en Hermosillo: Escasez de agua y plantas nativas Introducción. *Región y Sociedad*, 28(67), 79–120. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-39252016000300079&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252016000300079&lng=es&tlng=es)
- Neuman, M. (2005). The compact city fallacy. *Journal of Planning Education and Research*, 25(1), 11–26. <https://doi.org/10.1177/0739456X04270466>
- Newman, P. (2014). Density, the Sustainability Multiplier: Some Myths and Truths with Application to Perth, Australia. *Sustainability*, 6(9), 6467–6487. <https://doi.org/10.3390/su6096467>
- Nunez, M., & Oke, T. R. (1976). Long-wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology*, 10(2), 121–135. <https://doi.org/10.1007/BF00229280>

## O

---

- OECD. (2012). Compact City Policies: A Comparative Assessment. In OECD Green Growth Studies (Ed.), *Compact City Policies*. <https://doi.org/10.1787/9789264167865-en>

- Oke, T. R. (1978). *Boundary layer climates* (2nd ed.; Routledge, Ed.). Routledge. Taylor & Francis Group.
- Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1–3), 103–113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>

## P

---

- Pafka, E., & Dovey, K. (2017). Permeability and interface catchment: measuring and mapping walkable access. *Journal of Urbanism*, 10(2), 150–162. <https://doi.org/10.1080/17549175.2016.1220413>
- Palmero-Marrero, A. I., & Oliveira, A. C. (2010). Effect of louver shading devices on building energy requirements. *Applied Energy*, 87(6), 2040–2049. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.020>
- Palomares, R. (2008). *Calidad de vida en espacios urbanos: Estudio comparativo en fraccionamientos cerrados y fraccionamientos abiertos, en Nogales, Sonora*. El Colegio de Sonora.
- Pearlmutter, D., Bitan, A., & Berliner, P. (1999). Microclimatic analysis of “compact” urban canyons in an arid zone. *Atmospheric Environment*, 33(24–25), 4143–4150. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00156-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00156-9)
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Phaidon Editors. (2015). *MAPAS: EXPLORANDO EL MUNDO* (Phaidon Press Limited, Ed.). London.
- Pounds, N. (2005). *The Medieval City*. Westport, CT: Greenwood Publishing Group.
- Pozueta Echavarrí, J., Lamíquiz Daudén, F., & Porto Eschettino, M. (2013). *La ciudad paseable*. Madrid: CEDEX.
- PROMEXICO. (2016). Geografía y clima. Retrieved August 29, 2020, from <https://www.gob.mx/promexico/acciones-y-programas/geografia-y-clima>

## Q

---

- Quintana Pacheco, J., Almada Borbón, A. C., Ojeda De la Cruz, A., Ramos Corella, M. A., & García Arvizu, J. F. (2015). Una aproximación al valor del suelo habitacional: caso Hermosillo, Sonora, México. *Epistemos*, 19(9), 43–51.

## R

---

- R. Berke, P. (2002). Does sustainable development offer a new direction for planning? Challenges for the twenty-first century. *Journal of Planning Literature*, 17(1), 21.
- Radhi, H. (2009). Can envelope codes reduce electricity and CO2 emissions in different types of buildings in the hot climate of Bahrain? *Energy*, 34(2), 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.12.006>
- Ratti, C., Baker, N., & Steemers, K. (2005). Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, 37(7), 762–776. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.010>
- Ratti, C., Raydan, D., & Steemers, K. (2003). Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, 35(1), 49–59. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00079-8)
- Robinson, D. (2006). Urban morphology and indicators of radiation availability. *Solar Energy*, 80(12), 1643–1648. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.01.007>
- Robles, M. L. (2020, July 12). Hermosillo rompe récord de temperatura para un 12 de julio: 47 grados. *El Imparcial*. Retrieved from <https://www.elimparcial.com/sonora/hermosillo/Hermosillo-rompe-record-de-temperatura-para-un-12-de-julio-47-grados-20200712-0034.html>

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

- Rodríguez-Álvarez, J. (2016). Urban Energy Index for Buildings (UEIB): A new method to evaluate the effect of urban form on buildings' energy demand. *Landscape and Urban Planning*, 148, 170–187. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.01.001>
- Rueda i Palenzuela, S. (1998). *Visiones de la Ciudad: del Urbanismo de Cerda a la Ecología Urbana*.
- Rueda i Palenzuela, S. (2002). Els costos ambientals dels models urbans dispersos. *Papers: Regió Metropolitana de Barcelona: Territori, Estratègies, Planejament*, (36), 73–104.
- Ruiz Hernández, I. E. (2014). Identificación de asentamientos irregulares y diagnóstico de sus necesidades de infraestructura en Ciudad Juárez, Chihuahua, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, 88–101. <https://doi.org/10.14350/ig.41793>
- Rydin, Y. (1992). Environmental impacts and the property market. In M. Breheny (Ed.), *European Research in Regional Science 2. Sustainable Development and Urban Form* (pp. 217–241). Pion, London.

## S

- Sabaté Bel, J. (1985). El oficio de urbanista. Raymond Unwin in practice. In M. de Solà-Morales (Ed.), *UR: urbanismo revista* (Vol. 2). Barcelona: Romargraf, SA.
- Sabaté Bel, J. (2014). Las medidas de los trazados ortogonales. *QRU: Quaderns de Recerca En Urbanisme*, (4), 58–83. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2099/15555>
- Safriel, U., Adeel, Z., Niemeijer, D., Puigdefabregas, J., White, R., Lal, R., ... McNab, D. (2005). Chapter 22: Dryland Systems. In *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends, Volume 1* (pp. 625–664).
- Salvati, A. (2016). *La città compatta in clima mediterraneo: Isola di calore, morfologia e sostenibilità / The compact city in Mediterranean climate : Heat Island , Urban Morphology and Sustainability* (Universidad Politècnica de Catalunya). Retrieved from <http://hdl.handle.net/10803/394047>
- Salvati, A., Coch, H., & Morganti, M. (2017). Effects of urban compactness on the building energy performance in Mediterranean climate. *Energy Procedia*, 122, 499–504. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.303>
- Sarralde, J. J., Quinn, D. J., Wiesmann, D., & Steemers, K. (2015). Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London. *Renewable Energy*, 73, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.028>
- Schulz, J. (1978). Jacopo de' Barbari's View of Venice: Map Making, City Views, and Moralized Geography before the Year 1500. *The Art Bulletin*, 60(3), 425–474. <https://doi.org/10.1080/00043079.1978.10787588>
- Secretaría de Energía. (2015). *Evaluación Rápida del Uso de la Energía*. Retrieved from [http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/171266/21\\_\\_Monterrey.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/171266/21__Monterrey.pdf)
- Secretaría de Energía. (2018). *Balance Nacional de Energía 2017* (2018th ed.). Ciudad de México: Secretaría de Energía (SENER).
- SEGOB. (1996). Programa Nacional de Desarrollo Urbano 1995-2000. Retrieved July 20, 2018, from Diario Oficial de la Federación website: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4877390&fecha=27/03/1996](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4877390&fecha=27/03/1996)
- Sert, J. L. (1942). *Can Our Cities Survive?: An ABC of Urban Problems, Their Analysis, Their Solutions* (Harvard University Press, Ed.). Cambridge.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2019). Normales climatológicas. Hermosillo II (DGE) 1981-2010. Retrieved August 30, 2019, from <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
- Shariah, A., Shalabi, B., Rousan, A., & Tashtoush, B. (1998). Effects of absorptance of external surfaces on heating and cooling loads of residential buildings in Jordan. *Energy Conversion and Management*, 39(3–4), 273–284. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(96\)00185-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00185-9)
- Sharmin, T., & Steemers, K. (2013). Effect of canyon geometry on outdoor thermal comfort: A case-study of high-density , warm-humid climate. *PLEA 2013: Sustainable Architecture for a Renewable Future*, (September), 611–616. Retrieved from <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1169310/1169310.pdf>
- Sherif, A., El-Zafarany, A., & Arafa, R. (2012). External perforated window Solar Screens: The effect of screen depth and perforation ratio on energy performance in extreme desert environments. *Energy and Buildings*, 52, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.025>

- Sherif, Ahmad, El-Deeb, K., Zafarany, A. El, & Aly, M. (2012). Effectiveness of External Wall Shading in Reducing the Energy Consumption of Desert Buildings. *ICSDC 2011*, 265–275. [https://doi.org/10.1061/41204\(426\)34](https://doi.org/10.1061/41204(426)34)
- Simpson, J. R., & McPherson, E. G. (1997). The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona. *Energy and Buildings*, 25(2), 127–137. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01002-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01002-X)
- Siskna, A. (1997). The effects of block size and form in North American and Australian city centres. *Urban Morphology*, 1(1), 19–33. Retrieved from <http://www.urbanform.org/>
- Sivak, M. (2009). Potential energy demand for cooling in the 50 largest metropolitan areas of the world: Implications for developing countries. *Energy Policy*, 37(4), 1382–1384. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.031>
- Solís, D. (2008). Efecto de la orientación de una vivienda económica en el confort y consumo eléctrico por climatización: clima cálido-seco. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12, 8.
- Southworth, M. (2005). Designing the walkable city. *Journal of Urban Planning and Development*, 131(December), 246–257. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(2005\)131:4\(246\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2005)131:4(246))
- Strømmand-Andersen, J., & Sattrup, P. A. (2011). The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains. *Energy and Buildings*, 43(8), 2011–2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.007>
- Suehrcke, H., Peterson, E. L., & Selby, N. (2008). Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in a hot climate. *Energy and Buildings*, 40(12), 2224–2235. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.015>
- Svampa, M. (2003). Los que ganaron. La vida en los countries y barrios privados. *EURE (Santiago)*, 29(88), 181–184. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612003008800010>
- Swanson, S. (2003). Documenting Prehistoric Communication Networks: A Case Study in the Paquimé Polity. *American Antiquity*, 68(4), 753–767. <https://doi.org/10.2307/3557071>

## T

---

- Torres-Quezada, J. (2018). *Comportamiento térmico de la cubierta en un clima cálido húmedo. Repercusión energética en el edificio* (Universitat Politècnica de Catalunya). Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/125312>
- Torres-Quezada, J., Coch, H., & Isalgué, A. (2019). Assessment of the reflectivity and emissivity impact on light metal roofs thermal behaviour, in warm and humid climate. *Energy and Buildings*, 188–189, 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.022>
- Tsai, Y. H. (2005). Quantifying urban form: Compactness versus “sprawl.” *Urban Studies*, 42(1), 141–161. <https://doi.org/10.1080/0042098042000309748>
- Turconi, C. (1997). The map of Bedolina in the context of the Rock Art of Valcamonica. *2nd International Congress of Rupestrian Archaeology*. Darfo Boario Terme.

## U

---

- U.S. Department of Energy (DOE). (2015). *EnergyPlus Documentation, Auxiliary EnergyPlus Programs*. (c), 35–43.
- U.S. Department of Energy (DOE) Building Technologies Office (BTO). (2018). *EnergyPlus*. Retrieved from <https://energyplus.net/downloads>
- UCM. (2020). *Liber Chronicarum*. Retrieved August 30, 2020, from Biblioteca Complutense Madrid website: <https://biblioteca.ucm.es/historica/liber-chronicarum>
- United Nations. (2017a). *Habitat III - New urban agenda*. Retrieved from [www.habitat3.org](http://www.habitat3.org)
- United Nations. (2017b). *Habitat III Regional Report - Latin America and The Caribbean - Sustainable Cities with Equality*. Retrieved from <http://habitat3.org/wp-content/uploads/HabitatIII-Regional-Report-LAC.pdf>

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, & Population Division. (2019a). *World Urbanization Prospects: The 2018 revision*. Retrieved from United Nations website: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, & Population Division. (2019b). *World Urbanization Prospects 2018: Highlights*. In *Webpage*. Retrieved from <https://population.un.org/wup/>

Unwin, R. (1909). *Town Planning in Practice. An introduction to the art of designing cities and suburbs* (T.F. Unwin, Ed.). London.

Unwin, R. (1912). *Nothing Gained By Overcrowding! How the Garden City type of development may benefit both owner and occupier* (3d ed.; Garden Cities & Town Planning Association, Ed.). London: P.S. King & Son.

Urban Task Force. (1999). *Towards an urban renaissance. Final report of the urban task force*. London: E & FN Spon.

US Energy Information Administration (EIA). (2017). *International Energy Statistics - Mexico*. Retrieved August 29, 2020, from <https://www.eia.gov/international/overview/country/MEX>

### V

---

Vanguardia. (2019, June 11). *Con 49.5 grados Hermosillo es la ciudad más caliente del mundo*. *Vanguardia*. Retrieved from <https://vanguardia.com.mx/articulo/con-495-grados-hermosillo-es-la-ciudad-mas-caliente-del-mundo>

Vásquez, S. D., Alpuche Cruz, M. G., Marincic, I., & Ochoa de la Torre, J. M. (2014). *Energy Saving in a Dry Climate and Vertical Housing*. *Energy Procedia*, 57, 1687–1695. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.159>

### W

---

W. Caves, R. (2005). *Encyclopedia of the City* (R. W. Caves, Ed.). New York: Routledge. Taylor & Francis Group.

Wikipedia. (2020). *Sistema de Información Geográfica*. Retrieved August 1, 2020, from Wikipedia. La enciclopedia libre website: [https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_de\\_información\\_geográfica](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_información_geográfica)

World Bank. (2020a). *Global Solar Atlas v2.3*. Retrieved August 29, 2020, from <https://globalsolaratlas.info/map>

World Bank. (2020b). *Urban Population - Mexico*. Retrieved August 28, 2020, from <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?locations=MX>

## **LISTADO DE MAPAS, TABLAS Y FIGURAS**

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

## MAPAS

---

### CAPITULO 3

Mapa 3.1. Mapa en SIG del crecimiento de Hermosillo a partir de 1990. ....	93
Mapa 3.2. Mapa en SIG de la distribución de la densidad de población de Hermosillo.....	95
Mapa 3.3. Mapa en SIG de la distribución de la densidad de población de Hermosillo ajustada a los rangos establecidos por Jane Jacobs.....	96
Mapa 3.4. Mapa en SIG con las tipologías de vivienda existente en Hermosillo. ....	100
Mapa 3.5. Mapa en SIG de la distribución de lotes baldíos en Hermosillo. ....	102
Mapa 3.6. Mapa en SIG de la distribución de posibles sub – centros en Hermosillo.....	104

### CAPITULO 4

Mapa 4.1. Infraestructura pública y edificios terciarios (>5 plantas) en el área de estudio.....	123
Mapa 4.2. Densidad de población (hab/ha) distribuida por manzanas en el área de estudio.....	125
Mapa 4.3. Distribución de viviendas en el área de estudio.....	127
Mapa 4.4. Indicador GSI (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ) por manzanas dentro del área de estudio. ....	129
Mapa 4.5. Indicador FSI (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ) por manzanas dentro del área de estudio. ....	131
Mapa 4.6. Indicador L (Altura edificatoria) por manzanas dentro del área de estudio. ....	133

### CAPITULO 5

Mapa 5.1. Distribución de los diferentes tipos de vivienda construidos a partir de 1990 en Hermosillo. ....	186
Mapa 5.2. Distribución de los diferentes tipos de vivienda construidos a partir de 1990 en Hermosillo según su calificación de demanda de refrigeración.....	198

## TABLAS

---

### CAPITULO 1

Tabla 1.1. Características de una ciudad compacta (Neuman, 2005).....	41
---	----

### CAPITULO 2

Tabla 2.1. Estudios previos sobre el estudio del comportamiento energético y mejora de la vivienda en un clima cálido – seco (BWh).....	72
Tabla 2.1. Estudios previos sobre el estudio del comportamiento energético y mejora de la vivienda en un clima cálido – seco (BWh) (Continuación) .....	73

### CAPITULO 4

Tabla 4.1. Medidas de permeabilidad del área de estudio y de diferentes morfologías (Pafka & Dovey, 2017). ....	120
---	-----

## FIGURAS

---

### INTRODUCCION

Figura I.1. Porcentaje de urbanización y aglomeraciones urbanas de 500.000 o más hab. (United Nations, 2019b).....	15
Figura I.2. Distribución del sistema de <i>drylands</i> y sus subtipos (Safriel et al., 2005).....	16
Figura I.3. Relación entre el uso de energía del transporte privado per cápita y densidad urbana (Newman, 2014).....	17
Figura I.4. Peatones esperando el transporte público bajo la sombra de un poste del servicio eléctrico. ....	18
Figura I.5. Metodología de la tesis. ....	22

### CAPITULO 1

Figura 1.1. « <i>Città ideale</i> », autor desconocido. Representa una plaza renacentista en perspectiva.....	29
Figura 1.2. Pueblo del desierto en Nuevo México con morfología compacta (Coch & Serra, 1995). ...	30
Figura 1.3. Ciudad amurallada de Florencia. Ilustración de las Crónicas de Núremberg de 1493. ....	31
Figura 1.4. Calle de la antigua ciudad amurallada de Barcelona. ....	32
Figura 1.5. Ilustraciones de Gustave Doré de 1872. Escenas de Londres. ....	33
Figura 1.6. Crecimiento de Londres (1840 – 1929). ....	34
Figura 1.7. Diagramas de la Ciudad Jardín de Howard.....	35
Figura 1.8. Nueva Delhi es un ejemplo de la influencia del modelo de Howard. ....	36
Figura 1.9. Publicidad de la Agencia BBH para <i>The Guardian</i> . Retrata el acelerado crecimiento urbano: Londres si creciera tan rápido como Lagos, y París si tuviese la misma cantidad de automóviles que Bombay. ....	37
Figura 1.10. Patrones físicos que definen el <i>urban sprawl</i> (Galster et al., 2001).....	38
Figura 1.11. Urban sprawl: Suburbios de Sun City en Phoenix, Arizona, inaugurada en 1960. ....	39
Figura 1.12. Fraccionamientos cerrados de diferentes niveles socioeconómicos en la ciudad de Hermosillo. ....	40
Figura 1.13. Desarrollo monocéntrico (izquierda) y desarrollo policéntrico (derecha) (Tsai, 2005). ....	42
Figura 1.14. De izquierda a derecha: misma densidad de viviendas, diferente morfología urbana (Urban Task Force, 1999); misma cantidad de espacio construido, diferente distribución (Martin & March, 1972). ....	43
Figura 1.15. Estudio comparativo de la distribución de viviendas en 4 hectáreas (Unwin, 1912). ....	44
Figura 1.16. La Ville Radieuse y el Plan Voisin para Paris de Le Corbusier (Izquierda y derecha arriba); Relación entre la altura del edificio, ángulo solar, cobertura del suelo y densidad edificada de Gropius (Derecha abajo).....	45
Figura 1.17. Modelos con la distribución de la densidad poblacional de tres ciudades (Burdett & Deyan, 2011). ....	46
Figura 1.18. Cálculo de los indiferentes indicadores de densidad (Berghauser Pont & Haupt, 2009). ....	47
Figura 1.19. <i>Spacematrix</i> con los tres ejes: FSI, GSI y N (Berghauser Pont & Haupt, 2009).48	
Figura 1.20. En la imagen superior se muestran las áreas de referencia del <i>Spacemate</i> que cumplen con los criterios de densidad indicados (Berghauser Pont & Haupt, 2009).....	49
Figura 1.21. Ubicación en el <i>Spacemate</i> de las diferentes doctrinas que han sido discutidas a lo largo de la historia (Berghauser Pont & Haupt, 2009).....	50

**CAPITULO 2**

Figura 2.1. Modelo geométrico del *Sky View Factor* (Johnson & Watson, 1984)..... 53

Figura 2.2. Sitios estudiados y numero de estudios por sitio, con su distribución en la superficie global del subtipo climático BWh de *Köppen* (AlKhaled et al., 2020)..... 54

Figura 2.3. Vista esquemática de un cañón urbano simétrico y sus descriptores geométricos. A la derecha se muestra el valor del SVF en función a la relación de aspecto del cañón (Erell, 2011)..... 55

Figura 2.4. Irradiancias mensuales medias para cañones con E-W y N-S, con diferentes relaciones de aspecto. Los símbolos +, x, \*, □, Δ corresponden a H/W= (0,25 ;0,5 ;1, 2, 3, 4) *Köppen* (Arnfield, 1990b).  
..... 56

Figura 2.5. Patrones de sombra de varios cañones con diferentes relaciones H/W, a diferentes horas en un día de verano y uno de invierno. Las sombras están calculadas para una latitud 30°N (Erell, 2011).  
..... 57

Figura 2.6. Sección de una calle típica en Jaisalmer, India (27°N). Se muestra la proyección de la sombra en diferentes momentos del solsticio de verano (Krishan, 1996). ..... 58

Figura 2.7. Diferenciación de las escalas espaciales para el estudio climático (Oke, 1978). ..... 59

Figura 2.8. Modelos tipológicos y morfológicos de dos barrios de Barcelona (Curreli & Coch, 2013).. 59

Figura 2.9. Tres posibles configuraciones de un volumen edificado de 800.000 m<sup>3</sup> (arriba): (A) pabellón, (B) patio central, (C) bloque lineal. Patrones de sombra/luz en un clúster de edificios de patio central (abajo) (Gupta, 1987). ..... 60

Figura 2.10. *Sky View Factor* a nivel de cale en tres diferentes configuraciones urbanas (Ratti et al., 2003). ..... 60

Figura 2.11. Radiación media mensual y anual (kWh/m<sup>2</sup>) en la superficie de las calles de Ginebra, Suiza, se ha utilizado GIS para su estimación (Mohajeri et al., 2019)..... 61

Figura 2.12. Estudio sobre forma urbana, densidad y potencial solar. Modelos genéricos para simulación (Cheng et al., 2006)..... 62

Figura 2.13. Comparación de cuatro formas urbanas hipotéticas en el área de Perolles en Friburgo, Suiza. Se calculó el potencial solar en las fachadas (Compagnon, 2004). ..... 62

Figura 2.14. De izquierda a derecha: Mapa de valores medios de un índice de sombra en los barrios de Tel Aviv. Mapa con los valores medios del índice de sombra en segmentos de las calles de Tel Aviv. En la tercera imagen se muestra un mapa con valores de la radiación recibida en las calles (Aleksandrowicz et al., 2020)..... 63

Figura 2.15. Diferentes proyecciones generadas por Heliodon2. De izquierda a derecha: proyección estereográfica, proyección equivalente y proyección ortográfica. .... 63

Figura 2.16. Mapa producido por Heliodon2, muestra la radiación solar directa recibida sobre el pavimento (García-Nevado, 2019)..... 64

Figura 2.17. Colores en las cubiertas. De arriba hacia abajo: Hermosillo, El Cairo y Phoenix. .... 66

Figura 2.18. Celosía: Patrones de sombra y porcentajes de sombreado resultantes de celosías con diferentes relaciones de profundidad. Ejemplo de celosía moderna utilizada en El Cairo. Fuente (A. Sherif et al., 2012). ..... 67

Figura 2.19. Identificación del comportamiento anti-aislamiento. Ejemplo de una vivienda con perfil continuo de ocupación, en Miami, con una envolvente compuesta de ladrillo + aislamiento + ladrillo (Idris & Mae, 2017). ..... 69

Figura 2.20. Comportamiento anti-aislamiento con distintas configuraciones: (de izquierda a derecha): Phoenix, Arizona, con envolvente compuesta de aislamiento + ladrillo + aislamiento; Riad, Arabia Saudita, con envolvente de compuesta de ladrillo + aislamiento (Idris & Mae, 2017). ..... 70

Figura 2.21. A la izquierda, la variación en la calefacción y refrigeración y carga total con la absorción de una cubierta plana de hormigón sin aislamiento; a la derecha, se representa ésta variación pero con la absorción de la misma cubierta con aislamiento (Shariah et al., 1998)..... 71

**CAPITULO 3**

Figura 3.1. Ubicación de México (verde) en el mapa mundial..... 81

Figura 3.2. Clasificación climática de Köppen y regiones de México. .... 82

Figura 3.3. Ubicación de Hermosillo en el desierto de Sonora..... 83

Figura 3.4. Temperatura (media máxima, media y media mínima), y la humedad relativa media en la ciudad de Hermosillo. Se ha señalado de rojo la temporada cálida (mayo – octubre) (SMN, 2019).... 84

Figura 3.5. Mapa nubosidad de junio de 2019 hecho a partir de imágenes satelitales de NASA..... 84

Figura 3.6. Comparación de la radiación solar directa simulada RS\_sim\_(Heliodon2) con la radiación solar global RS\_global\_(LEMA), nubosidad media mensual (Sky\_cover\_(%)). El recuadro negro indica la temporada de lluvias, el recuadro rojo indica la temporada de calor (mayo – octubre). .... 85

Figura 3.7. Esquema del trazado establecido por las Ordenanzas de Felipe II y el seguido en Hermosillo. .... 87

Figura 3.8. Mapa que muestra el aspecto que pudo tener Hermosillo a finales del siglo XVIII. .... 88

Figura 3.9. Ilustración de Hermosillo al pie del Cerro de la Campana de J. Russel Bartlett, 1852 (Lagarda, 2008)..... 88

Figura 3.10. Plano de Hermosillo y proyecto de ensanche hacia el norte. Jesús M. Aínsa, 1900 (Gutiérrez Corrales, 2015). .... 89

Figura 3.11. Hermosillo en 1947. Ubicación de la nueva Colonia Pitic y una imagen de las calles de la nueva colonia, influenciada por los suburbios de Estados Unidos (Lagarda, 2016). .... 90

Figura 3.12. Relación Hermosillo - Río Sonora a lo largo de su historia. De arriba abajo: Imágenes de Hermosillo en los años 40 (Compañía Mexicana Aerofoto); Cauce del Río Sonora en los años 80 (Conrado Quezada Escandón); Proyecto Río Sonora Hermosillo XXI; Cauce Río Sonora años 90 (Duarte Aguilar, 2003)..... 91

Figura 3.13. Crecimiento de la población de Hermosillo y de la mancha urbana. .... 92

Figura 3.14. Crecimiento de la población de Hermosillo y el comportamiento de la densidad urbana. 94

Figura 3.15. Densidad urbana en 2015 de diversas ciudades agrupadas por climas..... 97

Figura 3.16. Vivienda de interés social 1970 (izquierda) y 1990 (derecha)..... 98

Figura 3.17. Ubicación de los conjuntos habitacionales FOVISSSTE y su aspecto actual..... 99

Figura 3.18. Torre Solara (izquierda), Sky Pitic (Centro) y Torres Altitud 40 (derecha)..... 99

Figura 3.19. Relación entre la superficie total de lotes baldíos y la superficie total de Hermosillo. .... 101

**CAPITULO 4**

Figura 4.1. « Le panneau de l’Ours » en las cuevas de Lascaux, Francia. Imagen de Norbert Aujoulat. .... 109

Figura 4.2. Tablilla de arcilla con el plano de la ciudad de Nippur (Phaidon Editors, 2015). .... 110

Figura 4.3. Reproducción gráfica de «La Roca 1 de Bedolina», conocida como el Mapa de Bedolina. .... 110

Figura 4.4. Mapa del mundo conocido, en el centro Babilonia aparece sobre el Éufrates (Phaidon Editors, 2015). .... 111

Figura 4.5. Fragmento de la *Forma Urbis* (Phaidon Editors, 2015). .... 111

Figura 4.6. Vista de Núremberg, Crónicas de Núremberg, Folio C. Hartmann Schedel, 1493. .... 112

Figura 4.7. Vista de Venecia de principios del siglo XVI de Jacopo de’ Barbari, 1500 (Phaidon Editors, 2015). .... 113

Figura 4.8. Mapa de Imola al centro de un anillo, líneas trazadas con una brújula. Leonardo da Vinci, 1502 (Phaidon Editors, 2015). .... 113

Figura 4.9. Mapa de Cortés, impreso en Núremberg en 1524 (Phaidon Editors, 2015). .... 114

Figura 4.10. La pianta grande di Roma, Mapa de Nolli. Giambattista Nolli, 1748. .... 115

## LISTADO DE MAPAS, TABLAS Y FIGURAS

Figura 4.11. Comparación de detalles del mapa de Nolli de 1748 con imágenes de satélite actuales. ....	115
Figura 4.12. Arriba: SmellyMaps, BigTimeBCN. Abajo: Ethnicity Estimator, Shadows of NY.....	116
Figura 4.13. Área de estudio: a la izquierda una imagen satelital, a la derecha: sentido de calles principales. ....	118
Figura 4.14. Resultado del análisis de la superficie de manzanas y evaluación de los recorridos peatonales.....	120
Figura 4.15. Desempeño de la permeabilidad del tejido del área de estudio con diferentes morfologías. ....	121
Figura 4.16. Comparativa del indicador densidad de intersecciones (i/ha) del área de estudio y los diferentes tejidos evaluados.....	121
Figura 4.17. Número de elementos de cada tipo de infraestructura pública en el área de estudio. ...	122
Figura 4.18. Relación entre la densidad de población bruta del área de estudio y la ciudad de Hermosillo. ....	124
Figura 4.19. Relación entre la superficie de viviendas en el área de estudio y su superficie total.....	126
Figura 4.20. Relación entre la huella de edificación bruta en el área de estudio y su superficie total.	128
Figura 4.21. Relación entre la superficie edificada bruta en el área de estudio y su superficie total. .	130
Figura 4.22. Diagramas <i>Spacemate</i> (Berghauser Pont & Haupt, 2009). Comparación de la densidad bruta (arriba) de diferentes tejidos de siete ciudades. Abajo, representación gráfica de la diferencia entre la densidad bruta y neta de diferentes tejidos de cuatro ciudades: Hermosillo, Barcelona, Madrid y Roma. ....	134
Figura 4.23. Área de estudio y calles seleccionadas para el análisis del acceso solar a nivel peatonal. ....	136
Figura 4.24. Imágenes de las diferentes secciones consideradas para definir las calles tipo. En rojo la calle Monterrey (ew.4) y en verde la calle Matamoros (ns.4). El punto ns.4 presenta una imagen del Jardín Juárez: en esta morfología urbana ya no se puede hablar de un cañón urbano. ....	137
Figura 4.25. Radiación solar y horas de sol directo recibido el día promedio en la calle Monterrey (ew.4). ....	139
Figura 4.26. Variación en la cantidad de radiación solar recibida (kWh/m <sup>2</sup> día) en la calle Monterrey (ew.4) durante la temporada de calor y su diferencia con respecto al valor máximo posible. ....	140
Figura 4.27. Radiación solar y horas de sol directo recibido el día promedio en la calle Matamoros (ns.4). ....	141
Figura 4.28. Variación en la cantidad de radiación solar recibida (kWh/m <sup>2</sup> día) en la calle Matamoros (ns.4) durante la temporada de calor y su diferencia con respecto al valor máximo posible. ....	142
Figura 4.29. Radiación recibida el día promedio en las calles Monterrey (ew.4) y Matamoros (ns.4).	143
Figura 4.30. Diferencia en la variación de la cantidad de radiación recibida en las calles Monterrey (ew.4) y Matamoros (ns.4). ....	144
Figura 4.31. Cantidad de horas de sol en el día promedio en las calles Monterrey (ew.4) y Matamoros (ns.4). ....	145
Figura 4.32. Distribución de la radiación solar directa en la red de calles del área de estudio. Día promedio de la temporada de calor. ....	146
Figura 4.33. Distribución de las horas de sol directo en la red de calles del área de estudio. Día promedio de la temporada de calor.....	147
Figura 4.34. Variación en la cantidad de radiación solar recibida (kWh/m <sup>2</sup> día) en la red de calles, durante la temporada de calor y su diferencia con respecto al valor máximo posible.....	148
Figura 4.35. Representación gráfica del artículo 38 del Reglamento de Construcción de Hermosillo. ....	150

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

Figura 4.36. A la izquierda: proyección estereográfica desde un punto al centro de un cañón urbano semi-infinito con una relación de aspecto  $h/w = 0,4$ . A la derecha: proyección ortográfica del mismo punto, con un SVF= 78,2%. ..... 150

Figura 4.37. Esquema de la sección promedio de la calle Este - Oeste. En rojo se encuentra el ángulo solar para el mediodía del 21 de junio y 31 de octubre. Se genera un corredor de sombra de 0,60 m. .... 151

Figura 4.38. Esquema de la sección propuesta una calle Este - Oeste. En rojo se encuentra el ángulo solar para el mediodía del 21 de junio y 31 de octubre. Se genera un corredor de sombra de 1,60 m. .... 151

Figura 4.39. Comparativa de las proyecciones estereográficas y ortográficas de un cañón urbano semi-infinito con una relación de aspecto  $h/w = 0,4$  y otro con  $h/w = 1$ . El punto ubicado al centro del cañón urbano de la izquierda tiene un SVF de 78,2%, mientras que el de la derecha tiene un SVF de 45%, una reducción mayor al 30%. ..... 152

Figura 4.40. Diagramas estereográficos y secciones de las calles Monterrey (ew.4) y Matamoros (ns.4). ..... 154

Figura 4.41. Resultados de la simulación de radiación solar que recibe la calle Monterrey (ew.4) durante la temporada de calor. .... 155

Figura 4.42. Resultados de la simulación de la cantidad de horas de sol directo que recibe la calle Monterrey (ew.4) durante la temporada de calor. .... 156

Figura 4.43. Comparativa entre la propuesta (p) de la calle Monterrey ew.4 y su situación actual. ... 157

Figura 4.44. Resultados de la simulación de radiación solar que recibe la calle Matamoros (ns.4) durante la temporada de calor. .... 158

Figura 4.45. Resultados de la simulación de la cantidad de horas de sol directo que recibe la calle Matamoros (ns.4) durante la temporada de calor. .... 159

Figura 4.46. Comparativa entre la propuesta (p) de la calle Matamoros ns.4 y su situación actual. .. 160

Figura 4.47. Radiación recibida el día promedio en las calles Monterrey (ew.4) y Matamoros (ns.4).161

Figura 4.48. Diferencia en la variación de la cantidad de radiación recibida en las propuestas para las calles Monterrey (ew.4) y Matamoros (ns.4). ..... 162

Figura 4.49. Cantidad de horas de sol directo por día promedio en las calles Monterrey (ew.4) y Matamoros (ns.4). ..... 162

Figura 4.50. Distribución de la radiación solar directa y horas de sol directo en la red de calles del área de estudio en el día promedio. .... 164

Figura 4.51. Variación en la cantidad de radiación solar recibida ( $kWh/m^2$  día) en la red de calles, durante la temporada de calor y su diferencia con respecto al valor máximo posible. .... 165

Figura 4.52. *Spacemate* (Berghauser Pont & Haupt, 2009). Arriba: desplazamiento de la densidad bruta del área de estudio. Abajo: diferencia entre densidad neta y bruta del área de estudio (situación actual y propuesta). ..... 167

Figura 4.53. Densidad de población en los distintos tejidos analizados en el *Spacemate*. ..... 168

**CAPITULO 5**

Figura 5.1. Suministro total de energía primaria por fuentes, México 1990-2018. .... 173

Figura 5.2. Consumo energético anual y fuentes de energía por sectores en México. .... 174

Figura 5.3. Consumo de electricidad del sector residencial de Hermosillo. .... 175

Figura 5.4. Tipologías de viviendas plurifamiliares en altura, en torre y en bloque lineal. .... 177

Figura 5.5. Tipologías de viviendas unifamiliares aisladas de una y dos plantas (2p). .... 178

Figura 5.6. Superficie habitable de las viviendas analizadas. A la derecha: viviendas en altura. .... 179

Figura 5.7. Volumen habitable de las viviendas analizadas. A la derecha: viviendas en altura. .... 180

## LISTADO DE MAPAS, TABLAS Y FIGURAS

Figura 5.8. Superficie de piel por unidad de volumen de las viviendas analizadas. A la derecha: viviendas en altura.....	180
Figura 5.9. Colores en las diferentes viviendas en Hermosillo: paredes de un color claro y cubiertas blancas. ....	181
Figura 5.10. Superficie de vidrio por unidad de volumen en las viviendas analizadas. A la derecha: viviendas en altura. ....	182
Figura 5.11. Valor de la transmitancia global de cada vivienda analizada. A la derecha: viviendas en altura.....	183
Figura 5.12. Cantidad de radiación solar directa recibida de acuerdo a distintas configuraciones de viviendas.....	184
Figura 5.13. Comportamiento de la temperatura media mensual del aire interior en viviendas unifamiliares (temporada de calor).....	187
Figura 5.14. Comportamiento diario de la temperatura media del aire interior de las seis viviendas unifamiliares. ....	190
Figura 5.15. Rangos de temperatura media interior de las viviendas durante julio y agosto. ....	192
Figura 5.16. Demanda mensual de refrigeración de las viviendas durante la temporada de calor.....	194
Figura 5.17. Demanda de refrigeración anual de las viviendas unifamiliares. Arriba: kWh/año; Abajo: kWh/m <sup>3</sup> /año. ....	196
Figura 5.18. A la izquierda: cubiertas blancas. A la derecha: imagen de la vivienda popular, colores claros. ....	200
Figura 5.19. Comportamiento de la temperatura media mensual interior en los diferentes casos analizados. ....	200
Figura 5.20. Comportamiento diario de la temperatura del aire interior en los diferentes casos analizados. ....	202
Figura 5.21. Rangos de temperatura media interior de los distintos casos analizados durante el mes de agosto.....	203
Figura 5.22. Intercambios energéticos por la envolvente de los cuatro casos analizados.....	205
Figura 5.23. Comportamiento de la temperatura media mensual interior en viviendas plurifamiliares (temporada de calor). ....	208
Figura 5.24. Comportamiento diario de la temperatura media del aire interior de las viviendas plurifamiliares. ....	210
Figura 5.25. Demanda mensual de refrigeración de las viviendas plurifamiliares durante la temporada de calor.....	211
Figura 5.26. Comparativa de los rangos de temperatura media interior de las viviendas unifamiliares y plurifamiliares durante julio y agosto.....	214
Figura 5.27. Comparativa de la demanda de refrigeración anual de las viviendas unifamiliares y plurifamiliares. Arriba: kWh/año; Abajo: kWh/m <sup>3</sup> /año. ....	216
Figura 5.28. Relación entre diferentes indicadores de características térmicas de las viviendas con la demanda de refrigeración (kWh/m <sup>3</sup> /año) ....	217
Figura 5.29. Comparación de la demanda de refrigeración entre viviendas unifamiliares y plurifamiliares. ....	220

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

**ANEXO A4**  
**TABLAS Y MAPAS DE NUEVAS DENSIDADES**

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

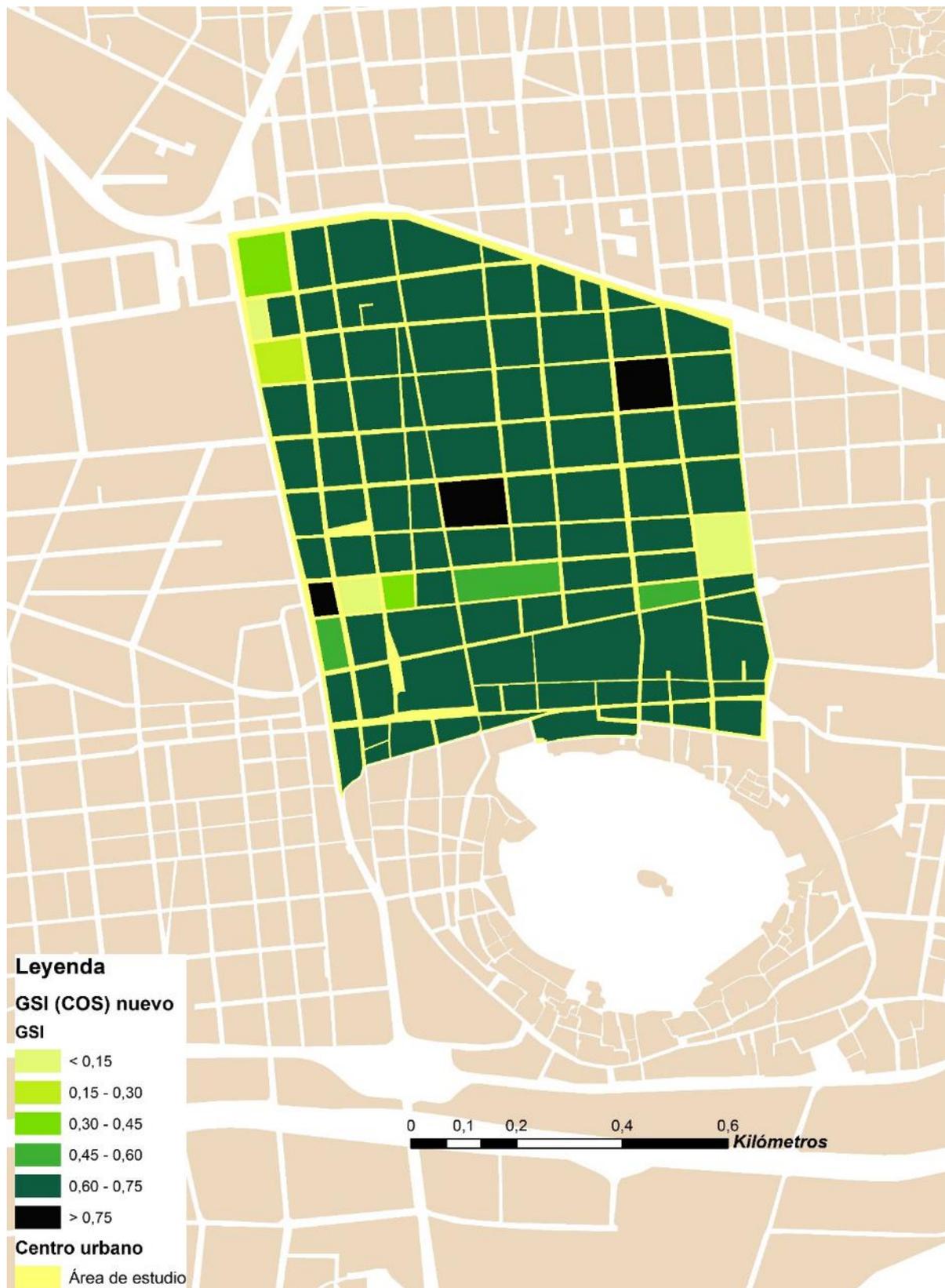
## A4.1 La nueva densidad edificatoria del centro urbano

<i>GSI (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) por manzanas - centro de Hermosillo</i>											
id	área (m <sup>2</sup> )	actual		modificado		id	área (m <sup>2</sup> )	actual		modificado	
		huella edif. (m <sup>2</sup> )	GSI	huella edif. (m <sup>2</sup> )	GSI			huella edif. (m <sup>2</sup> )	GSI		
1	4504	1910,6	0,42	3153,0	0,70	51	10167	4704,4	0,46	7117,2	0,70
2	7335	3182,6	0,43	5134,6	0,70	52	10377	8652,2	0,83	7263,9	0,70
3	1806	1170,4	0,65	1264,0	0,70	53	11355	8770,5	0,77	7948,8	0,70
4	9632	4136,9	0,43	6742,7	0,70	54	7596	5681,8	0,75	5317,2	0,70
5	6176	2359,3	0,38	4323,0	0,70	55	10663	7481,9	0,70	8340,8	0,78
6	11537	7789,8	0,68	6399,8	0,55	56	4429	2510,2	0,57	3100,4	0,70
7	9841	4983,9	0,51	6888,6	0,70	57	6017	1701,7	0,28	4212,2	0,70
8	4400	2791,5	0,63	3079,9	0,70	58	6578	4997,1	0,76	4771,7	0,73
9	13052	7076,2	0,54	9136,4	0,70	59	7744	7064,8	0,91	5421,0	0,70
10	4623	1618,2	0,35	3236,2	0,70	60	5222	3376,8	0,65	3376,8	0,65
11	8292	3878,3	0,47	5804,5	0,70	61	7845	5183,6	0,66	5117,5	0,65
12	5426	768,9	0,14	3798,5	0,70	62	4228	2713,2	0,64	2959,7	0,70
13	8360	3294,7	0,39	5852,2	0,70	63	4656	3303,6	0,71	3258,9	0,70
14	6273	2898,5	0,46	4391,0	0,70	64	10738	273,1	0,03	656,0	0,06
15	6682	2480,7	0,37	4677,6	0,70	65	5655	3995,1	0,71	3602,2	0,64
16	4971	1755,4	0,35	3479,4	0,70	66	6853	5780,0	0,84	4796,8	0,70
17	5655	1847,9	0,33	3958,2	0,70	67	2951	1877,3	0,64	2065,4	0,70
18	4659	0,0	0,00	0,0	0,00	68	4288	2841,5	0,66	3048,3	0,71
19	2895	2035,3	0,70	2405,0	0,83	69	4658	3021,7	0,65	2456,1	0,53
20	6102	3178,5	0,52	4271,3	0,70	70	3613	1641,0	0,45	1641,0	0,45
21	4450	2339,6	0,53	2339,6	0,53	71	6747	5261,3	0,78	4722,8	0,70
22	6081	1251,7	0,21	4256,5	0,70	72	4647	3828,4	0,82	3252,9	0,70
23	4248	2619,8	0,62	2973,3	0,70	73	7564	6117,1	0,81	5295,1	0,70
24	1691	883,0	0,52	1183,8	0,70	74	10538	5961,4	0,57	7376,7	0,70
25	1315	480,9	0,37	920,7	0,70	75	15833	8522,6	0,54	10983,2	0,69
26	2477	0,0	0,00	0,0	0,00	76	21257	8454,8	0,40	13540,5	0,64
27	3908	1877,3	0,48	2911,6	0,74	77	2501	1372,1	0,55	1793,7	0,72
28	7036	2051,5	0,29	4924,9	0,70	78	2047	994,9	0,49	1432,6	0,70
29	9993	4537,9	0,45	4537,9	0,45	79	3317	2424,4	0,73	2322,2	0,70
30	6929	2003,7	0,29	2003,7	0,29	80	4934	2399,3	0,49	3453,8	0,70
31	7452	3736,9	0,50	5216,3	0,70	81	13340	8019,4	0,60	8750,4	0,66
32	2520	1165,6	0,46	1764,1	0,70	82	11509	6510,8	0,57	8056,3	0,70
33	5369	3203,8	0,60	3758,4	0,70	83	1222	781,3	0,64	855,2	0,70
34	4676	2251,9	0,48	3273,1	0,70	84	11762	6179,5	0,53	8233,5	0,70
35	3795	2090,6	0,55	2656,4	0,70	85	1913	1036,4	0,54	1339,1	0,70
36	8664	5036,2	0,58	6064,5	0,70	86	1989	1386,0	0,70	1392,6	0,70
37	7678	4065,0	0,53	5374,7	0,70	87	5658	3552,6	0,63	3960,4	0,70
38	13088	6956,5	0,53	9295,1	0,71	88	8128	4295,3	0,53	5689,8	0,70
39	1685	938,1	0,56	1179,6	0,70	89	13027	6026,1	0,46	9119,0	0,70
40	10175	5618,1	0,55	7307,3	0,72	90	7542	3840,5	0,51	5279,6	0,70
41	9564	6445,9	0,67	9364,0	0,98	91	8780	5075,4	0,58	6146,2	0,70
42	11644	61,2	0,01	0,0	0,00	92	10820	5477,7	0,51	7574,1	0,70
43	7901	3787,8	0,48	5530,6	0,70	93	1342	1172,6	0,87	939,4	0,70
44	13328	7790,7	0,58	8734,7	0,66	94	1645	1121,3	0,68	1151,3	0,70
45	9659	3930,1	0,41	6761,4	0,70	95	3059	2112,3	0,69	2141,1	0,70
46	11070	8694,8	0,79	7748,7	0,70	96	2823	1329,0	0,47	1976,3	0,70
47	7648	4349,3	0,57	5353,3	0,70	97	2977	742,4	0,25	2083,9	0,70
48	11786	8860,5	0,75	8250,4	0,70	98	4571	1707,3	0,37	3437,0	0,75
49	3711	2633,8	0,71	2597,4	0,70	99	3111	1785,3	0,57	1994,7	0,64
50	7284	3511,3	0,48	5098,6	0,70	100	2208	2017,3	0,91	1649,8	0,75

Tabla A4.1. Valores para cálculo del indicador GSI.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del H. Ayuntamiento de Hermosillo (2012); INEGI (2010)

### A4.1.1 Densidad edificatoria: GSI (Ground Space Index $m^2/m^2$ )



Mapa A4.1. Mapa que muestra el nuevo indicador GSI ( $m^2/m^2$ ) por manzanas dentro del área de estudio.

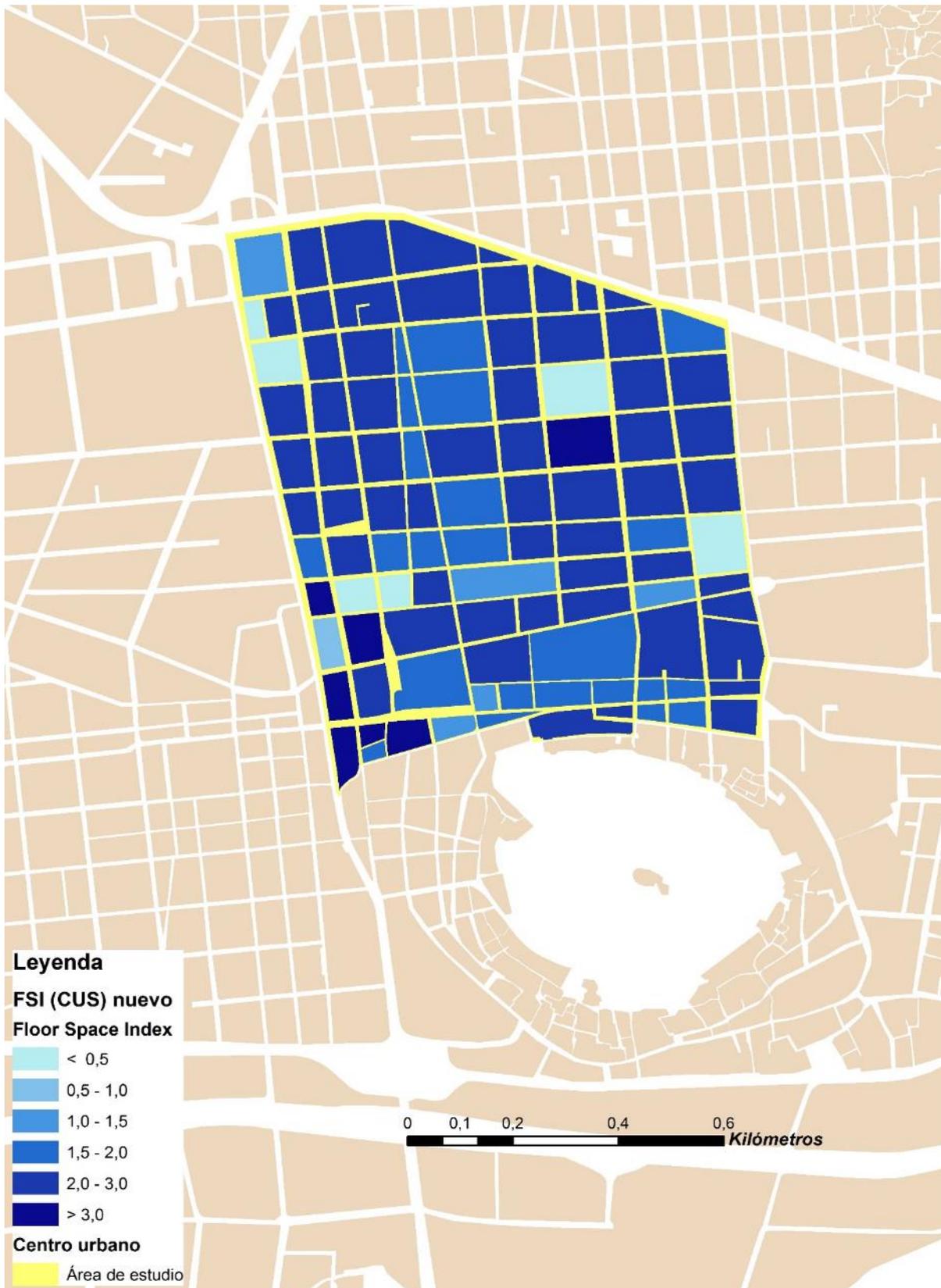
Fuente: Elaboración propia con ArcGIS a partir de datos del H. Ayuntamiento de Hermosillo (2012); INEGI (2010)

<b>FSI (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) por manzanas - centro de Hermosillo</b>											
id	área	actual		modificado		id	área	actual		modificado	
	(m <sup>2</sup> )	edificación (m <sup>2</sup> )	FSI	edificación (m <sup>2</sup> )	FSI		(m <sup>2</sup> )	edificación (m <sup>2</sup> )	FSI	edificación (m <sup>2</sup> )	FSI
1	4504	2689	0,60	14188	3,15	51	10167	6439	0,63	22063	2,17
2	7335	4808	0,66	19512	2,66	52	10377	17005	1,64	27603	2,66
3	1806	1278	0,71	3034	1,68	53	11355	12066	1,06	24641	2,17
4	9632	6522	0,68	25622	2,66	54	7596	8268	1,09	16483	2,17
5	6176	2490	0,40	13401	2,17	55	10663	13257	1,24	21204	1,99
6	11537	12191	1,06	14710	1,28	56	4429	3749	0,85	9611	2,17
7	9841	7507	0,76	26177	2,66	57	6017	1985	0,33	16006	2,66
8	4400	3443	0,78	11704	2,66	58	6578	6078	0,92	10638	1,62
9	13052	8195	0,63	34718	2,66	59	7744	13671	1,77	16805	2,17
10	4623	2062	0,45	12298	2,66	60	5222	14431	2,76	14431	2,76
11	8292	3351	0,40	17994	2,17	61	7845	7663	0,98	15369	1,96
12	5426	1821	0,34	14434	2,66	62	4228	3969	0,94	7103	1,68
13	8360	4896	0,59	18142	2,17	63	4656	5289	1,14	7821	1,68
14	6273	3279	0,52	13612	2,17	64	10738	656	0,06	656	0,06
15	6682	3080	0,46	14500	2,17	65	5655	5426	0,96	13919	2,46
16	4971	1926	0,39	10786	2,17	66	6853	12868	1,88	14870	2,17
17	5655	2241	0,40	20582	3,64	67	2951	3194	1,08	7848	2,66
18	4659	0	0,00	0	0,00	68	4288	3683	0,86	8721	2,03
19	2895	8487	2,93	10578	3,65	69	4658	5352	1,15	5458	1,17
20	6102	4297	0,70	19221	3,15	70	3613	1643	0,45	1643	0,45
21	4450	4221	0,95	4221	0,95	71	6747	9122	1,35	14641	2,17
22	6081	2838	0,47	13195	2,17	72	4647	8471	1,82	14638	3,15
23	4248	4489	1,06	17542	4,13	73	7564	13386	1,77	20122	2,66
24	1691	1751	1,04	5327	3,15	74	10538	8260	0,78	22868	2,17
25	1315	807	0,61	2210	1,68	75	15833	10952	0,69	32163	2,03
26	2477	0	0,00	0	0,00	76	21257	9841	0,46	41975	1,97
27	3908	2643	0,68	9423	2,41	77	2501	1399	0,56	4505	1,80
28	7036	2228	0,32	18715	2,66	78	2047	770	0,38	3438	1,68
29	9993	11320	1,13	11320	1,13	79	3317	2858	0,86	5573	1,68
30	6929	2731	0,39	2731	0,39	80	4934	3044	0,62	8289	1,68
31	7452	3918	0,53	16171	2,17	81	13340	12318	0,92	22842	1,71
32	2520	1281	0,51	5469	2,17	82	11509	7294	0,63	24975	2,17
33	5369	3398	0,63	11651	2,17	83	1222	891	0,73	3250	2,66
34	4676	3571	0,76	10147	2,17	84	11762	5679	0,48	25524	2,17
35	3795	2760	0,73	6375	1,68	85	1913	1480	0,77	5089	2,66
36	8664	5962	0,69	23045	2,66	86	1989	3584	1,80	4317	2,17
37	7678	5386	0,70	16662	2,17	87	5658	5927	1,05	12277	2,17
38	13088	9708	0,74	26225	2,00	88	8128	5423	0,67	21621	2,66
39	1685	1267	0,75	2831	1,68	89	13027	5943	0,46	28269	2,17
40	10175	7874	0,77	20726	2,04	90	7542	4483	0,59	12671	1,68
41	9564	9604	1,00	19972	2,09	91	8780	8497	0,97	23356	2,66
42	11644	0	0,00	0	0,00	92	10820	5359	0,50	23480	2,17
43	7901	5020	0,64	17145	2,17	93	1342	1614	1,20	2912	2,17
44	13328	9642	0,72	23935	1,80	94	1645	1299	0,79	2763	1,68
45	9659	5123	0,53	25693	2,66	95	3059	2898	0,95	5139	1,68
46	11070	9800	0,89	45717	4,13	96	2823	1624	0,58	4743	1,68
47	7648	7266	0,95	20343	2,66	97	2977	1809	0,61	5001	1,68
48	11786	12143	1,03	25576	2,17	98	4571	835	0,18	17054	3,73
49	3711	2840	0,77	6234	1,68	99	3111	2088	0,67	4068	1,31
50	7284	3789	0,52	15806	2,17	100	2208	1714	0,78	3078	1,39

Tabla A4.2. Valores para cálculo del indicador FSI.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del H. Ayuntamiento de Hermosillo (2012); INEGI (2010)

#### A4.1.2 Densidad edificatoria: FSI (Floor Space Index m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)



Mapa A4.2. Mapa que muestra el nuevo indicador FSI (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) por manzanas dentro del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con ArcGIS a partir de datos del INEGI (2010)

<i>L (FSI/GSI) por manzanas - centro de Hermosillo</i>													
id	actual			modificado			id	actual			modificado		
	FSI	GSI	L	FSI	GSI	L		FSI	GSI	L	FSI	GSI	L
1	0,60	0,42	1,41	3,15	0,70	4,50	51	0,63	0,46	1,37	2,17	0,70	3,10
2	0,66	0,43	1,51	2,66	0,70	3,80	52	1,64	0,83	1,97	2,66	0,70	3,80
3	0,71	0,65	1,09	1,68	0,70	2,40	53	1,06	0,77	1,38	2,17	0,70	3,10
4	0,68	0,43	1,58	2,66	0,70	3,80	54	1,09	0,75	1,46	2,17	0,70	3,10
5	0,40	0,38	1,06	2,17	0,70	3,10	55	1,24	0,70	1,77	1,99	0,78	2,54
6	1,06	0,68	1,57	1,28	0,55	2,30	56	0,85	0,57	1,49	2,17	0,70	3,10
7	0,76	0,51	1,51	2,66	0,70	3,80	57	0,33	0,28	1,17	2,66	0,70	3,80
8	0,78	0,63	1,23	2,66	0,70	3,80	58	0,92	0,76	1,22	1,62	0,73	2,23
9	0,63	0,54	1,16	2,66	0,70	3,80	59	1,77	0,91	1,94	2,17	0,70	3,10
10	0,45	0,35	1,27	2,66	0,70	3,80	60	2,76	0,65	4,27	2,76	0,65	4,27
11	0,40	0,47	0,86	2,17	0,70	3,10	61	0,98	0,66	1,48	1,96	0,65	3,00
12	0,34	0,14	2,37	2,66	0,70	3,80	62	0,94	0,64	1,46	1,68	0,70	2,40
13	0,59	0,39	1,49	2,17	0,70	3,10	63	1,14	0,71	1,60	1,68	0,70	2,40
14	0,52	0,46	1,13	2,17	0,70	3,10	64	0,06	0,03	2,40	0,06	0,06	1,00
15	0,46	0,37	1,24	2,17	0,70	3,10	65	0,96	0,71	1,36	2,46	0,64	3,86
16	0,39	0,35	1,10	2,17	0,70	3,10	66	1,88	0,84	2,23	2,17	0,70	3,10
17	0,40	0,33	1,21	3,64	0,70	5,20	67	1,08	0,64	1,70	2,66	0,70	3,80
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	68	0,86	0,66	1,30	2,03	0,71	2,86
19	2,93	0,70	4,17	3,65	0,83	4,40	69	1,15	0,65	1,77	1,17	0,53	2,22
20	0,70	0,52	1,35	3,15	0,70	4,50	70	0,45	0,45	1,00	0,45	0,45	1,00
21	0,95	0,53	1,80	0,95	0,53	1,80	71	1,35	0,78	1,73	2,17	0,70	3,10
22	0,47	0,21	2,27	2,17	0,70	3,10	72	1,82	0,82	2,21	3,15	0,70	4,50
23	1,06	0,62	1,71	4,13	0,70	5,90	73	1,77	0,81	2,19	2,66	0,70	3,80
24	1,04	0,52	1,98	3,15	0,70	4,50	74	0,78	0,57	1,39	2,17	0,70	3,10
25	0,61	0,37	1,68	1,68	0,70	2,40	75	0,69	0,54	1,29	2,03	0,69	2,93
26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76	0,46	0,40	1,16	1,97	0,64	3,10
27	0,68	0,48	1,41	2,41	0,74	3,24	77	0,56	0,55	1,02	1,80	0,72	2,51
28	0,32	0,29	1,09	2,66	0,70	3,80	78	0,38	0,49	0,77	1,68	0,70	2,40
29	1,13	0,45	2,49	1,13	0,45	2,49	79	0,86	0,73	1,18	1,68	0,70	2,40
30	0,39	0,29	1,36	0,39	0,29	1,36	80	0,62	0,49	1,27	1,68	0,70	2,40
31	0,53	0,50	1,05	2,17	0,70	3,10	81	0,92	0,60	1,54	1,71	0,66	2,61
32	0,51	0,46	1,10	2,17	0,70	3,10	82	0,63	0,57	1,12	2,17	0,70	3,10
33	0,63	0,60	1,06	2,17	0,70	3,10	83	0,73	0,64	1,14	2,66	0,70	3,80
34	0,76	0,48	1,59	2,17	0,70	3,10	84	0,48	0,53	0,92	2,17	0,70	3,10
35	0,73	0,55	1,32	1,68	0,70	2,40	85	0,77	0,54	1,43	2,66	0,70	3,80
36	0,69	0,58	1,18	2,66	0,70	3,80	86	1,80	0,70	2,59	2,17	0,70	3,10
37	0,70	0,53	1,32	2,17	0,70	3,10	87	1,05	0,63	1,67	2,17	0,70	3,10
38	0,74	0,53	1,40	2,00	0,71	2,82	88	0,67	0,53	1,26	2,66	0,70	3,80
39	0,75	0,56	1,35	1,68	0,70	2,40	89	0,46	0,46	0,99	2,17	0,70	3,10
40	0,77	0,55	1,40	2,04	0,72	2,84	90	0,59	0,51	1,17	1,68	0,70	2,40
41	1,00	0,67	1,49	2,09	0,98	2,13	91	0,97	0,58	1,67	2,66	0,70	3,80
42	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	92	0,50	0,51	0,98	2,17	0,70	3,10
43	0,64	0,48	1,33	2,17	0,70	3,10	93	1,20	0,87	1,38	2,17	0,70	3,10
44	0,72	0,58	1,24	1,80	0,66	2,74	94	0,79	0,68	1,16	1,68	0,70	2,40
45	0,53	0,41	1,30	2,66	0,70	3,80	95	0,95	0,69	1,37	1,68	0,70	2,40
46	0,89	0,79	1,13	4,13	0,70	5,90	96	0,58	0,47	1,22	1,68	0,70	2,40
47	0,95	0,57	1,67	2,66	0,70	3,80	97	0,61	0,25	2,44	1,68	0,70	2,40
48	1,03	0,75	1,37	2,17	0,70	3,10	98	0,18	0,37	0,49	3,73	0,75	4,96
49	0,77	0,71	1,08	1,68	0,70	2,40	99	0,67	0,57	1,17	1,31	0,64	2,04
50	0,52	0,48	1,08	2,17	0,70	3,10	100	0,78	0,91	0,85	1,39	0,75	1,87

Tabla A4.3. Valores para cálculo del indicador L.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del H. Ayuntamiento de Hermosillo (2012); INEGI (2010)

### A4.1.3 Densidad edificatoria: L (Altura edificatoria)



Mapa A4.3. Mapa que muestra el nuevo indicador L (Altura edificatoria) por manzanas dentro del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con ArcGIS a partir de datos del INEGI (2010)

<b>OSR (1-GSI/FSI) por manzanas - centro de Hermosillo</b>													
id	actual			modificado			id	actual			modificado		
	FSI	GSI	OSR	FSI	GSI	OSR		FSI	GSI	OSR	FSI	GSI	OSR
1	0,60	0,42	0,96	3,15	0,70	0,10	51	0,63	0,46	0,85	2,17	0,70	0,14
2	0,66	0,43	0,86	2,66	0,70	0,11	52	1,64	0,83	0,10	2,66	0,70	0,11
3	0,71	0,65	0,50	1,68	0,70	0,18	53	1,06	0,77	0,21	2,17	0,70	0,14
4	0,68	0,43	0,84	2,66	0,70	0,11	54	1,09	0,75	0,23	2,17	0,70	0,14
5	0,40	0,38	1,53	2,17	0,70	0,14	55	1,24	0,70	0,24	1,99	0,78	0,11
6	1,06	0,68	0,31	1,28	0,55	0,35	56	0,85	0,57	0,51	2,17	0,70	0,14
7	0,76	0,51	0,65	2,66	0,70	0,11	57	0,33	0,28	2,17	2,66	0,70	0,11
8	0,78	0,63	0,47	2,66	0,70	0,11	58	0,92	0,76	0,26	1,62	0,73	0,17
9	0,63	0,54	0,73	2,66	0,70	0,11	59	1,77	0,91	0,05	2,17	0,70	0,14
10	0,45	0,35	1,46	2,66	0,70	0,11	60	2,76	0,65	0,13	2,76	0,65	0,13
11	0,40	0,47	1,32	2,17	0,70	0,14	61	0,98	0,66	0,35	1,96	0,65	0,18
12	0,34	0,14	2,56	2,66	0,70	0,11	62	0,94	0,64	0,38	1,68	0,70	0,18
13	0,59	0,39	1,03	2,17	0,70	0,14	63	1,14	0,71	0,26	1,68	0,70	0,18
14	0,52	0,46	1,03	2,17	0,70	0,14	64	0,06	0,03	15,95	0,06	0,06	15,37
15	0,46	0,37	1,36	2,17	0,70	0,14	65	0,96	0,71	0,31	2,46	0,64	0,15
16	0,39	0,35	1,67	2,17	0,70	0,14	66	1,88	0,84	0,08	2,17	0,70	0,14
17	0,40	0,33	1,70	3,64	0,70	0,08	67	1,08	0,64	0,34	2,66	0,70	0,11
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	68	0,86	0,66	0,39	2,03	0,71	0,14
19	2,93	0,70	0,10	3,65	0,83	0,05	69	1,15	0,65	0,31	1,17	0,53	0,40
20	0,70	0,52	0,68	3,15	0,70	0,10	70	0,45	0,45	1,20	0,45	0,45	1,20
21	0,95	0,53	0,50	0,95	0,53	0,50	71	1,35	0,78	0,16	2,17	0,70	0,14
22	0,47	0,21	1,70	2,17	0,70	0,14	72	1,82	0,82	0,10	3,15	0,70	0,10
23	1,06	0,62	0,36	4,13	0,70	0,07	73	1,77	0,81	0,11	2,66	0,70	0,11
24	1,04	0,52	0,46	3,15	0,70	0,10	74	0,78	0,57	0,55	2,17	0,70	0,14
25	0,61	0,37	1,03	1,68	0,70	0,18	75	0,69	0,54	0,67	2,03	0,69	0,15
26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76	0,46	0,40	1,30	1,97	0,64	0,18
27	0,68	0,48	0,77	2,41	0,74	0,11	77	0,56	0,55	0,81	1,80	0,72	0,16
28	0,32	0,29	2,24	2,66	0,70	0,11	78	0,38	0,49	1,37	1,68	0,70	0,18
29	1,13	0,45	0,48	1,13	0,45	0,48	79	0,86	0,73	0,31	1,68	0,70	0,18
30	0,39	0,29	1,80	0,39	0,29	1,80	80	0,62	0,49	0,83	1,68	0,70	0,18
31	0,53	0,50	0,95	2,17	0,70	0,14	81	0,92	0,60	0,43	1,71	0,66	0,20
32	0,51	0,46	1,06	2,17	0,70	0,14	82	0,63	0,57	0,69	2,17	0,70	0,14
33	0,63	0,60	0,64	2,17	0,70	0,14	83	0,73	0,64	0,49	2,66	0,70	0,11
34	0,76	0,48	0,68	2,17	0,70	0,14	84	0,48	0,53	0,98	2,17	0,70	0,14
35	0,73	0,55	0,62	1,68	0,70	0,18	85	0,77	0,54	0,59	2,66	0,70	0,11
36	0,69	0,58	0,61	2,66	0,70	0,11	86	1,80	0,70	0,17	2,17	0,70	0,14
37	0,70	0,53	0,67	2,17	0,70	0,14	87	1,05	0,63	0,36	2,17	0,70	0,14
38	0,74	0,53	0,63	2,00	0,71	0,14	88	0,67	0,53	0,71	2,66	0,70	0,11
39	0,75	0,56	0,59	1,68	0,70	0,18	89	0,46	0,46	1,18	2,17	0,70	0,14
40	0,77	0,55	0,58	2,04	0,72	0,14	90	0,59	0,51	0,83	1,68	0,70	0,18
41	1,00	0,67	0,32	2,09	0,98	0,01	91	0,97	0,58	0,44	2,66	0,70	0,11
42	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	92	0,50	0,51	1,00	2,17	0,70	0,14
43	0,64	0,48	0,82	2,17	0,70	0,14	93	1,20	0,87	0,10	2,17	0,70	0,14
44	0,72	0,58	0,57	1,80	0,66	0,19	94	0,79	0,68	0,40	1,68	0,70	0,18
45	0,53	0,41	1,12	2,66	0,70	0,11	95	0,95	0,69	0,33	1,68	0,70	0,18
46	0,89	0,79	0,24	4,13	0,70	0,07	96	0,58	0,47	0,92	1,68	0,70	0,18
47	0,95	0,57	0,45	2,66	0,70	0,11	97	0,61	0,25	1,24	1,68	0,70	0,18
48	1,03	0,75	0,24	2,17	0,70	0,14	98	0,18	0,37	3,43	3,73	0,75	0,07
49	0,77	0,71	0,38	1,68	0,70	0,18	99	0,67	0,57	0,64	1,31	0,64	0,27
50	0,52	0,48	1,00	2,17	0,70	0,14	100	0,78	0,91	0,11	1,39	0,75	0,18

Tabla A4.4. Valores para cálculo del indicador OSR.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del H. Ayuntamiento de Hermosillo (2012); INEGI (2010)

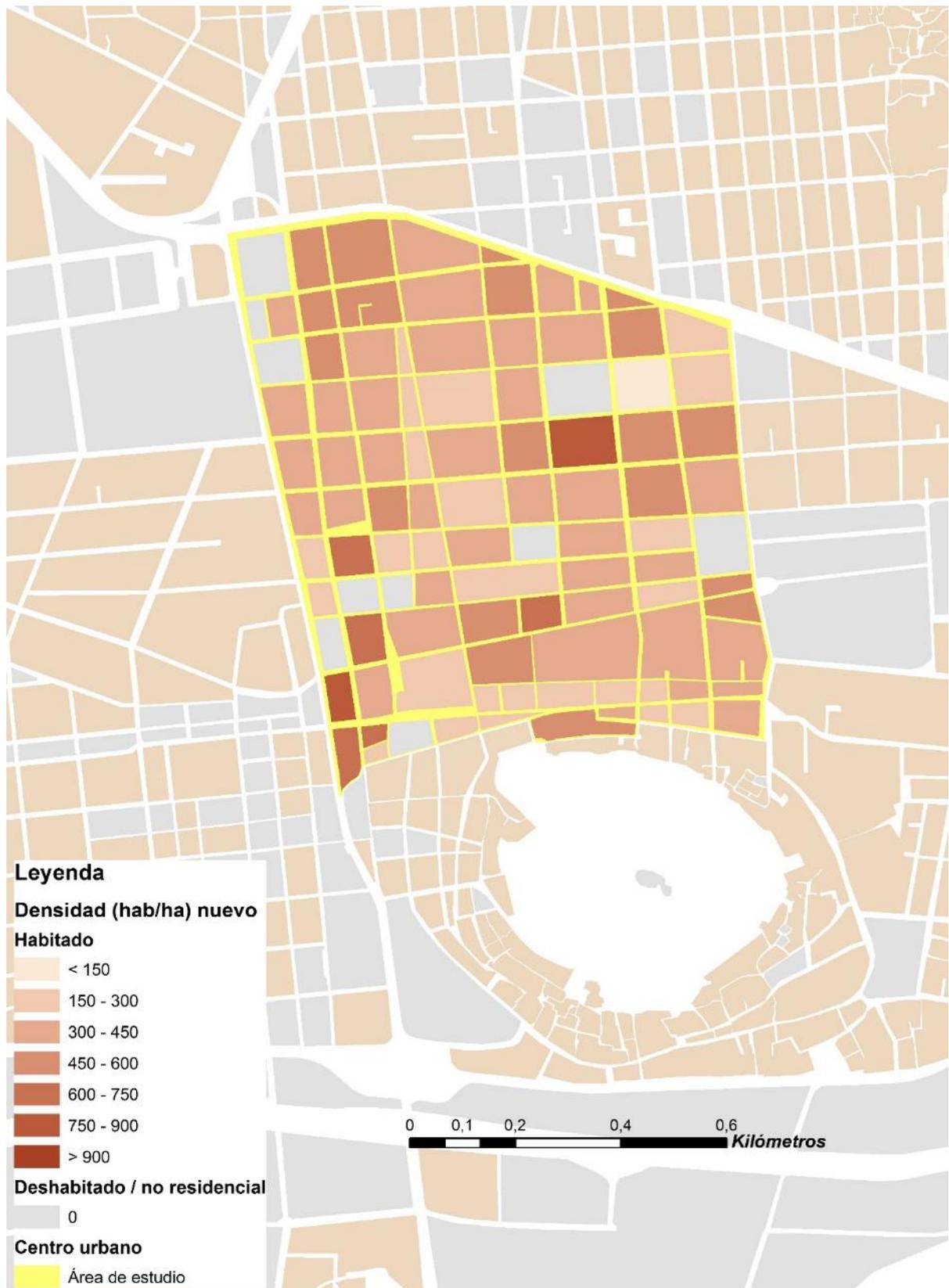
**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

<i>Densidad poblacional por manzanas - centro de Hermosillo</i>											
id	área (ha)	actual		modificada		id	área (ha)	actual		modificada	
		hab	hab/ha	hab	hab/ha			hab	hab/ha	hab	hab/ha
1	0,45	0	0	276	613	51	1,02	9	9	374	368
2	0,73	32	44	359	490	52	1,04	0	0	508	490
3	0,18	3	17	44	245	53	1,14	6	5	417	368
4	0,96	0	0	472	490	54	0,76	0	0	279	368
5	0,62	10	16	227	368	55	1,07	25	23	259	243
6	1,15	4	3	208	180	56	0,44	13	29	163	367
7	0,98	11	11	482	490	57	0,60	2	3	295	490
8	0,44	24	55	216	490	58	0,66	5	8	147	223
9	1,31	14	11	640	490	59	0,77	3	4	285	368
10	0,46	15	32	227	490	60	0,52	0	0	0	0
11	0,83	24	29	305	368	61	0,78	4	5	245	312
12	0,54	8	15	266	490	62	0,42	10	24	104	245
13	0,84	14	17	307	367	63	0,47	31	67	114	245
14	0,63	17	27	231	367	64	1,07	0	0	0	0
15	0,67	10	15	246	367	65	0,57	17	30	189	334
16	0,50	8	16	183	367	66	0,69	0	0	252	368
17	0,57	7	12	416	735	67	0,30	0	0	145	490
18	0,47	0	0	0	0	68	0,43	7	16	142	331
19	0,29	0	0	52	180	69	0,47	7	15	92	198
20	0,61	0	0	374	612	70	0,36	0	0	0	0
21	0,45	0	0	0	0	71	0,67	0	0	248	367
22	0,61	0	0	223	367	72	0,46	0	0	285	613
23	0,42	0	0	364	857	73	0,76	0	0	371	490
24	0,17	3	18	104	613	74	1,05	0	0	387	368
25	0,13	2	15	32	245	75	1,58	40	25	529	334
26	0,25	0	0	0	0	76	2,13	36	17	711	334
27	0,39	0	0	163	416	77	0,25	18	72	76	305
28	0,70	15	21	345	490	78	0,20	0	0	50	245
29	1,00	0	0	0	0	79	0,33	46	139	81	245
30	0,69	0	0	0	0	80	0,49	26	53	121	245
31	0,75	5	7	274	368	81	1,33	0	0	255	191
32	0,25	12	48	93	367	82	1,15	68	59	423	368
33	0,54	53	99	197	367	83	0,12	1	8	60	490
34	0,47	9	19	172	367	84	1,18	34	29	432	368
35	0,38	7	18	93	245	85	0,19	0	0	94	490
36	0,87	98	113	425	490	86	0,20	9	45	73	368
37	0,77	7	9	282	367	87	0,57	0	0	208	367
38	1,31	47	36	423	323	88	0,81	11	14	398	490
39	0,17	10	59	41	245	89	1,30	38	29	479	368
40	1,02	13	13	292	287	90	0,75	9	12	185	245
41	0,96	0	0	137	143	91	0,88	12	14	430	490
42	1,16	26	22	0	0	92	1,08	1	1	398	368
43	0,79	0	0	290	367	93	0,13	11	82	49	368
44	1,33	5	4	309	232	94	0,16	25	152	40	245
45	0,97	11	11	473	490	95	0,31	11	36	75	245
46	1,11	3	3	949	858	96	0,28	25	89	69	245
47	0,76	5	7	375	490	97	0,30	0	0	73	245
48	1,18	26	22	433	368	98	0,46	0	0	340	745
49	0,37	12	32	91	245	99	0,31	4	13	52	167
50	0,73	22	30	268	368	100	0,22	6	27	36	162

Tabla A4.4. Valores para cálculo de la densidad de población.

Fuentes: Elaboración propia a partir de datos del H. Ayuntamiento de Hermosillo (2012); INEGI (2010)

### A4.2 La nueva densidad poblacional del centro urbano (hab/ha)



Mapa A4.4. Mapa con la nueva densidad de población (hab/ha) distribuida por manzanas en el área de estudio.

Fuentes: Elaboración propia con ArcGIS a partir de datos de INEGI (2010)

### A4.2.1 Mapa indicativo de numeración de manzanas



Mapa A4.5. Mapa indicativo: numeración de manzanas.

**ANEXO A5**  
**VALIDACIÓN DE SIMULACIONES Y RESULTADOS**

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

## **A5.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS VIVIENDAS DE HERMOSILLO**

### **A5.1.1 Fichas viviendas estudiadas**

En Hermosillo existen dos tipologías de vivienda: la vivienda unifamiliar aislada y la vivienda plurifamiliar en altura. Sin embargo, este último tipo de vivienda comenzó a construirse a partir del año 2010.

En esta tesis, la vivienda unifamiliar aislada ha sido dividida en cinco categorías: vivienda mínima (32 – 45 m<sup>2</sup>), vivienda popular (45 – 60 m<sup>2</sup>), vivienda de interés social (60 – 90 m<sup>2</sup>), vivienda de interés medio (90 – 120 m<sup>2</sup>) y vivienda residencial (> 120 m<sup>2</sup>). Este tipo de viviendas suele ser de una o dos plantas.

En las categorías de interés social, interés medio y residencial, se ha favorecido la construcción de viviendas de dos plantas (para reducir el tamaño de los lotes). Por lo tanto, en este estudio, se ha optado por analizar las viviendas de dos plantas en estas categorías.

En el caso de la vivienda plurifamiliar en altura, existen pocos ejemplos en Hermosillo: dos torres y un bloque lineal. Este tipo de vivienda es de una categoría residencial y la superficie habitable de este tipo de viviendas varía entre 90 y 156 m<sup>2</sup>.

A continuación, se muestran fichas con las características espaciales y térmicas de las viviendas estudiadas en esta tesis.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
**LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

TIPO DE VIVIENDA:	<b>Vivienda Unifamiliar Aislada</b>	<p style="text-align: right;">↑ N <b>Planta VIVIENDA</b></p>
CATEGORÍA:	<b>Vivienda Mínima (32 – 45 m²)</b>	
SUPERFICIE HABITABLE	VOLUMEN HABITABLE	
<b>40,90 m²</b>	<b>102,25 m³</b>	
SUPERFICIE DE PIEL:	f= S.P./V.H (m²/m³):	
<b>158,95 m²</b>	<b>1,55 m²/m³</b>	
SUPERFICIE DE VIDRIO:	Suv= S.V./V.:	
<b>4,70 m²</b>	<b>0,05 m²/m³</b>	
MASA TÉRMICA:	M= M.T./V.H:	
<b>28,42 MJ/K</b>	<b>0,277 MJ/K/m³</b>	
EFUSIVIDAD TÉRMICA:		
$E = \sqrt{MG/\omega}$	<b>1,03E+05 J/m³K</b>	
VALOR-U GLOBAL:		
$UG = (\sum Si1 \cdot Ui) / SG$	<b>2,03 W/m²K</b>	
ASENTAMIENTO	ADOSAMIENTO	
$Ad = Sad / SG = Sad / (Sad + Sas + Spt)$	$as = Sas / SG = Sas / (Sad + Sas + Spt)$	
<b>0,20</b>	<b>0</b>	

TIPO DE VIVIENDA:	<b>Vivienda Unifamiliar Aislada</b>	<p style="text-align: right;">↑ N <b>Planta VIVIENDA</b></p>
CATEGORÍA:	<b>Vivienda Popular (45 – 60 m²)</b>	
SUPERFICIE HABITABLE	VOLUMEN HABITABLE	
<b>55,35 m²</b>	<b>138,38 m³</b>	
SUPERFICIE DE PIEL:	f= S.P./V.H (m²/m³):	
<b>200,58 m²</b>	<b>1,45 m²/m³</b>	
SUPERFICIE DE VIDRIO:	Suv= S.V./V.:	
<b>6,29 m²</b>	<b>0,05 m²/m³</b>	
MASA TÉRMICA:	M= M.T./V.H:	
<b>38,03 MJ/K</b>	<b>0,274 MJ/K/m³</b>	
EFUSIVIDAD TÉRMICA:		
$E = \sqrt{MG/\omega}$	<b>1,00E+05 J/m³K</b>	
VALOR-U GLOBAL:		
$UG = (\sum Si1 \cdot Ui) / SG$	<b>1,99 W/m²K</b>	
ASENTAMIENTO	ADOSAMIENTO	
$Ad = Sad / SG = ad / (Sad + Sas + Spt)$	$as = Sas / SG = Sas / (Sad + Sas + Spt)$	
<b>0,22</b>	<b>0</b>	

Fichas A.1 y A.2. Vivienda unifamiliar mínima y popular.

TIPO DE VIVIENDA:	<b>Vivienda Unifamiliar Aislada</b>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>Planta BAJA</b></p> </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>Planta ALTA</b></p> </div> </div>
CATEGORÍA:	<b>Vivienda Interés S. (60 – 90 m²)</b>	
SUPERFICIE HABITABLE	VOLUMEN HABITABLE	<p style="text-align: center;"><b>Planta VIVIENDA</b></p>
<b>71,70 m²</b>	<b>179,25 m³</b>	
SUPERFICIE DE PIEL:	f= S.P./V.H (m²/m³):	
<b>196,70 m²</b>	<b>1,10 m²/m³</b>	
SUPERFICIE DE VIDRIO:	Suv= S.V./V.:	
<b>8,84 m²</b>	<b>0,05 m²/m³</b>	
MASA TÉRMICA:	M= M.T./V.H:	
<b>71,17 MJ/K</b>	<b>0,397 MJ/K/m³</b>	
EFUSIVIDAD TÉRMICA:	<b>1,19E+05 J/m³K</b>	
$E = \sqrt{MG/\omega}$		
VALOR-U GLOBAL:	<b>2,23 W/m²CK</b>	
$UG = (\sum Si1 \cdot Ui) / SG$		
ASENTAMIENTO	ADOSAMIENTO	
$Ad = Sad / SG = Sad / (Sad + Sas + Spt)$	$as = Sas / SG = Sas / (Sad + Sas + Spt)$	
<b>0,27</b>	<b>0</b>	

TIPO DE VIVIENDA:	<b>Vivienda Unifamiliar Aislada</b>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>Planta BAJA</b></p> </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>Planta ALTA</b></p> </div> </div>
CATEGORÍA:	<b>Vivienda Interés M. (90 – 120 m²)</b>	
SUPERFICIE HABITABLE	VOLUMEN HABITABLE	<p style="text-align: center;"><b>Planta VIVIENDA</b></p>
<b>92,50 m²</b>	<b>245,12 m³</b>	
SUPERFICIE DE PIEL:	f= S.P./V.H (m²/m³):	
<b>266,80 m²</b>	<b>1,09 m²/m³</b>	
SUPERFICIE DE VIDRIO:	Suv= S.V./V.:	
<b>13,06 m²</b>	<b>0,05 m²/m³</b>	
MASA TÉRMICA:	M= M.T./V.H:	
<b>103,62 MJ/K</b>	<b>0,422 MJ/K/m³</b>	
EFUSIVIDAD TÉRMICA:	<b>1,23E+05 J/m³K</b>	
$E = \sqrt{MG/\omega}$		
VALOR-U GLOBAL:	<b>2,14 W/m²K</b>	
$UG = (\sum Si1 \cdot Ui) / SG$		
ASENTAMIENTO	ADOSAMIENTO	
$Ad = Sad / SG = Sad / (Sad + Sas + Spt)$	$as = Sas / SG = Sas / (Sad + Sas + Spt)$	
<b>0,26</b>	<b>0</b>	

Fichas A.3 y A.4. Vivienda unifamiliar de interés socia (2p) y de interés medio (2p).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
**LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

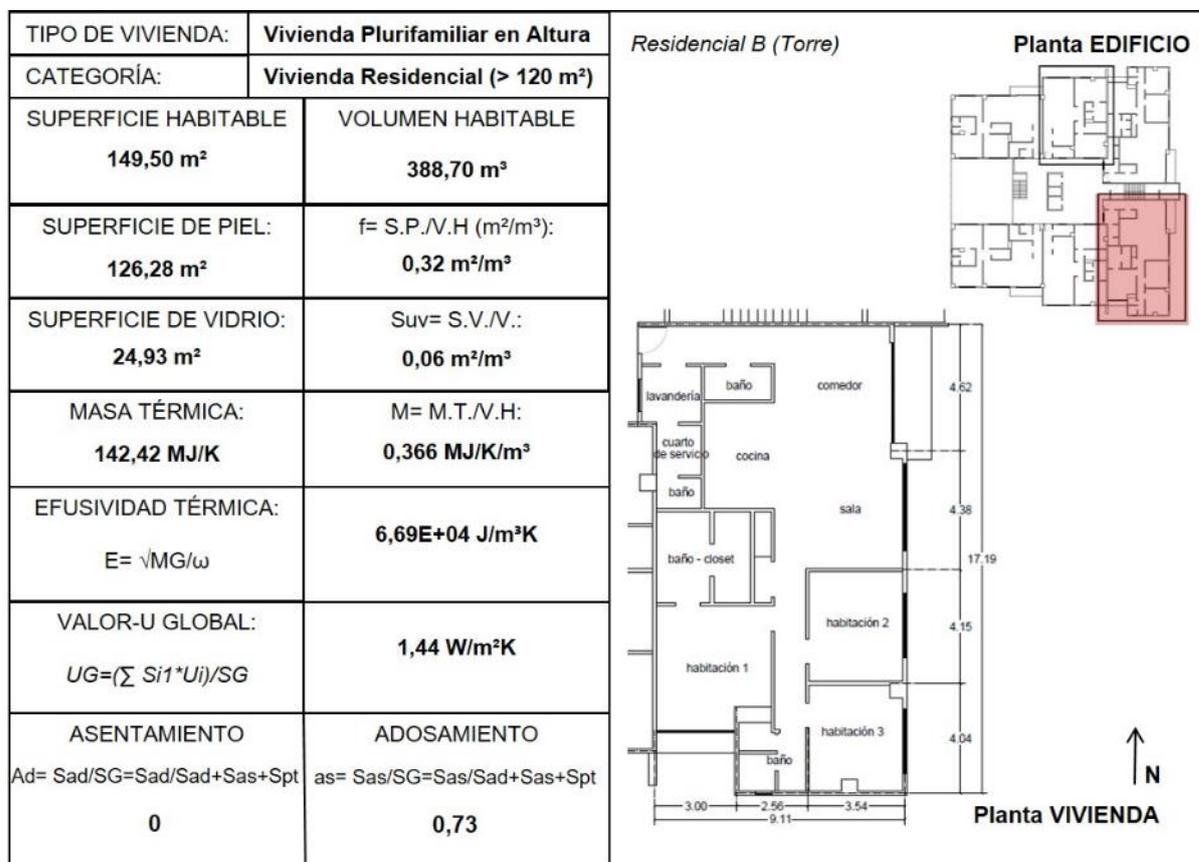
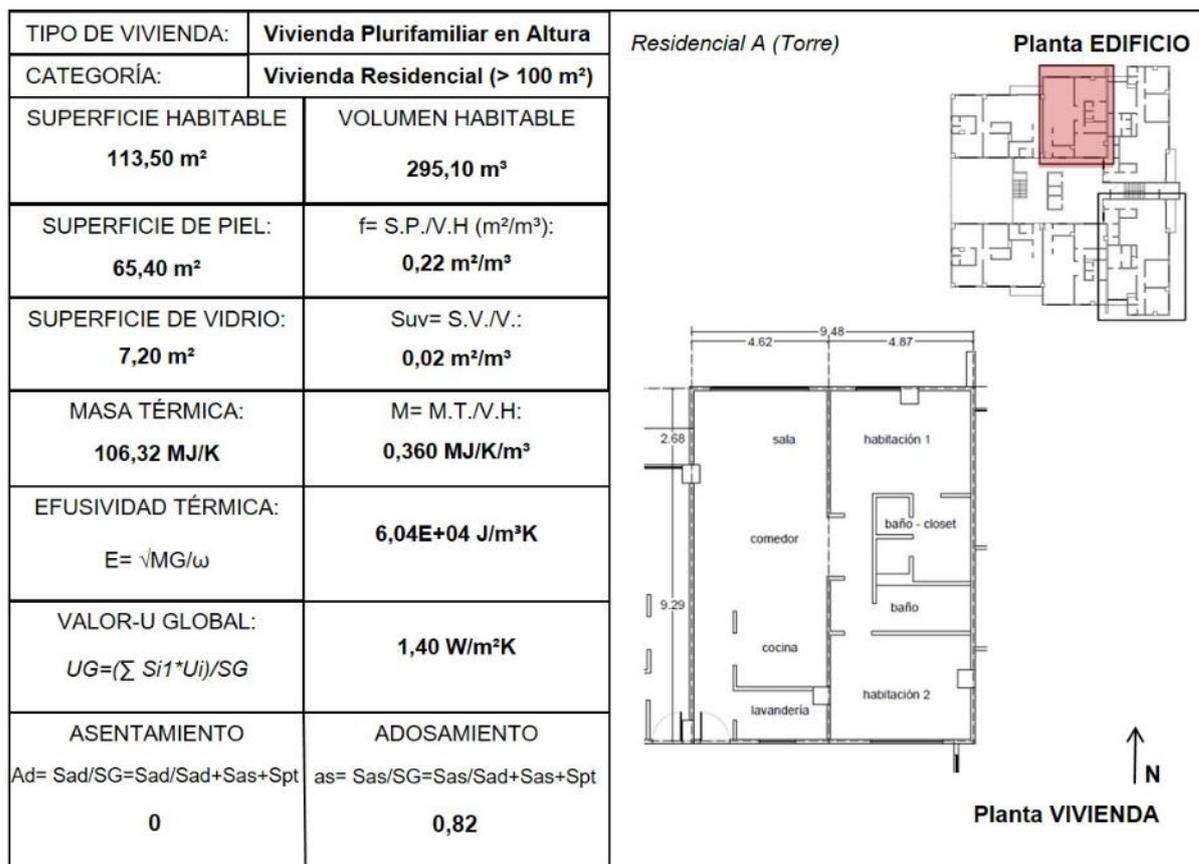
TIPO DE VIVIENDA:	<b>Vivienda Unifamiliar Aislada</b>	
CATEGORÍA:	<b>Vivienda Residencial (&gt; 120 m²)</b>	
SUPERFICIE HABITABLE	VOLUMEN HABITABLE	
<b>137 m²</b>	<b>363,05 m³</b>	
SUPERFICIE DE PIEL:	f= S.P./V.H (m²/m³):	
<b>465,57 m²</b>	<b>1,28 m²/m³</b>	
SUPERFICIE DE VIDRIO:	Suv= S.V./V.:	
<b>16,73 m²</b>	<b>0,05 m²/m³</b>	
MASA TÉRMICA:	M= M.T./V.H:	
<b>129,83 MJ/K</b>	<b>0,357 MJ/K/m³</b>	
EFUSIVIDAD TÉRMICA:		
E= √MG/ω	<b>1,00E+05 J/m³K</b>	
VALOR-U GLOBAL:		
UG=(∑ Si1*Ui)/SG	<b>1,81 W/m²K</b>	
ASENTAMIENTO	ADOSAMIENTO	
Ad= Sad/SG=Sad/Sad+Sas+Spt	as= Sas/SG=Sas/Sad+Sas+Spt	
<b>0,23</b>	<b>0</b>	

**Planta VIVIENDA**

TIPO DE VIVIENDA:	<b>Vivienda Unifamiliar Aislada</b>	
CATEGORÍA:	<b>Vivienda Residencial (&gt; 120 m²)</b>	
SUPERFICIE HABITABLE	VOLUMEN HABITABLE	
<b>146,80 m²</b>	<b>389,02 m³</b>	
SUPERFICIE DE PIEL:	f= S.P./V.H (m²/m³):	
<b>340,62 m²</b>	<b>0,88 m²/m³</b>	
SUPERFICIE DE VIDRIO:	Suv= S.V./V.:	
<b>9,54 m²</b>	<b>0,02 m²/m³</b>	
MASA TÉRMICA:	M= M.T./V.H:	
<b>143,49 MJ/K</b>	<b>0,368 MJ/K/m³</b>	
EFUSIVIDAD TÉRMICA:		
E= √MG/ω	<b>9,90E+04 J/m³K</b>	
VALOR-U GLOBAL:		
UG=(∑ Si1*Ui)/SG	<b>1,99 W/m²K</b>	
ASENTAMIENTO	ADOSAMIENTO	
Ad= Sad/SG=Sad/Sad+Sas+Spt	as= Sas/SG=Sas/Sad+Sas+Spt	
<b>0,30</b>	<b>0</b>	

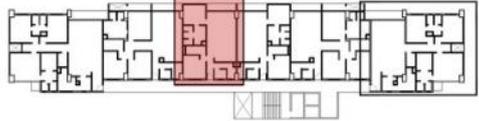
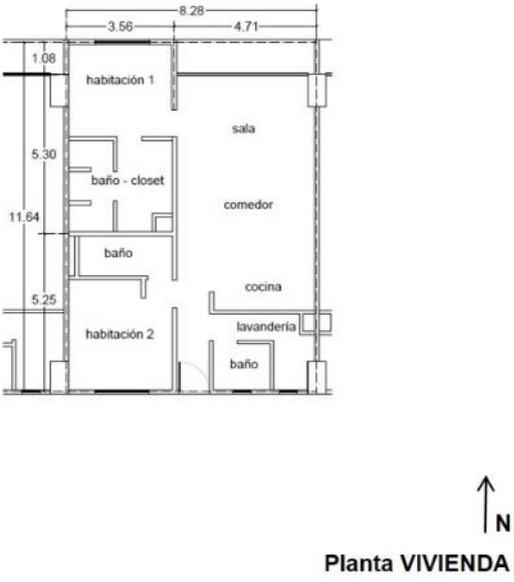
**Planta VIVIENDA**

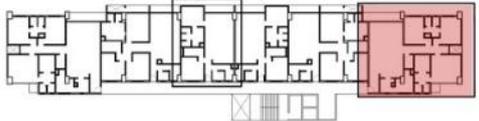
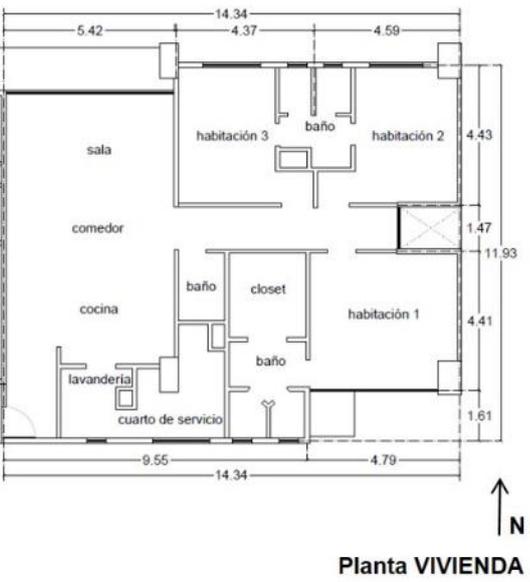
Fichas A.5 y A.6. Vivienda unifamiliar residencial y residencial (2p).



Fichas A.7 y A.8. Viviendas plurifamiliares en altura: residencial A (torre) y residencial B (torre).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
**LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

TIPO DE VIVIENDA:	<b>Vivienda Plurifamiliar en Altura</b>	<p><i>Residencial A (Bloque)</i> <b>Planta EDIFICIO</b></p> 
CATEGORÍA:	<b>Vivienda Residencial (&gt; 90 m²)</b>	
SUPERFICIE HABITABLE	VOLUMEN HABITABLE	<p><i>Residencial A (Bloque)</i> <b>Planta VIVIENDA</b></p> 
<b>90,10 m²</b>	<b>234,26 m³</b>	
SUPERFICIE DE PIEL:	f= S.P./V.H (m²/m³):	
<b>54,60 m²</b>	<b>0,23 m²/m³</b>	
SUPERFICIE DE VIDRIO:	Suv= S.V./V.:	
<b>15,98 m²</b>	<b>0,07 m²/m³</b>	
MASA TÉRMICA:	M= M.T./V.H:	
<b>83,86 MJ/K</b>	<b>0,355 MJ/K/m³</b>	
EFUSIVIDAD TÉRMICA:	<b>6,51E+04 J/m²K</b>	
E= √MG/ω		
VALOR-U GLOBAL:	<b>1,04 W/m²K</b>	
UG=(∑ Si1*Ui)/SG		
ASENTAMIENTO	ADOSAMIENTO	
Ad= Sad/SG=Sad/Sad+Sas+Spt	as= Sas/SG=Sas/Sad+Sas+Spt	
<b>0</b>	<b>0,81</b>	

TIPO DE VIVIENDA:	<b>Vivienda Plurifamiliar en Altura</b>	<p><i>Residencial B (Bloque)</i> <b>Planta EDIFICIO</b></p> 
CATEGORÍA:	<b>Vivienda Residencial (&gt; 120 m²)</b>	
SUPERFICIE HABITABLE	VOLUMEN HABITABLE	<p><i>Residencial B (Bloque)</i> <b>Planta VIVIENDA</b></p> 
<b>155,90 m²</b>	<b>405,34 m³</b>	
SUPERFICIE DE PIEL:	f= S.P./V.H (m²/m³):	
<b>132 m²</b>	<b>0,33 m²/m³</b>	
SUPERFICIE DE VIDRIO:	Suv= S.V./V.:	
<b>33,54 m²</b>	<b>0,08 m²/m³</b>	
MASA TÉRMICA:	M= M.T./V.H:	
<b>136,51 MJ/K</b>	<b>0,336 MJ/K/m³</b>	
EFUSIVIDAD TÉRMICA:	<b>6,35E+04 J/m²K</b>	
E= √MG/ω		
VALOR-U GLOBAL:	<b>0,93 W/m²K</b>	
UG=(∑ Si1*Ui)/SG		
ASENTAMIENTO	ADOSAMIENTO	
Ad= Sad/SG=Sad/Sad+Sas+Spt	as= Sas/SG=Sas/Sad+Sas+Spt	
<b>0</b>	<b>0,72</b>	

Fichas A.9 y A.10. Vivienda plurifamiliar en altura: residencial A (bloque) y residencial B (bloque).

### A5.1.2 Radiación solar recibida en distintas configuraciones de vivienda

En la **Figura A.1** se muestra la radiación solar directa recibida en la envolvente de una vivienda de 100 m<sup>2</sup>, durante el día promedio del año (kWh/día y kWh/m<sup>2</sup>/día) en la latitud 29°N. Los valores han sido obtenidos a través de simulaciones en el programa de cálculo Heliodon2 (Benoit Beckers, 2009). En ella se puede ver la diferencia en la cantidad de radiación recibida en distintas configuraciones de una vivienda, la cual conserva, en todos los casos, la misma superficie (100 m<sup>2</sup>) y volumen habitable (260 m<sup>3</sup>).

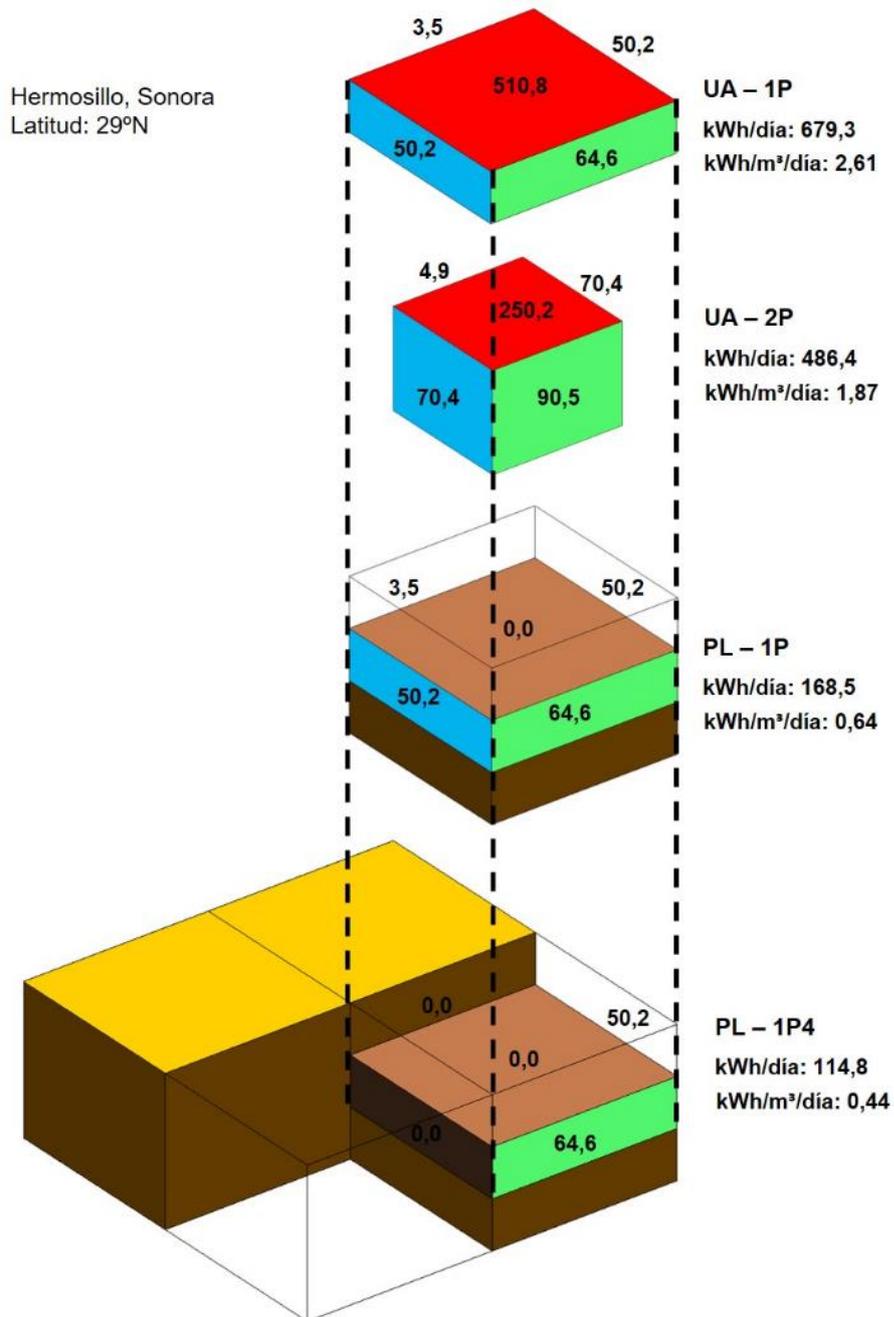


Figura A.1. Radiación solar recibida en un día promedio en distintas configuraciones de vivienda. Misma superficie (100 m<sup>2</sup>) y volumen habitable (m<sup>3</sup>)

## **A5.2 SIMULACIONES ENERGÉTICAS**

### **A5.2.1 Software de simulación (Design Builder & EnergyPlus)**

Las simulaciones se basan en un modelo de cálculo dinámico que utiliza la interfaz Design Builder (2016), que se utiliza Energy Plus (DOE, 2018) como motor de cálculo.

Los archivos climáticos que utiliza Energy Plus son los *EPW File* (EnergyPlus Weather). En este archivo se reúnen datos de varios factores climáticos (Torres-Quezada, 2018).

En esta tesis se ha utilizado un archivo EPW generado por la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional Ignacio Pesqueira de la ciudad de Hermosillo (29,096 -111,048). El periodo de registro de los datos es de 1950 – 2017.

Un archivo EPW debe de contener los siguientes datos de acuerdo EnergyPLUS (DOE, 2015):

<b>Parametros Archivo EPW</b>	
1: Año	19: Iluminancia Horizontal Difusa (lux)
2: Mes	20: Luminancia Zenith (Cd/m <sup>2</sup> )
3: Día	21: Dirección Viento (°)
4: Hora	22: Velocidad Viento (m/s)
5: Minuto	23: Cobertura Total del Cielo (décimas de cobertura)
6: Fuente de datos	24: Cobertura Opaca del Cielo (décimas de cobertura)
7: Temperatura Bulbo Seco (°C)	25: Visibilidad (km)
8: Temperatura de Rocio (°C)	26: Altura del Cielo (m)
9: Humedad Relativa (%)	27: Observación del Tiempo Presente
10: Presión Atmosférica (Pa)	28: Codigos del Tiempo Presente
11: Radiación Horizontal Extraterrestre (Wh/m <sup>2</sup> )	29: Agua precipitable (mm)
12: Radiación Normal Directa Extraterrestre (Wh/m <sup>2</sup> )	30: Profundidad Óptica de Aerosol (milésimas)
13: Radiación Horizontal Infrarroja (Wh/m <sup>2</sup> )	31: Profundidad de Nieve (cm)
14: Radiación Horizontal Global (Wh/m <sup>2</sup> )	32: Días Desde la Última Nevada
15: Radiación Normal Directa (Wh/m <sup>2</sup> )	33: Albedo
16: Radiación Horizontal Difusa (Wh/m <sup>2</sup> )	34: Profundidad de Precipitación Líquida (mm)
17: Iluminancia Horizontal Global (lux)	35: Cantidad de Precipitación Líquida (hora)
18: Iluminancia Horizontal Directa (lux)	

Tabla A.1. Datos de entrada de un archivo EPW.

### **A5.2.2 Bases para los modelos de simulación**

En este estudio, las viviendas han sido divididas en dos grupos: la tipología de vivienda unifamiliar aislada y la de vivienda plurifamiliar en altura. En el grupo de las viviendas unifamiliares existen cinco categorías: vivienda mínima, popular, de interés social, de interés medio y vivienda residencial. Dentro de esta clasificación podemos encontrar viviendas de 1 o 2 plantas. En la vivienda plurifamiliar todas son consideradas como vivienda residencial.

Los materiales de la envolvente y del interior de las viviendas son definidos de acuerdo a los más utilizados en la región. La geometría, orientación y la distribución espacial de los modelos son las que predominan en la ciudad. En las **Tablas A.2 y A.3** se muestran los valores de

distintos parámetros utilizados en simulaciones en régimen libre y con refrigeración. Estos valores son utilizados en todos los casos con el fin de disminuir el número de variables.

### Parámetros base para simulaciones en régimen libre

<b>Actividad</b>	
<b>Ocupación</b>	
	4 personas
Programa:	L - V: 16:00 - 08:00 / S - D: 24 h
<b>Control Ambiental</b>	
Calefacción:	-
Refrigeración:	-
Ventilación Natural:	-
<b>Cargas internas</b>	
Computadoras:	-
Equipo de Oficina:	-
Catering:	-
<b>Construcción</b>	
<b>Muros Exteriores</b>	
Emisividad:	0,90
Absorptancia (visible e infrarrojo cercano)	0,30
Rugosidad:	Suave
Textura:	GranulatedClear01
<b>Hermeticidad</b>	
Infiltraciones:	24/7 - 0,70 ac/h
<b>Aberturas</b>	
Unifamiliares	
Acrilamiento:	Vidrio transparente genérico de 6 mm
Transmitancia Térmica:	5,801 W/m <sup>2</sup> K
Plurifamiliares	
Acrilamiento:	Vidrio doble con cámara de aire (6 + 6 + 6 mm)
Transmitancia Térmica:	3,082 W/m <sup>2</sup> K
<b>Climatización (HVAC)</b>	
Calefacción:	-
Refrigeración:	-
Ventilación Natural:	2 ac/h
Programa:	Nov - Abr: 24/7 May - Oct: 20:00 - 07:00
Temp. mínima exterior:	21,0 °C
Temp. máxima exterior:	34,0 °C
<b>Localización</b>	
enero - diciembre	
Temperatura del Suelo	15,6 °C, 15,9 °C, 16,9 °C, 19,9 °C, 23,5 °C, 26,8 °C, 32,6 °C, 32,2 °C, 31,8 °C, 30,3 °C, 25,6 °C, 19,9 °C

Tabla A.2. Parámetros base para simulación en régimen libre en Design Builder.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
 LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

**Parámetros base para simulaciones con refrigeración**

<b>Actividad</b>	
<b>Ocupación</b>	
	4 personas
Programa:	L - V: 16:00 - 08:00 / S - D: 24 h
<b>Control Ambiental</b>	
Calefacción:	-
Refrigeración:	Temperatura de consigna 26,0 °C
Ventilación Natural:	Temperatura mínima interior 21,0 °C
<b>Cargas internas</b>	
Computadoras:	-
Equipo de Oficina:	-
Catering:	-
<b>Construcción</b>	
<b>Muros Exteriores</b>	
Emisividad:	0,90
Absorptancia (visible e infrarrojo cercano)	0,30
Rugosidad:	Suave
Textura:	GranulatedClear01
<b>Hermeticidad</b>	
Infiltraciones:	24/7 - 0,70 ac/h
<b>Aberturas</b>	
	Unifamiliares
Acristalamiento:	Vidrio transparente genérico de 6 mm
Transmitancia Térmica:	5,801 W/m <sup>2</sup> K
	Plurifamiliares
Acristalamiento:	Vidrio doble con cámara de aire (6 + 6 + 6 mm)
Transmitancia Térmica:	3,082 W/m <sup>2</sup> K
<b>Climatización (HVAC)</b>	
Calefacción:	-
Refrigeración:	On
Tipo de sistema:	Split o multi-split con ventilación natural
CoP:	1,83
Distribución de aire:	Mezclada
Programa:	Nov - Abr: - May - Oct: L-V: 06:00 - 08:00 & 16:00 - 23:00 / S-D: 07:00 - 23:00
Ventilación Natural:	2 ac/h
Programa:	Nov - Abr: 24/7 May - Oct: L-V: 08:00 - 16:00 / S-D: -
Temp. mínima exterior:	15,0 °C
Temp. máxima exterior:	40,0 °C
<b>Localización</b>	
	enero - diciembre
Temperatura del Suelo	15,6 °C, 15,9 °C, 16,9 °C, 19,9 °C, 23,5 °C, 26,8 °C, 32,6 °C, 32,2 °C, 31,8 °C, 30,3 °C, 25,6 °C, 19,9 °C

Tabla A.3. Parámetros base para simulación con refrigeración en Design Builder.

Además de los parámetros base para las simulaciones tanto en régimen libre como con refrigeración, cada modelo presenta distintos parámetros en lo que respecta a su envolvente. El tipo de muro, de cubierta y de suelo, el espesor de cada uno de estos parámetros, así como el nivel de aislamiento térmico con el que cuentan y su valor de transmitancia térmica ( $W/m^2K$ ).

En la **Tabla A.4** se muestran estos valores en cada uno de los diferentes modelos de viviendas, unifamiliares aisladas y plurifamiliares en altura. En la **Figura A.2** se muestran los modelos hechos para las simulaciones.

<b>Características constructivas de los modelos</b>				
<b>Unifamiliar Aislada</b>				
<b>Categoría</b>	<b>Muro</b>	<b>Valor-U (W/m<sup>2</sup>K)</b>	<b>Cubierta / Suelo</b>	<b>Valor-U (W/m<sup>2</sup>K)</b>
Mínima	Bloque de hormigón hueco (0,24 m). Enlucido interior de yeso. Revoque exterior de cemento-arena. Sin aislamiento térmico	2,549	Losas de vigueta de hormigón y bovedilla de EPS (0,27 m). Acabado con membrana impermeabilizante de color blanco, con una emisividad de 0,90 y absorptancia (visible e infrarrojo cercano) 0,25 y 0,25	0,249
Popular				
Interés Social (2p)				
Interés Medio (2p)	Ladrillo rollo (0,1820 m). Enlucido interior de yeso. Revoque exterior de cemento-arena. Sin aislamiento térmico	2,30	Losas de hormigón reforzado de 0,27 m. Sin aislamiento térmico.	2,616
Residencial				
Residencial (2p)				
<b>Plurifamiliar en Altura</b>				
<b>Categoría</b>	<b>Muro</b>	<b>Valor-U (W/m<sup>2</sup>K)</b>	<b>Cubierta</b>	<b>Valor-U (W/m<sup>2</sup>K)</b>
Residencial A	Paneles prefabricados de EPS (0,1727 m)	0,221	Losas nervada de hormigón armado (forjado interior) + plafón de panel de yeso (0,38 m de separación)	1,352
Residencial B				
Residencial A	Medianeras de Bloque de hormigón hueco de 0,24 m. Enlucido interior de yeso. Sin aislamiento térmico	2,549		
Residencial B				

Tabla A.4. Parámetros de la envolvente en los distintos modelos en Design Builder.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

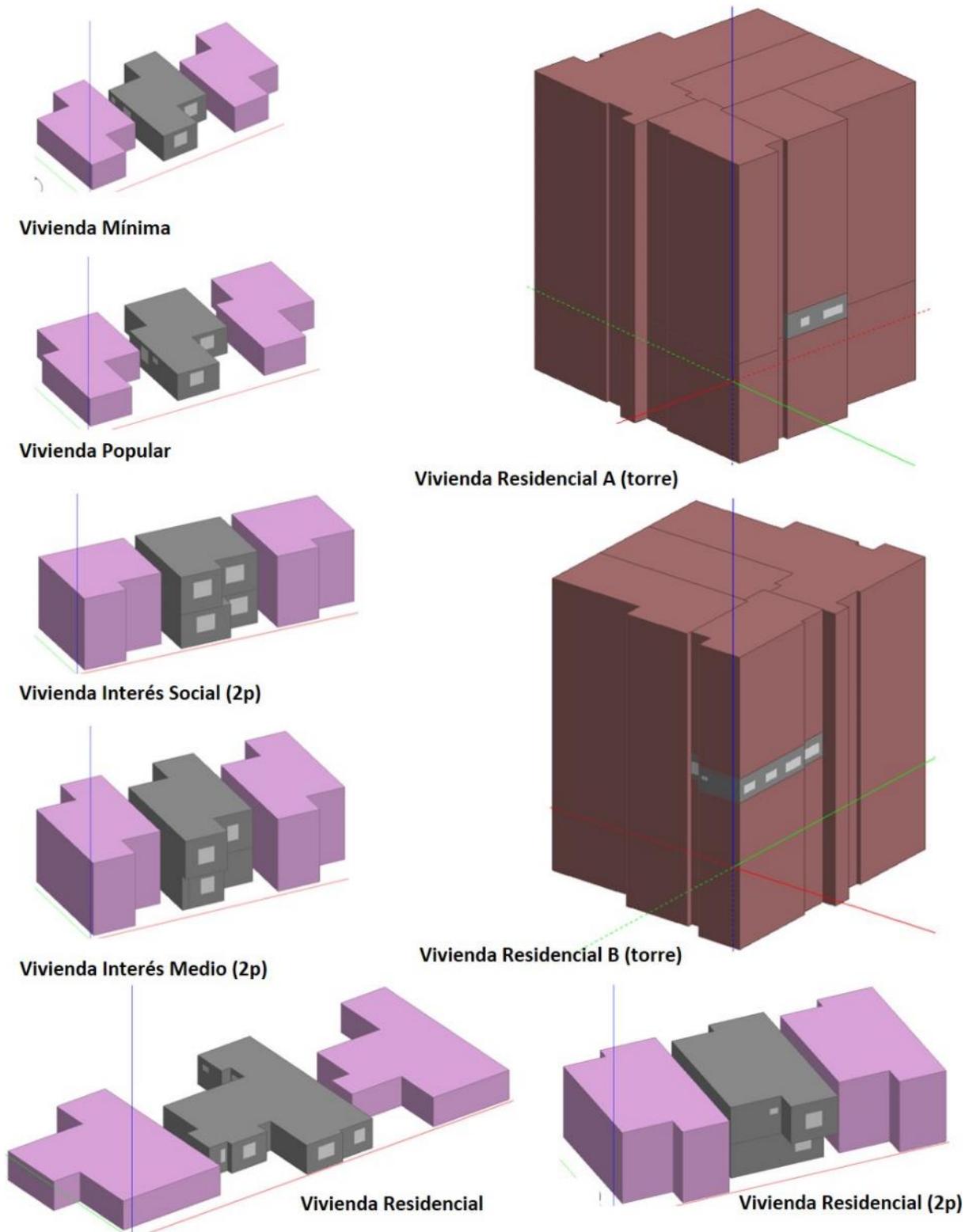


Figura A.2. Volúmenes de los modelos de las distintas viviendas estudiadas.

### A5.2.3 Validación de los modelos de simulación (régimen libre)

Para la validación de las simulaciones se escogió la vivienda unifamiliar mínima y la vivienda popular. Se tomó como referencia el trabajo realizado por Irene Marincic en la ciudad de Hermosillo durante los meses de agosto y septiembre (08:00-19:00) en este tipo de viviendas (Gomez-Azpeitia et al., 2014)

Durante la campaña de mediciones de ese trabajo, se tomaron datos de la temperatura del aire interior, humedad relativa, velocidad del viento y la temperatura media radiante de 143 viviendas, se calculó la temperatura operativa de cada vivienda ( $T_{op}$ ) con la formula simplificada de ANSI/ASHRAE 55 (2013) (Ec 1).

La temperatura del aire y la temperatura operativa (**Figura A.3**) son los que se han utilizado para la validación de las simulaciones de esta tesis. Los valores medidos presentan una fuerte correlación positiva de  $R^2=0,959$ , y se mantienen, en todos los casos, en un rango entre 25°C y 40°C.

$$T_{op} = (T_a + MRT)/2 \quad (\text{Ec } 1)$$

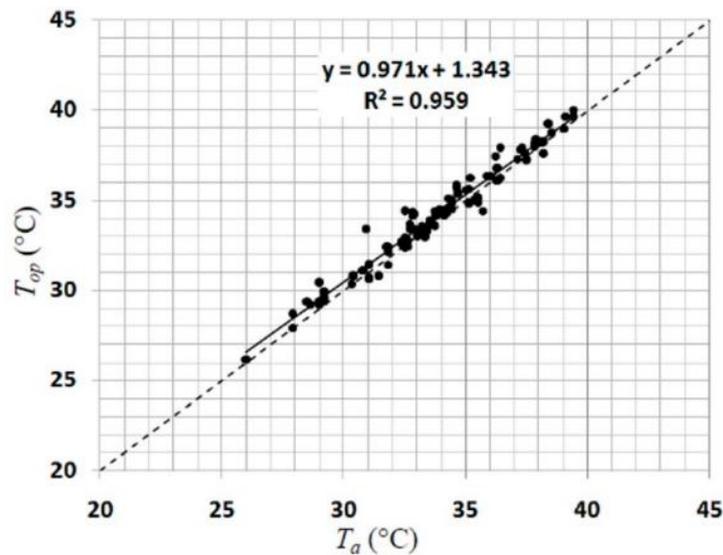


Figura A.3. Datos de 143 viviendas de Hermosillo durante agosto y septiembre de 2006 (Gomez-Azpeitia et al., 2014)

Para llevar a cabo la validación de los modelos se ha simulado el comportamiento térmico interior de dos viviendas (de las categorías mencionadas) diariamente durante los meses de agosto y septiembre. Los resultados son datos horarios, de manera que sean valores similares a los obtenidos en el trabajo de referencia.

Los gráficos en la **Figura A.4** muestran la temperatura del aire interior y la temperatura operativa durante la primera semana de agosto (01 – 07 de agosto). En estos gráficos se puede ver como la temperatura operativa tiene un comportamiento similar a la temperatura del

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

aire durante todo el periodo simulado, presentando un ligero retraso debido a efecto de la inercia (se considera la temperatura radiante). Sin embargo, existe una fuerte correlación entre ambos parámetros, en ambas viviendas, la cual queda representada en la **Figura A.5**.

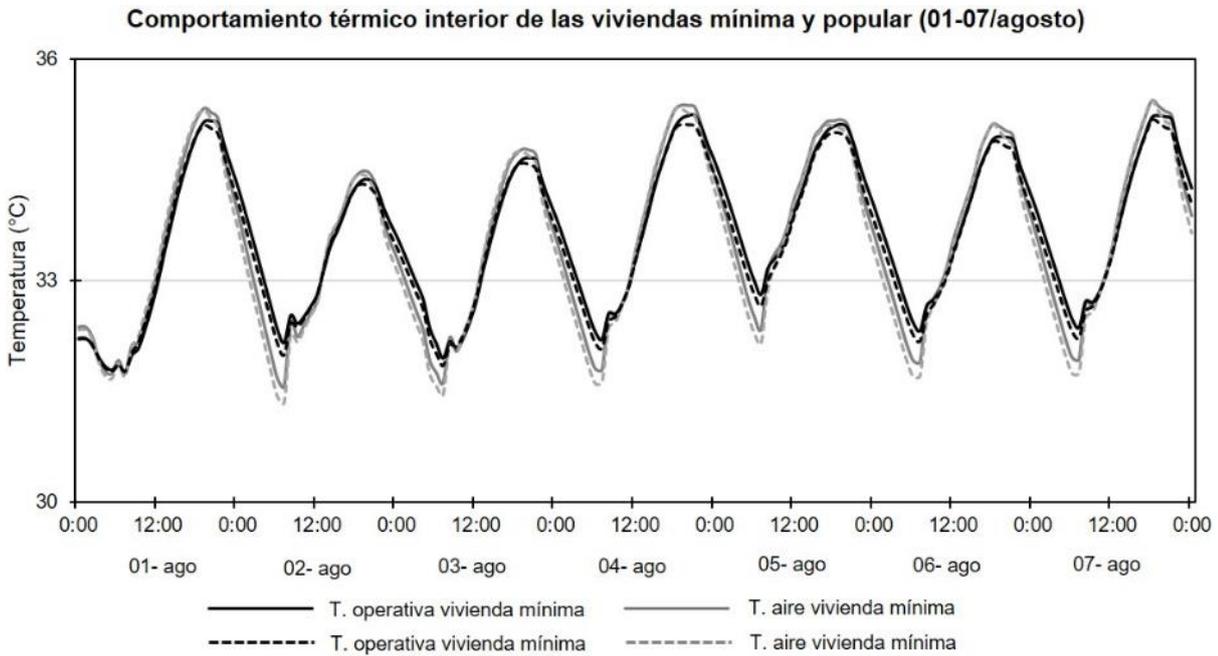


Figura A.4 Comparación de la temperatura operativa y la temperatura del aire interior de ambas viviendas.

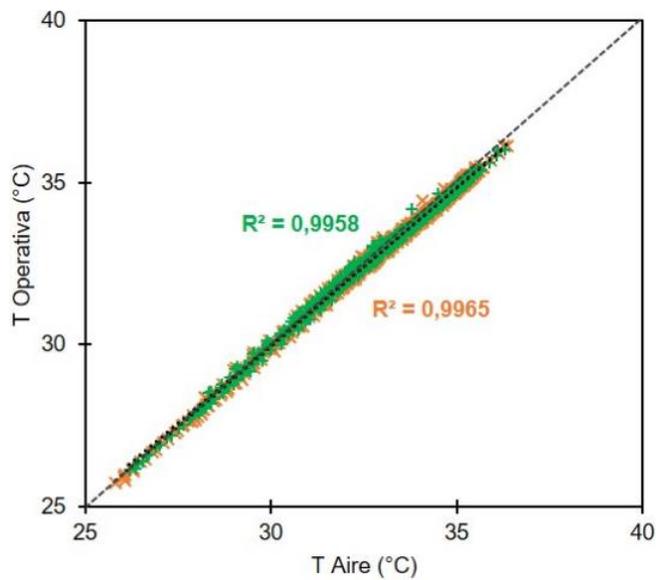


Figura A.5 Comparativa de la correlación entre la temperatura del aire interior y la temperatura operativa en la viviendas mínima (verde) y en a vivienda popular (naranja).

En la **Figura A.5** se muestran los datos de las temperaturas promedio del aire y operativa para las dos viviendas. En el gráfico están representados los meses de agosto y septiembre, en un horario de 8:00 a 19:00 (12 horas cada día) para un total de 732 puntos por cada vivienda. En ambos casos existe una fuerte correlación entre la temperatura del aire y la temperatura operativa: el coeficiente de Pearson para la vivienda mínima es de  $r=0,9978$  ( $R^2=0,9958$ ) y para la vivienda popular es de  $r=0,9982$  ( $R^2=0,9965$ ). Ambos casos tienen un comportamiento similar a los datos obtenidos por Gomez-Azpeitia et al. (2014)

La **Figura A.6** muestra la comparación de los datos simulados con los datos obtenidos a partir de las mediciones de 143 viviendas. En este gráfico es posible observar como el comportamiento de los datos en ambos casos es similar, siguiendo una misma tendencia.

Cabe resaltar que, al igual que los datos medidos, los datos obtenidos a partir de las simulaciones se encuentran dentro del mismo rango ( $25^{\circ}\text{C}$  -  $40^{\circ}\text{C}$ ).

Al comparar ambas situaciones, se puede ver como los datos medidos alcanzan temperaturas que se ubican más cercanas a los extremos de este rango, esto se puede deber a varios aspectos:

- El valor de las temperaturas en las simulaciones es un promedio para toda la vivienda, mientras que las mediciones se han hecho en un espacio particular de cada vivienda.
- Al ser simulaciones en régimen libre, se intenta ver únicamente el comportamiento térmico de la vivienda, por lo que se han dejado fuera las cargas internas por equipos electrónicos o de cocina.
- En cuanto a la ocupación de las viviendas, ésta fue simulada con 4 habitantes. Este número ha podido variar en las mediciones, presentando un valor mayor o menor al asignado en la simulación, afectando el valor de las cargas internas por ocupación.

Sin embargo, en este caso, estos aspectos no afectan de gran manera la correlación entre la temperatura operativa y la temperatura del aire interior.

Por lo tanto, de acuerdo al comportamiento de los datos medidos, así como su correlación ( $R^2=0,959$ ), es posible validar los datos obtenidos al simular estos dos casos, los cuales tienen un comportamiento y correlación similar ( $R^2=0,9958$  y  $R^2=0,9965$ ).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

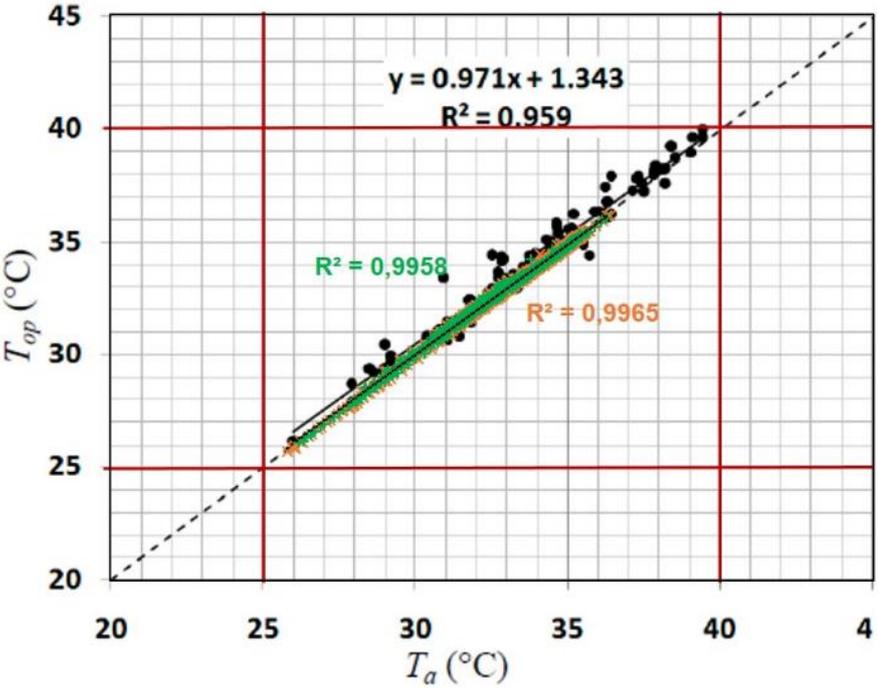


Figura A.6 Comparación de los datos simulados en la vivienda mínima y popular con los datos medidos de 143 viviendas.

#### A5.2.4 Validación de los modelos de simulación (demanda de refrigeración)

Para la validación de las simulaciones de la demanda mensual (kWh) de refrigeración se han seleccionado viviendas de ambas tipologías (unifamiliares aisladas y plurifamiliares en altura). Se escogieron dos viviendas unifamiliares de categoría residencial (de una y dos plantas), y dos viviendas plurifamiliares en altura.

Se cuenta con los datos de consumo mensual real de estas viviendas. Estos datos son obtenidos de las facturas de electricidad (de CFE). Sin embargo, estos datos no se encuentran disgregados, es decir, en el consumo mensual se incluyen todos los electrodomésticos y sistemas activos de acondicionamiento. Otra característica de este tipo de facturas, es que las fechas de corte y toma de lectura no coinciden con el inicio o final de mes, y son fechas distintas entre las diferentes viviendas.

Por lo tanto, los valores obtenidos por medio de la simulación se han presentan de manera mensual y de acuerdo a las fechas de la factura de cada vivienda.

Los datos de consumo son de dos años para las viviendas plurifamiliares, de tres años para la vivienda residencial (2p) y seis años para la vivienda residencial de una planta (**Tabla A.5**). De estos datos se ha calculado un “año promedio” el cual se ha tomado como referencia para las simulaciones.

Si bien, los datos de consumo no están disgregados, es posible calcular un “consumo base” considerando los meses en los que no se utiliza la refrigeración (noviembre – abril). Este dato permite calcular el consumo eléctrico de refrigeración en los meses de uso (mayo – octubre).

Al tratarse de datos de consumo general, difíciles de disgregar, sirven para comparar el comportamiento en el uso de refrigeración en cada tipo de vivienda. Sin embargo, incluso el utilizarlo con este fin es complicado debido al factor «usuario». Las cuatro viviendas tienen diferentes perfiles de usuario, por lo tanto, el comportamiento en el consumo eléctrico es distinto en cada caso.

En algunos casos, el usuario puede decidir no utilizar la refrigeración por motivos económicos. En otros, la falta de uso de refrigeración se debe a que durante la temporada de calor se encuentra el periodo de vacaciones. Diferentes horarios entre los usuarios, temperatura de consigna, una mayor o menor ocupación, diferentes equipos de refrigeración (tipo paquete o mini-split, etc.).

Las simulaciones se han llevado a cabo para la temporada de calor (mayo – octubre), por lo que estos son los datos utilizados para la validación de los modelos simulados. Los parámetros base para estas simulaciones son los que se encuentran en la **Tabla A.3** (p.11).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:**  
**LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

<b>Consumo real y demanda simulada de la vivienda Residencial (fechas según factura)</b>														
<b>Consumo mensual (kWh)</b>														
Año	07/01 - 04/02	05/02 - 05/03	06/03 - 06/04	07/04 - 07/05	08/05 - 04/06	05/06 - 06/07	07/07 - 05/08	06/08 - 03/09	04/09 - 05/10	06/10 - 04/11	05/11 - 04/12	05/12 - 05/01	TOTAL CONSUMO ANUAL	BASE
2013	257,0	184,0	223,0	276,0	299,0	839,0	919,0	616,0	519,0	180,0	207,0	306,0	4825,0	233,3
2014	192,0	202,0	229,0	249,0	620,0	1929,0	1351,0	1185,0	958,0	247,0	209,0	309,0	7680,0	233,9
2016	227,0	215,0	271,0	229,0	283,0	1635,0	1548,0	1455,0	861,0	297,0	189,0	166,0	7376,0	216,2
2017	160,0	183,0	199,0	248,0	440,0	1582,0	1105,0	986,0	961,0	419,0	207,0	217,0	6707,0	202,3
2018	205,0	174,0	139,0	262,0	560,0	1555,0	1378,0	562,0	614,0	232,0	186,0	212,0	6079,0	201,4
2019	152,0	164,0	183,0	192,0	209,0	579,0	1481,0	596,0	585,0	276,0	200,0	197,0	4814,0	196,6
Promedio	198,8	187,0	207,3	242,7	401,8	1353,2	1297,0	900,0	749,7	275,2	199,7	234,5	6246,8	213,9
<b>Simulación de la demanda de refrigeración (kWh)</b>														
Simulación	0,0	0,0	0,0	3,7	327,2	1133,2	1714,8	1484,9	1308,5	522,8	0,0	0,0	6495,2	

<b>Consumo real y demanda simulada de la vivienda Residencial (2p) (fechas según factura)</b>														
<b>Consumo mensual (kWh)</b>														
Año	10/01 - 09/02	10/02 - 09/03	10/03 - 09/04	10/04 - 09/05	10/05 - 09/06	10/06 - 09/07	10/07 - 09/08	10/08 - 09/09	10/09 - 09/10	10/10 - 09/11	10/11 - 09/12	10/12 - 09/01	TOTAL CONSUMO ANUAL	BASE
2016	195,0	270,0	260,0	322,0	961,0	1518,0	1296,0	1227,0	924,0	610,0	314,0	237,0	8134,0	266,3
2017	237,0	197,0	300,0	375,0	735,0	1337,0	1010,0	1233,0	821,0	478,0	253,0	193,0	7169,0	259,2
2018	234,0	183,0	288,0	430,0	912,0	1255,0	1562,0	1191,0	885,0	545,0	280,0	215,0	7980,0	240,0
Promedio	222,0	216,7	282,7	375,7	869,3	1370,0	1289,3	1217,0	876,7	544,3	282,3	215,0	7761,0	255,2
<b>Simulación de la demanda de refrigeración (kWh)</b>														
Simulación	0,0	0,0	0,0	4,3	521,3	1214,4	1523,8	1272,9	927,8	315,4	0,0	0,0	5780,0	

<b>Consumo real y demanda simulada de la vivienda Residencial A (Torre) (fechas según factura)</b>														
<b>Consumo mensual (kWh)</b>														
Año	11/01 - 11/02	12/02 - 11/03	10/03 - 09/04	10/04 - 10/05	11/05 - 11/06	12/06 - 10/07	11/07 - 12/08	13/08 - 11/09	12/09 - 11/10	12/10 - 09/11	10/11 - 11/12	12/12 - 10/01	TOTAL CONSUMO ANUAL	BASE
2016	229,0	238,0	242,0	204,0	392,0	572,0	849,0	695,0	559,0	179,0	224,0	247,0	4630,0	223,3
2017	212,0	264,0	439,0	152,0	306,0	1466,0	1030,0	985,0	798,0	638,0	429,0	422,0	7141,0	383,6
Promedio	220,5	251,0	340,5	178,0	349,0	1019,0	939,5	840,0	678,5	408,5	326,5	334,5	5885,5	303,4
<b>Simulación de la demanda de refrigeración (kWh)</b>														
Simulación	0,0	0,0	0,0	1,3	283,0	504,0	633,6	470,9	295,9	84,0	0,0	0,0	2272,6	

<b>Consumo real y demanda simulada de una vivienda Residencial B (Torre) (fechas según factura)</b>														
<b>Consumo mensual (kWh)</b>														
Año	11/01 - 09/02	10/02 - 09/03	10/03 - 09/04	10/04 - 10/05	11/05 - 11/06	12/06 - 11/07	11/08 - 10/08	13/09 - 12/09	12/10 - 11/10	10/11 - 09/11	12/12 - 11/12	10/01 - 09/01	TOTAL CONSUMO ANUAL	BASE
2016	309,0	295,0	374,0	439,0	724,0	161,0	521,0	1004,0	691,0	578,0	338,0	265,0	5699,0	336,7
2017	299,0	295,0	419,0	474,0	667,0	303,0	499,0	1092,0	719,0	721,0	475,0	233,0	6196,0	365,8
Promedio	304,0	295,0	396,5	456,5	695,5	232,0	510,0	1048,0	705,0	649,5	406,5	249,0	5947,5	351,3
<b>Simulación de la demanda de refrigeración (kWh)</b>														
Simulación	0,0	0,0	0,0	45,5	663,1	931,1	1008,8	988,6	612,5	253,4	0,0	0,0	4502,8	

Tabla A.5. Datos de consumo mensual y de demanda de refrigeración simulada de las diferentes viviendas analizadas. Se ha señalado en rojo el valor histórico más elevado para cada mes. En azul se encuentran los valores de demanda obtenidos a partir de la simulación en Design Builder.

### Caso 1: vivienda unifamiliar Residencial

Construcción: Es una vivienda de 137 m<sup>2</sup> de superficie habitable y 2,65 m de altura interior. No cuenta con aislamiento en los muros exteriores (hechos de ladrillo), ni en el piso interior (hormigón reforzado y loseta cerámica. La cubierta es el único elemento con aislamiento térmico: está hecha a base de viguetas de concreto y bovedillas de EPS de 0,15 m. y una capa de compresión de hormigón reforzado de 0,05 m. Las ventanas son de vidrio sencillo de 6 mm con carpintería de aluminio.

Usuario: En los años 2013, 2014 y 2016 contaba con dos usuarios, mientras que en 2017, 2018 y 2019 la vivienda es habitada de manera regular por solo un usuario: una persona mayor jubilada (>70 años).

Como se puede ver en los gráficos de la **Figura A.7**, el comportamiento del consumo eléctrico mensual histórico es irregular, variando notablemente entre los años y contrasta con la regularidad de la simulación de la demanda de refrigeración. Esta irregularidad se debe al factor usuario, que prioriza el aspecto económico, por lo que presenta un consumo bajo al ser comparado la simulación durante varios meses de la temporada de calor.

En el gráfico de consumo mensual y demanda se observa como ha habido diferentes años en los que el consumo ha sido similar a la simulación, como en el año 2016, cuando había dos usuarios.

Sin embargo, al comparar la demanda simulada con el consumo promedio, el comportamiento del consumo parece seguir la misma tendencia que la simulación, si bien, este consumo sigue debajo de la demanda simulada durante cuatro de seis meses de temporada de uso de refrigeración. Existe una correlación positiva entre el consumo y la demanda de refrigeración simulado ( $R^2 = 0,7067$ ), sin embargo, esta no puede ser mayor por la influencia del factor usuario.

Al utilizar el consumo promedio de refrigeración calculado (consumo mensual promedio – consumo base) para observar la diferencia con los valores obtenidos mediante la simulación, ésta se reduce: el consumo promedio de refrigeración calculado para la temporada de calor es de 615,6 kWh/mes y la demanda de refrigeración simulada es de 1081,9 kWh/mes (08 de mayo – 04 de noviembre).

Resulta del interés de esta tesis el señalar la diferencia entre el consumo base calculado (213,9 kWh/mes) y los picos de consumo que se llegan a alcanzar durante la temporada de calor: 1.929 kWh/mes de 05 de junio – 06 de julio (refrigeración: 1716 kWh/mes al restar el consumo base). En el caso de la simulación, el pico que alcanza es de 1.714,8 kWh/mes (07 de julio – 08 de agosto).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

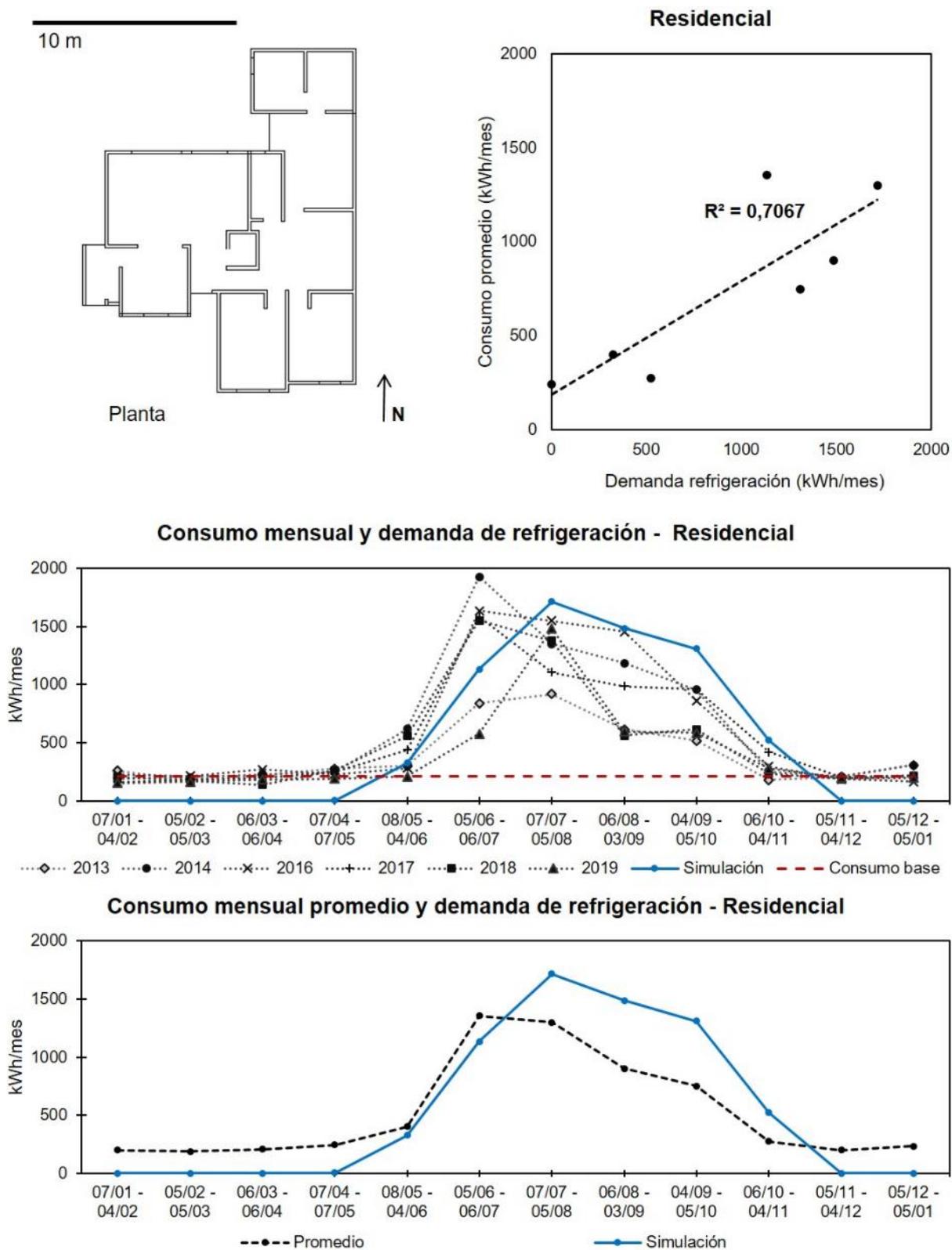


Figura A.7. Comparación del consumo mensual histórico y promedio con la demanda de refrigeración simulada para la vivienda unifamiliar Residencial.

## Caso 2: vivienda unifamiliar Residencial (2p)

Construcción: Es una vivienda de 146,8 m<sup>2</sup> de superficie habitable repartida en dos plantas, con 2,65 m de altura interior. No cuenta con aislamiento en los muros exteriores (hechos de ladrillo), ni en el piso interior (hormigón reforzado y loseta cerámica. La cubierta es el único elemento con aislamiento térmico: está hecha a base de viguetas de concreto y bovedillas de EPS de 0,15 m. y una capa de compresión de hormigón reforzado de 0,05 m. Las ventanas son de vidrio sencillo de 6 mm con carpintería de aluminio.

Usuario: Familia de cuatro integrantes, dos adultos profesionales y dos niños.

En los gráficos de la **Figura A.8** se puede observar como el comportamiento del consumo eléctrico mensual histórico es regular, y sigue el mismo comportamiento que la simulación de la demanda de refrigeración. Sin embargo, se presenta una irregularidad durante el periodo comprendido entre el 10 de julio y 9 de agosto, coincidiendo con las vacaciones escolares.

Es decir, esta irregularidad se debe al factor usuario, esta vez al encontrarse fuera de la vivienda por un cierto periodo, lo que se traduce en un menor consumo eléctrico. En el gráfico de consumo mensual y demanda se observa como el año 2018 ha habido el que presenta el comportamiento más parecido a la simulación, es posible que esto se deba a que los usuarios no salieron a vacacionar en verano.

Al comparar la demanda simulada con el consumo promedio, el comportamiento del consumo sigue la misma tendencia que la simulación (con excepción del mes de vacaciones). En este caso, el consumo eléctrico se encuentra por debajo de la demanda simulada durante tres de seis meses de temporada de uso de refrigeración. Sin embargo, en una proporción menor que en el caso de la vivienda Residencial de una planta.

Esta regularidad del consumo eléctrico y la poca diferencia entre consumo y demanda simulada, producen una fuerte correlación positiva entre el consumo y la demanda de refrigeración simulado ( $R^2= 0,9074$ ). De nueva cuenta, el factor usuario resulta decisivo.

En este caso, la diferencia entre el consumo base calculado (255,2 kWh/mes) y los picos de consumo que se llegan a alcanzar durante la temporada de calor: 1.562 kWh/mes de 10 de julio – 09 de agosto (refrigeración: 1.306,8 kWh/mes al restar el consumo base). En el caso de la simulación, el pico que alcanza es de 1.523,8 kWh/mes (07 de julio – 08 de agosto).

El consumo promedio de refrigeración calculado para la temporada de calor es de 772,6 kWh/mes y la demanda promedio de refrigeración simulada es de 962,6 kWh/mes (10 de mayo – 09 de noviembre). La diferencia entre estos valores tiene su principal causa en el periodo de vacaciones a mitad de la temporada de calor.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

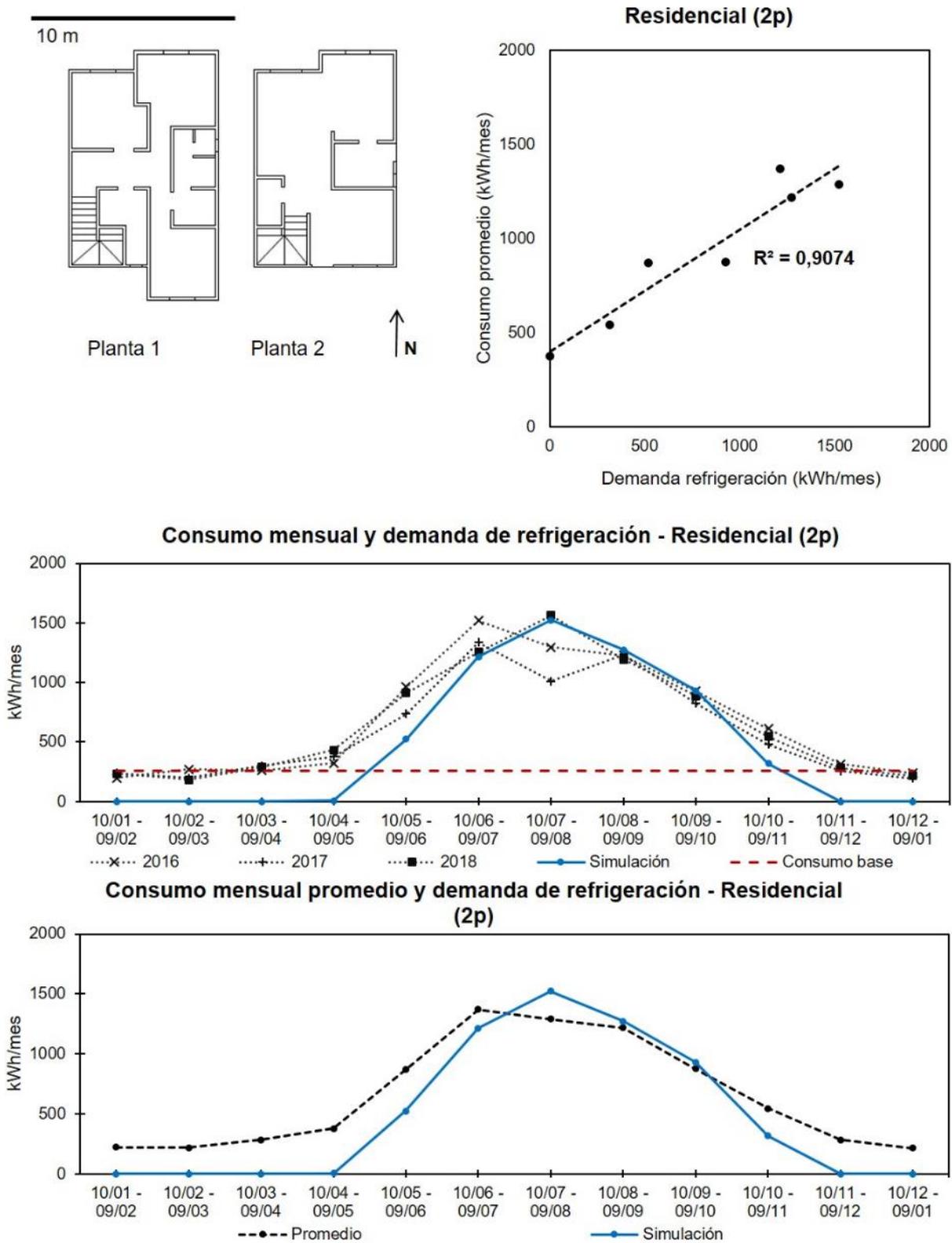


Figura A.8. Comparación del consumo mensual histórico y promedio con la demanda de refrigeración simulada para una vivienda unifamiliar Residencial (2p).

### Caso 3: vivienda plurifamiliar Residencial A (Torre)

Construcción: Es una vivienda de 113,5 m<sup>2</sup> de superficie habitable de una planta, con 2,60 m de altura interior. La vivienda se encuentra en el quinto piso de una torre y está orientada al norte, tiene vecinos a ambos lados. Los muros exteriores de la vivienda cuentan con aislamiento térmico (muros hechos a base de paneles de EPS de alta densidad), mientras que las medianeras son de bloque de concreto perforado sin aislamiento. Las ventanas son de vidrio doble con cámara de aire y carpintería de PVC.

Usuario: Familia de tres integrantes, dos adultos profesionales y un niño.

En los gráficos de la **Figura A.8** se observa un comportamiento regular en el consumo eléctrico mensual, aumentando en los meses de la temporada de calor. El consumo en el año 2017 es mayor al del 2016 (aumento el número de usuarios).

El consumo promedio y la demanda de refrigeración simulada se comportan de manera similar. En este caso, el consumo siempre es superior a la demanda simulada, manteniéndose estable durante la temporada de calor, con excepción del periodo entre el 12 de junio y 10 de julio de 2017.

Por lo tanto, la simulación y el consumo siguen una misma tendencia, presentando una correlación positiva de  $R^2 = 0,8381$ . Esta correlación podría ser mayor si no se hubiese presentado el pico de junio – julio.

El consumo base calculado es de 303,04 kWh/mes y los picos de consumo durante la temporada de calor llegan a alcanzar 1.466 kWh/mes (12 de junio – 10 de julio). Esto significa que el consumo de refrigeración calculado es de 1.162 kWh en este mismo periodo. En el caso de la simulación, el pico que alcanza la demanda de refrigeración es de 633,6 kWh/mes en el periodo entre el 11 de julio y el 12 de agosto.

El promedio del consumo de refrigeración calculado para la temporada de calor es de 402,4 kWh/mes, la demanda promedio de refrigeración simulada es de 378,5 kWh/mes (11 de mayo – 09 de noviembre). La diferencia entre estos promedios es el pico de consumo que se dio entre el 12 de junio y el 10 de julio de 2017.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

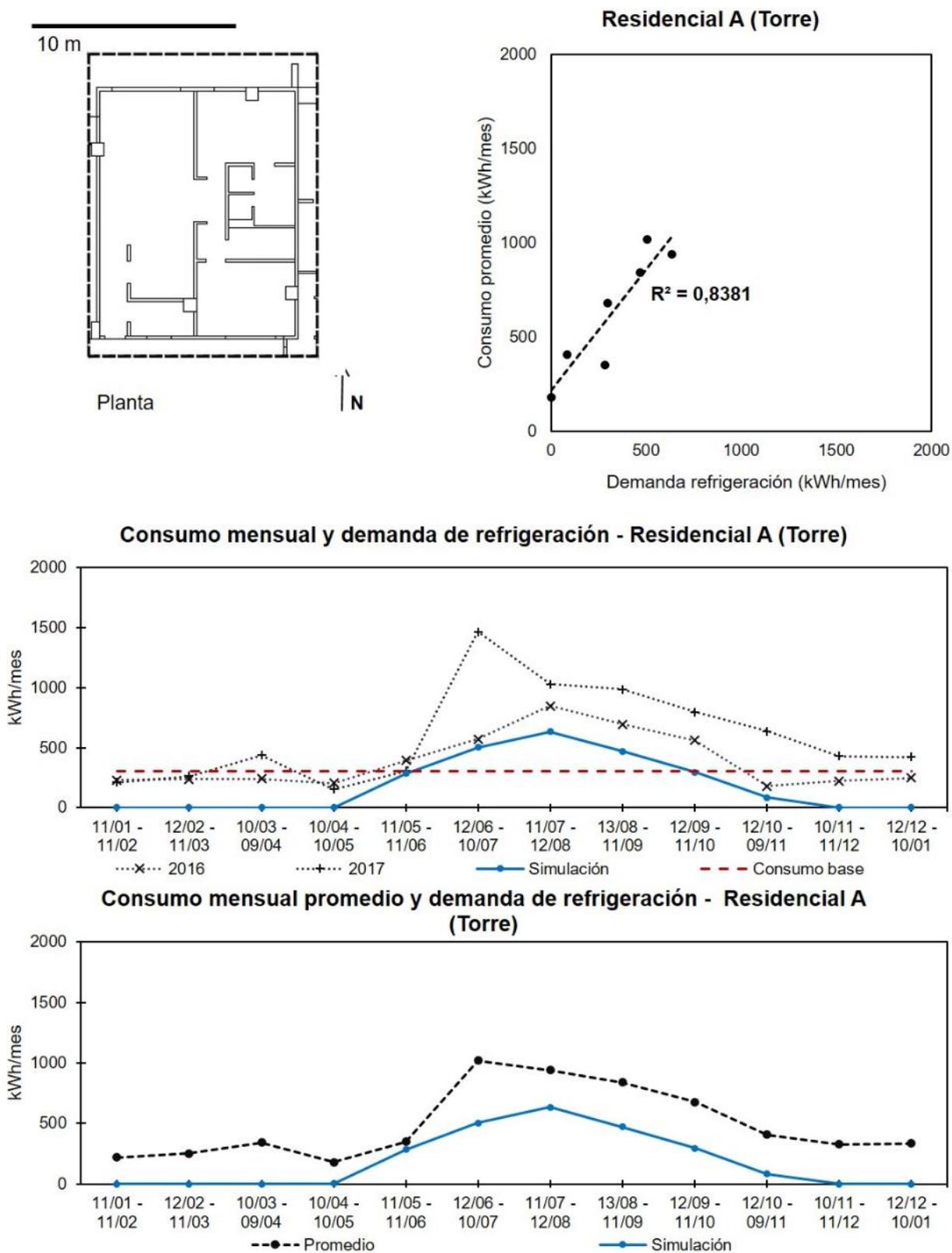


Figura A.9. Comparación del consumo mensual histórico y promedio con la demanda de refrigeración simulada para la vivienda plurifamiliar Residencial A (Torre).

#### Caso 4: vivienda plurifamiliar Residencial B (Torre)

Construcción: Es una vivienda de 149,5 m<sup>2</sup> de superficie habitable de una planta, con 2,60 m de altura interior. La vivienda se encuentra en el séptimo piso de una torre y está orientada al este y al sur, tiene vecinos a ambos lados. AL formar parte de la misma torre que la vivienda Residencial A, los muros exteriores de la vivienda cuentan con el mismo nivel de aislamiento térmico (paneles de EPS de alta densidad), con medianeras de bloque de concreto perforado sin aislamiento. Las ventanas son de vidrio doble con cámara de aire y carpintería de PVC.

Usuario: Familia de dos adultos profesionales.

En los gráficos de la **Figura A.9** se observa como el comportamiento del consumo eléctrico mensual es similar en los dos años que se tiene registro. Existe una notable reducción del consumo durante los meses de junio y julio, esto se debe a que es el periodo vacacional y los usuarios no utilizan la vivienda.

La simulación se ha hecho considerando una estancia durante todo el año, por lo tanto, la ausencia del usuario en el verano produce que existe una diferencia entre el consumo y la demanda simulada. Sin embargo, la simulación presenta un comportamiento similar al consumo durante los meses en los que se encuentran los usuarios, siendo ligeramente inferior al consumo real.

En este caso es fácil identificar la razón de la diferencia entre el consumo y demanda simulada, sin embargo, esta diferencia provoca que exista una correlación débil ( $R^2= 0,0201$ ). El factor usuario influye de manera importante, sin embargo, el comportamiento de la simulación es el esperado para esta vivienda.

El consumo base calculado es de 351,3 kWh/mes y los picos de consumo durante la temporada de calor llegan a alcanzar 1.092 kWh/mes (11 de agosto – 10 de julio). Esto significa que el consumo de refrigeración calculado es de 740,7 kWh en este mismo periodo. En el caso de la simulación, este valor es de 988,6 kWh/mes.

El consumo promedio de refrigeración calculado para la temporada de calor es de 308,6 kWh/mes y la demanda promedio de refrigeración simulada es de 742,9 kWh/mes (11 de mayo – 09 de noviembre). Esta gran diferencia radica en los meses del periodo vacacional.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

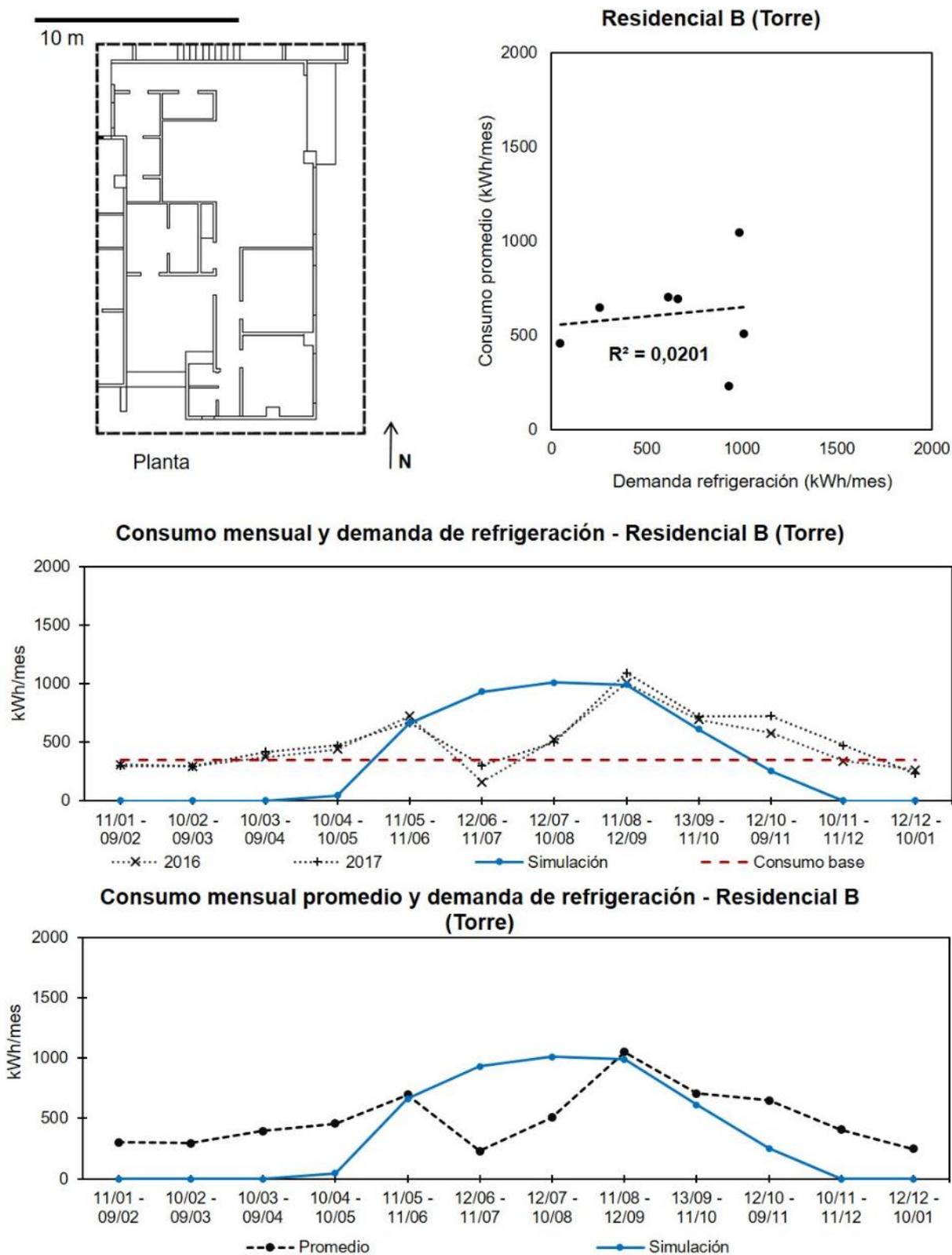


Figura A.10. Comparación del consumo mensual histórico y promedio con la demanda de refrigeración simulada para la vivienda plurifamiliar Residencial B (Torre).

### A5.3 COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR AISLADA

Los resultados se han obtenido a través de simulaciones energéticas realizadas durante la temporada de calor (mayo a octubre). El parámetro que se ha seleccionado, para llevar a cabo la evaluación y comparación del comportamiento térmico de las viviendas, es la temperatura de aire interior.

#### A5.3.1 Comportamiento térmico en régimen libre

En este apartado se muestran los resultados que describen el comportamiento térmico de las viviendas en régimen libre. Este análisis tiene la finalidad de observar las diferencias que presentan viviendas entre sí, al considerar las diferentes configuraciones de las viviendas, p. ej., viviendas de una o dos plantas, sistema constructivo de muros (bloque de hormigón hueco o ladrillo) de cada vivienda.

La **Figura A.11** muestran las temperaturas medias (TM, TMM y TMm) interior de las viviendas, durante cada uno de los meses de la temporada de calor. Cada uno de los gráficos representa a una de las 6 viviendas analizadas. Todas las viviendas tienen el valor más alto de TMM durante julio y la TMm las baja durante mayo.

La vivienda mínima tiene una temperatura media (TM) interior, que varía a lo largo de la temporada entre 27,1°C – 33,3°C. El valor de temperatura media máxima (TMM) más elevado es de 34,9°C, mientras que mayo tiene la menor temperatura media mínima (TMm) con 25,4°C. Considerando estos valores, durante la temporada de calor, esta vivienda tiene una temperatura media interior de 30,9°C.

La vivienda popular tiene una TM que varía entre 26,8°C – 33,2°C. La mayor TMM es de 34,8°C y la menor TMm es de 25,1°C. La temperatura media interior de la vivienda popular a lo largo de la temporada de calor es de 30,8°C.

La vivienda de interés social (2p) tiene una TM que varía entre 27°C – 33°C. Su mayor valor de TMM es de 34,4°C y el menor valor de TMm es de 25,6°C. La temperatura promedio de la vivienda de interés social (2p), durante la temporada de calor, es de 30,8°C.

La vivienda de interés medio (2p) tiene una TM que varía entre 27°C – 33°C. La mayor TMM es de 34,2°C y la menor TMm es de 25,7°C. La temperatura media interior de la vivienda de interés medio (2p), durante la temporada de calor, es de 30,6°C.

La vivienda residencial tiene una TM que varía entre 26,4°C – 33,1°C. Su mayor valor de TMM es de 34,5°C y el menor valor de TMm es de 24,9°C. La temperatura promedio de la vivienda de residencial, durante la temporada de calor, es de 30,5°C.

La vivienda residencial (2p) tiene una TM que varía entre 26,5°C – 32,7°C. La mayor TMM es de 33,8°C y la menor TMm es de 25,4°C. La temperatura media interior de la vivienda de residencial (2p), durante la temporada de calor, es de 30,3°C.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

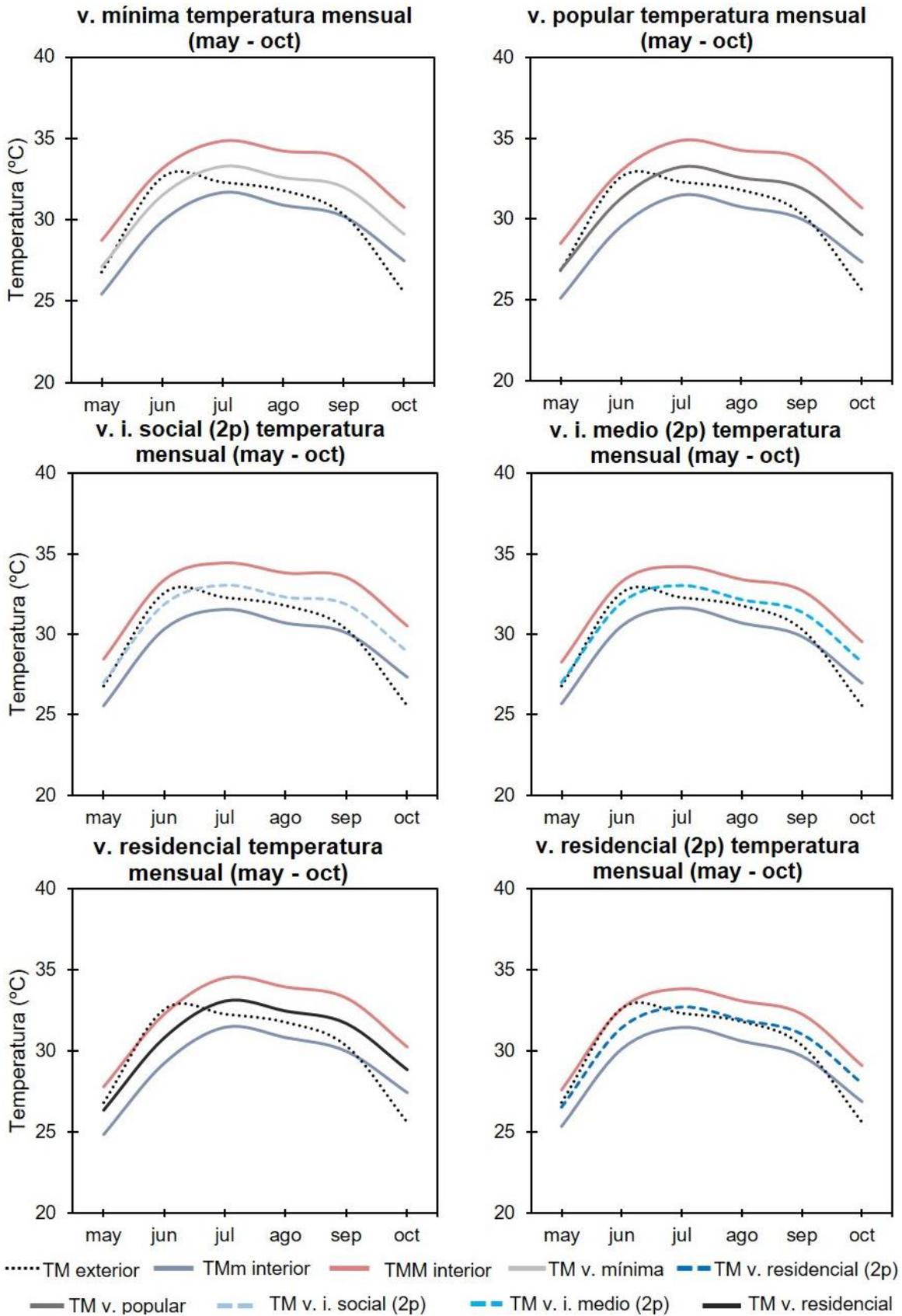


Figura A.11. Comportamiento de la temperatura media mensual interior de las diferentes viviendas unifamiliares en régimen libre durante la temporada de calor.

### A5.3.2 Comportamiento de la demanda de refrigeración

En este apartado se muestran los resultados de las simulaciones llevadas a cabo para obtener la demanda de refrigeración de las viviendas unifamiliares aisladas. El periodo considerado para las simulaciones es la temporada de calor (mayo – octubre).

Las **Figuras A.12 y A.13** muestran los resultados diarios de la demanda de refrigeración de cada vivienda. Estos resultados son la demanda total de energía que es necesaria para refrigerar la totalidad de la vivienda (kWh/día) y la cantidad de energía necesaria por unidad de volumen habitable al día (kWh/m<sup>3</sup>/día). Estos resultados se presentan junto a la temperatura exterior diaria.

Estos resultados aportan un mayor detalle del comportamiento de la demanda de refrigeración. En ellos se puede ver los picos de demanda energética que se producen durante los fines de semana, y el cómo los cambios en la temperatura exterior afectan directamente la demanda de refrigeración.

Al observar los resultados de la demanda de refrigeración total diaria (kWh/día), las viviendas de mayor tamaño son las que tienen la mayor. En primer lugar, se encuentran las viviendas residenciales de una y dos plantas, seguidas por la vivienda de interés medio (2p) y la vivienda de interés social (2p). Finalmente, la vivienda popular y la vivienda mínima son las de menor demanda de refrigeración total.

Este comportamiento es distinto al observar los resultados de la demanda de refrigeración diaria por unidad de volumen habitable (kWh/m<sup>3</sup>/día). En este caso, las posiciones de las viviendas en cuanto a la demanda se invierten. La vivienda con la mayor demanda de refrigeración por m<sup>3</sup>, es la vivienda mínima, seguida por la popular. Les siguen las viviendas de interés social (2p) y de interés medio (2p), vivienda residencial y por último la vivienda residencial (2p).

En los gráficos se puede ver que la mayor demanda se produce el mes de julio, seguido por el mes de agosto y septiembre. Durante estos tres meses se observan las mayores diferencias entre la demanda total diaria de las viviendas. Sin embargo, al observar la demanda de refrigeración por m<sup>3</sup> en estos meses, la diferencia entre la vivienda de mayor y la de menor demanda es inferior a la que se produce en otros meses, como mayo u octubre, en los cuales la diferencia llega a ser de alrededor de 2:1.

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

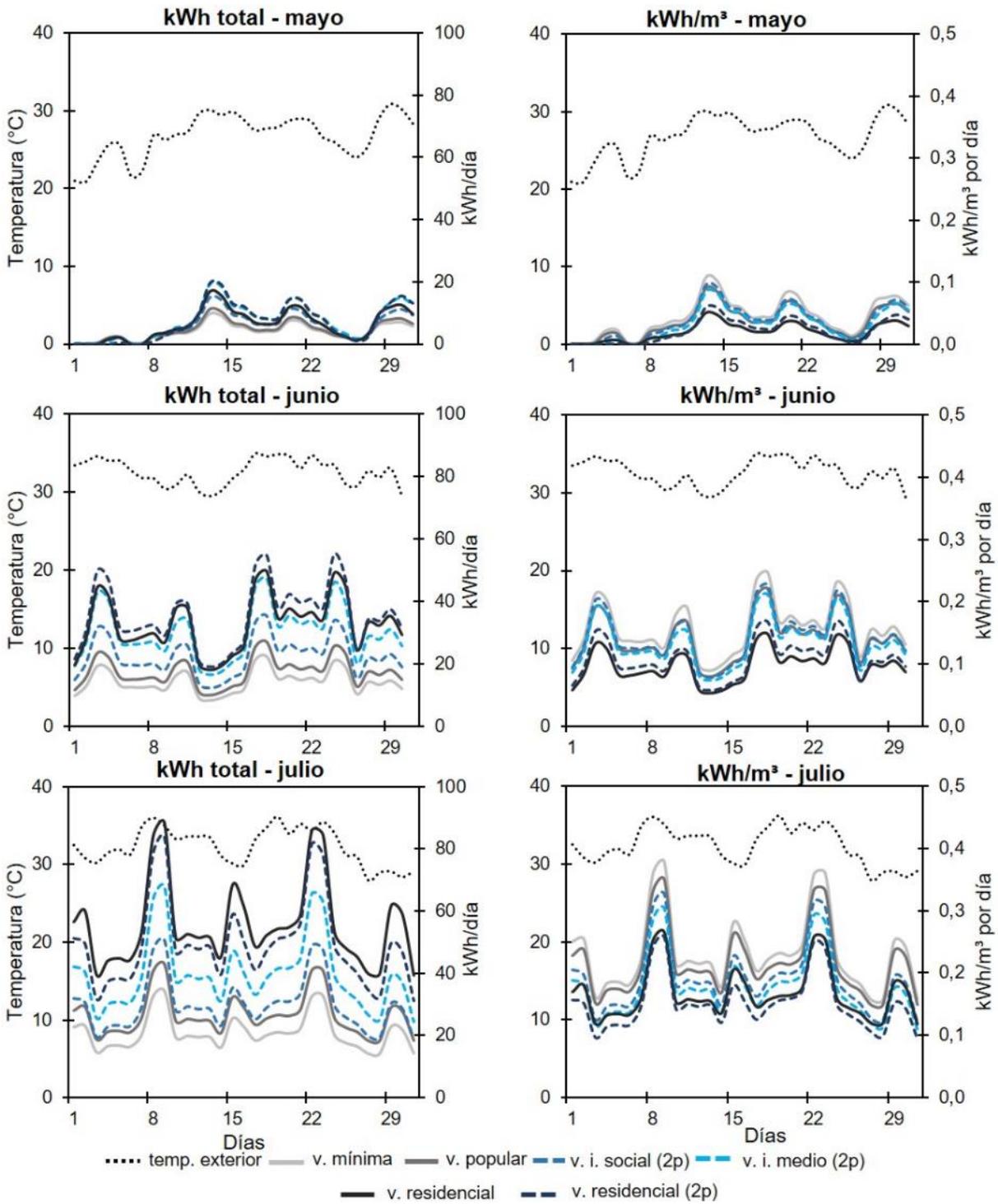


Figura A.12. Comportamiento de la demanda de refrigeración diaria de las viviendas unifamiliares: kWh/día y kWh/m³/día, durante la temporada de calor.

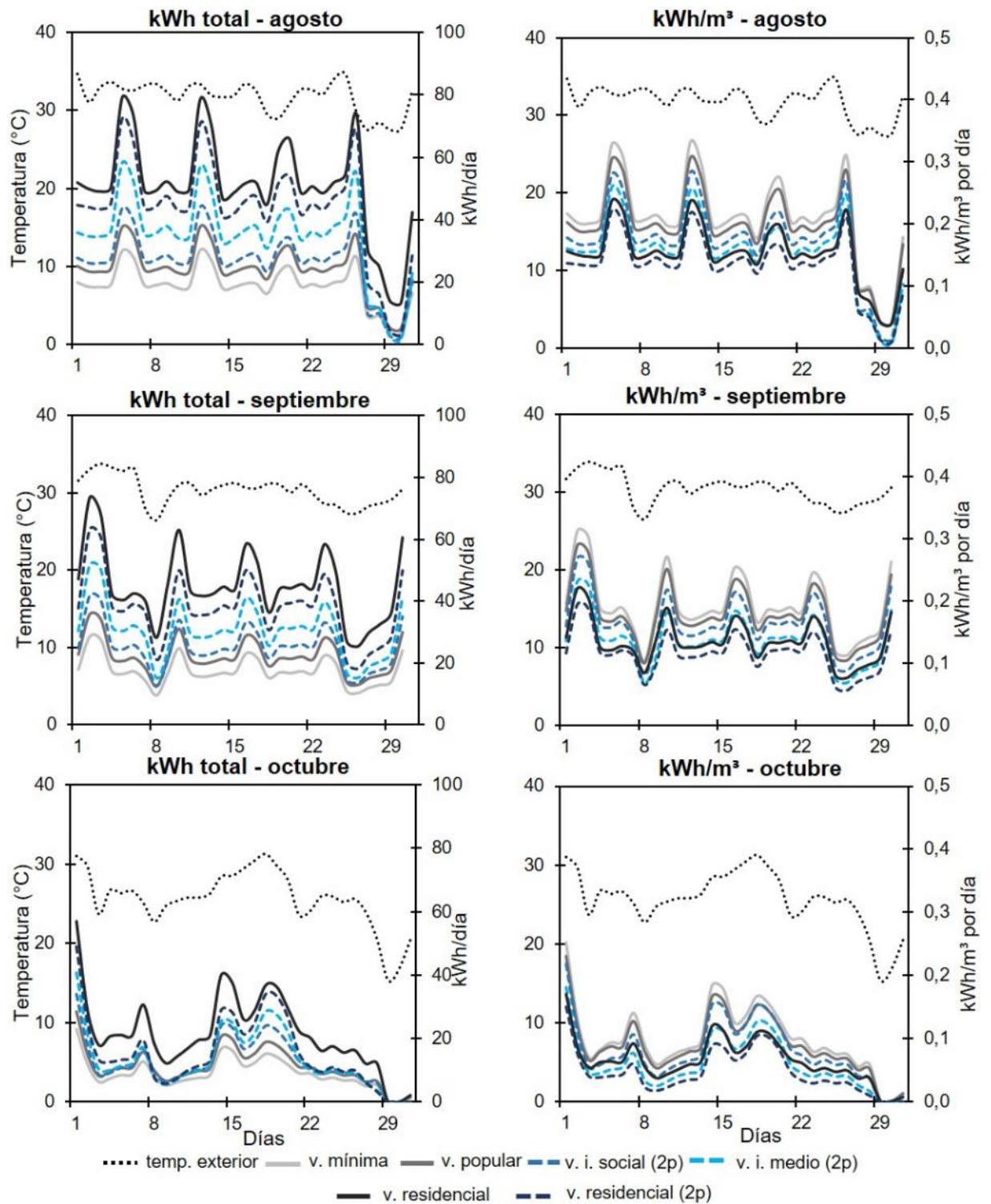


Figura A.13. Comportamiento de la demanda de refrigeración diaria de las viviendas unifamiliares: kWh/día y kWh/m³/día, durante la temporada de calor.

### A5.3.3 Comportamiento energético de la vivienda popular

La vivienda popular, es junto con la vivienda mínima, irregular y de interés social, el grupo de viviendas con mayor presencia en Hermosillo. Una gran parte las familias que habitan éstas viviendas es considerada como población vulnerable económica y energéticamente.

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta esta población, es el alto costo que supone el uso de refrigeración en sus viviendas. En numerosos casos, los hogares no pueden permitirse el uso de estos sistemas de acondicionamiento, por lo que es del interés de esta tesis, el proponer soluciones arquitectónicas que resulten eficientes y económicas para este tipo de hogares.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de simulaciones del comportamiento energético de una vivienda popular. Se ha comparado el comportamiento térmico de la vivienda, durante la temporada de calor, al utilizar diferentes niveles de aislamiento térmico en la envolvente y el uso de protecciones solares en las ventanas. En la Figura A.14 se muestra el detalle de las protecciones solares colocadas sobre las ventanas.

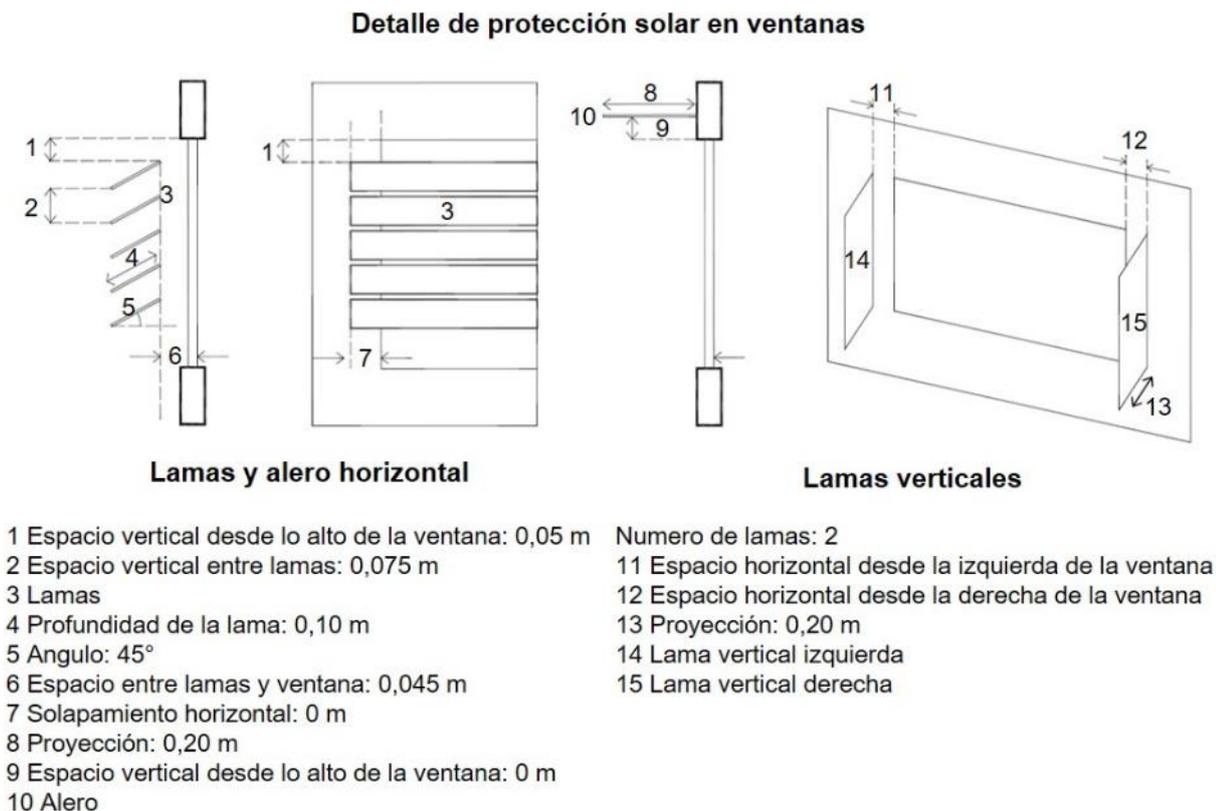


Figura A.14. Comportamiento de la demanda de refrigeración diaria de las viviendas unifamiliares: kWh/día y kWh/m<sup>3</sup>/día, durante la temporada de calor.

En la **Tabla A.6**, se muestran los resultados de la temperatura media (TM) mensual, la temperatura media máxima (TMM) y la temperatura media mínima (TmM).

En la tabla se pueden ver los cuatro casos estudiados: caso A (aislamiento térmico en cubierta), caso B (cubierta + muros + ventanas), caso C (cubierta + muros + ventanas + suelo) y caso D (cubierta + protección solar en ventanas).

Los casos que presentan las temperaturas más bajas son el caso B y el caso D (con excepción del mes de octubre, donde el caso B tiene, junto con el caso C, la temperatura media más elevada). Durante los primeros tres meses de la temporada, el caso B tiene el menor valor de TMM. En los primeros dos meses tiene el menor valor de TM y TmM. El caso B y D tienen la misma TM en julio

El caso B tiene el menor valor de TMM durante la segunda mitad de la temporada de calor (agosto, septiembre y octubre). A partir de julio, el caso B tiene el menor valor de TmM, y durante la segunda mitad de la temporada, es el caso con la menor TM.

<b>Vivienda unifamiliar popular en régimen libre - temporada de calor</b>	<b>Temperatura media exterior</b>						
	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>promedio</b>
	26,8	32,6	32,3	31,8	30,3	25,6	29,9
<b>Estrategia de mejora térmica</b>	<b>Temperatura media mínima aire interior</b>						
aislamiento térmico en cubierta	25,1	29,6	31,5	30,8	30,0	27,4	29,1
ais. en cubierta + muros + ventanas	24,3	28,2	31,2	30,8	30,0	28,0	28,8
ais. en cubierta + muros + ventanas + suelo	26,0	30,2	31,7	31,3	30,3	28,0	29,6
ais. en cubierta + protección solar en ventanas	24,8	29,3	31,3	30,6	29,8	27,0	28,8
	<b>Temperatura media aire interior</b>						
aislamiento térmico en cubierta	26,8	31,3	33,2	32,5	31,9	29,0	30,8
ais. en cubierta + muros + ventanas	25,9	29,7	32,8	32,5	31,8	29,6	30,4
ais. en cubierta + muros + ventanas + suelo	27,7	32,0	33,4	33,0	32,1	29,6	31,3
ais. en cubierta + protección solar en ventanas	26,4	30,8	32,8	32,1	31,4	28,4	30,3
	<b>Temperatura media máxima aire interior</b>						
aislamiento térmico en cubierta	28,5	33,0	34,8	34,2	33,7	30,7	32,5
ais. en cubierta + muros + ventanas	27,3	31,1	34,3	34,0	33,4	31,2	31,9
ais. en cubierta + muros + ventanas + suelo	29,3	33,6	34,9	34,5	33,7	31,2	32,9
ais. en cubierta + protección solar en ventanas	27,9	32,3	34,2	33,6	33,0	29,9	31,8

Tabla A.6. Temperaturas mensuales de una vivienda popular utilizando diferentes estrategias de mejora térmica. Se ha señalado en verde la temperatura media más baja en cada mes, en rojo la mayor.

La **Figura A.15** permite ver con más detalle el comportamiento térmico de los distintos casos durante el mes de julio. En este mes, los casos B y D tiene la menor temperatura media. En este gráfico se muestran los rangos en los que se desplaza el valor de la temperatura media interior de los cuatro casos.

## PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO: LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.

El utilizar este gráfico permite ver más allá de la temperatura media (TM), ya que se han incluido la temperatura media máxima (TMM) y la temperatura media mínima (Tm) del mes de agosto, un mes que presenta temperaturas interiores muy cálidas y constantes.

Los casos B y D tienen la menor TM con 32,8°C, existe una diferencia de 0,6° con el caso C (33,4°C). Por lo tanto, dentro de este rango inferior a un grado, se encuentran el caso A. Los rangos de temperatura son los siguientes: para el caso A es de 3,3°C (+1,6, -1,7), el rango del caso B es 3,1°C (+1,5, -1,6), para el caso C es 3,1°C (+1,5, -1,6) y el caso D tiene un rango de 2,9°C (+1,4, -1,5).

### Vivienda popular: rango de la temperatura media interior durante julio (diferentes estrategias de mejora térmica)

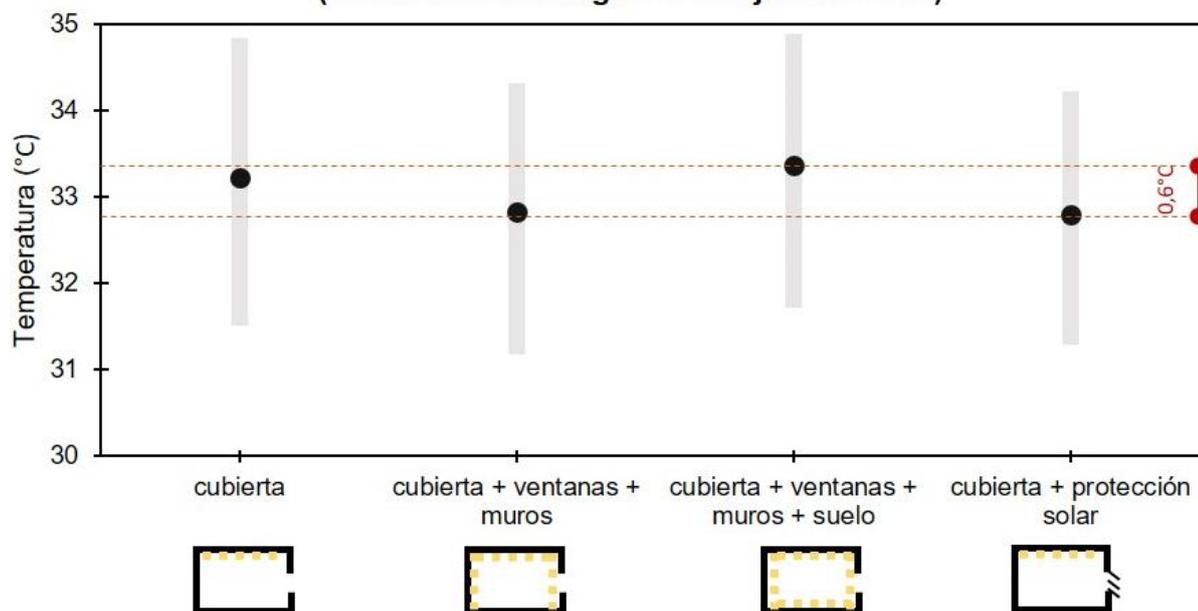


Figura A.15. Rango de la temperatura media interior, durante el mes de julio, de una vivienda popular con diferentes estrategias de mejora térmica.

La **Figura A.16** muestra cómo se ven modificados estos intercambios dependiendo de la estrategia de mejora utilizada (diferentes niveles de aislamiento térmico y la protección solar en ventanas). Cada uno de los cuatro gráficos muestra el comportamiento de los intercambios a través de diferentes elementos de la envolvente.

A través de estos gráficos se observa como el uso de aislamiento térmico reduce significativamente los intercambios energéticos por la piel de la vivienda. Este efecto sucede tanto cuando el flujo de calor es del interior hacia el exterior como en el caso contrario. Lo cual en un clima como el de Hermosillo puede resultar contraproducente.

En el caso D, se puede ver cómo el uso de protección solar en las ventanas incrementa el flujo de calor a través de la envolvente, en ambos sentidos (al compararlo con el caso A). Sin embargo, la reducción de las ganancias solares directas por ventanas tiene mayor peso en el balance energético de la vivienda, esto se traduce en una menor temperatura interior.

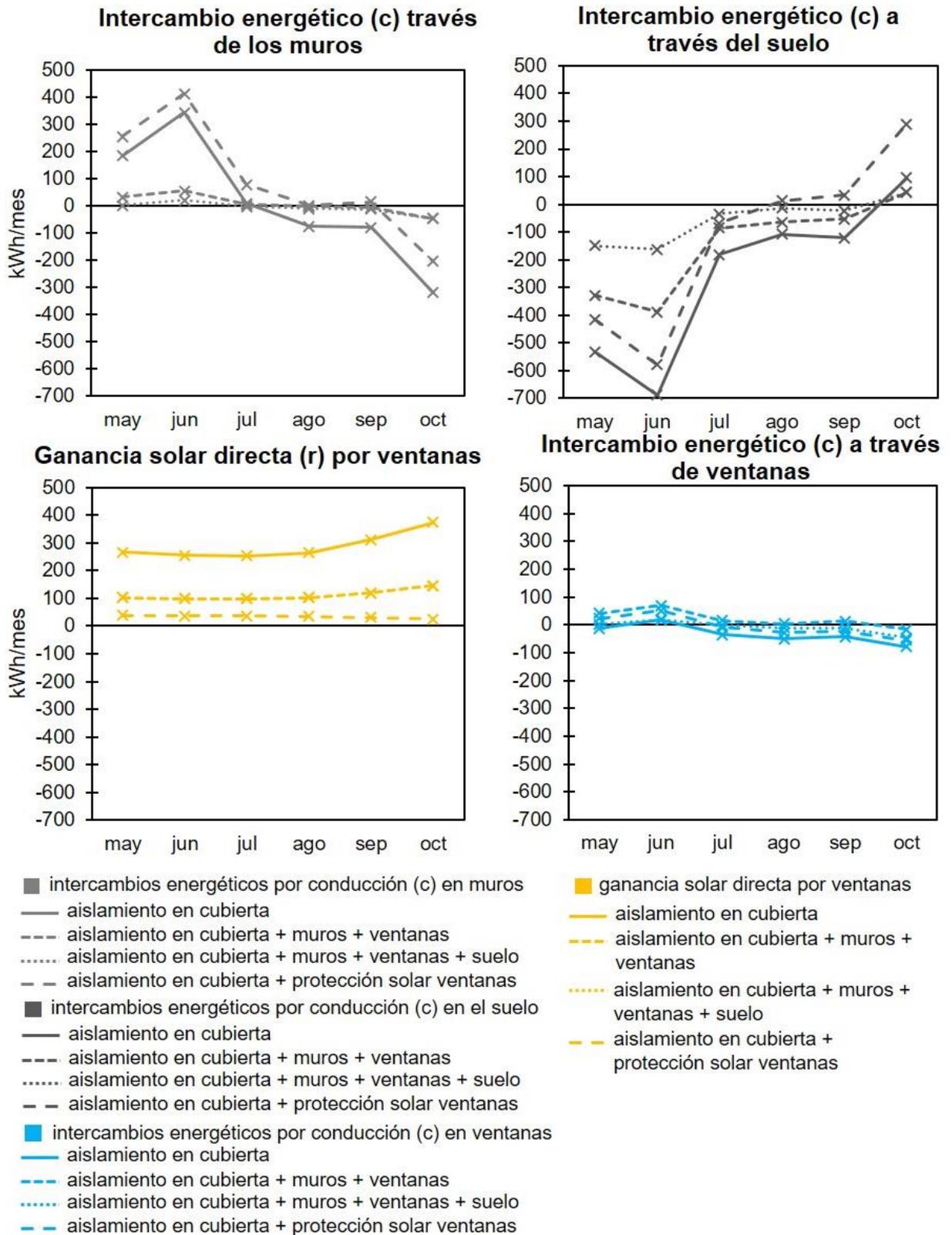


Figura A.16. Comparación de los intercambios energéticos a través de los distintos elementos de la envolvente de la vivienda durante la temporada de calor.



### A5.4.2 Comportamiento de la demanda de refrigeración

En este apartado se muestran los resultados de las simulaciones llevadas a cabo para obtener la demanda de refrigeración de las viviendas plurifamiliares en altura. El periodo considerado para las simulaciones es la temporada de calor (mayo – octubre).

Las **Figuras A.19 y A.20** muestran los resultados diarios de la demanda de refrigeración de cada una de las dos viviendas. Estos resultados son la demanda total de energía que es necesaria para refrigerar la totalidad de la vivienda (kWh/día) y la cantidad de energía necesaria por unidad de volumen habitable al día (kWh/m<sup>3</sup>/día). Estos resultados se presentan junto a la temperatura exterior diaria.

A diferencia de los resultados observados en las viviendas unifamiliares, el comportamiento de la demanda de refrigeración en las viviendas plurifamiliares es más estable (con excepción de los picos de demanda que se producen durante los fines de semana). Esta mayor regularidad es gracias al uso de aislamiento térmico, lo que produce que los cambios diarios en la temperatura exterior afectan en menor manera la demanda de refrigeración.

Los resultados de la demanda de refrigeración total diaria (kWh/día), muestran que la vivienda de mayor tamaño (residencial B) tiene la mayor demanda. Este comportamiento, a diferencia de las viviendas unifamiliares, se mantiene en los resultados de la demanda de refrigeración diaria por unidad de volumen habitable (kWh/m<sup>3</sup>/día). En los gráficos se puede ver que la mayor demanda se produce el mes de julio, seguido por el mes de agosto y junio.

En junio, la vivienda residencial A tiene una demanda diaria de entre 8,2 – 26,6 kWh/día. La residencial B tiene una demanda diaria de entre 16,9 – 47,5 kWh/día. La demanda de refrigeración diaria de la vivienda residencial B es de 1,6 – 2,1 veces mayor. La diferencia en cuanto a la demanda de refrigeración por m<sup>3</sup> es mayor. La demanda de la vivienda residencial B es 2,2 - 2,8 veces mayor.

En julio, la demanda diaria de la vivienda residencial B es de entre 1,7 – 1,9 veces mayor a la residencial A. La demanda diaria de la residencial B se mantiene entre 20,9 – 54,5 kWh/día. En el caso de la residencial A, se mantiene entre 11,5 – 31,6 kWh/día. La demanda de refrigeración por unidad de volumen habitable, de la vivienda residencial B, es 2,2 - 2,5 veces superior a la demanda de la vivienda residencial A.

En agosto, la diferencia entre la demanda diaria de refrigeración aumenta. La demanda de la vivienda residencial B es de 1,7 – 2,7 veces superior a la demanda de la vivienda residencial A. La demanda de la residencial A es de entre 4 – 28,1 kWh/día. En el caso de la residencial B, es de entre 10,7 – 51 kWh/día. La vivienda residencial B tiene una demanda por unidad de volumen habitable, 2,2 – 3,5 veces superior a la demanda de la vivienda residencial A.

La demanda es menor en el resto de meses (mayo, septiembre, octubre), a pesar de esto, la diferencia entre la demanda de las viviendas aumenta, sobretodo, durante octubre y mayo.

Durante la temporada de calor (184 días), la vivienda residencial A tiene 10 días (5,4%) en los que no requiere refrigeración. En el caso de la vivienda residencial B, son solo 2 días (1,1%).

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**

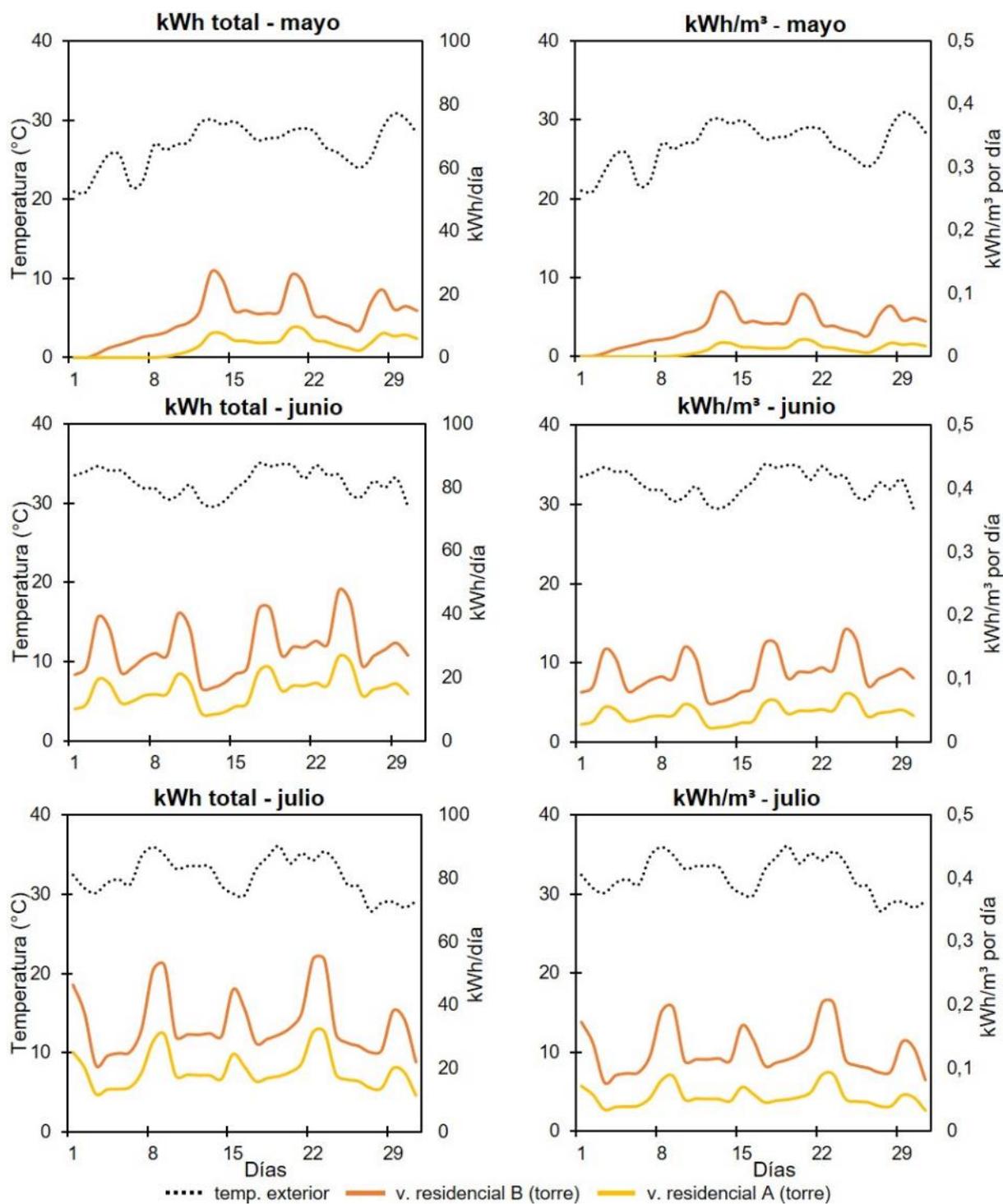


Figura A.19. Comportamiento de la demanda de refrigeración diaria de las viviendas plurifamiliares: kWh/día y kWh/m³/día durante la temporada de calor.

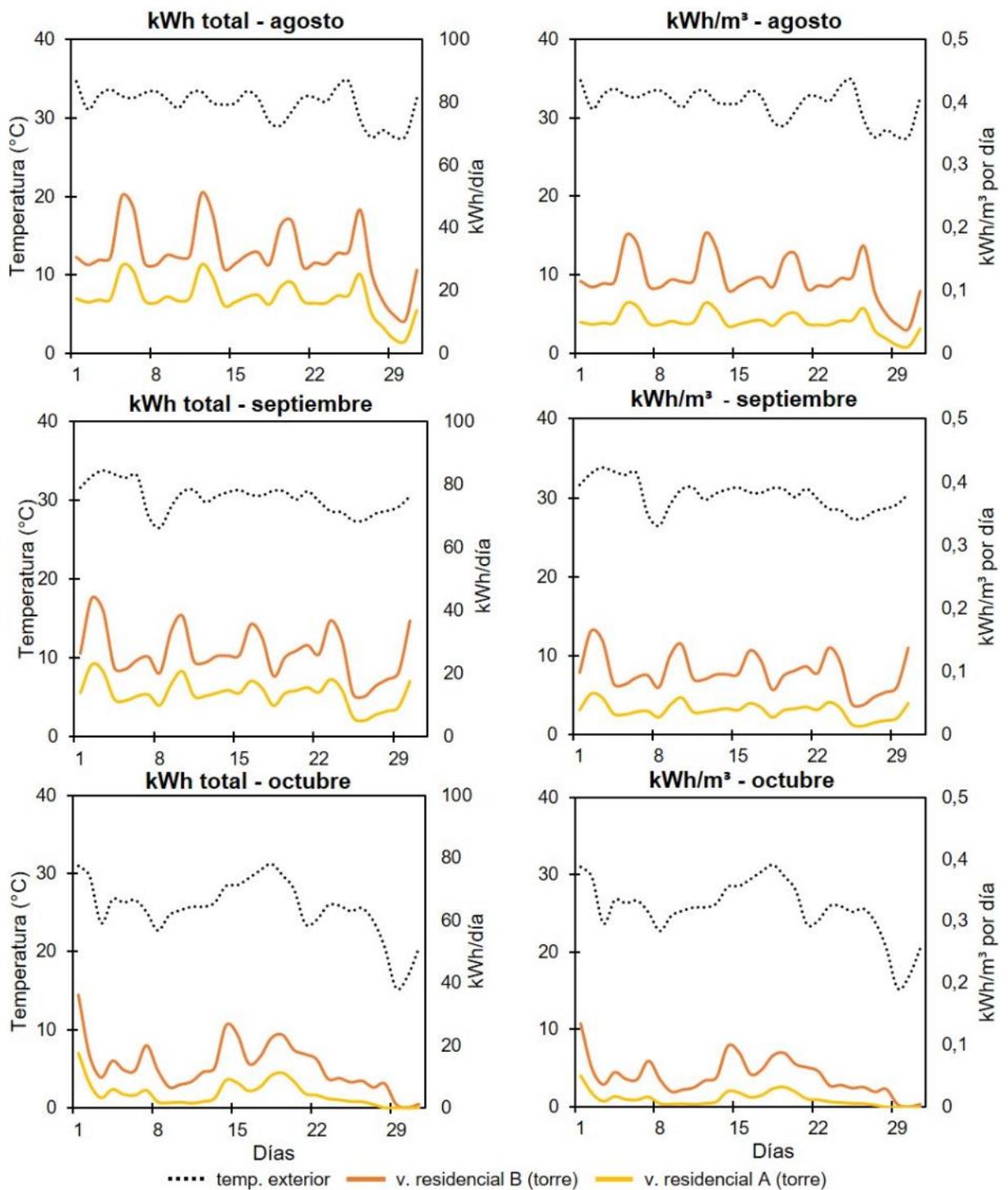


Figura A.20. Comportamiento de la demanda de refrigeración diaria de las viviendas plurifamiliares: kWh/día y kWh/m³/día durante la temporada de calor.

### A5.4.3 Comparativa del comportamiento térmico en régimen libre de la vivienda plurifamiliar en altura y la vivienda unifamiliar aislada

En este apartado, se compara el comportamiento térmico de las viviendas unifamiliares y plurifamiliares en régimen libre. Es importante mencionar que, la principal diferencia entre las envolventes de las viviendas unifamiliares y plurifamiliares es el uso de aislamiento térmico, lo cual modifica, en gran medida, el comportamiento térmico de las viviendas. En la **Figura 5.26**, se muestra el comportamiento de la temperatura media (TM) interior de las viviendas a lo largo de la temporada de calor. La comparación entre las viviendas se ha hecho mediante este parámetro.

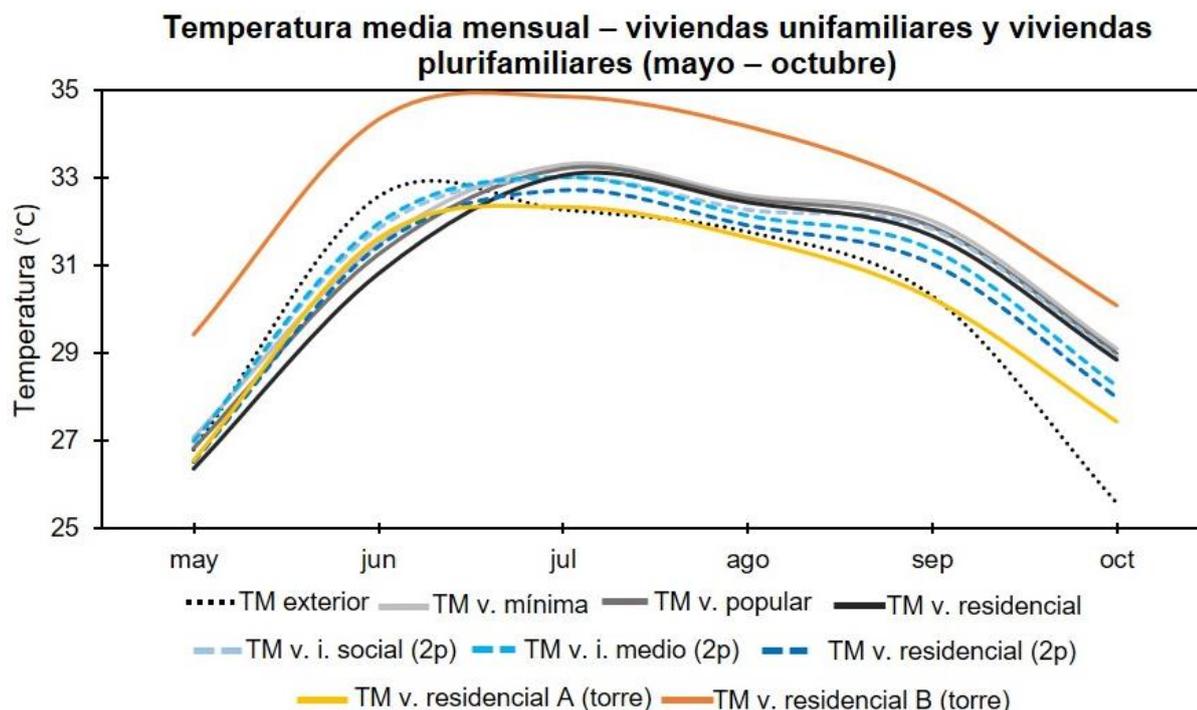


Figura A.21. Comparación de la temperatura media mensual interior de las viviendas unifamiliares y plurifamiliares en régimen libre.

Durante gran parte de la temporada, las viviendas plurifamiliares están en los extremos: la vivienda residencial B (torre) tiene la mayor TM en cada mes, se mantiene entre 29,4°C – 34,9°C. La vivienda residencial A (torre) tiene la menor TM a partir de julio, se mantiene entre 26,4°C - 32,4°C. En mayo, las viviendas unifamiliares residencial y residencial (2p) tienen una temperatura media interior, ligeramente inferior a la residencial A (torre) con 26,4°C y 26,5°C. En junio, la vivienda mínima (31,5°C), popular (31,3°C); residencial (30,8°C) y residencial (2p) (31,4°C) tienen una temperatura media inferior a la vivienda residencial A (torre) (31,6°C).

La vivienda residencial A (torre) tiene una TM interior por debajo de la temperatura exterior durante cuatro meses. La vivienda residencial B (torre) nunca logra estar por debajo de la temperatura exterior. En cuanto a las viviendas unifamiliares, las de categoría residencial logran estarlo durante mayo y junio. El resto de viviendas, solamente logran una TM interior menor a la temperatura exterior durante el mes de junio.

## REFERENCIAS DE ANEXO A5

- ASHRAE. (2013). ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, GA.
- Beckers, B. (2009). Manual de Heliodon. Retrieved January 1, 2019, from [http://heliodon.net/downloads/Heliodon2\\_User\\_Guide\\_2009\\_es\\_02\\_11.pdf](http://heliodon.net/downloads/Heliodon2_User_Guide_2009_es_02_11.pdf)
- DesignBuilder Software Ltd. (2016). Design Builder. Retrieved from <https://designbuilder.co.uk/>
- Gomez-Azpeitia, L. G., Bojórquez-Morales, G., Ruiz, R. P., Marincic, I., González, E., & Tejeda, A. (2014). Extreme Adaptation to Extreme Environments in Hot Dry, Hot Sub-humid and Hot Humid Climates in Mexico. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 8(8), 929–942. <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2014.08.001>
- Torres-Quezada, J. (2018). Comportamiento térmico de la cubierta en un clima cálido húmedo. Repercusión energética en el edificio (Universitat Politècnica de Catalunya). Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/125312>
- U.S. Department of Energy (DOE). (2015). EnergyPlus Documentation, Auxiliary EnergyPlus Programs. (c), 35–43.
- U.S. Department of Energy (DOE) Building Technologies Office (BTO). (2018). EnergyPlus. Retrieved from <https://energyplus.net/downloads>

**PLANIFICACIÓN URBANA EN CIUDADES DISPERSAS DE CLIMA DESÉRTICO:  
LA DENSIFICACIÓN VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA AMBIENTAL.**