



Isla de Calor Urbana en ciudades del desierto continental

Estrategias de mitigación



**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA**



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

**Laura Mercado Maldonado
Irene Marincic Lovriha**

Isla de Calor Urbana en ciudades del desierto continental

Estrategias de mitigación

Laura Mercado Maldonado
Irene Marincic Lovriha



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Ediciones Comunicación Científica se especializa en la publicación de conocimiento científico de calidad en español e inglés en soporte de libro impreso y digital en las áreas de humanidades, ciencias sociales y ciencias exactas. Guía su criterio de publicación cumpliendo con las prácticas internacionales: dictaminación de pares ciegos externos, autenticación antiplagio, comités y ética editorial, acceso abierto, métricas, campaña de promoción, distribución impresa y digital, transparencia editorial e indexación internacional.

Cada libro de la Colección Ciencia e Investigación es evaluado para su publicación mediante el sistema de dictaminación de pares externos y autenticación antiplagio. Invitamos a ver el proceso de dictaminación transparentado, así como la consulta del libro en Acceso Abierto.



www.comunicacion-cientifica.com

[DOI.ORG/10.52501/cc.174](https://doi.org/10.52501/cc.174)




**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA** PUBLICACIONES
ARBITRADAS
HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS

CC+
COLECCIÓN
**CIENCIA e
INVESTIGACIÓN**

Isla de Calor Urbana
en ciudades del desierto continental

Estrategias de mitigación

Laura Mercado Maldonado
Irene Marincic Lovriha



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Mercado Maldonado, Laura

Isla de calor urbana en ciudades del desierto continental : estrategias de mitigación / Laura Mercado Maldonado, Irene Marincic Lovriha — Ciudad de México: Conocimiento Científico, 2023.

286 páginas : ilustraciones ; 23 × 16.5 cm — (Colección Ciencia e Investigación)

ISBN (Universidad de Sonora) 978-607-518-526-2

ISBN (Comunicación Científica) 978-607-59988-6-2

DOI 10.52501/cc.174

1. Isla de calor urbana. 2. Urbanismo – Aspectos ambientales. I. Marincic Lovriha, Irene, coautora.
II. Título.

LC: NA2542.36

Dewey: 720.472

La titularidad de los derechos patrimoniales y morales de esta obra pertenece a las autoras D.R. © Laura Mercado Maldonado, Irene Marincic Lovriha, 2023. Reservados todos los derechos conforme a la Ley. Su uso se rige por una licencia Creative Commons BY-NC-ND 4.0 Internacional, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>

Primera edición, 2023

D.R. © 2023, Universidad de Sonora
Av. Rosales y Blvd. Luis Encinas Johnson s/n
Col. Centro, Hermosillo, Sonora,
México, C.P. 83000.
www.libros.unison.mx

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana Reg. No. 3661

D.R.© Ediciones Comunicación Científica S.A. de C.V., 2023
Av. Insurgentes Sur 1602, piso 4, suite 400, Benito Juárez,
Ciudad de México, C.P. 03940,
www.comunicacion-cientifica.com

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana Reg. No. 3976

ISBN (USON) 978-607-518-526-2

ISBN (ECC) 978-607-59988-6-2

DOI 10.52501/cc.174



Esta obra fue dictaminada mediante el sistema de pares ciegos externos.
El proceso transparentado puede consultarse, así como el libro en acceso abierto,
en <https://doi.org/10.52501/cc.174>

Índice

<i>Resumen</i>	9
<i>Agradecimientos</i>	11
<i>Introducción</i>	13
Capítulo I. Formación de la Isla de Calor Urbana en el desierto continental	17
Capítulo II. Isla de Calor Urbana y su impacto sobre la habitabilidad urbana en ciudades del desierto	51
Capítulo III. El reto de mitigar la isla de calor urbana en clima desértico a mesoescala	67
Capítulo IV. Isla de Calor Urbana en Hermosillo, Sonora. Configuración del espacio urbano e impacto del fenómeno a mesoescala	101
Capítulo V. Comportamiento de la Isla de Calor Urbana a escala local y microescala	145
Capítulo VI. Estrategias de mitigación para ciudades del desierto continental a mesoescala y microescala en Hermosillo, Sonora, bajo la perspectiva del diseño urbano	203
<i>Comentarios finales</i>	271
<i>Referencias bibliográficas</i>	275
<i>Sobre las autoras</i>	285

Resumen

El proceso de urbanización se ha acelerado en las últimas décadas; como resultado, más de la mitad de la población mundial vive en ciudades. Esta tendencia conlleva una serie de consecuencias negativas junto con cambios en el ambiente, en el clima y en las respuestas culturales de los asentamientos humanos.

Uno de los principales impactos de la urbanización es la formación de Islas de Calor Urbanas (ICU), las cuales se producen cuando la temperatura en las ciudades es más alta que en las zonas rurales circundantes.

Este fenómeno se debe a una serie de factores: el uso de materiales de construcción que absorben el calor, la falta de vegetación, tráfico vehicular y todo tipo de actividades antropogénicas. Las consecuencias son relevantes, ya que afectan la salud y el bienestar de las personas que viven en las ciudades, además de provocar un aumento del consumo eléctrico.

En el presente libro se destacan las características de la ICU en cualquier ecosistema y se hace énfasis en el desierto continental. Se explican los fenómenos térmicos particulares que suceden en este tipo de ambientes, donde coexisten los elementos del ambiente natural con el entorno urbano, sus habitantes y las actividades que en él se desarrollan. Estos efectos son aún más importantes cuando se trata de ciudades del desierto, donde se parte de una condición climática extrema. Se presentan varios métodos para detectar y estudiar este fenómeno.

Si bien los impactos al ambiente y a la vida urbana son inevitables, pueden minimizarse aplicando estrategias adecuadas para mitigar la ICU en

climas desérticos, por ejemplo con la selección apropiada de materiales, el diseño adecuado del cañón urbano, la incorporación de vegetación, el manejo del agua pluvial y la reducción del calor antropogénico, entre otras.

Palabras clave: *Isla de Calor Urbana, desierto continental, estrategias de mitigación, habitabilidad urbana.*

Agradecimientos

Este libro es producto de un trabajo de investigación de más de seis años, el cual reúne información, conocimiento, compromiso, esfuerzo y mucho amor.

Las autoras expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad de Sonora, que hace posible la publicación de esta obra, en especial a nuestro Departamento de Arquitectura y Diseño y a la Facultad Interdisciplinaria de Humanidades y Artes, los cuales nos han apoyado a continuar nuestro trabajo de investigación y nos animan a crecer profesionalmente.

Gracias a todos aquellos docentes, investigadores, académicos y directivos que nos abrieron sus puertas y compartieron valiosa información.

Laura Mercado Maldonado:

Quisiera destacar el papel fundamental del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por el apoyo brindado a este proyecto durante el periodo de mis estudios de maestría y doctorado, cuando nació la idea de este libro.

Agradezco de forma especial a Fernando, Lucy y Lili, quienes dan luz, color y alegría a mi corazón.

Introducción

El constante proceso de urbanización¹ ha ocasionado que algunas de las ciudades más pobladas hoy en día se encuentren afectadas por ciertos fenómenos negativos a consecuencia de su crecimiento, por lo que se notan cambios en el ambiente, en el clima y en las respuestas culturales de los asentamientos humanos. De acuerdo con el Banco Mundial (2018), más de 50% de la población del mundo vive en ciudades; además, estos asentamientos aportan más de 80% de las emisiones de contaminación del planeta. Por su parte, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2015) da a conocer que, en América Latina y el Caribe, 80% de la población vive en comunidades urbanas y, según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020), en México 79% de la población vive en zonas urbanas, lo cual impacta negativamente en el entorno y provoca fenómenos como el calentamiento global y la Isla de Calor Urbana (ICU), al grado de impactar a las comunidades en general y, en particular, a las más vulnerables. Ante esta situación, la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2015) ha establecido la agenda 2030, que incluye el compromiso de cumplir con los diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) a favor de la población y del planeta. En ella se plantean acciones a favor del clima mediante comunidades más sostenibles.

¹ De acuerdo con la Real Academia Española (RAE, 2001), este término se define como la acción de acondicionar una porción de terreno abriendo calles y dotándolas de luz, pavimento y servicios públicos. También Henderson (2003) argumenta que es el crecimiento y desarrollo industrial, poblacional y urbano concentrado en una localidad, donde se observa la transformación de una economía basada en la agricultura a una economía industrial que impacta en los usos de suelo.

El fenómeno de la isla de calor ha sido definido, estudiado y documentado en distintas partes del mundo. Por ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) (2009), la define como el conjunto áreas urbanizadas que experimentan más calor que sus alrededores. Akbari (2005) explica que se trata de zonas urbanas con temperaturas del aire más elevadas que en las zonas rurales como resultado de la modificación gradual de las superficies terrestres; además, Oke (1995) establece que la ICU es la diferencia de temperaturas entre la zona urbana y sus alrededores rurales y señala que dicha isla se observa en todo el planeta y en distintos tipos de clima. Su causa se atribuye principalmente a la sustitución de suelo natural por artificial.

La presencia de este fenómeno causa deterioros en el entorno inmediato, tales como el aumento en la temperatura (y, por consiguiente, en el consumo energético), elevado nivel de ozono e inclusive incremento en la tasa de mortalidad y enfermedades (Rizwan, Dennis y Chunchu, 2008). Con base en lo anterior, se infiere que los impactos al ambiente y a la vida urbana son inevitables debido a los efectos que ocasiona la ICU. Adicionalmente, en localidades áridas del planeta, esta isla presenta un comportamiento atípico a la de otro ecosistema urbano-rural, debido a la alta capacidad de absorción térmica del suelo natural, característica del clima cálido seco. Es por ello que se espera mayor vulnerabilidad ambiental que en el resto de los ecosistemas, ya que los centros de población que muestran mayores intensidades de ICU demandan entre 5% y 10% más de consumo energético para el uso de aire acondicionado con el fin de sobrellevar los efectos del calor extremo. Esto impacta en la economía, la contaminación y el confort urbano ambiental (Ruiz, Correa y Cantón, 2012; Rosenfeld *et al.*, 1993).

Una ciudad se muestra altamente urbanizada con consecuencias negativas cuando el impacto de su crecimiento sobre los componentes ambientales pone en riesgo las actividades de una población. Por ello, hoy en día, la presencia e intensidad de la ICU revela el impacto del alto porcentaje de suelo que es convertido de natural a artificial. Mediante la búsqueda para mitigar el fenómeno en ciudades del desierto se espera una transformación urbana más resiliente (Jacob, 2010; Romero y Vásquez, 2005).

Un ejemplo de esta situación se presenta en las ciudades del desierto de Sonora, México. El cambio del uso de suelo de las tierras nativas a tierras

para agricultura, el aporte de calor antropogénico, praderas de uso pecuario, minería, urbanización y desarrollos costeros son las principales causas de los cambios en los ecosistemas del estado. De acuerdo con el INEGI (2020), el desierto sonorense, con una extensión de 311 000 km², cuenta con cinco ecosistemas; abarca parte de los estados de California y Arizona, en los Estados Unidos, y Baja California, Sinaloa y Sonora, en la República Mexicana. Dentro de este extenso desierto se encuentra el municipio de Hermosillo, con 936 263 habitantes (INEGI, 2020), además de otras grandes ciudades como Mexicali, Tucson y Phoenix. La ciudad de Hermosillo ha mostrado un notable impacto por el desarrollo en su área urbanizada. En un día típico de agosto la radiación global horizontal puede superar los 1 000 W/m² (Liggett y Milne, 2008), por lo que la población recurre al uso de sistemas artificiales de climatización, con demandas de doce horas o más al día para disminuir las temperaturas interiores, hecho que aporta un incremento en las temperaturas urbanas y, con ello, una alta intensidad de la ICU. Lo anterior ratifica lo que Rosheidat y Bryan (2010) exponen sobre las ciudades que hoy absorben e irradian más calor que el original desierto natural ahora reemplazado. Desde la posición de Rizwan, Dennis y Chuncho (2008), los resultados del crecimiento urbano no son los esperados, ya que actualmente la gente vive en ciudades planeadas para el uso de auto, lo que provoca cambios en el ambiente y en las temperaturas urbanas.

El desierto de Sonora es diverso y rico en flora y fauna. De acuerdo a Villalobos (2018), “es un desierto cambiante, transformador y transformado, que culturalmente ha sido adoptado y adaptado para vivir”. Por consiguiente, se busca analizar las condiciones naturales y artificiales para determinar las medidas de mitigación de la ICU en el desierto continental, como en el caso del desierto de Sonora, donde comúnmente el elemento hídrico es escaso y los cambios al balance térmico se vuelven relevantes para la habitabilidad² del lugar.

Lo anterior como una alternativa de solución en los criterios de planeación urbana, a manera de herramienta para su análisis y control, en busca del confort térmico urbano, la disminución de los consumos por aire acondicionado en edificios y mejor calidad del aire en el exterior.

² Moreno (2008) determina la habitabilidad urbana en función de la calidad del medio ambiente y el microclima urbano; además, Ruiz, Correa y Cantón (2012) señalan una estrecha relación con el confort térmico.

En el presente libro se destacan las características de la ICU en general y en el desierto continental y se explican los fenómenos térmicos característicos que suceden en este tipo de ambientes, donde coexisten los elementos del ambiente natural con el entorno urbano, sus habitantes y las actividades que en él se desarrollan. Ante el fenómeno de la ICU, agravado en las ciudades del desierto, se presentan y explican fenómenos que suceden a mesoescala, escala local y microescala. Se muestran estrategias de diagnóstico de condiciones térmicas a diferentes escalas, ejemplificando el estudio con casos de la ciudad de Hermosillo, Sonora, y seleccionando posibles estrategias de mitigación apropiadas para este tipo de entorno, teniendo en cuenta sus características climáticas y limitaciones en cuanto a disponibilidad de agua. Dichas estrategias están enfocadas al diseño urbano aplicado en la planeación de los asentamientos. Se particularizan las medidas de control climático y se muestran estrategias aplicadas a microescala en áreas de intervención, buscando la adaptación al fenómeno en el entorno urbano para mejorar el confort térmico en espacios públicos de la ciudad y hacerlos así más habitables.

CAPÍTULO I

FORMACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA EN EL DESIERTO CONTINENTAL



Isla de Calor Urbana. Causas y efectos en el entorno urbano

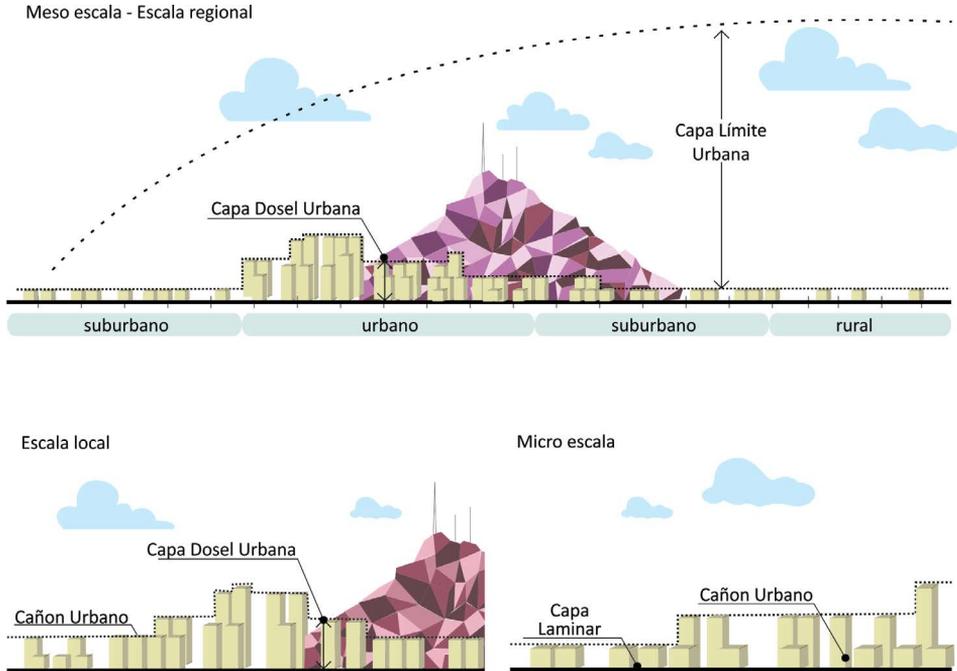
De acuerdo con los estudios de las problemáticas ambientales que genera la urbanización de los asentamientos humanos, autores como Rosenzweig *et al.* (2006), Santamouris M. (2014) y Rizwan, Dennis y Chuncho (2008) señalan que la presencia de la Isla de Calor Urbana (ICU) deteriora las condiciones de confort y pone en riesgo a la población en los aspectos de salud pública y calidad de vida urbana, ya que el entorno urbano absorbe energía de la radiación solar, lo cual altera el balance energético nativo, causa un aumento de temperaturas e intensifica el fenómeno definido por Tim R. Oke¹ (1987) como la presencia de aire más caliente en zona urbana que en sus alrededores. Por su parte, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2009) denomina *perfil de ICU* a aquel que muestra su intensidad y cambia con los meses de acuerdo con la cantidad de radiación incidente.

Ludwig, Morgan y McMullen (1970) estudiaron la relación entre la radiación solar y la temperatura del aire a nivel de suelo y observaron que el tejido urbano denso y el campo abierto mostraban variaciones significativas.

¹ Timothy R. Oke, nacido en Inglaterra en 1941, investigador y profesor emérito de la Universidad de Bristol en Vancouver, Canadá, miembro del programa de ciencia atmosférico, centró sus intereses de investigación en el clima urbano y el equilibrio energético e hídrico de las ciudades. Es autor del libro *Boundary Layer Climates* (1987), donde explica el intercambio de energía entre la superficie y la atmósfera al mismo tiempo que analizaba las condiciones urbanas y la modificación del clima por la humanidad. Autor de seis monografías, coautor de cuatro libros y autor de ochenta y seis trabajos científicos que han sido guías de investigación en climatología en los últimos treinta años, propone las bases para el estudio de la existencia e intensidad de la ICU a nivel de calle y azotea e integra imágenes satelitales en su libro *Urban Climates* (2017). Fundó y fue el primer presidente de la Asociación Internacional para el Clima Urbano y ganador de varias medallas, incluida la Medalla Patterson del Servicio Meteorológico de Canadá, en 2002, y la Medalla Massey de la Royal Canadian Geographical Society, en 2005 (Google Académico, s. f.; Tejeda, 2019; Oke *et al.*, 2017).

Los resultados plantean que, en campo abierto, después de su absorción, la mayoría de la radiación térmica es emitida o reflejada (radiación de onda larga), pero en la ciudad la morfología y la proporción H/W de los cañones urbanos a nivel de calle —altura de los edificios (H) y ancho de la calle adyacente (W)— condicionan el área de las superficies expuestas al sol. Los autores expusieron la relación en el cañón urbano $H/W = 1$ (tejido urbano disperso), donde gran parte de la radiación se refleja a otros edificios o el piso y eventualmente se absorbe a nivel suelo, lo cual contribuye al aumento significativo de temperatura urbana. Mientras tanto, en $H/W \leq 4$ (tejido urbano vertical y denso), la mayor absorción ocurre por encima del nivel de calle (en techos) y, en consecuencia, la cantidad de radiación solar a nivel de calle es poca (Ludwig, Morgan y McMullen, 1970).

IMAGEN I.1. Clasificación de escalas atmosféricas a mesoescala, escala local y microescala



FUENTE: Elaboración propia con base en Oke (1987).

Años más tarde, Oke planteó en su obra “*Boundary Layer Climates*” (1987) que la atmósfera se compone de una serie de capas y las clasifica como se muestra a continuación:

- Macroescala (200 km-100 000 km, escala continental): Aquí interviene la interacción entre la radiación solar, la curvatura de la tierra y sus movimientos de rotación y translación.
- Mesoescala (10 km-200 km / regional): Se refiere a la interacción entre la energía disponible (para el proceso de evaporación y generación de campos de presión) y las características del medio terrestre. Esta escala estudia el clima en áreas relativamente pequeñas, por ejemplo en el estudio del clima urbano.
- Escala local (100 m-50 km / local): La configuración del terreno, tipo de suelo y cubierta vegetal se consideran características de la localidad que determinan el clima que prevalece en un sitio determinado.
- Microescala (1 cm-1 km / Área inmediata): Aquí interviene la interacción entre sistemas ambientales particulares en la modificación de flujos de energía, humedad, masa y movimiento. Esta escala estudia el clima cercano a la superficie o áreas pequeñas.

Estas clasificaciones permiten estudiar a distintas escalas el comportamiento e interacciones entre la atmósfera y el suelo. Es así que el motivo de estudio de la ICU abarca la *mesoescala*, la *escala local* y la *microescala*, en las que se desarrollan las capas que se describen a continuación:

- Capa dosel urbana (UCL, por sus siglas en inglés): es la sección de aire contenida entre el suelo de la superficie terrestre y la altura media de los edificios. Oke (1976) expone por primera vez este término para ubicarlo bajo una microescala determinada por las superficies inmediatas que la rodean, tales como el tipo de uso de suelo (mixto, habitacional, comercial), los materiales (características térmicas, radiativas y de permeabilidad), los edificios (geometría, uso de suelo) y la forma urbana. En esta capa se localiza el cañón urbano.
- Cañón urbano: se refiere a que la relación entre la altura de los edificios y el ancho de la calle se caracteriza por la complejidad de la su-

perficie activa inmediata que la rodea, constituida muros, calles y edificaciones, por ejemplo.

- Factor de cielo visible² (FCV): es la relación entre el cielo visible y un hemisferio centrado sobre la ubicación analizada. Su unidad oscila entre 0 y 1, cifras que representan el cielo totalmente obstruido y abierto, respectivamente.
- Capa laminar:³ se encuentra inmediata a la superficie, no es turbulenta y está separada por milímetros de las superficies. Sobre esta capa se desarrolla la ICU superficial.
- Capa límite urbana⁴ (UBL, por sus siglas en inglés): es la capa característica de la ICU atmosférica y un fenómeno a mesoescala. Se presenta a partir de la capa dosel y se ve afectada por la presencia de área urbana, bien por el uso de suelo o bien por los elementos rugosos de una ciudad, como los edificios, los cuales alteran las características climáticas de esta capa. La altura de la capa límite no es constante con el tiempo. En el día, cuando la superficie de la tierra se calienta por el sol, hay una transferencia de calor a la atmósfera fría por convección, lo cual permite que la capa límite se extienda entre 1 y 2 kilómetros. Por el contrario, de noche, cuando la superficie de la tierra se enfría más rápido que la atmósfera, hay transferencia descendente de calor; por ello se suprime la capa y la profundidad se reduce a menos de 100 metros. Este proceso aumenta y disminuye de forma rítmica en respuesta al ciclo solar diario.
- Capa rugosa:⁵ ubicada dentro de la capa límite urbana, se encuentra a partir de la capa dosel urbana y se extiende de una a tres veces su altura; también es irregular, ya que se ve afectada por superficies rugosas, tales como árboles, cristales y edificios.
- Penacho urbano⁶ (UP, por sus siglas en inglés): se le llama al momento en que la capa límite urbana se extiende a la periferia o a las zonas rurales. Debajo de ella se encuentra la capa límite rural.

² En inglés, *sky view factor*.

³ En inglés, *laminar boundary layer*.

⁴ En inglés, *urban boundary layer*.

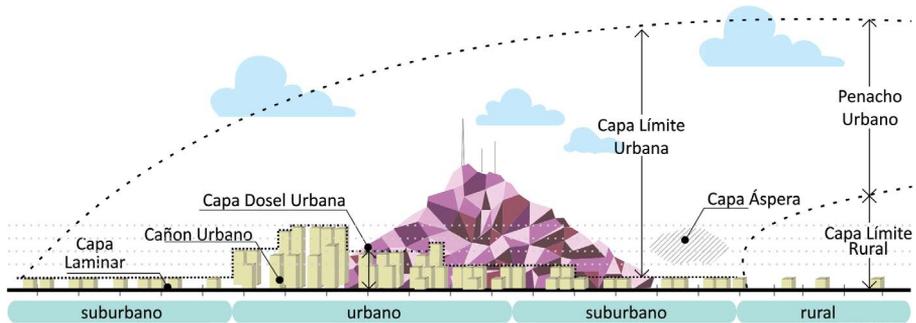
⁵ En inglés, *roughness layer*.

⁶ En inglés, *urban plume*.

- Capa límite rural⁷ (RBL, por sus siglas en inglés): se refiere a la altura de la capa de aire del campo rural al penacho urbano.

Para una mejor comprensión, se ubican visualmente los conceptos en el perfil de una ciudad (véase la siguiente imagen).

IMAGEN I.2. Capas de la Isla de Calor Urbana



FUENTE: Elaboración propia.

Además de lo anterior, Oke (1995) establece una clasificación de ICU dentro del cual la separa en un fenómeno diurno y en otro nocturno. El primero presenta capas turbulentas, cálidas, secas y contaminadas, con una ICU que se extiende desde 1 hasta 40 km de altura, en donde se presentan diferencias variables de 1.5°C en la temperatura del aire. Por el contrario, el fenómeno nocturno se comprime, extendiéndose sólo de 100 a 300 m de altura, donde las temperaturas del aire se vuelven más frescas justo arriba de la *capa límite urbana*.

A partir de lo anterior, debe señalarse, entonces, que la radiación solar que llega a las superficies de una ciudad en el día es absorbida,⁸ reflejada y emitida⁹ al ambiente, lo cual modifica el balance energético natural. Esto contribuye a la formación del fenómeno de ICU, que típicamente se presen-

⁷ En inglés, *rural boundary layer*.

⁸ *Absortividad*: es la fracción de energía que absorbe una superficie de la radiación respecto a la que incide sobre ella (Cengel y Ghajar, 2011).

⁹ *Emisividad*: según Cengel y Ghajar (2011), la emisividad de una superficie representa la razón entre la radiación emitida por la superficie a una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. Dicho en otras palabras, es la capacidad de un objeto de emitir energía infrarroja debido a una diferencia de temperatura con su entorno. Se representa con el símbolo ϵ y varía entre 0 y 1. Es una medida que ayuda a saber cuán cerca se aproxima una superficie a un cuerpo negro.

ta en zonas carentes de vegetación y suelos no reflectivos, por lo que el entorno urbano absorbe y almacena de forma directa la energía de la radiación solar incidente durante el día. Por la noche, mientras el ambiente comienza a refrescar, el calor es liberado de los materiales y caliente la temperatura del aire; por eso durante la noche se presenta el fenómeno con mayor intensidad, principalmente en la *capa dosel urbana* (Giguère, 2009).

Con respecto a lo anterior, Oke (1987) señala que por la noche, cuando la ICU está mejor desarrollada, ΔT_{u-r} ¹⁰ está inversamente relacionada con la velocidad del viento y la capa de nubes; por lo tanto, la intensidad del fenómeno es mayor bajo las condiciones de vientos débiles y cielos despejados. Chow, Brennan y Brazel (2012) lo confirman al estudiar las intensidades y demostrar que las intensidades mayores se registran por la noche bajo cielos claros y escenarios en calma; por tal motivo, incrementar la emisividad y albedo de las superficies es potencialmente efectivo para reducir las temperaturas del día y la noche.

En la opinión de Rizwan, Dennis y Chuncho (2008) las causas de la presencia de ICU se separan en dos grupos: el primero es nombrado *factores controlables* y tiene relación con la orientación, el diseño de infraestructura verde y el factor del cielo visto mediante la reglamentación y planeación urbanas, la selección de materiales y el diseño arquitectónico y urbano. El segundo grupo se denomina *factores incontrolables* y se refiere a los parámetros climáticos, tales como temperatura, humedad, vientos, precipitación, punto de rocío, radiación solar y asoleamiento, definidos por la latitud, altitud, topografía, orografía, hidrografía, albedo, evaporación, velocidad del viento, nubosidad, entre otros. Bajo esa perspectiva, concluyen que el entorno urbano tiene un impacto directo en la formación e intensidad del fenómeno por la cobertura y geometría urbana, materiales de las superficies y actividades de la población capaces de generar calor antropogénico.¹¹

Rosheidat y Bryan (2010) afirman que la causa principal de la ICU siguen siendo los materiales de la superficie horizontal urbana; Taslim, Parapari, y Shafaghat (2015) muestran una relación directa entre las ICU nocturnas y

¹⁰ De acuerdo con Oke (1987), ΔT_{u-r} es la expresión matemática para encontrar la intensidad de ICU, donde ΔT = diferencia de temperatura, u = temperatura urbana y r = temperatura rural.

¹¹ Rizwan, Dennis y Chuncho (2008) definen el calor antropogénico como aquel causado por el volumen de tránsito, plantas de energía y aire acondicionado utilizado para enfriar los espacios interiores de las edificaciones. Se podrá entender, entonces, que es todo calor causado por el hombre.

la proporción H/W de los cañones urbanos de la calle, ya que la pérdida de radiación de onda larga está directamente relacionada con la obstrucción del cielo, puesto que, entre menor visibilidad se tenga del cielo, más lento será el enfriamiento por la noche y el calentamiento durante el día (Bourbia y Boucheriba, 2010; Oke, 1987). Teniendo en cuenta esto, el FCV ha sido objeto de estudio en distintas partes del mundo y se encuentra estrechamente relacionado con la formación de la ICU, ya que la temperatura del aire se incrementa mientras más alto sea el FCV.

Por los trabajos señalados anteriormente se establece que la cobertura urbana, la geometría urbana, los materiales de la superficie y el calor antropogénico son las principales causas de la presencia e intensidad de la ICU. Por esto a continuación se presenta la explicación de estos elementos para un mejor entendimiento.

Transformación e impacto de la cobertura urbana en la ciudad

De acuerdo con la historia de las ciudades, a lo largo de los años las comunidades van creciendo en densidad, aumentando y cambiando el área de ocupación del suelo y impactando negativamente el territorio y los recursos naturales. Con esta transformación es indiscutible que el microclima resulta alterado por el intercambio de superficies naturales por artificiales, debido a las actividades de la población, lo cual causa un aumento de la temperatura urbana.

Según la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2020), la cobertura urbana (o cobertura de suelo) se define como la descripción del material físico en la superficie terrestre que la identifica y clasifica; de ese modo, se diferencia del término *uso de suelo* en que este último alude a la actividad humana en un territorio. Estos cambios temporales y espaciales acontecidos en la cobertura son información valiosa para el estudio del impacto de las actividades antrópicas y el medio ambiente.

Por su parte, el documento de investigación de Onishi *et al.* (2010) revela el impacto del cambio de cobertura nativa por edificios de concreto, argumentando que actualmente en algunas ciudades del mundo el uso del automóvil ha crecido de manera exponencial. En consecuencia, se estable-

ce un notable aumento en diseño y construcción de estacionamientos en la zona urbana, caracterizados por tener superficies de concreto y asfalto expuestas a la radiación solar. En su trabajo los autores dan a conocer, mediante estudios de campo, las temperaturas superficiales en un estacionamiento de verano a mediodía y encuentran que la temperatura superficial del concreto es mayor por 15 °C que el césped, por lo que se asocia el número de estos espacios con las ICU.

En tal sentido Giguère (2009) sostiene que reemplazar la superficie vegetal por pavimento provoca una reducción de enfriamiento evaporativo (el responsable de evitar el calentamiento alrededor de los edificios) y destaca la relevancia de distintos parámetros: el porcentaje de cobertura urbana, el tipo de cobertura urbana (natural o artificial), las características físicas del suelo (orientación, topografía, hidrología), la geometría urbana y la selección de materiales para urbanizar una localidad.

Geometría urbana y su influencia en el microclima urbano

De acuerdo con Chatzipoulka, Nikolopoulou y Watkins (2015), el término *geometría urbana* se refiere a la relación cuantitativa de la cantidad edificada, espacios abiertos y la configuración espacial que hay entre ellos. Estos elementos varían significativamente y tienen una relación directa con el confort térmico debido a que la geometría urbana define la disponibilidad de radiación incidente y saliente al ambiente urbano.

Lau *et al.* (2014), en su trabajo titulado “*The effect of urban geometry on mean radiant temperature under future climate change: A study of three European cities*”, señalan que la geometría urbana tiene impactos en el microclima urbano de acuerdo con la región, forma urbana y paisaje urbano del asentamiento. Por su parte, Alcoforado (2010) afirma que el diseño urbano tiene una posición en el comportamiento climático de un sitio y que debe ser considerado a escala microclimática, donde la forma y posición de los edificios con sus alrededores se lleven a cabo tomando en cuenta hasta una mesoescala para la planeación regional. De la misma forma Rosenzweig *et al.* (2006) sostienen que la configuración del paisaje urbano, la meteorología y la localización del microclima influyen en un cambio de temperatura urbana.

Referente a la relación de la geometría urbana y el confort térmico, Akbari H. (2005) indica que el espacio público entre los edificios provee de traslado y descanso, pero en una localidad cubierta de suelos artificiales estos recorridos resultan cansados e incómodos; por ello el paisaje natural es esencial para tener microclimas resilientes a eventos vinculados al cambio climático presentados en el cañón urbano, como el de la ICU o el de las *Olas de Calor*.

Con respecto a la adaptación al cambio climático referente al fenómeno conocido como ICU, el Instituto Nacional de Salud Pública de Québec, Canadá, mediante el Departamento de Toxicología y Salud Ambiental, publicó en 2009 un plan titulado *Urban Heat Island Mitigation Strategies*. En él se establece que las temperaturas urbanas de una localidad a mesoescala son motivadas por una serie de elementos como parámetros climáticos, morfología del asentamiento, tamaño de la ciudad, orientación edificada, la relación que guardan los edificios y vialidades, densidad vehicular y los espacios públicos carentes de vegetación, todo lo cual da como consecuencia la presencia de la ICU en una urbe.

Con respecto a la forestación en la geometría urbana, Wong y Lau (2013) sugieren que, a falta de espacios verdes, las partículas suspendidas que provocan contaminación quedan en el aire y afectan la salud pública; al mismo tiempo, la energía solar queda atrapada por el efecto invernadero, lo cual contribuye al calentamiento de la atmósfera. También la pérdida de vegetación se traduce de manera inmediata en una reducción de áreas frescas, ya que ésta previene el calentamiento en las superficies, así que al tener suelos artificiales, como banquetas de concreto o calles de asfalto, una parte de la radiación es absorbida, mientras que la otra es reflejada hacia las superficies adyacentes, por lo cual se provoca un aumento de temperatura.

De acuerdo con Giguère (2009), incluir zonas urbanas frías en las ciudades de climas cálidos es una de las iniciativas que promueven la habilidad y adaptación a los fenómenos climáticos en una región. Sin embargo, se presentan problemas cuando no hay una selección adecuada de elementos en el diseño de paisaje y se ofrecen a las comunidades áreas verdes artificiales, las cuales son capaces de emitir calor y aumentar la temperatura hasta 10°C en contraste con la vegetación natural.

Referente a la composición de la geometría del cañón urbano y la ventilación, Pulifito, Bochaca y Allende (2013) señalan que, entre menor sea la turbulencia, más se reduce la pérdida de calor sensible. Por otra parte, Takebayashi y Moriyama (2009) plantean que la orientación de las vialidades y la morfología urbana son importantes para la cantidad de ventilación que una ciudad recibe cuando está obstruida por una alta densidad de edificaciones, que emiten radiación de onda larga y contribuyen al calentamiento de las superficies a lo largo de la geometría urbana.

En relación con el concepto *morfología urbana*, Fei (2014) la define como el estudio de la forma urbana y su transformación a lo largo del tiempo, la cual se constituye por patrones espaciales. Se centra no en los objetos, sino en la relación de los componentes de la ciudad, yendo más allá de la arquitectura y observando el paisaje y su lógica de diseño urbano. Por su parte, Vernez (1997) la define como el estudio de la ciudad como hábitat humano desde sus años formativos hasta sus posteriores transformaciones, identificando sus diversos componentes: (a) Forma urbana definida por tres elementos físicos: edificios y su relación con los espacios abiertos, lotes y calles; (b) forma urbana compuesta por edificios, calle, manzana y ciudad; por último, (c) forma urbana desde el punto de vista histórico de su transformación.

De este modo la geometría urbana, compuesta por la morfología urbana, el tamaño de una ciudad, la forma de los edificios y la composición del cañón urbano con respecto al ancho de calles, altura de edificios y densidad edificada, orientación, ventilación y calor antropogénico, tiene un papel relevante en la formación del fenómeno ICU.

Materiales y su condición térmica en el ambiente urbano

La selección de materiales en el entorno urbano (como calles, banquetas y espacios públicos de una ciudad) se plantea principalmente en función de requerimientos técnicos, seguridad, durabilidad y buen costo, pero pocas veces se consideran las propiedades térmicas (Giguère, 2009), hecho que tiene como consecuencia que la radiación solar que llega a estas superficies en el día sea absorbida, reflejada y posteriormente emitida, lo cual aumenta las temperaturas urbanas diurnas y nocturnas. Si bien es cierto que en

la planeación de una ciudad se deben tomar en cuenta los aspectos antes mencionados, no deberían priorizarse por cuestiones meramente económicas y se esperaría que todos los temas fuesen tomados en cuenta con la misma jerarquía, ya que todos impactan de manera directa en el confort urbano.

Cengel y Ghajar (2011) explican que la fracción de radiación solar incidente absorbida se llama *absortividad* (α); la reflejada, *reflectividad* (ρ), y la transmitida, *transmisividad* (τ), ésta última en el caso de los materiales translúcidos. Estos coeficientes definen la propiedades térmicas superficiales de los materiales.

Numerosos autores estudian el comportamiento de los materiales en relación con el ambiente térmico. Giguère (2009) plantea que por la noche, dependiendo de los valores de emisividad de las superficies, éstas disipan la energía acumulada y calientan la temperatura del aire. Por su parte, Santamouris M. (2014)¹² menciona que los materiales absorben calor durante el día por sus propiedades térmicas de rugosidad, forma y variables ópticas, como el albedo,¹³ la emisividad,¹⁴ la absortividad¹⁵ y los valores hidrológicos, todo lo cual contribuye a un aumento de temperatura diurna que posteriormente se libera por la noche a la atmósfera hasta formar la ICU nocturna.

¹² Mattheos Santamouris, nacido en Atenas, Grecia, en 1956, ha sido profesor de Arquitectura en la Universidad de Nueva Gales, al sur de Australia, y exprofesor de la Universidad de Atenas, Instituto de Chipre, Universidad Metropolitana de Londres, Universidad Politécnica de Tokio, Universidad de Bolzano, Universidad Brunel, Universidad de Seúl y Universidad Nacional de Singapur. Expresidente del Centro Nacional de Ahorro Energético y Renovable de Grecia. Editor en jefe del *Energy and Buildings Journal*, exeditor en jefe de *Advances Building Energy Research*, editor asociado de *Solar Energy Journal* y miembro del consejo editorial de catorce revistas. Editor de la serie de libros sobre edificios, publicados por Earth Scan Science Publishers. Editor y autor de catorce libros internacionales publicados por Elsevier, Earth Scan, Springer, entre otros sellos editoriales. Autor de 342 artículos científicos publicados en revistas. Revisor de proyectos de investigación en veintinueve países, incluidos Estados Unidos, Reino Unido, Francia, Alemania, Canadá y Suecia. Autor de investigaciones relacionados con la ICU, energía solar y conservación de energía en edificios (UNSW Sydney, s.f.).

¹³ Es la relación entre la cantidad de radiación solar reflejada por un cuerpo y la cantidad incidente sobre ella; se representa con la letra griega α (Oke, 1987).

¹⁴ La emisividad de una superficie representa la razón entre la radiación emitida por la superficie a una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura; se representa con la letra ϵ y varía entre 0 y 1. Es una medida que señala cuán cerca se aproxima una superficie a un cuerpo negro (Cengel y Ghajar, 2011).

¹⁵ Es la fracción de energía que absorbe una superficie de la radiación que incide sobre ella (Cengel y Ghajar, 2011).

A continuación, en la tabla I.1, se muestran los albedos y emisividades de algunas superficies de los asentamientos urbanos. Ahí se hace evidente que materiales de bajo albedo, como el asfalto, el concreto, la grava y la pintura negra, son poco adecuados para regular la temperatura de aire en el entorno urbano, ya que contribuyen a una mayor absorción del calor de la radiación solar y, a su vez, presentan una emisividad alta, lo que facilita el enfriamiento durante la noche del material, pero un incremento de la temperatura del cañón urbano por su efecto de radiación emitida.

En este sentido, conocer los valores de albedo y emisividad de los materiales de la estructura urbana es fundamental para entender fenómenos asociados con las altas temperaturas urbanas. Por ello se buscan principalmente superficies de alto albedo para incrementar la reflectividad solar.

TABLA I.1. *Albedo y emisividad de superficies urbanas*

<i>Superficie</i>	<i>α: Albedo</i>	<i>ϵ: Emisividad</i>
Caminos de asfalto	0.05 – 0.20	0.95
Muro de concreto	0.10 – 0.35	0.71 – 0.90
Muro de ladrillo	0.20 – 0.40	0.90 – 0.92
Muro de piedra	0.20 – 0.35	0.85 – 0.95
Azotea de grava	0.08 – 0.18	0.92
Azotea con fachaleta	0.10	0.90
Pintura blanca	0.50 – 0.90	0.85 – 0.95
Pintura roja, café y verde	0.20 – 0.35	0.85 – 0.95
Pintura negra	0.20 – 0.15	0.90 – 0.98
Área urbana de la ciudad	0.15	0.95

FUENTE: Elaboración propia con base en Oke (1987).

Ahora bien, en cuanto a la superficie natural del desierto, Oke (1987) plantea que este tipo de suelo posee grandes capacidades de transferencia y liberación de calor. Si las temperaturas superficiales se elevaran a causa de la radiación solar, la temperatura del aire también lo hará, ya que los materiales ceden calor al aire que entra en contacto con ellos, lo cual forma corrientes de convección.

TABLA I.2. *Comparación de albedo y emisividad en desierto y área verde*

<i>Superficie</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Albedo (α), porcentaje de radiación reflejada</i>	<i>Emisividad (ϵ) de radiación emitida</i>
Desierto	No impactado	0.40%	0.98

Área verde	Altura 1.00 m Altura 0.02 m	0.16 – 0.26%	0.90 – 0.95
------------	--------------------------------	--------------	-------------

FUENTE: Elaboración propia con base en Oke (1987) y Nikolopoulou (2004).

Aunados a lo anterior, los trabajos de Akbari H. (2002) señalan que actualmente el diseño arquitectónico de las edificaciones tiende a incluir poca vegetación a sus alrededores. Esto afecta en aspectos ambientales, de uso energético y de habitabilidad urbana. Akbari H. argumenta también que la hierba seca, la tierra en baldíos, el asfalto de las calles y el concreto de los edificios son variables fundamentales del clima cálido seco y de aumento en la intensidad de la ICU superficial.

TABLA I.3. *Comportamiento térmico de las superficies urbanas con radiación solar incidente*

<i>Superficie</i>	<i>Observaciones</i>
Césped y superficies verdes	Su temperatura superficial es similar a la temperatura ambiente, ya que su actividad metabólica consume gran parte del calor incidente. No acumula calor y no emite calor, por lo que no incrementa la temperatura del aire.
Asfalto	La radiación solar que recibe calienta la superficie, absorbe y acumula gran cantidad de calor. Libera el calor lentamente horas más tarde, lo cual provoca un efecto de inercia térmica, que incrementará la temperatura del aire horas más tarde. Si el cañón urbano tiene gran <i>svf</i> , la temperatura del aire irá descendiendo por la noche; de lo contrario, elevará el calor en el ambiente urbano.
Concreto claro	Su albedo es alto, por lo que absorbe poco calor de la radiación solar recibida. Este calor lo emite horas más tarde, por lo que aumenta la temperatura del aire en el caso de que el cañón urbano tenga bajo <i>svf</i> .
Suelo natural seco	Recibe radiación solar que calienta la superficie, tiene gran capacidad de absorber y almacenar este calor. Al mismo tiempo el calor se refleja y calienta el aire. Emite calor posteriormente hacia el cielo al liberarlo, por lo que la temperatura del aire en zonas rurales desciende por la noche.
Suelo húmedo	Ya sea suelo pavimentado o vegetal, la humedad provoca que el suelo se encuentre por debajo de la temperatura ambiente, debido al efecto del enfriamiento evaporativo, que es más efectivo en climas cálido-secos.

FUENTE: Elaboración propia con base en Oke (1987), Akbari H. (2002) y Santamouris M. (2014).

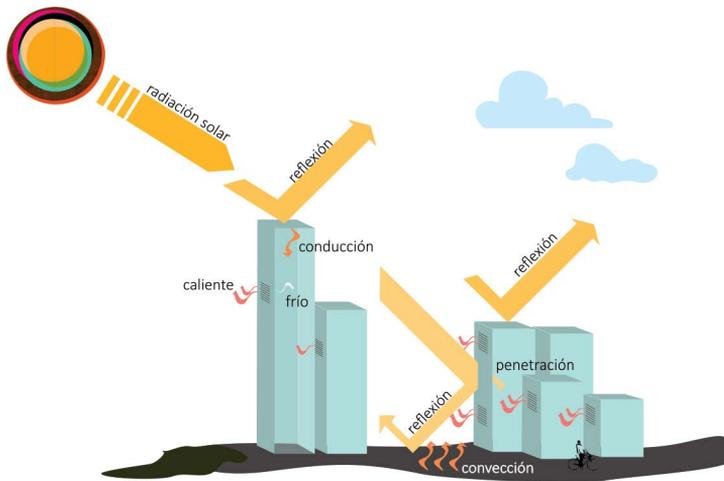
Calor antropogénico

De acuerdo con Giguère (2009) y Allen, Lindberg y Grimmond (2011), el calor antropogénico se refiere al calor emitido por vehículos, a la radiación emitida por los muros de los edificios, al calor metabólico producido por la actividad humana, al producido por procesos industriales y al calor que aportan los sistemas de climatización de espacios, que intensifican las emi-

siones de gases del efecto invernadero natural. Todos ellos contribuyen al calentamiento de la atmósfera y llegan de manera instantánea al ambiente; además, tienen una variación espacial y temporal, ya que es distinta en el día por meses y años.

El calor antropogénico frecuentemente corresponde a los usos de suelo que indican las acciones y actividades que realiza una comunidad en una superficie determinada y suceden por la urbanización de la ciudad, por lo que hay distintas unidades de paisaje urbano,¹⁶ como edificios, calles, árboles, jardines y parques, todo lo cual interactúa de forma distinta con la UBL y la UCL en función de la exposición a la radiación solar y el intercambio de radiación de onda larga y ventilación, lo cual determina las temperaturas urbanas (Puliafito, Bochaca y Allende, 2013).

IMAGEN I.3. *Transferencia de calor en la geometría urbana por convección en el aire*



FUENTE: Elaboración propia.

¹⁶ En las distintas definiciones de *unidades de paisaje* destacan la característica de homogeneidad para diferenciar unas unidades de otras. Teniendo en cuenta esto, Fernández (2013) señaló la definición de López y Cervantes (2002) como "estructuras de componentes físicos, bióticos y antrópicos, funcionalmente integradas, derivando a unidades [sic] geoecológicas ligadas vertical y horizontalmente, en tiempo y espacio". También Cabrerizo y Rodríguez (2010) exponen que los paisajes encontrados en una ciudad son unidades de información útiles para la gestión en la que se busca descodificar el paisaje, es decir estudiar las capas que lo componen, ya sean materiales, espirituales y simbólicas.

En relación con lo anterior, Allen, Lindberg y Grimmond (2011) plantean que, como la temperatura exterior aumenta o disminuye en el transcurso del día, al interior se necesita energía de climatización que incremente su consumo proporcionalmente con la temperatura exterior, respecto a la cual, en zonas áridas, se plantea que la temperatura promedio más utilizada en el interior de los recintos es de 18 °C, lo que ocasiona un alza significativa en el consumo energético.

De acuerdo con un trabajo realizado por Akbari H. (2002), el uso de sistemas de aire acondicionado en edificaciones es el recurso principal de climatización, el cual, en las ciudades con ICU, registra un aumento de 10% en el consumo de aire acondicionado para mantener el confort interior.

Además, hay emisiones de calor metabólico, las cuales son determinadas a partir de datos de población con una suposición de tasa metabólica humana promedio. El proceso metabólico varía dependiendo de las actividades humanas, que han ido cambiando de acuerdo con las actividades sociales, económicas y necesidades espaciales del colectivo urbano (Allen, Lindberg y Grimmond, 2011).

En cuanto a los vehículos, la combustión de gasolina es otra fuente de calor junto con la densidad vehicular. Su incremento se relaciona directamente con los horarios de mayor actividad. También el tiempo de uso del auto se desarrolla en función de la distancia recorrida y el sistema de transporte empleado, ya sea vehículo, moto o transporte público. Esto provoca un aumento de partículas en el aire, fenómeno que representa uno de los principales contaminantes y factores que contribuyen al aumento de temperaturas ambientales.

Efectos negativos en el ambiente y en la salud por el incremento de temperatura urbana

Después de estudiar las causas que provocan las altas temperaturas, se hace necesario señalar los efectos negativos en la salud y en el ambiente de la vida urbana. Ante todo, destaca el impacto adverso al balance térmico, sobre todo en los espacios abiertos. Por ende, es conveniente correlacionar las causas y efectos, con el fin de entender el fenómeno de la ICU y, por consiguiente, proponer estrategias de mitigación que controlen situaciones como

el aumento del consumo energético, contaminación e incremento en la tasa de morbilidad y mortalidad, todo lo cual afecta la salud pública y la calidad de vida del ser humano (Onishi *et al.*, 2010).

Impacto del consumo energético por la ICU

Tal como lo señala la iniciativa Healthy Air Living (2011), el alto impacto de la demanda de sistemas de climatización de verano e invierno en horas pico incrementa el consumo de energía, principalmente de las subestaciones eléctricas del sector industrial. Esto causa un aumento en la contaminación del aire adyacente.

A escala regional, la capacidad de las subestaciones eléctricas, que muchas veces es insuficiente, provoca apagones eléctricos. En el caso de Estados Unidos, Santamouris M. (2014) afirma que, en las ciudades con más de 100 000 habitantes, la demanda eléctrica aumenta de 1.5 a 2.0% por cada grado Fahrenheit que incrementa la temperatura. Por otra parte, el uso de electrodomésticos, iluminación incandescente, refrigeradores, congeladores y aires acondicionados de modelos anteriores al año 2008 tiene un consumo energético mayor, lo cual provoca bajas de tensión en periodos y horarios específicos. Por ello, en México, con ayuda de programas federales como Sustitución de Refrigeradores y Aire Acondicionado, en el que participan el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (Fide, 2020), la Secretaría de Energía, Nacional Financiera y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) han ofrecido bonos o créditos para la sustitución de aparatos con más de diez años de uso, con el fin de reducir el consumo energético entre 40 y 65%. Sin embargo, había que cumplir con requisitos para ser beneficiario, por lo que un significativo porcentaje de la población, principalmente las áreas vulnerables o asentamientos irregulares, no podían beneficiarse de dichos programas.

Ahora bien, la relevancia de este tema en zonas áridas se da principalmente en el consumo energético para enfriar los espacios interiores, ya que, para lograr una situación de confort al interior, el recurso principal es la climatización artificial por medio de aires acondicionados, los cuales liberan CO_2 al ambiente, el cual lo contamina y provoca un aumento de temperatu-

ra exterior, aunado a las condiciones climáticas extremas características del desierto.

Efecto de la ICU en el ambiente

A medida que las ciudades se desarrollaban con la revolución industrial, la contaminación del aire se empezó a ver como algo común y cotidiano, sin tomar en cuenta que en realidad trae efectos adversos a la salud y agrava el calentamiento global que sufre el planeta, lo que impacta, en una escala menor, el clima de una localidad y provoca fenómenos climáticos extremos (Cruz *et al.*, 2013; Shalaby, 2011).

De acuerdo con el trabajo de Rosenfeld *et al.* (1993) y el trabajo de Healthy Air Living (2011), se pone de manifiesto que la calidad de aire se relaciona con la presencia de la ICU, ya que con altas temperaturas incrementa el óxido de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles. Estos últimos, cuando se combinan con los NO_x , reaccionan y forman ozono, conocido como smog, el cual deteriora las condiciones de confort, salud y calidad de vida.

Además, Giguère (2009) señala que, debido a las altas temperaturas urbanas, la demanda de aire acondicionado para climatizar el interior de los edificios aumenta y, al mismo tiempo, se incrementa el calor antropogénico y los gases de efecto invernadero, causantes de daños en el ambiente exterior. Por otra parte, el uso prolongado del aire acondicionado al interior, sin ventilación adecuada, provoca el crecimiento de ácaros, moho, bacterias y sustancias tóxicas como los formaldehídos,¹⁷ que se encuentran en los pegamentos utilizados en muebles y materiales de construcción y contaminan el ambiente interior.

Dentro del proceso de investigación, con respecto a la relación entre los materiales urbanos y el impacto a la calidad del aire, se presentan los siguientes estudios: la iniciativa Healthy Air Living (2011) argumenta que los *materiales fríos*¹⁸ con alto albedo ayudan a reducir la contaminación, el con-

¹⁷ Formaldehído, de acuerdo con la RAE (2001), se define como un gas incoloro de olor picante que resulta de la oxidación del alcohol metílico.

¹⁸ De acuerdo a Zinzi y Agnoli (2012), los materiales fríos son llamados así por sus propiedades ópticas y térmicas que mantienen menor temperatura que otras superficies por su alta reflectancia solar y alta emitancia térmica.

sumo de energía y los gases de efecto invernadero. Los trabajos de Akbari H. (2005) registraron en simulaciones una reducción de ozono de 10 a 20% al cambiar las superficies de los asentamientos urbanos. Los estudios de Synnefa *et al.* (2008) muestran mediante simulaciones que las superficies frías de edificios u otras del entorno urbano pueden disminuir la temperatura del aire en 2°C, y afirman que la aplicación de estos materiales reduce la contaminación del aire, ya que, entre menos energía para enfriar es usada, menores son las emisiones que producen.

Aunado a lo anterior, el incremento de tráfico vehicular se relaciona con la mala calidad del aire, ya que, al aumentar el CO₂ de los autos, la suspensión de partículas que contaminan el aire genera consecuencias en la salud a corto plazo, como irritación nasal u ocular y otras más complicadas como la bronquitis crónica (Ellis *et al.*, 2016).

Ahora bien, la agencia Food and Agriculture Organization of the United Nations (citada en Salvatore *et al.*, 2014) afirma en su análisis que cada día se incrementan las emisiones mundiales de CO₂ por la agricultura, ya que en 1990 registraba 4.6 Gt CO₂ eq yr-1,¹⁹ en el 2000 se anotaban 5.0 Gt CO₂ eq yr-1 y para el 2011 fueron 5.3 Gt CO₂ eq yr-1. Por su parte, en México la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat, 2016), mediante el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), presentó el *Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero* (INECC, 2018), que indica que los principales sectores que aportan emisiones son tres: transporte, con 22.2%; energía, con 21.8%, y agricultura, con 12.3%. Sin embargo, en el ámbito de la energía, también se utilizan recursos para el sector agropecuario, los cuales influyen de manera notable en la contribución a los gases de efecto invernadero.

Otro de los causantes de emisiones de gases de efecto invernadero, según el informe del *World Watch Magazine* (citado en Goodland y Anhang, 2009), son las vacas, búfalos, ovejas, cabras, camellos, caballos, cerdos y aves, ya que aportan 51% de las emisiones de gases de efecto invernadero, sin olvidar otros problemas ambientales como la contaminación de las aguas (causada al tener que buscar un lugar de desalojo de desechos sin ningún tratamiento) y el cambio del uso de suelo a causa del pastoreo.

¹⁹ Gt CO₂ eq yr-1: emisiones de calor antropogénico reportadas en gigatoneladas de CO₂ equivalentes por año.

Consecuencias en la salud por altas temperaturas

Un análisis de percepción de la población sobre la calidad de vida urbana en América Latina y el Caribe²⁰ (Ellis *et al.*, 2016) expone que la máxima prioridad a tomar en cuenta es la seguridad ciudadana. A ésta le siguen la salud, transporte, empleo, espacios públicos, vivienda, agua y equidad; por ello el control de los fenómenos asociados con estos aspectos contribuye al beneficio de la calidad de vida.

Así pues, es valioso señalar la importancia que tiene el efecto de la ICU en la salud pública de los ciudadanos, ya que con la presencia del fenómeno se hace evidente un mayor deterioro que impacta la calidad de vida urbana, por lo que se hace necesario tener pleno conocimiento de su formación, morfología, intensidad y todas las características que posea, a fin de comprenderlo e incluirlo en las políticas de planeación urbana.

La Secretaría de Salud de México (2009) expone que, en temperaturas extremas, como las de 40°C o más, la salud experimenta un riesgo; y, además las cuestiones climáticas donde el fenómeno de ICU se presenta con mayor intensidad, la demanda de agua potable se hace presente, por lo que es relevante que el suministro del vital líquido sea eficiente y no afecte la salud pública de los habitantes, pues ello traería consecuencias relacionadas con enfermedades cardiovasculares, cancerígenas y respiratorias, como la inflamación del aparato respiratorio y un incremento en la susceptibilidad de alergias o infección en los pulmones.²¹ Aunado a lo anterior, Giguère (2009) expone en sus trabajos que el estrés térmico de la población es la causa de discomfort, debilidad, fatiga y molestias respiratorias.

De acuerdo con el Consejo de Salubridad General (CSG, 2012), en México el número de incidentes de este trastorno va en aumento: cada año se registran aproximadamente 1 200 casos de golpe de calor y de 15 defunciones en todo el país, principalmente en las zonas de mayor riesgo, donde se presentan fenómenos climáticos extremos, como las olas de calor y las ICU.

²⁰ Análisis consolidado de los resultados de las encuestas de opinión pública realizadas en el marco de la Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles (2011–2014).

²¹ La capacidad de adaptación del cuerpo no sobrepasa la exposición a altas temperaturas, lo cual favorece la experimentación de golpes de calor, quemaduras, lesiones dérmicas e insolación, así como la rápida descomposición de alimentos, los cuales pueden ocasionar diarreas agudas y deshidratación al consumirlos (Secretaría de Salud, 2009).

La Secretaría de Salud de México (2009) define el golpe de calor como la “[...] *elevación de temperatura corporal [...] y [cuando] el organismo no puede regular la temperatura extrema, es un cuadro médico grave que pone en peligro la vida*”. Asimismo, define *zonas de mayor riesgo* como aquellas localidades a menos de 1 000 metros sobre el nivel del mar (msnm) y zonas áridas y clasifica las olas de calor como sucesos en los que por más de tres días consecutivos hay temperaturas superiores los 35°C.

También el CSG (2012) ofrece una definición de golpe de calor como “[...] *el trastorno grave que se presenta cuando un organismo homeotérmico no es capaz de disipar más calor del que genera o absorbe, superando la temperatura corporal de 40 °C*”. Este organismo, a partir del 2008, reforzó acciones epidemiológicas. El Gobierno Federal de México etiqueta con el código X30 la exposición al calor natural excesivo; así mantiene un registro de la tasa de mortalidad y morbilidad que se vive en el país.

Según los datos de la Secretaría de Salud (2009), se registraron 481 defunciones en México en el periodo de 1998 a 2007 relacionadas con la exposición al calor natural excesivo. Los grupos más vulnerables son aquellos que tienen edad económicamente activa, ya que se encuentran laborando en las calles (lo que significa mayor exposición a las altas temperaturas durante el día) en edades de entre 15 y 64 años. Aquí destacan los estados de Baja California Norte, San Luis Potosí, Veracruz y Sonora, con 147 muertes; además, se reportan 1 200 casos de golpe de calor.

De acuerdo con el CSG (2012), la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) estima que el número de muertes relacionadas con el calor extremo se duplicará en los próximos veinte años. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés)²² establece que, en el periodo de 1950 a 2100, se producirán cambios climáticos relacionados con temperaturas máximas.

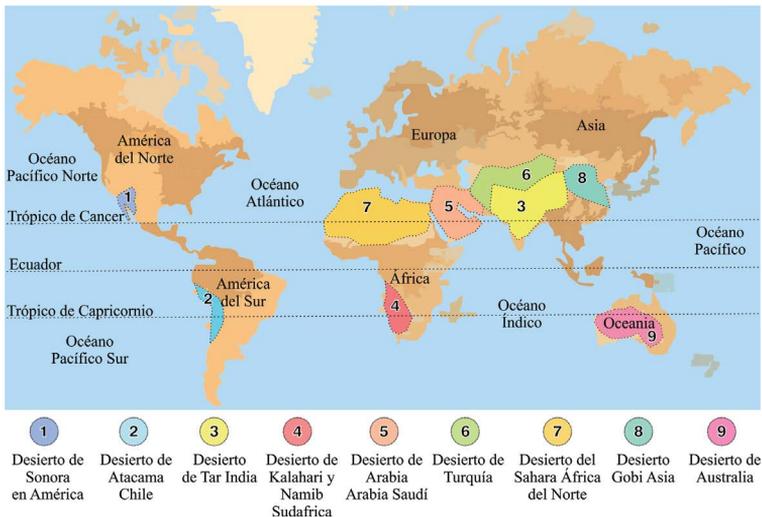
²² Se trata de una organización dedicada a la formulación de políticas y evaluaciones científicas sobre el cambio climático, así como a presentar opciones de adaptación y mitigación.

ICU en ciudades del desierto continental

Según Stewart (2009), la clasificación del paisaje se establece en cuatro tipos: ciudad, mixto, agrícola y natural; este último se subdivide en bosque, humedal, sabana, pradera, tunda y desierto.

Entre más cercano del ecuador, más cálido-húmedo es el ambiente en conjunto con su altitud, y se identifica por la presencia de grandes selvas, la Amazónica en América del Sur, la selva de Darién en Panamá y Colombia, la Paranaense en Argentina, Paraguay y Brasil, la selva Lacandona en México y Guatemala, la del Congo en África Central, entre otras. En las regiones cercanas a los paralelos 30° y -30° se localiza una zona cálida seca que se caracteriza por haber en ella desiertos cálidos, como el desierto del Sahara en África del Norte, el desierto de Arabia en Arabia Saudí, el de Kalahari y Namib en Sudáfrica, el desierto de Sonora en América, el desierto de Turquía, el de Tar en India, el desierto Gobi en Asia y el desierto de Australia (véase la imagen siguiente).

IMAGEN I.4. Ubicación de los desiertos en el mundo



FUENTE: Elaboración propia con base en National Geographic (2023).

Las ciudades del desierto continental son asentamientos con una configuración urbana que modifica ambientalmente un sector del suelo, de modo que lo transforma en un lugar con condiciones aptas para la vida del ser humano, pero, de acuerdo con Alchapar, Correa y Cantón (2010) y Sofer y Potchter (2006), las elevadas temperaturas condicionan el consumo energético, hídrico y la habitabilidad urbana en función del confort.

Tal como describen Enrique, Bochaca y Allende (2013), estos asentamientos en el desierto se caracterizan por condiciones térmicas extremas y diferencias significativas entre el día y la noche, lo mismo que durante el verano y el invierno. Además, el consumo de agua para regado de parques, plazas y zonas de cultivo es elevado, lo cual compromete la sostenibilidad de la ciudad, más aun cuando típicamente en los asentamientos de clima cálido-seco el recurso hídrico es insuficiente; por ello se sostiene que las ciudades de este clima son más vulnerables ante fenómenos climáticos como el de la ICU.

Alrededor del mundo ciudades impactadas por la urbanización se enfrentan a fenómenos climáticos como el de este isla, pero en localidades ubicadas en el desierto la morfología e intensidad tienen un comportamiento atípico, ya que la ICU superficial diurna más intensa se registra en las zonas rurales, mientras que en el área urbana las superficies almacenan el calor de la radiación solar directa del día y por la noche lo liberan; esto significa una alta intensidad y la presencia de una ICU superficial nocturna.

De acuerdo con lo expuesto, Baker *et al.* (2002) señalan que en décadas anteriores, en la ciudad de Phoenix, Arizona, durante los veranos, al anochecer no se hacía uso del aire acondicionado, por lo que el consumo energético era menor, lo mismo el calor emitido. Esto favorecía el efecto de enfriamiento por la noche. Años después se hizo uso de sistemas de climatización en el día, gracias a los cuales las temperaturas nocturnas eran lo suficientemente frescas para dormir con ventanas abiertas, pero actualmente, conforme a lo argumentado por Golden (2010), el uso de aire acondicionado es continuo en zonas áridas, lo que provoca un aumento de la temperatura urbana, con mayores intensidades de ICU y con una morfología más grande en el centro urbano debido a los aires en calma. Además, a la hora del ocaso, por la ausencia de calentamiento solar, se provoca convección atmosférica y la UBL se comienza a estabilizar, pero, si los componen-

tes de la geometría urbana dificultan que el aire circule y entonces tienen un bajo FCV, se forma una capa de inversión. Esto significa que el aire urbano se queda atrapado en la UCL y permite calentar las superficies aún cálidas. El resultado es la formación de la ICU nocturna.

En este sentido, autores como Guhathakurta y Gober (2007) y Puliafito, Bochaca y Allende (2013) afirman que la variación de temperaturas por efecto de ICU en una localidad desértica es mayor al anochecer, ya que el calor almacenado durante el día se libera hacia la atmósfera por la noche. En las áreas urbanas esta variación es causada por el tipo y cantidad de superficies expuestas al sol, mientras que en la periferia hay un refrescamiento más rápido debido a una mayor tasa de vegetación, que aporta enfriamiento evaporativo. Por lo tanto, la ICU en zonas áridas se manifiesta principalmente como un fenómeno nocturno.

En las ciudades del desierto, el fenómeno además se intensifica con la presencia de *Olas de Calor*,²³ las cuales aumentan la intensidad de la ICU y, en consecuencia, generan mayores efectos adversos, tales como mayor consumo energético, incremento de contaminación y afectación en la salud pública (Rizwan, Dennis y Chuncho, 2008), principalmente en la población vulnerable de entre 0 y 14 años de edad y personas mayores, quienes tienen una menor capacidad termorreguladora y son, por tanto, susceptibles a los efectos del calor. Este porcentaje de habitantes tiene mayores índices de hospitalización, morbilidad y mortalidad (Nikolopoulou, 2004).

Como hace notar Golden (2010), los cielos claros característicos del desierto incrementan la cantidad de radiación solar que llega a la superficie; por ende, las temperaturas diurnas aumentan. A una altura de 1.5 m la temperatura diurna regularmente es de 40°C, y se ha encontrado que alcanza los 56°C en sitios de climas cálido-secos, como en Tucson, Arizona. En función de lo planteado, Oke (1987) argumenta que en la superficie del desierto no impactado puede incluso acercarse a 80°C, ya que el desierto natural tiene grandes capacidades de almacenamiento de calor. Si la temperatura del aire se eleva, el suelo árido lo hará rápidamente y, por la noche, al refrescar, los suelos naturales se enfriarán velozmente; no obstante, una vez que este desierto natural se ve impactado con el cambio de superficies

²³ Las *Olas de Calor* son eventos asociados con calor o clima cálido. Duran algunos días con vientos bajos, poca brisa y temperaturas altas (wmo, 2015).

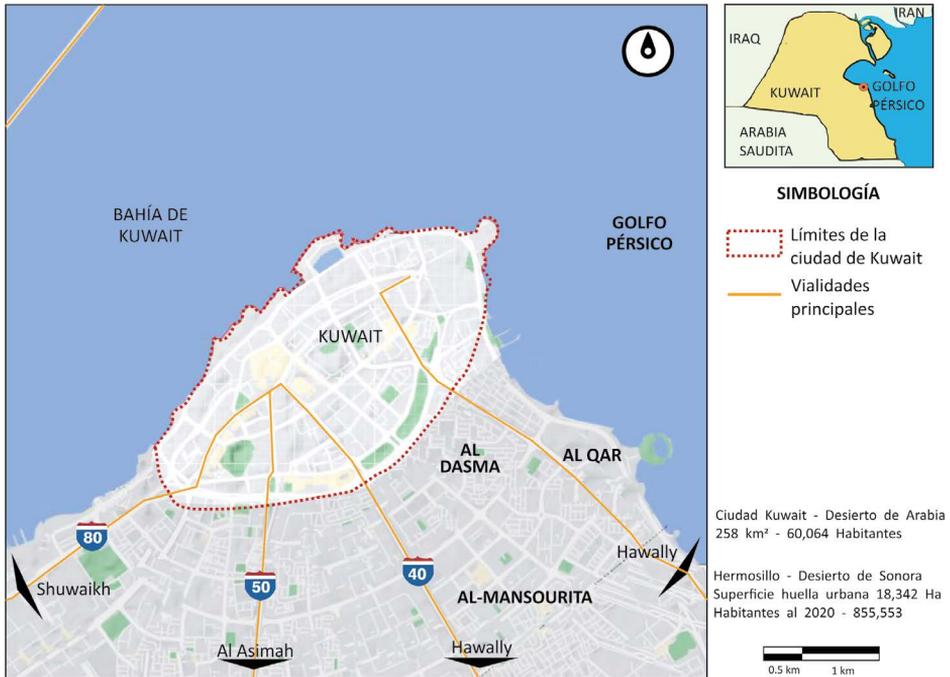
naturales por concreto y asfalto, y se convierte en áreas urbanas, este equilibrio natural se altera y está directamente relacionado con el FCV y las proporciones de los espacios urbanos.

Numerosos estudios analizan la presencia, morfología y comportamiento del fenómeno en un clima árido. En el continente asiático Sharifi y Lehmann (2014) estudian la ciudad de Sana'a en Yemen y afirman que la ICU actúa de varias formas de acuerdo con el clima donde se presenta. Exponen estrategias de mitigación para el clima cálido que se agrupan en patrones de sombras con respecto al ancho de las calles y altura de los edificios, aprovechamiento de viento, materiales de las superficie, vegetación y calor antropogénico.

Los trabajos de Santamouris M. (2015) estudian las ICU en los desiertos de Hyderabad en Pakistán, Mosul en Iraq y Ankara en Turquía, y expone la presencia e intensidad de dichas islas. Este autor también analiza el fenómeno en el desierto de Al-Hasa, Saudi, y junto con Junjing Yang afirma que situarse en un clima cálido conlleva implicaciones más graves al confort, la salud, el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero (Yang y Santamouris, 2018).

Otro caso de ICU en el desierto se plantea en Asia occidental, sobre el desierto de Arabia, donde se encuentra la ciudad de Kuwait, capital del estado de Kuwait, justo en la bahía de la costa noroeste del Golfo Pérsico (imagen I.5), a una distancia aproximada de 100 km al norte de la frontera con Arabia Saudita y a 150 km al sur de Irak, con latitud 29° 22' N. Esta ciudad contaba con 60 064 habitantes en 2017 y una densidad poblacional de 232 hab / km². Es el centro económico, cultural y comercial del emirato, ya que se encuentra rodeado de conurbaciones que superan los dos millones de habitantes (World Population Review, 2020; Population Stat, World Statistical Data, s. f.).

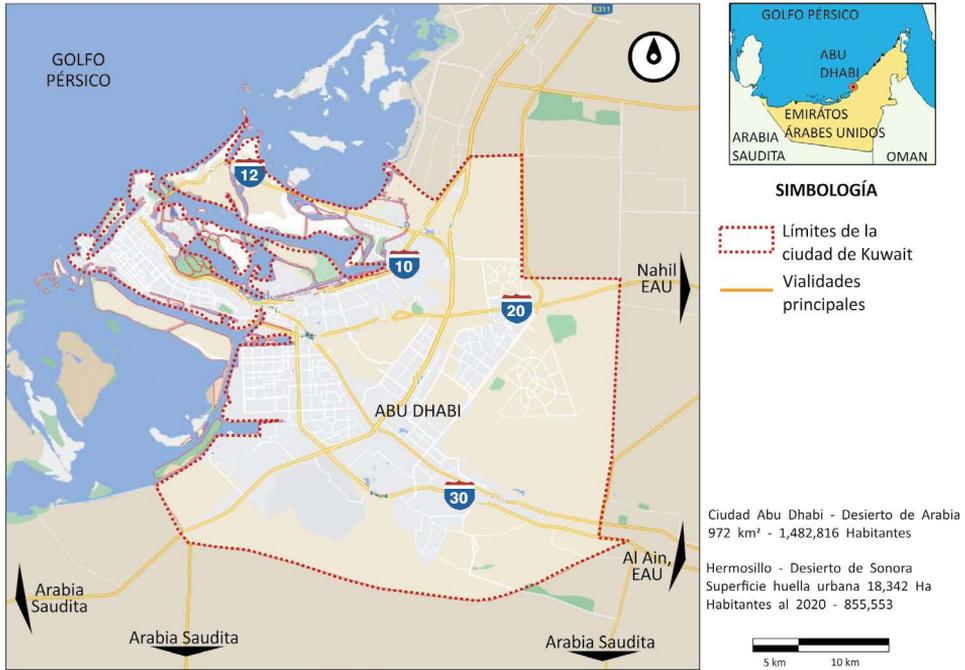
Las observaciones y estudios de Nasrallah, Brazel y Jr. (2006) en Kuwait son resultado de un análisis, a lo largo de veintitrés años, de temperaturas colectadas de estaciones meteorológicas para obtener información estadística que revela una ICU por el rápido crecimiento urbano, caracterizado por rascacielos con un bajo FCV. Estos datos verifican que la acelerada urbanización y un desequilibrio del FCV han provocado un aumento de temperaturas urbanas.

IMAGEN 1.5. *Ubicación de Kuwait*

FUENTE: Elaboración propia con base en World Population Review y Population Stat (2018).

Por otra parte, sobre el desierto de Arabia, se encuentra Abu Dhabi, capital de los Emiratos Árabes Unidos, ubicado al nororiente del Golfo Pérsico en una latitud de $24^{\circ}28' N$, con una población de 1 482 816 habitantes en 972 km², lo que significa una densidad de 1 525 hab/km² (Population Stat, World Statistical Data, s. f.), las temperaturas superan los 40°C y hay presencia de tormentas de arena aisladas (véase la imagen 1.6).

La investigación de Lazzarini, Marpu y Ghedira (2016) documenta y verifica que en el centro de población hay áreas más frescas comparadas con los suburbios, a causa del sombreado provocado por las alturas de los edificios y la intensa densidad vegetal. Además, se afirma una inversión de la ICU durante el día, es decir, en el perfil de temperaturas horarias diarias las superficies más cálidas están registradas en la periferia por el tipo de suelo árido, mientras que en el centro de población los suelos urbanizados se encuentran mayormente bajo la sombra; es por ello que las temperaturas del aire permanecen más frescas.

IMAGEN I.6. *Ubicación de Abu Dabi*

FUENTE: Elaboración propia con base en Population Stat, World Statistical Data (2018).

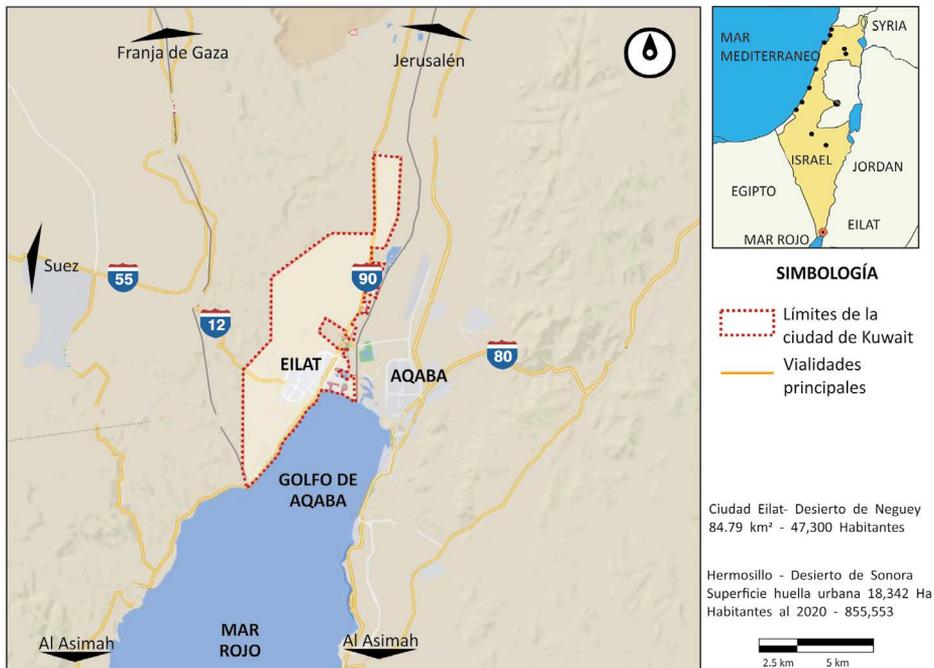
Continuando en el continente asiático, en la región sur del desierto de Neguev, en el Mar Mojo, en el golfo de Áqaba, se encuentra Eilat Israel (imagen I.7), con una población de 47 300 habitantes en 2008 dentro de una superficie de 84.79 km², lo que significa una densidad poblacional de 557.84 hab / km² (World Population Review, 2020), ubicada en una latitud de 29°33' N, con clima árido según la clasificación climática de Köppen BWh.

La información que destacan Sofer y Potchter (2006) trata sobre la actividad urbana en los centros de negocios y zona hotelera, donde localizan una ICU más significativa en el verano a mediodía y encuentran que la topografía y el viento representan un papel significativo en la intensidad del fenómeno de la localidad; por consiguiente, son herramientas fundamentales para las medidas de control.

En el continente africano algunos trabajos destacan líneas de estudio con respecto a la planeación urbana en climas áridos. Bourbia y Bouche-riba (2010) describen el impacto que conlleva planificar los asentamientos

para el microclima local, ya que influye en la absorción y emisión de radiación, lo que provoca cambios directamente en la temperatura urbana. Los autores usan como referencia una investigación en la costa del mediterráneo, en Argelia, ubicada en África del Norte, sobre el desierto del Sahara, con ayuda de la cual comparan las formas en que el microclima varía en el cañón urbano de la calle, dependiendo del entorno construido. Encontraron que la mayor influencia del FCV se obtiene entre las 0:00 y las 6:00 h; además, con un comparativo entre la estación meteorológica en un área abierta y el promedio de la temperatura medida en sitio, confirman que en el espacio abierto las temperaturas son menores que en las áreas urbanas, principalmente por la noche.

IMAGEN I.7. Ubicación de Eilat, Israel



FUENTE: Elaboración propia con base en Population Stat (2018).

Por su parte, los países ubicados en América Latina también experimentan un rápido crecimiento urbano tras el cambio de suelo natural. Así lo documentan Palme, Lobato y Carrasco (2016) para los casos de Lima, en

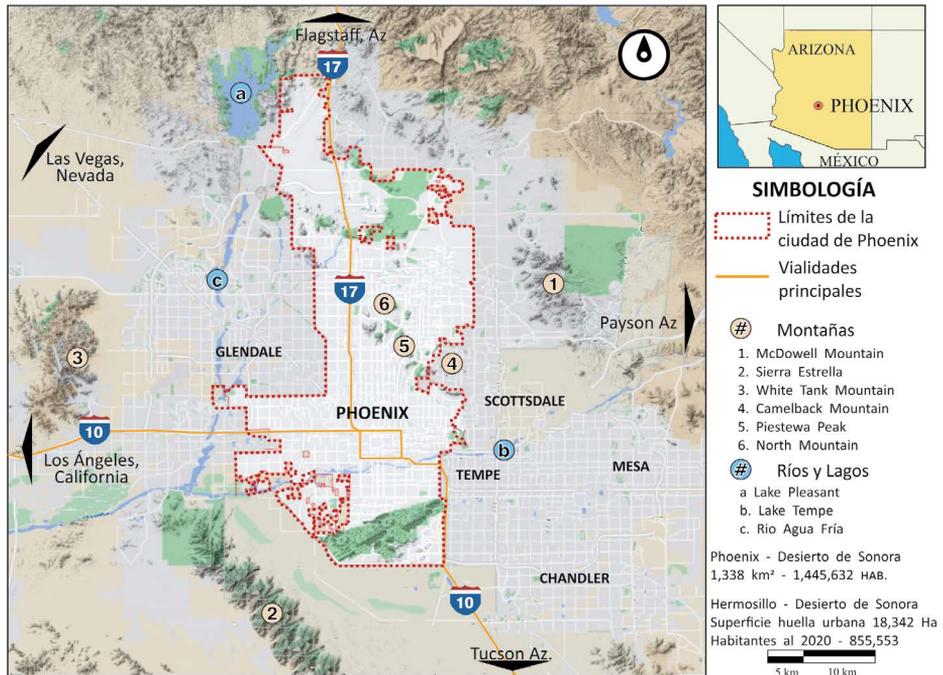
Perú; Guayaquil, en Santiago; Valparaíso, en Chile, y Antofagasta, en el desierto de Atacama de Chile. Exponen, además, las causas del aumento de temperaturas urbanas, destacando en primer sitio el tráfico vehicular como el motivo de la intensidad de la ICU; en segundo lugar, sitúan la densidad edificada; como tercer parámetro, consideran el uso de energía eléctrica en el sector industrial; por último, la pérdida de áreas verdes. Además, informan que en América del Sur la actual proporción de autos es de 0.15 por persona, mientras que en los Estados Unidos es de 0.98 y de 0.6 en Europa, situación que en veinte años espera cambiar con el desarrollo urbano que se observa. En cuanto al sistema de climatización, actualmente en Chile, Perú y Ecuador sólo 10% de la población usa aire acondicionado o calefacción. Las recomendaciones de mitigación se dirigen principalmente a una consideración de proceso de densificación con crecimiento vertical en combinación con estrategias pasivas de enfriamiento, junto con el uso de ventilación natural y un óptimo sistema de transporte público para evitar el aumento del uso de auto y contribuir a la reducción de temperaturas sobre el desierto de Atacama.

En América del Norte, sobre el desierto continental de Sonora-Arizona, se ha estudiado ampliamente la ICU. Al noroeste de México se ubica la localidad de Hermosillo, donde se realizó un estudio por parte de Mercado y Marincic (2017), quien considera temporalidad, causas y efectos del fenómeno. Los trabajos presentados por Guhathakurta y Gober (2007) y Rosheidat y Bryan (2010) estudian la ciudad de Phoenix, Arizona,²⁴ ubicada en las coordenadas 33°27' N en el Valle del Solm al norte del desierto de Sonora, al sur del estado de Arizona en los Estados Unidos de América, rodeada por conurbaciones como Tempe, Mesa, Scottsdale, Chandler, Glendale, entre otras (imagen I.8). Cuenta con una población de 1 445 632 habitantes en el municipio, una extensión territorial de 1 338 km² y una densidad de 1 080.44 hab/km², de acuerdo con el último censo oficial del año 2010 (EcuRed, 2018; United States Census, 2016). En cuanto a la forma urbana, ésta revela una traza ortogonal y morfología plana, a excepción del

²⁴ Ubicada dentro del desierto de Sonora-Arizona, la ciudad de Phoenix, Arizona, se localiza a 290 km al norte de la frontera entre México y Estados Unidos de América y a 568 km de la ciudad de Hermosillo, Sonora, México.

centro del asentamiento, que cuenta con edificaciones de gran altura y edificaciones sobre algunas sierras en la periferia.

IMAGEN I.8. Ciudad de Phoenix, Arizona



Fuente: Elaboración propia con base en EcurRed (2023) y United States Census (2016).

Como plantean las investigaciones referentes a esta urbe, existe una problemática de crecimiento urbano acelerado en el centro de población de Phoenix, Arizona, que da lugar a una alta intensidad de ICU. Se dan a conocer, mediante imágenes térmicas satelitales, temperaturas elevadas en las carreteras y estacionamientos por la noche, ya que estas superficies calentadas durante el día liberan su calor horas más tarde y elevan la temperatura del aire circundante. Por ello se afirma que la causa principal de la ICU, incluso en asentamientos áridos, sigue siendo la superficie horizontal urbana. Así, tomando en cuenta el suelo donde se ubica y que los ríos situados a su alrededor se encuentran secos, los autores sugieren estrategias de mitigación al fenómeno para optimizar el recurso del agua y de energía de la ciudad.

Del mismo modo, Emmanuel y Fernando (2007), al estudiar la misma localidad, señalan una ICU con una anomalía microclimática caracterizada por ser más caliente de noche en el centro de la ciudad si se compara con el ambiente rural de los alrededores. Este calentamiento nocturno fue inesperado en el caso de Phoenix, Arizona, y se explica a partir de la baja densidad de construcción. Aunque hay edificios verticales en el centro de la localidad, la densidad sigue siendo baja, con un alto FCV. También evalúan el alto albedo de las superficies como causa de las altas temperaturas diurnas y concluyen que manipular las propiedades térmicas de los materiales es una alternativa en cuanto a estrategias.

En la investigación de Chow, Brennan y Brazel (2012) se proponen políticas de sustentabilidad urbana por medio de técnicas para reducir la intensidad del fenómeno en la ciudad norteamericana. Por su parte, los trabajos de Guhathakurta y Gober (2007) exponen datos sobre el impacto de la ICU en el uso de agua. También Baker *et al.* (2002) hablan sobre las causas del crecimiento acelerado de Phoenix, así como del cambio de uso de suelo agrícola y natural desértico por paisajes artificiales. Además, los análisis de Wang *et al.* (2016) revelan el potencial de vegetación xérica como estrategia de control de la temperatura en el desierto.

Registrado todo lo anterior, aquí se plantea que las ciudades ubicadas en un territorio árido presentan típicamente una ICU diurna en el suelo natural del desierto con mayor intensidad que en sus centros urbanos. No obstante, y como lo afirman Rosheidat y Bryan (2010), una vez que la superficie natural es reemplazada con materiales como asfaltos y concretos típicamente de la infraestructura urbana, ese equilibrio natural se altera y presenta ICU diurnas y nocturnas en los centros de población. Además, se concluye que una de las características en ciudades situadas en el desierto es que la ICU ocurre de modo más prominente durante la noche, ya que el calor almacenado durante el día es liberado a la atmósfera en horas nocturnas, lo que da como resultado una ICU nocturna a causa de las superficies urbanas y del FCV, que representan un elemento de influencia en las temperaturas urbanas de localidades áridas. Dado que en el desierto el objetivo es reducir la temperatura y capacidad de almacenamiento de calor de las superficies urbanas por medio de la selección de propiedades térmicas y ópticas, se busca que la composición de las superficies urbanas emulen super-

ficies naturales tanto como sea posible, ya que el efecto refrescante de la vegetación urbana proporciona un resultado favorable, al mismo tiempo que brinda sombra a todas las superficies urbanas gracias a la arborización como estrategia de mitigación de la ICU en una ciudad de desierto (Wang *et al.*, 2016; Golden, 2010).

CAPÍTULO II

ISLA DE CALOR URBANA Y SU IMPACTO SOBRE LA HABITABILIDAD URBANA EN CIUDADES DEL DESIERTO



Habitabilidad urbana y su relación con el medio ambiente

En la búsqueda de la habitabilidad hacia una mejora en calidad de vida urbana, es preciso estudiar las condiciones que se desenvuelven en el ambiente urbano y que permitan entornos favorables, apropiados y vivibles para y por las comunidades. La ausencia de estas condiciones podría provocar el incremento de patologías sociales¹ urbanas derivadas de diseños no adecuados, por lo que en este apartado se expone la importancia de este concepto y su relación con el medio ambiente.

Las ciudades del siglo xx experimentaron un fenómeno urbano a causa de la migración de la población de localidades rurales a localidades urbanas. Esto provocó la gestación de las metrópolis y trajo consigo ventajas, como incremento de infraestructura y servicios disponibles, pero también consecuencias, como aglomeración de personas, congestión de vehículos, estrés y contaminación, lo cual ha hecho los espacios poco habitables y ha despertado la preocupación de la comunidad por una problemática ambiental, ya que, como menciona Moreno (2008), la supervivencia de la humanidad está ligada a la capacidad de conocer y controlar la relación de los asentamientos con el hábitat, en función de una óptima calidad de vida, donde la calidad del medio ambiente y el microclima urbano determinan el grado de habitabilidad urbana. Este autor define la habitabilidad urbana como el estudio de las cualidades que se desarrollan en el medio ambiente urbano al exterior de los espacios arquitectónicos.

¹ De acuerdo con la Real Academia Española (RAE, 2001), la patología social es una conducta anormal dentro de la sociedad.

Del mismo modo, Rueda (1996) explica que la calidad de vida tiene distintas interpretaciones de acuerdo con el enfoque, y son diversos los documentos, archivos e informes que la definen desde el punto de vista económico, político o social. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) fue quien en 1970 hizo referencia por primera vez a ella al mencionar que el crecimiento económico no es una finalidad, sino un instrumento para crear mejores condiciones de vida.

Como antecedentes, de acuerdo con los trabajos de Moreno (2008), se argumenta que en Europa, desde la Edad Media hasta principios del siglo xx, las personas se enfrentaron a enfermedades que trajeron consecuencias, como la pérdida de vidas, lo que originó un movimiento filantrópico² en la Inglaterra del siglo xix, el cual buscaba mejorar la situación de vida en términos de salubridad, vivienda y medio urbano, explicando las condiciones mínimas que se debían tener, como espacio, ventilación, luz, red de alcantarillado y agua potable. Esto solucionaba momentáneamente el problema, ya que los residuos se enviaban a zonas periféricas a costa de los territorios, actividad que hoy en día se sigue presentando y que repercute en la calidad de vida de los habitantes.

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2020) dentro de los informes de salud, menciona que no sólo la ausencia de enfermedad o padecimiento define la calidad de vida, sino también el estado de bienestar físico, mental y social. Por su parte, Rueda (1996) define esta calidad de vida como “una construcción compleja y multifuncional que desarrollan formas de medida objetiva a través de indicadores” y hace mención de la calidad de vida urbana

[...] como aquella conjunción de condiciones óptimas que determinan sensaciones de confort en lo biológico y psicosocial por medio de tres sistemas: (i) el microsistema que habla del crecimiento personal y desarrollo de oportunidades, (ii) el mesosistema que trata técnicas de mejoras de programas y entorno, y finalmente (iii) un macrosistema que hace referencia a políticas sociales.

² Según la RAE (2001), el filántropo es aquella persona que se distingue por el amor a sus semejantes y por sus obras en bien de la comunidad.

También establece que el ser humano tiene necesidades que se catalogan como sigue: (a) fisiológicas, que son básicas y se refieren principalmente a las que no amenacen la supervivencia, como habitar y poseer infraestructura mínima; (b) las de salud y seguridad, como la ausencia de peligros y riesgos; (c) de carácter subjetivo, como las necesidades sociales, que representan la voluntad de reconocer y ser reconocido en un grupo y tener la posibilidad de contacto y relación social; por último, (d) las de estima y meta, necesidades que se refieren a las virtudes, deseos y aspiraciones. Pese a que todos los seres humanos tengamos las mismas necesidades, la forma en que son satisfechas por cada una de las personas varía, por lo que la relación entre ellas y la satisfacción genera el grado de bienestar humano, las comunidades y la sociedad. Rueda (2010) sugiere que el grado de bienestar es difícil de estandarizar porque es distinto para todos; por ello los habitantes buscan diversidad de usos y apropiación de espacios. Es así que los programas de participación ciudadana son útiles para brindar una variedad de lugares y cubrir distintos grados de satisfacción en una comunidad.

La relación que existe entre el medio ambiente y la habitabilidad urbana tiene un impacto directo en la calidad de vida urbana y los usos tradicionales de los espacios. De acuerdo con Ruiz, Correa y Cantón (2012), las ciudades son consideradas la forma territorial más eficaz de la modernidad. Se configuran de un tejido que entremezcla el entorno artificial de espacios construidos y el natural mediante espacios verdes, por lo que la habitabilidad urbana en parques, jardines y espacios públicos está en función del confort térmico.

El ser humano realiza actividades cotidianas en la que desarrolla características biológicas, sociales, económicas, culturales, ideológicas, psicológicas, así que requiere de espacios propicios para la habitabilidad urbana, como parques, jardines, plazas, puntos de reunión, entre otros. Para esta finalidad Schejtnan, Calvillo y Peniche (1997) clasifican dichos espacios en *íntimos*, *semipúblicos* y *públicos*, entendiendo por este último zonas de encuentro donde miembros de una comunidad desarrollan acciones diversas, tales como trabajo, recreación, traslado, comercio o uso de los servicios. Por otra parte, Bazant (1991), define la *estructura urbana*³ como “el resultado de

³ De acuerdo con Bazant (1991), la estructura urbana se compone de todos aquellos elementos que influyen para hacer funcional una ciudad. Comprende infraestructura (agua, electricidad, drenaje, telefonía, gas, voz y

dos procesos interdependientes, por medio de los cuales edificios y actividades se ubican en determinados lugares”.

Por las razones anteriores, el concepto *habitabilidad urbana*, de acuerdo con lo que dice Rueda (2010), se clasifica en (a) habitabilidad y espacio público, (b) habitabilidad y equipamiento, (c) habitabilidad y edificación, (d) habitabilidad y cohesión social y, por último, (e) habitabilidad y biodiversidad. De entre éstos, el primero aborda el tema bajo la premisa de compacidad, índice de habitabilidad urbana, calidad de aire, confort acústico, confort térmico, accesibilidad de espacios públicos, apertura de vista al cielo, proximidad a servicios básicos y percepción espacial verde urbano.

Por su parte, Wong y Lau (2013) plantean que las actividades de un sitio, la composición y morfología de los edificios modifican las condiciones climáticas del lugar por su configuración, distribución, color y contaminantes que emiten e influyen en la temperatura superficial urbana. Aunado a esto, los espacios públicos y áreas verdes son pocos, lo cual provoca que la contaminación generada se concentre en la zona y, por ende, bloquee la circulación del aire.

Asimismo, por la relevancia en la geografía de nuestra investigación, Ruiz, Correa y Cantón (2012) señalan que el comportamiento de grandes masas de vegetación al interior de la mancha urbana facilita el acercamiento al confort urbano con respecto al prado, lotes baldíos y áreas densas, donde no existe flujo de vientos, para obtener índices de confort que permitan cuantificar rangos para distintos espacios y situaciones. Utilizaron el modelo *Comfort Formula* (Confa), desarrollado por Brown Gilles en 1995, el cual evalúa el confort térmico en el entorno urbano.

En cuanto a lo relacionado con el estudio de las propiedades térmicas de las superficies urbanas en condiciones geográficas de extremo calor, esto es primario, ya que está directamente relacionado con el confort térmico urbano. Respecto a este punto, los trabajos de Synnefa *et al.* (2008) han demostrado que en condiciones de radiación solar mayores, como la de $1\ 000\ \text{W/m}^2$ y escaso viento, la temperatura de una superficie opaca con reflectancia solar de 0.05 es 50°C mayor que la temperatura del aire, mientras que en una superficie clara con reflectancia solar de 0.8 el aumento es

datos), espacios urbanos abiertos (calles, plazas, parques), comunicación (vialidad y transporte) y accesibilidad (aproximación de elementos).

de sólo 10 °C. Por ello, según Shishegar (2014), la estructura urbana compuesta por materiales resistentes al agua y bajo porcentaje vegetal es la principal fuente de calor y, en consecuencia, aquélla en donde se desarrollan las islas de calor urbanas (ICU).

De acuerdo con Sosa, Correa y Cantón (2017), el confort térmico⁴ en áreas exteriores es uno de los factores que influye en la habitabilidad de los espacios públicos, por lo que implica un reto que el diseño responda al fortalecimiento de las interacciones y que, al mismo tiempo, disminuyan causas derivadas al cambio climático. Además, los efectos de la ICU en ciudades áridas condicionan la habitabilidad térmica del espacio exterior.

Bojórquez (2010) propone el uso de un modelo de adaptación⁵ para el estudio del confort en espacios exteriores, debido a que toma en cuenta las condicionantes del entorno y las acciones que el ser humano realiza para alcanzar el confort térmico. Su trabajo fue realizado en Mexicali, Baja California, y se basó en una metodología de enfoque adaptativo, transversal y estadístico con regresión lineal, con el fin de obtener valores neutros y rangos de confort térmico por nivel de actividad. En el periodo cálido establece que la temperatura de confort de bulbo seco neutral es de 34.4 °C, con un rango extendido de 26.7 a 42.1 °C y un rango reducido de 30.5 a 38.2 °C. Durante el periodo frío la temperatura neutral de confort es de 17.1 °C, con un rango reducido de 13.9 a 20.4 °C y un rango extendido de 10.7 a 23.8 °C. Este resultado es el promedio de las tres actividades: pasiva, activa e intensa. Para la presente investigación se ha tomado el rango de actividad activa.

Actualmente la ciudad contemporánea se encuentra encarecida de prácticas sociales y necesidades regionales de las comunidades. La habitabilidad del espacio público es cuestionable para algunos climas y ciudades a causa de la modificación del balance energético, que puede afectar la calidad de una vida urbana. Además, con la urbanización en un intento de atraer inversiones, llegó un mercado inmobiliario que ubica los desarrollos en zonas

⁴ Definido, según la norma de los estándares internacionales ISO 7730 (2005) y la ANSI / ASHRAE 55 (2013), como "aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico"; según Lacomba *et al.* (1991), como el equilibrio térmico que logra el cuerpo humano en un ambiente dado y que le permite desarrollar sin dificultad ni molestia cualquier actividad física o mental; según Nikolopoulou (2004), como "la satisfacción psicofisiológica del humano con respecto a las condiciones climáticas del entorno".

⁵ Desde el punto de vista de Humphreys y Nicol (1998), este modelo resulta más apropiado para el estudio del confort en exteriores, ya que las personas reaccionan ante el cambio de incomodidad de manera instintiva y tratan de restaurar las condiciones de comodidad.

alejadas de centros urbanos y sin accesibilidad a servicios y equipamiento, lo cual obliga a la población a recorrer grandes distancias y demanda un mayor uso de recursos, servicios públicos y transporte. Cuando la zonificación urbana de un lugar no está adecuadamente planeada, por factores como inadecuadas orientaciones o múltiples usos de suelo y cercanía de equipamiento, los usuarios tienen dificultades para su movilidad y esto provoca la ausencia de vida urbana en espacios públicos (Schjetnan, Calvillo y Peniche, 1997).



FUENTE: Elaboración propia con base en Bojórquez (2016).

Los ciudadanos perciben el espacio en función de posibilidad de apropiación y accesibilidad. Chombart de Lauwe *et al.* (1978) señala que la apropiación de un lugar no significa hacer una utilización reconocida, sino establecer una relación de vivencias propias y convertirse en actor de su propia transformación. Desde la posición de Hernández (2000), los equipamientos públicos son fundamentales en cualquier estrategia de interacción social, ya que no necesitan generar recursos económicos, son de propiedad colectiva y es posible sustentar una red social. También argumenta que, ante la pérdida de los espacios colectivos, éstos son sustituidos por privados de carácter lucrativo, situación que se observa en muchas ciudades del mundo.

En América Latina y el Caribe los espacios públicos son elementos centrales del desarrollo sustentable, ya que contribuyen a la calidad de vida del habitante por ser lugares de recurrencia por varios días a la semana; no obstante, el principal factor que impide acudir a un mismo espacio es la inseguridad, que se relaciona con la condición socioeconómica de la ubicación (Ellis *et al.*, 2016).

Por ello Hernández (2000) sugiere que, para garantizar la supervivencia de la sociedad, surge la responsabilidad ecológica como un reclamo de una ciudad para ciudadanos que reconozca la calidad de vida mediante un pro-

yecto de sustentabilidad que responde a tres cualidades, (a) *la libertad individual*, que habla del tiempo y espacio dominado por el poblador con libre elección de lugar, participación, contacto social y apropiación del espacio; (b) *la responsabilidad social*, que se refiere a actividades sociales para el desarrollo humano en espacios urbanos, y (c) *la responsabilidad ecológica*, que habla de una nueva estructura urbana que garantice la calidad del entorno al no consumir recursos ni producir residuos, ya que la ciudad y los procesos que la animan resultan de las actividades de los que interactúan en ella. También argumenta que, en Europa, el proceso de sustentabilidad ambiental comenzó como política en 1990 con el *Libro verde sobre medio ambiente urbano*,⁶ pasando por la *Carta de las ciudades europeas hacia la sustentabilidad* de 1944, hasta los informes sobre *Ciudades sostenibles* destinados a las autoridades locales de 2005 y la estrategia temática para el medio ambiente urbano de 2006, los cuales muestran que la sustentabilidad local es un proceso que progresivamente se ha ido concretizando para el ámbito urbano.

Lezama y Domínguez (2006) señalan que actualmente la tendencia del urbanismo es ambientalista: va en busca de coherencia con el entorno necesario para el desarrollo del ser humano, implica bienestar social y tiende a ideas y prácticas amplias de justicia, democracia e igualdad, con elementos para un acceso equitativo, igualitario y democrático de la riqueza natural no sólo por protección ambiental. Argumentan también que en Latinoamérica la sustentabilidad está vinculada con la gobernabilidad, ya que se requieren estrategias particulares de desarrollo para cada situación, por lo que se vuelve un desafío alcanzar la sustentabilidad en un ambiente construido. También sugieren que la interacción del medio ambiente en políticas y toma de decisiones obliga al cambio de algunas categorías normativas, por lo que surgen conceptos como participación, información, democracia ambiental, que se refieren a un sistema de gobierno participativo donde el ciudadano tiene voz para defender su derecho al medio ambiente.

⁶ El *Libro verde de medio ambiente urbano* se compone de tres tomos y es el resultado de un convenio de colaboración entre el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino con la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. En ellos se sostiene que el futuro es insostenible y se invita a cambiar el paradigma de las ciudades a un modelo de ciudad más sostenible en diversos ámbitos temáticos, como urbanismo, edificación, biodiversidad, movilidad, gestión urbana, metabolismo urbano y la relación entre medio urbano y medio rural (Geoinnova, 2018).

Derecho al medio ambiente urbano

De acuerdo con el trabajo de Camargo (2016), en 1968 el francés Henri Lefebvre, en su libro *El derecho a la ciudad*, menciona por vez primera el impacto que tuvo la economía capitalista y la privatización de espacios públicos de las ciudades y construye una propuesta política de rescate para recuperar la ciudad, llamándolo derecho a la urbe, el cual define como “el derecho de los habitantes urbanos a construir, decidir y crear la ciudad, y hacer de éste un espacio privilegiado de lucha anticapitalista”.

Según Costes (2011), en el año 2001, en el Foro Social Mundial de Porto Alegre de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), con el fin de enfrentar la crisis del proceso industrial, surge la *Carta mundial de derecho a la ciudad*, que traducía los compromisos y métodos para llegar a obtener ciudades justas, democráticas, humanas y sustentables, a la vez que definía ese derecho como el “usufructo equitativo de las ciudades dentro de los principios de sustentabilidad y justicia social”.⁷ En ella se muestra un compromiso por parte de las ciudades a “desarrollar una planificación, regulación y gestión urbano-ambiental que garantice el equilibrio entre el desarrollo urbano y la protección del patrimonio natural, histórico, arquitectónico, cultural y artístico”. Dentro del contexto del derecho al medio ambiente, menciona que “las ciudades deberán adoptar medidas de prevención frente a la ocupación desordenada del territorio y de áreas de protección y a la contaminación”; además, define el derecho ambiental como “el conjunto de normas jurídicas que regulan las conductas individual y colectiva con incidencia en el ambiente a fin de lograr un equilibrio natural, para la optimización de la calidad de vida” (Habitat, 2005).

Respecto a Latinoamérica, los trabajos de Cafferatta (2004) en Argentina ofrecen su aportación en relación con la problemática de derecho ambiental en plena formación y su relación con el ordenamiento de los asentamientos humanos. Asimismo Valls (2008) define el *derecho ambiental* como “la creación, modificación, transformación y extinción de las relacio-

⁷ Afirmaba esto con base en el artículo 1.1., que dice: “Todas las personas tienen derecho a la ciudad sin discriminaciones de género, edad, raza, etnia u orientación política y religiosa y preservando la memoria y la identidad cultural en conformidad con los principios y normas que se establecen en la carta”. El artículo XI desarrolla el compromiso que tendrán las ciudades a disponer de espacios públicos como puntos de reunión y encuentros informales (Habitat, 2005).

nes jurídicas que condicionan el disfrute, preservación y mejoramiento del ambiente”. En México, Brañes (2000) lo define como “sector de ordenamiento jurídico que regula las condiciones humanas que influyen a la calidad de vida [sic] en la interacción entre lo humano y lo ambiental, donde se asume la calidad de vida como valor que va de la mano del reconocimiento a la dignidad humana”. Por su parte, Azuela (2007) sostiene que la reacción al problema ambiental difícilmente incide sobre un individuo, pues más bien es procesada por un campo socioambiental donde, en el colectivo urbano, se genera una permuta de un modelo consumidor a uno sustentable y, una vez permeado en la sociedad actual, busca un compromiso de parte de las leyes y normas para regular (controla y aplica las normas ambientales).

De acuerdo con Borja y Muxi (2003), la política ambiental se estableció en la década de 1980, cuando las comunidades ya identificaban el *saber geográfico*,⁸ es decir, el momento social y económico en el que se producen las crisis, como catástrofes naturales o catástrofes producidas por actividad productiva. Por su parte, con el *saber ecológico*⁹ nacen y evolucionan las políticas ambientales como acción transformadora. Ambos saberes conforman las estrategias públicas que se traducen en instrumentos y, a su vez, en normatividad.

Con base en lo anterior, las leyes federales mexicanas han incidido de manera directa en el proceso urbano. Éstas son algunas de las más importantes: *Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas* (1972, actualizada a 2018), el *Código Sanitario de los Estados Unidos Mexicanos* (1926), la *Ley General de Población* (1974, actualizada a 2018) y la *Ley para promover la inversión mexicana y regular la inversión extranjera* (1973, actualizada a 2018); y junto a los organismos a nivel nacional se decretó el nacimiento del Instituto Nacional para el Desarrollo de la Comunidad y de la Vivienda Popular (INDECO en 1978), del Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (Infonavit en 1972), de la Comisión para la Regularización de la Tenencia de la Tierra (Corett en 1973), entre otros.

⁸ El saber geográfico es el conocimiento de las acciones de los actores sociales frente a la crisis ambiental (Borja y Muxi, 2003).

⁹ El saber ecológico lo define Borja (2003) como el conocimiento de las relaciones entre procesos a nivel químico-biológico, en las dimensiones del suelo, aire y agua.

De acuerdo con Micheli (2002), la planificación urbana contiene un sistema de planes debido a que es multidisciplinar. Puesto que el fenómeno urbano es complejo, éste no puede ser cubierto por un solo actuar; así, en México, la *Ley General de Asentamientos Humanos* (1993) establece el Plan Nacional, Estatal y Municipal de Ordenación de las Zonas Conurbanas. El Plan Nacional de Desarrollo (PND), decretado en la presidencia de Miguel de la Madrid en el periodo de 1982 a 1988, dio lugar a la primera vez en que se incluía el tema ecológico inmerso en el desarrollo social y económico del país, planteando estrategias para el correcto uso de recursos naturales. A partir de él, la publicación de la *Ley Federal de Protección al Ambiente*, publicada el 11 de enero de 1982, generó normas para defender el medio ambiente. Durante ese periodo, a nivel internacional, se estableció una agenda ambiental en 1987 por parte de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo (WCED, por sus siglas en inglés), donde el desarrollo sustentable fue definido en el reporte de Brundtland¹⁰ como “un desarrollo que satisface las necesidades de la presente generación sin comprometer la capacidad de las futuras para satisfacer sus necesidades” (WCED, 1987). Sin duda este compromiso de orden internacional para proteger al medio ambiente fue motivo de acciones en las diversas esferas de gestión gubernamental.

Paralela a esto, la urbanización forma parte del conflicto en la lucha por el espacio urbano, que es de los motivos principales de las aceleradas expansiones urbanas. A fin de entender el conjunto de normas que regulan los procesos de crecimiento y cambios en los centros de población, surge el *derecho urbanístico*, en el que el objetivo directo es la conducta urbana y el indirecto es el área sobre la cual ésta se desarrolla. Al respecto, Azuela (1978) sugiere que el espacio urbano es un satisfactor de necesidades y el que fundamenta la existencia del derecho urbanístico, donde el ser humano desarrolla conductas que se agrupan en tres procesos articulados entre sí: de apropiación, de producción y de utilización. En el proceso de apropiación se

¹⁰ Elaborado para la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 1987, el informe Brundtland originalmente llevaba por nombre *Our Common Future*. Es un reporte realizado por la ex primera ministra noruega Gro Harlem Brundtland, quien confrontaba la postura del desarrollo económico actual junto con el de sostenibilidad ambiental. En él analiza, critica y replantea las políticas de desarrollo económico, reconociendo que el actual se está llevando a cabo a un costo medioambiental alto. En este documento utilizó por primera vez el término *desarrollo sostenible* (Maderero, 2017).

dan los actos por medio de los cuales se adquieren y modifican derechos sobre el espacio, en el proceso de producción hay acciones propias del inmueble en el que se determina el uso particular del espacio y, finalmente, la utilización del espacio producido es el resultado de dicha producción.

Esto dio inicio al movimiento ambiental en México, con la expedición de la *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente* (LGEEPA, 1988), la primera ley que buscó abordar de manera integral el problema urbano. En ella se da origen a las normas de conservación, mejoramiento y crecimiento de la población en el país. Para 1992 surgieron dos organismos clave para la política ambiental: el Instituto Nacional de Ecología¹¹ (INE) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente¹² (PROFEPA). Con las modificaciones en 1996 de la reforma de la LGEEPA se incluyó una nueva definición de desarrollo sustentable¹³ (Borja y Muxi, 2003). En la opinión de Azuela (1978), la LGEEPA es un lugar para expresar propósitos y visiones de mundo difícilmente aplicables “la ley regula los procedimientos para producir reglas aplicables a la protección del ambiente, el aprovechamiento de recursos naturales y las regulaciones de las modificaciones del paisaje”. En el futuro estas disposiciones deberán ser motivo de una gestión más articulada a la planeación de ciudades.

A pesar del avance en cuanto a políticas ambientales que ha experimentado el país, uno de los principales objetivos puede ser que la sociedad comprenda el impacto ambiental del aumento de las temperaturas urbanas con respecto a la salud, además de la calidad de aire, para que posteriormente se propongan estrategias de control a fenómenos asociados con el cambio climático, como las ICU, que, de acuerdo con Wong y Mercado (2002), son interdisciplinarias y requieren de distintas áreas interesadas. Por ello es complicado aterrizar estrategias en políticas públicas, ya que todos los involucrados deben conocer los beneficios, mientras que éstas, a su vez,

¹¹ Con el fin de generar normas y definir políticas.

¹² Se encarga de vigilar y fiscalizar el cumplimiento de las normas y leyes.

¹³ Definida como el proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social, que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas y que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras.

requieren ser guiadas procurando incentivos en búsqueda de aceptación en las comunidades.

Como ejemplos de políticas públicas aplicadas a la mitigación de la ICU, dentro del estado de California, en el suroeste de los Estados Unidos, de acuerdo con Rosenfeld *et al.* (1993), en áreas de uso comercial se implementan programas para el cambio y colocación de asfalto de vidrio y los acabados del edificio deben tener 0.75 de reflectividad. Los trabajos de Onishi *et al.* (2010) exponen que, en ciudades como Sacramento, Davis y Los Ángeles, California, las normas sobre superficies pavimentadas indican que en ellas debe existir al menos 50% de sombra vegetal.¹⁴ Por su parte, la iniciativa Healthy Air Living (2011) manifiesta que en la ciudad de Chicago, ubicada en el estado de Illinois, los edificios que instalen materiales reflectivos en azoteas obtienen rebajas de entre 0.50 y 0.80 dólares. Esto es una promoción de The Energy Star Program de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) y el Departamento de Energía (DOE, por sus siglas en inglés), los cuales indican materiales con requerimientos reflectivos específicos.

El Comité sustentable U. S. Green Building Council (USGBC) incorpora criterios de diseño de paisaje. Los modelos establecidos por el American National Standards Institute (ANSI), la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) y la Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) desarrollaron los estándares 90-1 en 1999, que incluyen techos reflejantes. Por su parte, la American Society of Testing Materials (ASTM) propuso patrones para medir y calcular la reflectancia y estableció un comité para techos verdes. Los estados de Arizona, California, Florida, Georgia, Maine, Massachusetts y Chicago han modificado sus códigos de energía para considerar las estrategias en techos fríos, mientras que el comité California Energy Commission (CEC) lanzó el Cool Savings Program, que promueve en Sacramento, California, incentivos a los programas de vegetación urbana arbórea.

Otras acciones para mitigar las ICU en los Estados Unidos se propusieron por parte de la EPA (2009), la cual emitió una medida llamada *Stationary Sources Voluntary Measures Policy*, que permite a los estados obtener recur-

¹⁴ Ya que estudios sobre áreas de estacionamientos indicaban que una superficie pavimentada de concreto arrojaba 15°C más que un campo de césped, por lo que, a mayores estacionamientos, mayores ICU.

sos económicos para el control del fenómeno en sus planes de calidad de aire. En Filadelfia, Pensilvania, la Energy Coordinating Agency (ECA) lanzó el programa Cool Homes para personas de la tercera edad que están en riesgo de morir o que tengan problemas por calor, a fin de cambiar las envolventes de viviendas por colores blancos acrílicos o elastómeros con reflectancia de 80%.

Por otra parte, respecto a realizar acciones para mitigar las ICU en América Latina, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) cuenta con la iniciativa de ciudades emergentes y sostenibles (ICES), la cual define una ciudad sostenible como “aquella que ofrece una buena calidad de vida a sus habitantes, minimiza sus impactos sobre el medio natural, preserva sus activos ambientales y físicos y promueven a través de estos su competitividad”. Ellis *et al.* (2016) señalan que las evidencias científicas son consistentes respecto al cambio climático, el cual constituye un serio problema de orden global cuyas consecuencias para las personas y sus entornos se vuelven evidentes. Las encuestas en el trabajo de los autores arrojaron que 80.4% de las personas que viven en megaciudades perciben que éstas son más afectadas por el cambio climático o por eventos climáticos extremos.

CAPÍTULO III

EL RETO DE MITIGAR LA ISLA DE CALOR URBANA EN CLIMA DESÉRTICO A MESOESCALA



Estrategias, beneficios y retos para moderar el clima urbano

El clima urbano depende de múltiples factores. Es posible controlar algunos de ellos para así modificar las condiciones climáticas urbanas de manera más favorable. Para estos fines, en primer lugar, habría que distinguir entre diferentes escalas en las que suceden los fenómenos climáticos a fin de poder determinar la mejor manera de intervenir en el clima. Abordaremos los fenómenos climáticos según diferentes dimensiones de las áreas urbanas de impacto, las cuales clasificaremos en macro, meso y microescala, las cuales se definieron anteriormente. La determinación de estas escalas depende no sólo de las dimensiones de área estudiada, sino también de los accidentes topográficos contenidos en ellas (cerros, ríos, grandes parques), que hacen que los fenómenos climáticos puedan cobrar características diferenciadas.

En este capítulo se abordarán los fenómenos térmicos que tienen lugar en las ciudades y en las áreas rurales aledañas, enfocados particularmente a las ciudades del desierto. Comprendiendo las características de estos fenómenos, se pueden formular posibles estrategias para el control del clima urbano a varias escalas, considerando la Isla de Calor Urbana (ICU). Ante el crecimiento constante de las ciudades, la ICU es un fenómeno cuya tendencia es creciente, ya que las ciudades siguen creciendo rápidamente y alteran el ambiente social y el ecosistema natural hasta impactar en el comportamiento humano. Por ello es importante generar estrategias de control para moderar el clima urbano (Sharifi y Lehmann, 2014).

Para tomar acciones ante el cambio climático y sus efectos ambientales, como la ICU, se han planteado a lo largo de los años estudios de mitigación

del fenómeno en diversas ciudades y climas, partiendo del principio fundamental de que se desarrolla en ciudades con alto porcentaje de superficies no reflectivas, impermeables y con baja cobertura vegetal (Akbari, 2002; Shishegar, 2014).

De acuerdo con la literatura revisada, la ICU se desarrolla en cualquier tipo de asentamiento en el que el balance energético haya sido modificado por los seres humanos. Hay estudios en climas templados, subtropicales y en localidades desérticas, como en Argentina, Argelia, Israel, Yemen, Grecia, India, Pakistán, Iraq, Turquía, Australia, Arabia, Irán, Chile, Perú, Ecuador, México y Estados Unidos. En estos países se muestran medidas de control para clima árido con métodos sustentables por medio del uso de vegetación xerófila y estrategias enfocadas en reducir la temperatura urbana para, con ello, mejorar el confort térmico (Chow y Brazel, 2012).

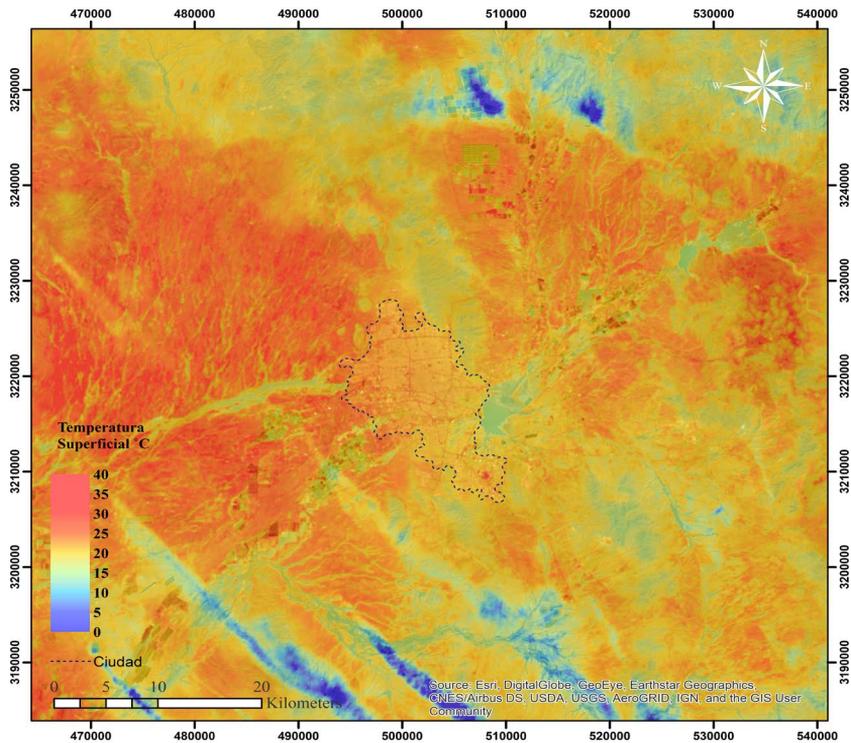
Las metodologías con las que se abordan las investigaciones de la ICU y su mitigación son numerosas; entre las más utilizadas, se encuentran las simulaciones (Akbari, 2002), el uso de bandas satelitales Landsat (Onishi *et al.*, 2010), cálculos numéricos (Shishegar, 2014), análisis comparativos (Zinzi y Agnoli, 2012), métodos matemáticos de energía (Ruiz, Correa y Cantón, 2012), mediciones en campo, cámara infrarroja y estaciones meteorológicas (Takebayashi y Moriyama, 2009; Ruiz, Correa y Cantón, 2012; Bourbia y Boucheriba, 2010; Chow, Brennan y Brazel, 2012).

En cuanto a las ciudades áridas, éstas se caracterizan por tener condiciones térmicas extremas y diferencias significativas entre el día y la noche, entre el verano y el invierno. En un desierto típico el suelo se calienta durante el día y por la noche libera su calor al cielo abierto; sin embargo, una vez que estas superficies se ven impactadas por materiales artificiales, como en las áreas urbanas, el calor almacenado se libera por la noche y aumenta la temperatura superficial nocturna. Esto caracteriza las ICU en climas desérticos como un fenómeno nocturno (Rosheidat y Bryan, 2010).

Como ejemplo de este comportamiento, a continuación se muestran imágenes satelitales obtenidas de Landsat 8, adquiridas el 29 de agosto de 2015 y el 5 de enero de 2016 a las 17:00 h, las cuales fueron procesadas en el sistema de información geográfica ArcGIS 10.2.1 con el uso de las bandas 10-TIRS (*Thermal infrared sensor*) con una resolución de 100 metros, mapeo térmico, humedad estimada del suelo y, finalmente, la banda 11-TIRS con

una resolución de 100 metros. Dichas imágenes fueron remuestreadas a 30 metros por píxel con un mapeo térmico mejorado y humedad estimada del suelo, para obtener un mapa de temperatura superficial de la región hermosillense, ubicada en el desierto continental de Sonora. Con esto se da a conocer que el fenómeno se presenta en un típico desierto continental con diferencias significativas entre lo urbanizado y lo rural.

IMAGEN III.1. *Temperatura superficial durante agosto de 2015 en Hermosillo, Sonora.*
La línea discontinua muestra los límites urbanos de Hermosillo



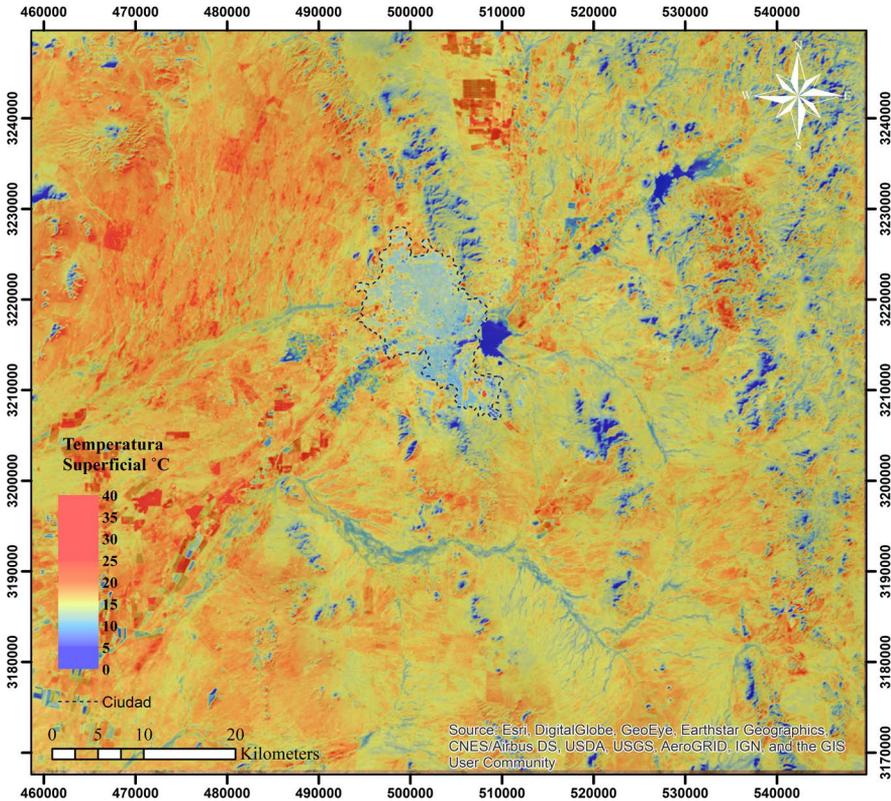
FUENTE: Elaboración propia con uso de Landsat 8.

La Imagen anterior corresponde al periodo cálido (29 agosto de 2015). se tiene un polígono de 70×70 km, en el que se observan áreas naturales al poniente de la zona urbanizada con temperaturas superficiales que superan los 40°C . También destacan algunas áreas donde se cuenta con elemento hídrico y relieves de montañas, los cuales reducen las temperaturas has-

ta 20°C. Si observamos el cuadrante en general, se mira claramente que los suelos no urbanizados pero desérticos muestran, efectivamente, temperaturas más altas que la zona urbanizada (en la imagen dentro de la línea discontinua); sin embargo, existen dentro de ésta algunos polígonos que registran temperaturas de hasta 48°C.

Por su parte, la imagen siguiente, que pertenece al periodo frío (5 enero de 2016), destaca las áreas no impactadas por el desarrollo urbano con temperaturas más altas que dentro de la huella urbana.

IMAGEN III.2. Temperatura superficial en enero de 2016 en Hermosillo, Sonora.
La línea discontinua muestra los límites urbanos de Hermosillo.



FUENTE: Elaboración propia con uso de Landsat 8.

Estas características observadas en los mapas de temperatura de suelos verifican lo que Oke (1987) señala con respecto al desierto natural y su gran

capacidad de almacenamiento de calor: que eleva la temperatura superficial a causa de la radiación de onda corta y, en consecuencia, la temperatura del aire también lo hace. Por la noche, al refrescar, los suelos naturales se enfrían velozmente, de modo que se presenta el fenómeno con mayor intensidad dentro de las zonas urbanizadas.

Así se manifiesta la presencia de la ICU en los desiertos continentales, cuya característica principal es su prominencia por la noche. En cuanto al fenómeno diurno, a pesar de presentar las mayores temperaturas en la zona rural debido al suelo nativo, en la zona urbana es posible localizar algunas ICU a causa de la geometría urbana, usos de suelo, materiales y vegetación. También se ubican islas frías por la presencia de parques, plazas y zonas arborizadas que permiten alterar el clima a una microescala. Estos ejemplos nos permiten formular estrategias para el control del clima urbano.

En la siguiente tabla se presentan las características que componen la ICU de las ciudades ubicadas en el desierto continental.

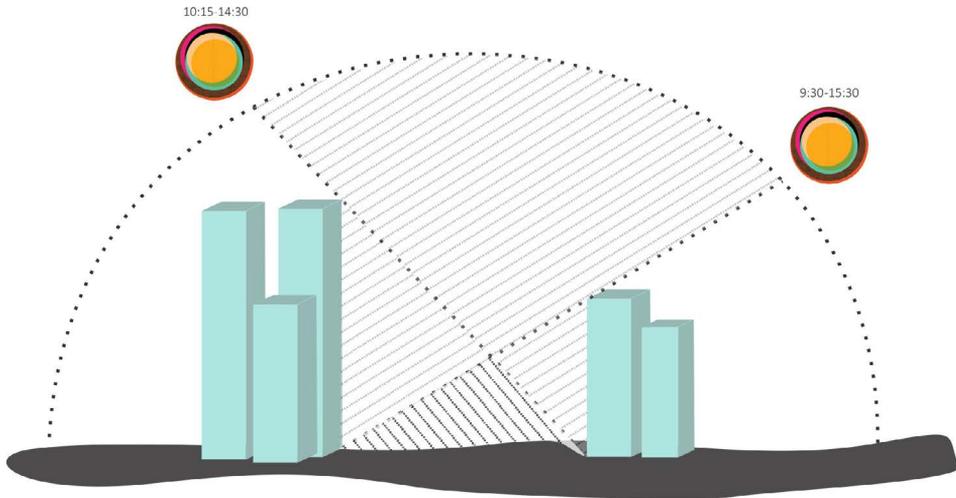
TABLA III.1. *Características de la ICU en ciudades del desierto continental*

<i>Características</i>	<i>Causa</i>
La ICU se presenta como un fenómeno nocturno.	El suelo desértico tiene una alta capacidad de almacenamiento de calor.
La ICU diurna presenta su mayor intensidad en la zona rural.	
La ICU nocturna se ubica en la zona urbana.	El calor almacenado en el día de los materiales superficiales no permeables tarda en enfriarse, por lo que libera calor por la noche.
En la zona urbana es posible ubicar algunas ICU diurnas.	Por la geometría, escasa vegetación, uso de suelo y materiales de la superficie urbana que almacenan calor.
La vegetación predominante es escasa y xérica.	Al no tener vegetación en el entorno urbano, sus beneficios no son aprovechados, principalmente el de sombreadamiento.
Se presentan islas frías en la zona urbana.	Por la presencia de parques, plazas y algunas zonas arborizadas que alteran el clima a microescala.
La relación entre la altura de los edificios, el ancho de las calles y el factor de cielo visible (FCV) es uno de los factores que determinarán la intensidad del fenómeno de la ICU.	A mayor altura de los edificios, mayor sombreadamiento y menor FCV, lo que provoca mayor intensidad en el fenómeno nocturno por obstruir la salida de calor.
	A menor altura de los edificios, menor sombreadamiento y mayor FCV, lo que provoca mayor intensidad en el fenómeno diurno.
La vegetación con riego parsimonioso es escasa, por lo que reduce la presencia de humedad en el ambiente.	El recurso hídrico es escaso.
Aumento de calor antropogénico que aumenta la intensidad del fenómeno diurno en las zonas urbanas.	Por el uso de aire acondicionado (que aporta CO ₂ al ambiente), actividad industrial y tránsito vehicular, entre otras actividades humanas.

FUENTE: Elaboración propia.

Analizando las características que posee el fenómeno en un ambiente árido, se estudian los criterios para mitigar el clima urbano, los cuales resultan diversos. Estudios de Taslim, Prapari y Shafaghat (2015) plantean que en ciudades desérticas el principal énfasis ocurre con respecto al recorrido solar y su correlación ente la altura de las edificaciones y el ancho de las calles (véase la imagen III.3), así como con respecto a la óptima selección de orientación, vegetación, sombreado y relación entre materiales, sobre todo sus propiedades térmicas. Por otro lado, Shalaby (2011) hace mención al beneficio por enfriamiento de una geometría urbana compacta, con zonas verdes dentro y fuera de los edificios, la reducción del uso de transporte y la selección de materiales óptimos.

IMAGEN III.3. *Relación de sombra, ancho de calles y altura de edificios*



FUENTE: Elaboración propia.

Estudios de Rosenzweig *et al.* (2006), Giguère (2009), Zinzi y Agnoli (2012) y el programa Healthy Air Living¹ (2011) afirman que reducir el calor antropogénico, diseñar techos verdes o claros y cambiar la infraestructura urbana forman parte de las principales estrategias para mitigar el fenómeno. Otros estudios, como los de Rizwan *et al.* (2008), Santamouris y

¹ Healthy Air Living es una iniciativa de la Agencia gubernamental del Valle de San Joaquín, California, en los Estados Unidos.

Kolokotsa (2016), Synnefa *et al.* (2008) y Correa, Alchapar y Cantón (2010) buscan medidas en el cambio de albedo de las superficies urbanas.

Con respecto a lo anterior, Synnefa *et al.* (2008) argumentan que las estructuras urbanas absorben energía solar y causan un aumento severo de temperatura del aire, responsable de estrés térmico; como consecuencia, se eleva el consumo energético. Por su parte, Giguère (2009) expone que, en un estudio realizado en Tokio, Japón, las temperaturas de los pavimentos después de ser regados se redujeron 8°C en el día y 3°C por la noche. Dichos autores, con mediciones de campo y modelados, establecen los beneficios que aportan las superficies claras (que contribuyen a reducir la contaminación) y plantean modificar el albedo de las superficies, además de incrementar áreas vegetales, pues afirman el impacto positivo sobre la calidad del aire y consumo energético.

Por su parte, Santamouris M. (2014) realizó simulaciones en Houston, Texas, las cuales consistían en un incremento de albedo en techos y muros. Probó que se podría reducir el pico de intensidad de la ICU, pero la magnitud de reducción dependería del sitio de aplicación de la estrategia.

La iniciativa gubernamental Healthy Air Living (2011) en Estados Unidos promueve cambios a favor de mejorar la calidad del aire; propone cuatro estrategias principales de aplicación: uso de vegetación, techos fríos, pavimentos claros y techos verdes. Por su parte, Rosenzweig *et al.* (2006) mencionan los techos fríos² como la mejor opción en vecindarios, ya que ofrecen mayor enfriamiento por unidad de área que las superficies claras, mientras que Giguère (2009), con una visión urbana, busca tomar acción sobre la infraestructura urbana: en la planeación de su geometría y usos de suelo, el manejo del agua y medidas para la reducción de calor antropogénico.

Con respecto a la estructura paisajística o infraestructura verde, ha sido analizada por numerosos autores, entre ellos Ruiz, Correa y Cantón (2012), quienes puntualizan los elementos que se deben tomar en cuenta, como entorno urbano, superficie, altitud, diseño de paisaje y forestación. En la misma línea, Villanueva-Solis, Ranfla y Quintanilla-Montoya (2013) establecen que la reforestación urbana es una buena estrategia, ya que la configuración de la ciudad es un mosaico entremezclado de entorno natural y

² De acuerdo con Santamouris M. (2014), un techo frío, también conocido como techo reflejante, es la condición superficial de una azotea que reduce el calor emitido a la atmósfera

artificial. Los trabajos realizados por Takebayashi y Moriyama (2009) analizan distintas superficies vegetales y observan las diferencias térmicas entre una extensión de césped y otra de asfalto, mientras que Zinzi y Agnoli (2012) señalan que la elección de vegetación horizontal no es tan efectiva como la vertical; al mismo tiempo afirman que la flora xerófila³ con irrigación parsimoniosa presenta sombreado, mientras que los paisajes méxicos⁴ con áreas verdes, donde el recurso hídrico está restringido como en zonas áridas, no es el más adecuado.

Por su parte, Ruiz, Correa y Cantón (2012) verifican lo benéfico que resultan los parques en la trama urbana del área metropolitana de Mendoza, Argentina, principalmente para el enfriamiento nocturno, que es el momento en que se presenta el fenómeno inverso a la ICU, llamado *Isla Fría Urbana*.⁵

Con respecto a lo anterior, Shishegar (2014) muestra estudios de la isla fría en los que ilustra un parque urbano con árboles de copa densa y observa un enfriamiento en verano, cuando las temperaturas se reducen hasta 3.8 °C, mientras que en invierno disminuyeron 2 °C. Los resultados del estudio de Chow, Brennan y Brazel (2012) en la ciudad árida de Phoenix, Arizona, muestran que el riego generado en espacios xéricos impacta la ICU diurna mediante la evapotranspiración, que, combinada con condiciones ventosas, produce el efecto oasis que mitiga el fenómeno.

Otro beneficio ambiental que sugieren Ruiz, Correa y Cantón (2012), aportado por la vegetación en función de las características urbanas climáticas y morfológicas, es el amortiguamiento del sonido, además de filtrar contaminantes, refrescar y reducir la velocidad del viento cálido y evitar la erosión; por ello estas ventajas están vinculadas con la calidad de vida de los habitantes de las ciudades.

En ciudades desérticas las afecciones por las altas temperaturas impactan de forma negativa en la salud pública. De acuerdo con la Secretaria de Salud Pública en México (ss, 2009), hay estados en el país que registran mayor nú-

³ Dicho de un organismo vegetal adaptado a la vida en un medio seco (Real Academia Española, 2001).

⁴ El paisaje méxico es aquel perteneciente a un hábitat caracterizado por una moderada cantidad de agua (Real Academia Española, 2001).

⁵ *Isla Fría Urbana (urban cool-islands)*: definido por Chi-Ru, Ming-Huang y Shyh-Dean (2007) como el resultado de áreas más frías que sus alrededores. De acuerdo con Rasul, Balzter y Smith (2015), la isla fría se describe como suelos que exhiben temperaturas superficiales más bajas en comparación con un entorno seco no urbanizado.

mero de defunciones por el calor natural excesivo: Baja California, San Luis Potosí, Veracruz y Sonora. Destaca este último en primer lugar con una tasa de mortalidad en un periodo de 20 años.

Rosenzweig *et al.* (2006) enfatizan que en un clima árido la exposición a temperaturas extremas favorece la presencia de golpe de calor, quemaduras solares, deshidrataciones e insolación. En la búsqueda por reducir las temperaturas urbanas, se espera como resultado disminuir el número de incidentes registrados de morbilidad y mortalidad por eventos relacionados con calor extremo.

Es así que los beneficios ambientales de la mitigación de la ICU están directamente relacionados con los aspectos en temas de salud pública, ya que, al brindar mejoras en la calidad del aire, en consecuencia el índice de enfermedades respiratorias, infecciones en los pulmones y alergias disminuiría (Healthy Air Living, 2011). Cabe destacar que, de acuerdo con el Consejo de Salubridad General (CSG, 2012) y la World Meteorological Organization (WMO), se estima que el número de muertes relacionadas con el calor extremo se duplicará en los próximos años y, según las previsiones de Intragovernmental Paneling Climate Change (IPCC), se producirán cambios climáticos por la existencia de temperaturas máximas y mínimas más extremas en la historia.

En relación con los beneficios energéticos y financieros, los trabajos de Sproken *et al.* (2000) reportan que los parques reducen la temperatura urbana y, por ende, provocan islas frías. Mientras tanto, Sugawara *et al.* (2008) miden la distribución horizontal y vertical de la temperatura del aire alrededor de un parque en el centro de Tokio y evalúan la cantidad de aire fresco que produce en verano. Los resultados muestran que las características de los parques influirán en la cantidad de aire fresco obtenido: en el parque estudiado se estimó que la energía máxima de enfriamiento fue de 5 Wm^{-2} , que corresponde a 1 000 unidades de aires acondicionados a escala de una habitación. Sin embargo, las estrategias no se limitan a la vegetación. Kolokotroni *et al.* (2006) estiman que un edificio optimizado con ventilación adecuada en una zona urbana reduce 10% la demanda de aires acondicionados, lo cual trae beneficios económicos y ambientales.

Según Santamouris M. (2014) los beneficios de reducir el consumo de energía dependen del clima local, el diseño urbano y las características del

edificio. De igual modo, el trabajo realizado por Healthy Air Living (2011) comprueba que el consumo energético disminuye al sombrear las superficies de los edificios. Argumenta que las superficies reflejantes en la envolvente del edificio, techos y pavimentos tienen un potencial de reducción de uso de energía de 10% a 40%, lo que se traduce en ganancias económicas. Así, se propone el uso de vegetación urbana arbórea como estrategia de sombreadamiento, en lo cual hay beneficios por costo de la implementación de este elemento, como se observa en la tabla III.2. El costo anual de un árbol va de \$15 a \$65 dólares; incluye la compra, el mantenimiento y el costo de riego, todo lo cual indica para el edificio ahorros de 7% a 47% por la sombra vegetal. Otros estudios demuestran que los árboles reducen la temperatura del aire desde 2 hasta 4 °C y promueven el uso de varias medidas de mitigación combinadas; por ello los programas de árboles en las ciudades tienen un costo-beneficio de 1.5 a 3.0 por cada dólar invertido en los Estados Unidos.

TABLA III.2. Costo-beneficio de estrategias de mitigación

<i>Medida de Mitigación</i>	<i>Potencial de enfriamiento</i>	<i>Costo</i>	<i>Beneficios adicionales</i>
Vegetación	1.00 – 9.00 °F (0.50 – 5.00 °C)	Entre 15 y \$65 dólares por árbol cada año	Estética
Techos fríos	0.60 – 1.40 °F (0.30 – 0.80 °C)	Entre 0 y 7 % más alto que un techo convencional	Ahorro de energía
Pavimentos claros	0.50 – 3.00 °F (0.27 – 1.70 °C)	Entre 10 y 20 % más alto que un pavimento convencional	Conservación de agua
Techos verdes	0.20 – 3.50 °F (0.10 – 1.90 °C)	Entre 88 y 93 % más alto que un techo convencional	Durabilidad del techo

FUENTE: Healthy Air Living (2011).

De acuerdo con Healthy Air Living (2011), en la ciudad de Sacramento, California, con una latitud de 38.58 °N y 121.49 °O, se llevó a cabo un proyecto con el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBNL, por sus siglas en inglés), en el que se encontró que los edificios con techos fríos consumen 40% menos energía para enfriar que aquellos con techos convencionales; reducen el pico de consumo energético y ayudan a reducir la contaminación, con lo que se disminuyen los gases de efecto invernadero, y, a pesar de que el costo es más alto que un techo convencional, ya que se le agregan acabados con propiedades para hacerlos reflejantes, el beneficio económico se compensa una vez que entra en operación el edificio.

En cuanto a los techos verdes, también es relevante esta estrategia en las ciudades, de acuerdo con la Agencia Gubernamental del Valle de San Joaquín, California (Healthy Air Living, 2011). Esta agencia expone que las ventajas se traducen en reducción de la temperatura urbana, mejora la calidad del aire, amortiguamiento de sonidos, incremento del valor estético y uso del techo verde como huerto y productor de alimentos. De acuerdo con el programa, un techo verde reduce el uso de la energía del edificio a 10%. El costo inicial de un techo verde extensivo es de 10 dólares por m² y el de uno intensivo es de 25 dólares por m²; resulta más costoso, pero tiene mayor durabilidad.

Como se ha estado mencionando, las medidas de control de la temperatura urbana buscan mitigar las ICU nocturna y diurna, lo que trae beneficios económicos, a la salud y a la calidad de vida de los habitantes. Además, con la implementación de este tipo de medidas, se busca el rescate de las actividades urbanas en espacios públicos y la cohesión social mediante una mejora en el confort térmico en espacios exteriores.

El desafío, entonces, está en explorar las estrategias de enfriamiento por vegetación urbana, que se encuentran condicionadas por el recurso hídrico, el cual típicamente es limitado en estos asentamientos (por lo que se vuelve un reto integrarlas), así como en la infraestructura urbana sustentable, la reducción de calor antropogénico y la elección de medidas que sean más efectivas en ciudades desérticas, caracterizadas por una intensa radiación solar diurna y una ICU nocturna (Wang *et al.*, 2016). Estas estrategias se abordarán en los siguientes apartados.

Infraestructura urbana sustentable: una alternativa de resiliencia urbana

De acuerdo con Hansen *et al.* (2017), la infraestructura urbana sustentable (UGI, por sus siglas en inglés) tiene como objetivo desarrollar una red de espacios verdes mediante vegetación y cuerpos de agua en las áreas urbanas, considerando la biodiversidad para adaptarse al cambio climático y procurando una mejor cohesión social. El enfoque para la planeación de este tipo de infraestructura se basa en cuatro principios: (a) integración de espacios

verdes al entorno urbano, (b) conectividad de espacios verdes, (c) multifuncionalidad de servicios y (d) inclusión social para una participación colaborativa.

Por su parte, Giguère (2009) expone que el uso de la infraestructura urbana sustentable ha sido un apoyo en la arquitectura, urbanismo y planeación urbana para mitigar efectos en el medio ambiente como la ICU, donde principalmente el uso de suelo, los tipos de superficies en suelos y techos, el manejo de agua pluvial, los suelos permeables y las medidas para reducir el calor antropogénico forman parte de los principales elementos de aplicación.

Algunos trabajos analizan el impacto de estas medidas a escala planetaria y otros lo hacen a nivel local; en ellos se estudian conceptos como la emisividad,⁶ que da a conocer la radiación emitida, y el albedo,⁷ que es una de las técnicas propuestas más importantes para mitigar el fenómeno en el ambiente urbano. El albedo se representa en escala del 0 al 1, donde un 0.70 significa un alto albedo que refleja una gran cantidad de radiación solar, mientras que la emisividad representa la propiedad del material para emitir la energía acumulada, la cual no se emite y contribuye al calentamiento de la superficie. Un valor alto de emisividad corresponde a una temperatura de superficie menor (Santamouris, 2014).

Por otra parte, Akbari H. (2005) destaca que las superficies urbanas típicamente son oscuras y poseen menos vegetación que sus alrededores rurales. Estas diferencias afectan al clima, el uso de la energía y la habitabilidad de las ciudades. A continuación, en la tabla III.3 se muestra el albedo y la emisividad de algunos materiales que podemos encontrar en las zonas urbanas.

⁶ La emisividad de una superficie representa la razón entre la radiación emitida por la superficie a una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. Se representa con la letra ε y varía entre 0 y 1. Es una medida que señala cuán cerca se aproxima una superficie a un cuerpo negro (Cengel y Ghajar, 2011).

⁷ Es la relación entre la cantidad de radiación solar reflejada por un cuerpo y la cantidad incidente sobre ella. Se representa con la letra griega α (Oke, 1987).

Control del impacto térmico en las edificaciones

En el caso de los edificios algunos estudios sugieren incorporar elementos de protección solar y materiales con alta reflectividad (albedo) y con alta emisividad para emitir la energía acumulada y evitar el calentamiento de las superficies; además, habría que añadir la aplicación de sistemas pasivos que ayuden a proteger las edificaciones del sobrecalentamiento de verano, principalmente en climas desérticos. El objetivo es cuidar los puentes térmicos que se generan en una edificación y el manejo de la inercia térmica, definida como la capacidad para almacenar calor y liberarlo en un periodo de tiempo. El manejo adecuado de los flujos de calor mediante el diseño térmico de los edificios radica en el adecuado balance entre la velocidad de penetración del calor (difusividad) y la capacidad del material para absorber y liberar calor (efusividad).

TABLA III.3. *Albedo y emisividad en materiales*

<i>Material / Superficie</i>	<i>Emisividad (ϵ)</i>	<i>Albedo (α)</i>
Aluminio pulido	0.10	0.90
Concreto seco	0.90	0.20
Asfalto	0.95	0.05
Madera oscura	0.95	0.15
Ladrillo rojo	0.90	0.30
Mármol blanco	0.90	0.60
Pintura blanca	0.90	0.80
Yeso	0.90	0.90
Área urbana de ciudad (mesoescala)	0.95	0.15
Desierto (mesoescala)	0.98	0.40
Área verde (mesoescala)	0.90 – 0.95	0.16 – 0.26

FUENTE: Elaboración propia con base en Giguère (2012) y Oke (1987).

La envolvente de los edificios, de acuerdo con Giguère (2009), para garantizar el mínimo calor transmitido, deberá tener baja difusividad y alta efusividad. Los materiales de alta inercia térmica tienen la propiedad de acumular y almacenar el exceso de calor, lo cual previene que se caliente el ambiente. Ese exceso de calor se libera horas más tarde, cuando el ambiente sea más fresco, como lo hacen la piedra, el concreto, la tierra y el ladrillo. Reemplazar materiales oscuros por unos de alto albedo, como en el caso

de acabados claros en la envolvente, es más eficiente en lo referente a una menor absorción del calor.

Los puntos débiles de las edificaciones son las ventanas y aperturas; por ello se recomienda el uso de ventanas dobles o triples con aire entre ellas, junto con adhesivos plásticos o películas que bloqueen 98% de radiación ultravioleta (UV) y 75% de radiación solar. Hay que evitar tragaluces por el efecto invernadero causado y, muy importante, promover el uso de elementos fijos para sombrear ventanas y muros, como cubiertas, pergolados, persianas, balcones, pórticos y sistemas móviles, como pérgolas, persianas y toldos.

Infraestructura en caminos y pavimentos claros

Las calles como elementos jerárquicos de la estructura de las ciudades son una figura condicionante del desarrollo y crecimiento de las urbes. Actualmente tienen relevancia para su planeación en las políticas públicas de la movilidad urbana. Se componen de la vialidad vehicular, ciclovías, banquetas para el desplazamiento peatonal, imagen urbana y mobiliario urbano.

La práctica de pavimentar las calles con asfalto comenzó a finales del siglo XIX como consecuencia de la urbanización, pero incrementó las temperaturas por asoleamiento y acumulación de calor. El pavimento representa un porcentaje significativo de área cubierta en una ciudad, conformada regularmente por vialidades y estacionamientos cubiertos con asfalto o algún otro material obscuro que absorbe mayor calor proveniente de la radiación solar. En días cálidos estas superficies pueden llegar hasta a 80 °C, lo que contribuye a la formación de la ICU (Asaeda *et al.*, 1994). Proponer mejoras en los materiales de los caminos o sustituir pavimentos por unos con albedo más alto es una estrategia de infraestructura urbana prometedora que presenta un alto potencial de mitigación de ICU, siempre que se tome en cuenta que el aumento debe ser el óptimo para evitar problemas de deslumbramiento (Giguère, 2009).

Es complejo estimar el albedo en las calles porque éstas usualmente están cubiertas de autos a causa del tránsito; por ello Akbari H. (2005) sugiere el uso de pavimentos reflectivos en vialidades de tráfico ligero, ya

que actualmente el asfalto se compone de 85% de agregados minerales y 15% de materiales bituminosos, que son sustancias de color negro. Una alternativa para aumentar el albedo es extender una fina capa de material bituminoso y colocar un agregado de alto albedo para incrementar la reflectividad solar de la superficie expuesta, para reducir la temperatura del pavimento.

Por otro lado, Winkelman (2005), Synnefa *et al.* (2008) y Maillard (2009) recomiendan mantener superficies frescas aplicando una capa de concreto de 2.5 a 10 cm de espesor sobre la superficie de una carretera, ya que el concreto tiene un albedo mayor (0.30 a 0.40 cuando es nuevo). Además, Akbari H. (2005) manifiesta que el uso de pavimento permeable es otra opción, ya que permite el paso del agua, aire y vapor y posibilita absorber la radiación y mantenerse fresco. Puede ser asfalto poroso, asfalto de caucho, concreto permeable, ladrillos o adoquín.

En un clima árido, en condiciones altas de soleamiento, bajo situaciones bajas de viento, la temperatura de una superficie opaca con reflectancia solar de 0.05 es de 50 °C mayor que la temperatura del aire, mientras que con una de 0.8 el aumento de la temperatura del aire es solamente de 10 °C (Synnefa *et al.*, 2008). En caso de que el diseñador prefiera una paleta de colores más oscuros, o bien si se requiere el uso de productos de color blanco, se están desarrollando en Estados Unidos pigmentos especializados de todos colores reflectantes para evitar problemas de deslumbramiento.

Estos pavimentos claros o fríos ayudan a reducir la temperatura de la superficie y del ambiente y ayudan a disminuir la demanda de electricidad por aire acondicionado en los edificios adyacentes, a decrecer la contaminación en el ambiente y a ampliar la durabilidad del pavimento.

Techos fríos o techos reflejantes

El trabajo titulado de Santamouris M. (2014) revela que la superficie de los techos representa una alta fracción de exposición urbana a la radiación solar. En este caso se posee un excelente espacio para aplicar estrategias de mitigación al fenómeno de la ICU. El uso de techos fríos o reflejantes y techos verdes es una técnica que disminuye la temperatura superficial de la azotea y reduce el calor emitido a la atmósfera.

De acuerdo con la iniciativa Healthy Air Living (2011), los techos fríos reflejan la radiación solar y esto posibilita que absorban menos calor. En un día típico, en techos convencionales se alcanzan temperaturas de 65 a 82 °C, mientras que los materiales altos en reflexión se elevan de 5 a 10 °C sobre la temperatura ambiente. Con esto el costo de la energía para enfriar el interior del edificio disminuye, se contribuye a reducir la contaminación por efecto invernadero, el consumo energético en hora pico cae, se incrementa el valor de la propiedad y la salud y el confort de los habitantes mejoran. En el mismo orden de ideas, el trabajo de Giguère (2009) registró que un techo negro puede alcanzar 80 °C, uno blanco 45 °C y un techo verde 29 °C en un día soleado a 26 °C de temperatura ambiente. Existen distintos tipos de techos fríos; los hay en superficies inclinadas o planas y se dividen en tres: el primero con revestimiento claro, ideal para remodelaciones, compuesto de partículas de cemento y polímeros con un albedo de 0.65 o mayor; el segundo con revestimiento de acrílicos, como capas de lámina blanca, alquitrán y grava, azulejo; el último con revestimientos de aluminio.

La literatura analiza distintos materiales y prueba sus propiedades ópticas y térmicas, de las cuales depende su clasificación como fríos cuando pueden mantener las superficies con menor temperatura que otros materiales. Se realizaron simulaciones en Atenas, Grecia, por parte de Synnefa *et al.* (2008), quienes encontraron que implementar superficies con albedos altos a gran escala puede reducir la temperatura del aire en 2 °C. Por otra parte, Akbari H. (2005) reporta ahorros de hasta 46% en aulas, de 12% a 18% en edificios comerciales y estimó una reducción de ozono de 10% a 20% en monitoreos de simulación térmica, aplicando la estrategia en edificios y entornos urbanos de California. Cuando el albedo de los techos reflejantes es igual o mayor a 0.7, representa mayor mitigación que los techos verdes, pero albedos de entre 0.3 y 0.5 no son buenos. Además, Santamouris M. (2014) refiere que el clima árido tiene una participación considerable en esta medida, ya que los techos reflejantes presentan mayor ventaja que uno verde debido a que este último contiene tierra de suelo árido o desértico y, además, está condicionado por el tipo de vegetación que se seleccionará

Si bien ambas tecnologías presentan un potencial de mitigación alto, varios estudios evalúan la efectividad de la estrategia en las superficies de

las azoteas y concluyen que los techos reflejantes funcionan como un aislamiento térmico que contribuye a disminuir el uso de energía del edificio para refrescar los espacios interiores y, en consecuencia, reducir la temperatura superficial. No obstante, se debe tomar en cuenta que, si se cambiaran todas las superficies para que sean reflejantes y de alto albedo, se generaría deslumbramiento e incomodidad visual; por ello se debe tener un nivel razonable y aplicar esta estrategia mayormente en los techos y, en menor cantidad, a nivel calle. Aun así, hoy en día, de acuerdo con Akbari H. (2005), se transita en calles con concreto de albedo 0.35 o similar y no se registran accidentes por esa causa.

Características del ambiente construido

De acuerdo con González y Larralde (2019), se define el término *forma urbana* como la ciudad física construida con su morfología, y se compone de siete atributos que la caracterizan: (a) superficie urbana, (b) policentralidad, (c) compacidad, (d) densidad, (e) distribución del empleo, (f) diversidad y (g) traza urbana. Estudiar estas características permite a los planeadores urbanos planificar y diseñar la urbe. Para efectos de esta investigación la superficie urbana es el indicador sobre el que se busca impactar con estrategias de mitigación verde y azul, como las circulaciones de la ciudad y la combinación de la infraestructura de vegetación y agua, para incrementar el efecto de enfriamiento evaporativo y promover medidas que busquen el confort térmico de una localidad.

Akbari H. (2005) habla acerca de la plantación de vegetación y el uso de superficies de alto albedo para reducir la temperatura de verano, lo que contribuye directamente a alterar el balance de energía de manera favorable. Giguère (2009) sugiere que ubicar áreas verdes que sean de fácil acceso (a menos de veinte minutos de la zona habitacional) y diseñar caminos arborizados cómodos para los peatones y espacios abiertos vegetados (que contribuyan a la ventilación y enfriamiento del viento) aportan beneficios para la vida urbana. Igualmente argumenta que debe buscarse una efectividad del uso de suelo mixto con el fin de fomentar la actividad y propiciar el acceso a zonas recreativas y a distintos servicios comerciales, lo cual disminuiría el uso del automóvil. Además, habría que tener centros fríos accesi-

bles; e instalar puntos húmedos en áreas verdes, con pozos, estanques, lagos y protecciones solares en espacios públicos, es esencial para proveer alivio a la población ante los efectos adversos de las olas de calor.

Por su parte, Nikolopoulou (2004) ratifica que la morfología urbana define la capa que compone la ICU, donde la contaminación y el calor quedan atrapados entre el suelo y la atmósfera. Esta correlación entre morfología urbana y microclima se ha establecido en numerosos estudios; de aquí la importancia en la aplicación de estrategias de mitigación en el ambiente construido.

Incorporación de la vegetación en el entorno urbano árido

En climas áridos los efectos de las ICU tienen más impacto debido a que presentan mayor vulnerabilidad ambiental; por esta razón se hace necesario incluir en el paisaje urbano espacios forestados para obtener el máximo aprovechamiento para la población. Es bien sabido el beneficio de la vegetación urbana por el enfriamiento evaporativo, además del sombreado de superficies. Se presenta como una de las principales herramientas de resiliencia a las altas temperaturas y, por consiguiente, está vinculada con la calidad de vida de los asentamientos urbanos; pese a ello, ¿qué tan efectivos son los resultados de la vegetación en un clima desértico? ¿Será esto el motivo primordial para la selección y ubicación de las especies vegetales?

Partiendo de la premisa de que hoy en día existen mayores proporciones de superficies artificiales que impactan la cobertura del suelo (LULC, por sus siglas en inglés),⁸ y después de analizar la temperatura superficial del suelo (LST, por sus siglas en inglés),⁹ se piensa en el uso de la vegetación como una opción para mitigar el efecto de la ICU. Numerosos estudios revelan que el uso de vegetación es una estrategia efectiva para reducir la intensidad de fenómenos asociados con el cambio climático. Los trabajos de Shishegar (2014) y la iniciativa Healthy Air Living (2011) sugieren que se modera el clima urbano gracias a las áreas verdes. Estos estudios desarrollan metodo-

⁸ LULC: *land use land cover*.

⁹ LST: *land surface temperature*.

logías a nivel macroescala, utilizando información meteorológica e imágenes satelitales; a nivel microescala con mediciones en campo, y a nivel matemático con cálculos numéricos.

Ahora bien, la literatura compara la efectividad del uso de vegetación con respecto a los materiales que la rodean. La investigación de Onishi *et al.* (2010) en Nagoya, Japón, con latitud 35.18 °N y 136.90 °E, revela que en el periodo de verano, a mediodía, la temperatura superficial del concreto en un estacionamiento era 15 °C mayor que en uno de césped. Otros autores, como Rosenfeld *et al.* (1993), estudiaron en la ciudad de Sacramento, California, de latitud 38 °N y 121 °O, los efectos de las superficies claras y los de la vegetación, para demostrar que las primeras, en algunos casos, son más efectivas que los árboles por unidad para refrescar el ambiente, sobre todo por los resultados inmediatos, ya que el árbol tarda en llegar a su máximo crecimiento, mientras que cambiar el color sólo requiere recursos económicos y hay más áreas capaces de aplicar esta estrategia en comparación con la plantación.

A pesar de que se ha demostrado un beneficio con la utilización de la vegetación, Shishegar (2014) expone la relevancia de conocer las especies y estrategias que se han de utilizar, ya que, por mencionar algunas de las dificultades más comunes, el uso de árboles que mantienen aire bajo su copa impide que las superficies debajo de ella se refresquen por la noche. No obstante, la vegetación provee sombra a las superficies urbanas y enfría el aire mediante la evapotranspiración. Si se cuida la ubicación y tipo de flora, se maximiza el beneficio de mitigación (Healthy Air Living, 2011).

De acuerdo con Shishegar (2014), el follaje de un árbol logra bloquear de 60 a 90% de la radiación solar al interceptar los rayos incidentes, con lo cual se enfrían las superficies del suelo con sombra, cuya calidad depende de la densidad de los árboles. Estos estudios se realizaron en Países Bajos, Grecia y Japón. Por su parte Ruiz, Correa y Cantón (2012) en Mendoza, Argentina, con latitud 32.89 °S y 68.82 °O, plantean que, al utilizar la vegetación como medida de control para las temperaturas urbanas, se incrementan los niveles de humedad en el ambiente y se pierde calor por evapotranspiración, proceso por el que cede vapor de agua al ambiente y libera calor latente sin modificar la temperatura, función vital en la regulación de la temperatura del aire.

Por otra parte, localizada en la región del desierto de Sonora, con latitud 33.44°N y 112.07°O, la ciudad de Phoenix, Arizona, considera el desarrollo sustentable en la planeación urbana y lo enfrenta implementando estrategias de mitigación ante la ICU. Los trabajos de Wang *et al.* (2016) señalan el efecto de enfriamiento con diferentes tipos de vegetación e indican que el enfriamiento por la sombra del árbol es más significativo que por la evapotranspiración de los patios o jardines verdes de césped, conclusión a tomar en cuenta en un ambiente árido y semiárido, donde la sombra de los árboles y la cobertura de césped en patios son dos de las formas más populares de diseño de paisaje. Además, Giguère (2009) explica que la flora proporciona sombra sobre la infraestructura y minimiza las diferencias de temperatura del suelo. También provee otros beneficios, como una mejora en la calidad del aire (por la producción de oxígeno), la filtración de las partículas suspendidas, un control de la erosión del suelo, captación de agua de lluvia en el subsuelo, protección de rayos ultravioleta y reducción de estrés al proveer de espacios más habitables extramuros. Por su parte, Chow y Brazel (2012) indican que durante el invierno en una ciudad árida el efecto del enfriamiento evaporativo es mínimo por la ausencia de hojas de árboles y bajas temperaturas, pero en verano la arborización contribuye al enfriamiento, lo cual crea el efecto oasis.

De acuerdo con Rosenfeld *et al.* (1993), la vegetación como estrategia de mitigación no se limita sólo a la integración de flora urbana arbórea. También se hace presente en distintas acciones en materia de diseño, ya que posee diferentes mecanismos de enfriamiento. De acuerdo con esto, los puntos que se desglosan a continuación son algunas de las medidas con que se aplican estrategias de mitigación a las altas temperaturas urbanas.

Selección de especies

La óptima selección de especies vegetales permite maximizar los beneficios de las medidas de control a las altas temperaturas; de aquí que sea relevante eliminar árboles con potencial de alergias y seleccionar plantas de acuerdo con el uso, riego, raíces, tierra, ubicación, orientación y cobertura de asfalto por sombra, ya que estos aspectos tienen implicaciones en el resultado del uso de la vegetación como estrategia de mitigación.

En el caso de zonas áridas, de acuerdo con Chow y Brazel (2012), la importancia del método xerofítico con baja demanda de riego, con el uso del palo verde o mezquite chileno, ha sido aceptado en ciudades como Phoenix, Tempe, Mesa, Glendale, ubicadas en Arizona, en el desierto de Sonora, al suroeste de los Estados Unidos. La vegetación xérica con irrigación parsimoniosa presenta sombreado. Usualmente la sombra de los árboles bloquea directamente la radiación solar y se recomienda para clima desértico, aunque no aporta evapotranspiración por su escasa humedad. Cabe destacar, dentro de este tipo de vegetación, que las cactáceas, usadas en paisajismo en este tipo de entornos, aportan sombreado mínimo a las superficies. Por otro lado, los jardines de césped se encuentran comúnmente en un paisaje méxico, es decir, con moderado uso de agua. El césped enfría el ambiente principalmente vía evapotranspiración, distribuyendo la energía incidente en una superficie de suelo por el calor latente a la vaporización, pero requiere constante irrigación para mantener su función.

Un estudio realizado en la ciudad Mendoza, Argentina, por Enrique, Bochaca y Allende (2013) clasifica los árboles en primera y segunda magnitud en función de su altura, ancho de copa y robustez. La vegetación de magnitud 1 proporciona sombra en calles, que evita que la radiación solar alcance las superficies y reduce la temperatura ambiente en el día. La vegetación de magnitud 2 se refiere a la reducción de velocidad de viento. Los árboles retienen aire caliente bajo la copa, por lo que el enfriamiento nocturno es más lento. Se considera también que la temperatura de un césped sin sombra es mayor a la del entorno construido por la noche; además, el césped no bloquea el flujo del viento y no brinda sombreado. En el estudio se utilizó el *software* Rayman, que calcula la cantidad de calor que una persona podría recibir cuando se expone a la radiación del sol, para comparar las condiciones en sombra y dentro del edificio. Se calculó el índice de temperatura fisiológica equivalente (PET, por sus siglas en inglés) como el índice para comparar el estrés por calor y el confort térmico humano en áreas como parques, zonas rurales abiertas y calles urbanas con diferentes copas de árboles y distintas sombras.

A continuación se mencionarán distintos elementos de aplicación en vegetación urbana junto con sus características.

Muros y techos verdes

De acuerdo con el trabajo de Giguère (2009), los muros verdes son ecosistemas que mejoran la eficiencia energética del interior del edificio, con lo que incrementan la masa térmica de las paredes exteriores y evitan la radiación solar directa. Al mismo tiempo, limpian el ambiente de partículas suspendidas y protegen el inmueble de posible vandalismo. Pueden ser fachadas verdes que incluyen enredaderas de hasta 30 metros o muros vivos, es decir, con las plantas adosadas al muro.

En ese orden de ideas, Shishegar (2014) argumenta que los techos verdes reducen la cantidad de calor transferido al interior del edificio; los árboles aportan evapotranspiración y sombra y enfrían el ambiente exterior, lo cual mejora la calidad del aire. Al mismo tiempo, se protegen los materiales de las azoteas extendiendo su vida útil y se minimiza el uso de aire acondicionado. Esta estrategia es una práctica común en Alemania, Japón y Estados Unidos. Por su parte, Hien *et al.* (2007) encontraron, en un estudio en Singapur, que la temperatura superficial de un techo verde es 18 °C más baja que uno convencional.

TABLA III.4. *Techos verdes intensivos y extensivos*

<i>Características</i>	<i>Techo extensivo (plantas de poco mantenimiento)</i>	<i>Techo intensivo (árboles y cobertura de suelo)</i>
Peso	Ligero Soporta peso adicional de 30 a 100 kg/m ²	Pesado Soporta peso adicional de 120 a 300 kg/m ²
Costo	Entre 100 y \$150 dólares/m ²	Supera los \$1 000 dólares/m ² , dependiendo de la selección de plantas
Función	Ecológico Se adapta a grandes áreas (industrial)	Uso recreacional y agricultura urbana. Se adapta a pequeñas y medianas superficies
Tipo de crecimiento	Ligero, poroso, orgánico	Ligero a pesado, poroso; varía en cantidad y es orgánico
Espesor	2 a 20 cm	30 cm o más
Tipo de vegetación	Vegetación resistente a climas extremos	Sin restricción. El tipo de techo se adapta a los árboles
Mantenimiento	Limitado	Moderado. Parecido a un jardín convencional
Accesibilidad	Poco frecuente, sólo para mantenimiento	Accesible para recreación y jardinería

FUENTE: Recuperado de Giguère (2009).

Típicamente las capas que componen estos techos se disponen así: la estructura principal, una capa de aislamiento, otra de impermeabilizante, una membrana de protección de raíces, una sección de drenado y filtración, seguida de una membrana geotextil para retener la tierra y, finalmente, la capa vegetal. Esto depende de las características de diseño del techo verde, ya que, como hace notar Giguère (2009), éstos se clasifican en dos categorías: techos verdes extensivos y techos verdes intensivos. Los primeros incluyen suculentas, plantas que necesitan poco mantenimiento o intervención humana y que son las mejores en cuanto a su estructura; mientras tanto, los intensivos son plantas y árboles con cobertura de suelo que crean un ambiente de jardín, requieren riego y mayor apoyo estructural. A continuación se presenta una comparativa entre los techos extensivos e intensivos.

El trabajo de Santamouris M. (2014) plantea que los techos verdes son más efectivos cuando la altura de los edificios es menor a 10 metros y afirma que esta medida es más significativa durante el día. También indica que estas azoteas presentan similar o mayor mitigación que los techos reflejantes si el calor latente perdido excede los 400 W/m^2 , lo que es posible con un buen riego, aunque en climas desérticos es algo difícil de alcanzar.

Perímetros verdes

Tomando en cuenta que se han seleccionado las especies adecuadas con respecto al clima, Giguère (2009) sugiere sembrar o incrementar la forestación en los perímetros de edificios, caminos y calles de la vida urbana, ya que protege en gran medida la radiación solar directa, reflejada y difusa que incide sobre la superficie terrestre; con ello se mantienen suelos frescos y sombreados. Además, explica que la sombra de los árboles proyectada sobre las fachadas reduce la transferencia de calor al edificio, lo que mejora la eficiencia energética al interior de éste. También señala que hacer uso de los muros y techos verdes, en conjunto con perímetros verdes, mejora la eficacia de esta estrategia.

La implementación de esta medida beneficiará a los habitantes de las ciudades en sus recorridos urbanos, incentivará a las comunidades a caminar y disfrutar de las ciudades y permitirá crear espacios públicos de cohesión social, así como puntos frescos a lo largo de los caminos.

Estacionamientos verdes

Cambiar el paradigma de los estacionamientos actuales, construidos habitualmente con concreto o asfalto, es el objetivo de esta medida de control. Hablamos de proponer aparcamientos verdes que contribuyan a reducir el área de asfalto, así como superficies de bajo albedo, de manera que se pueda incluir en su diseño vegetación arbórea para sombrear las superficies, a fin de disminuir las temperaturas superficiales y proteger la vida útil del material. También es posible incluir otros materiales permeables o concretos perforados que permitan el crecimiento de pasto o árboles para sombrear las superficies. Los trabajos sobre este tema son amplios gracias al programa Cool Communities en los Estados Unidos, del cual varias zonas forman parte; una de ellas es California, donde Pomerantz *et al.* (2003) reportan durante meses la temperatura superficial de los edificios de estacionamientos en sus paredes y techos con árboles. La temperatura máxima fue de entre 11 a 25 °C. Por otra parte, McPherson (2001) muestra que, en Sacramento, California, la temperatura de un auto bajo la sombra es 7 °C menor y plantea que los árboles son esenciales para moderar el calor ganado por los estacionamientos de asfalto; ejemplifica esto con un estacionamiento en Davis, California, donde se redujo la temperatura del aire de 0.5 a 1.5 °C.

La modernización de los estacionamientos convencionales actuales para que incluyan vegetación es una propuesta a largo plazo, pero dar a conocer estas estrategias es fundamental para que sean incluidas en las políticas públicas de las ciudades y para que, al mismo tiempo, diseñadores de estacionamientos adopten esta estrategia para proyectos futuros.

La vegetación como barrera contra vientos áridos

Como lo hace notar Akbari H. (2002), en la ciudad de Phoenix, Arizona, otro de los beneficios que aporta la infraestructura verde es que, al situar vegetación continua o en masas, ésta actúa como rompevientos, es decir, disminuye la velocidad y la disposición de calor en las superficies. En climas cálidos o desérticos la infraestructura verde es excelente para evitar vientos calientes y tormentas de arena en zonas urbanas. Por otra parte, Puliafito, Bochaca y Allende (2013) relacionan el viento nocturno con la formación

de la ICU y afirman que es fundamental el flujo de viento en el proceso de enfriamiento urbano, por lo que es importante conocer su velocidad, dirección y temperatura para que sea aplicada esta estrategia de manera óptima.

Estrategia de planeación y diseño urbano verde

En la opinión de Ruiz, Correa y Cantón (2012), el objetivo principal de la estrategia de planeación y diseño urbano verde en zonas áridas es el incremento de la forestación en la estructura urbana, entendida como corredores, camellones, banquetas y vialidades, principalmente en una configuración densa con edificios alrededor, así como un aumento de estructura paisajística en parques, áreas verdes, patios, escuelas y propiedades públicas. Los autores exponen características que influyen en la temperatura urbana, por ejemplo el acceso del viento y la materialidad de los espacios.

Por otra parte, Chow y Brazel (2012) destacan la importancia de estimular al sector privado a utilizar o incrementar vegetación en los perímetros de los edificios y banquetas. Ubicar un árbol, un conjunto de árboles o un espacio vegetado es valioso para el ambiente desde la perspectiva ambiental, económica y social, ya que la presencia de espacios verdes se relaciona con la calidad de vida de los habitantes de las ciudades.

Bosques urbanos, parques urbanos y arbolado vial

Desde el punto de vista urbano, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) (FAO, 2017) define *bosque urbano* (UE, por sus siglas en inglés) como las redes o sistemas que comprenden los bosques, grupos de árboles y árboles individuales ubicados en áreas urbanas y periurbanas; por lo tanto, se incluyen bosques, árboles en calles, parques y jardines e inclusive vegetación en lotes baldíos. Estos bosques urbanos son la columna vertebral de la infraestructura verde, pues a ellos se unen áreas rurales y urbanas, y esto aporta beneficios económicos ambientales y socioculturales. El trabajo de Shishegar (2014) define los bosques urbanos como la arborización o espacios vegetales en línea o en grupos. Los principales beneficios que se enfatizan son las

reducciones de emisiones de carbono, superficies sombreadas por la copa de los árboles y un menor uso de la energía al interior de los edificios. Esos elementos en conjunto logran una reducción en las temperaturas urbanas.

Dentro de la red de la infraestructura verde se incluyen distintos componentes, como parques, plazas, árboles en calles, cementerios, complejos deportivos, entre otros. De acuerdo con Konijnendijk *et al.* (2013), los parques urbanos (UP, por sus siglas en inglés) se definen como áreas abiertas públicas que incluyen un porcentaje de vegetación notable, y Shishegar (2014) señala que estos espacios reducen la temperatura de los alrededores hasta en 4 °C, con lo que generan un fenómeno llamado *Isla Fría Urbana*, definida por Chi-Ru, Ming-Huang y Shyh-Dean (2007) como el resultado de áreas más frías que sus alrededores, donde en verano se registran reducciones de 3.8 °C y en invierno de 2 °C. La extensión del efecto de enfriamiento de un parque va de 800 a 1 000 metros a la redonda, con 1.3 °C de disminución en el día y 4 °C durante la noche.

Con respecto a la plantación de infraestructura arbórea en las calles, según la EPA (2009), la *arborización urbana en vialidades* (UST, por sus siglas en inglés) se refiere a la vegetación arbórea en las calles públicas municipales y también forma parte de la infraestructura verde de una ciudad. Esta vegetación tiene beneficios que promueven la sustentabilidad y ayudan a aliviar el estrés térmico de la población. Asimismo, Shishegar (2014) explica que, por la manera en que se ubican los árboles en las ciudades de manera dispersa, éstos inciden poco en el clima urbano, pero se tienen impactos significativos en la temperatura del aire en áreas urbanas cuando éstas son grandes, ya que durante el día la temperatura más baja del aire se encuentra bajo o alrededor de un árbol. Shishegar expone que, en un estudio realizado por Tsiros en Atenas, Grecia, una calle con vegetación densa y tráfico mínimo disminuye su temperatura hasta en 2.2 °C, mientras que un parque urbano reduce 4 °C la temperatura en sus alrededores. Con respecto a esto, Giguère (2009) señala que la presencia de vegetación en el cañón urbano modifica los factores radiativos entre elementos urbanos, como cielo, muros y suelo, interceptando radiación solar. Sugiere que colocar árboles en línea reduce 1 °C la temperatura circundante, mientras que diseñar parques en las ciudades, en lugar de edificios, reduciría la temperatura del aire entre 2 y 6 °C.

Por su parte, Puliafito, Bochaca y Allende (2013) verifican, a partir de mediciones meteorológicas fijas y móviles, que los árboles y parques mejoran el confort térmico por efecto de la sombra y evapotranspiración durante el día, al mismo tiempo que las calles arboladas retrasan el enfriamiento nocturno por retención de aire caliente debajo de sus copas.

Vegetación cubresuelo contra vegetación urbana arbórea

Es sabido que la temperatura del aire es más fresca sobre el césped que en el concreto. El trabajo de Onishi *et al.* (2010) evalúa su potencial como mitigador de la ICU en estacionamientos. Se muestran dos escenarios: un primero en donde habría que cubrir todo de césped y un segundo con 30% de árboles. El último es el más efectivo desde el punto de vista térmico.

Rosenfeld *et al.* (1993) han estudiado el comportamiento en el monumento White Sands, las arenas blancas, al sur de Nuevo México, Estados Unidos, y han encontrado que es muy claro con albedos de 0.65 y absorptividad de 0.65, con formación de dunas con vegetación. Por el contrario, el desierto circundante posee arbustos de color amarillo verdoso con un albedo de 0.2 a 0.4 y absorptividad de 0.6 a 0.8. Ahí se registraron temperaturas típicas de un desierto (40.5 °C) y se encontró en la zona de arenas blancas una temperatura de 5 °C menor.

En cuanto a los jardines de césped, el impacto del enfriamiento evaporativo tiene un efecto indirecto en la conducción de calor a través de los muros por reducción de la temperatura del aire y la reflexión de la radiación desde el suelo; mientras, los árboles pueden proveer de sombra directa en muros y hacer más significativo el efecto. Morfológicamente el césped cubre superficies horizontales, mas los árboles ocupan volúmenes tridimensionales. Por lo anterior se concluye que las áreas cubiertas de césped no son tan efectivas como los árboles en cuanto a enfriamiento y ahorro energético.

No obstante, los estudios realizados en zonas áridas y semiáridas por Akbari H. y Taha (1992) enfocan las mitigaciones por integración de vegetación urbana arbórea al uso habitacional, lo cual incrementa la cobertura de árboles por casa en 30% y aumenta 20% el albedo en las superficies.

Estas medidas generan ahorros de aire acondicionado de 10% y 35% respectivamente. Akbari H. *et al.* (1997) llevaron a cabo un experimento para medir el impacto de la sombra de ocho árboles grandes y ocho chicos en dos casas en Sacramento, California, Estados Unidos. La prueba documentó ahorros de 30%. Por su parte, Chow y Brazel (2012) señalan que la forestación urbana con árboles xerófilos, en el caso del área metropolitana de Phoenix, Arizona, altera el balance energético, ya que tiene el potencial de reducir el agua necesaria para riego y las temperaturas urbanas.

Entonces, en una ciudad desértica, la alternativa de infraestructura verde con árboles xéricos es una estrategia atractiva que se podría aplicar, ya que requiere menor irrigación y alivia el estrés térmico en distintos espacios públicos o privados, además de crear un ambiente habitable, cómodo y cercano al confort térmico urbano. La investigación de Giguère (2009) declara que, en Estados Unidos, en ciudades con más de 100 000 habitantes, el pico de electricidad aumenta de 1.5 a 2% por cada grado Fahrenheit que incrementa la temperatura. Por ello se han estudiado estrategias de control y aplicado en algunas localidades, donde se ha demostrado que la combinación de varias de ellas tiene un mayor efecto mitigador.

TABLA III.5. *Estrategias de mitigación y escenario*

<i>Estrategia</i>	<i>Escenario</i>
Forestación urbana	De pasto a árboles: menor plantación en espacio abierto Calle con árboles: menor plantación en el perímetro de las calles (acera) Pasto más árboles en las calles: menor espacio abierto y mayor perímetro en calle
Superficies claras	Techos de alto albedo: menos techos claros Implementar alto albedo: superficies claras horizontales
Techos fríos	Techo verde o reflejante
Infraestructura ecológica	Forestación urbana
Forestación urbana más techos claros	Pasto, árboles en la calle y techos fríos
Combinación de todas	50% de espacio abierto, más 50% en aceras, más 25% de techos fríos, más 25% de techos claros

FUENTE: Elaboración con base en Rosenzweig, Solecki y Solsberg (2006).

En cuanto al recurso hídrico, los trabajos de Wang *et al.* (2016) hacen mención de que incluir un plan estratégico de cuidados de agua es primordial cuando se considera implementar estrategias de forestación. Estas tácticas de forestación, individuales o en conjunto, buscan transmitir el efecto

de enfriamiento en la capa urbana para refrescar el aire y también reducen la radiación térmica reflejada del suelo a los muros y otros elementos vegetales: la interceptan por las sombras de los árboles directamente, lo que disminuye la temperatura de la superficie vertical y horizontal del perfil urbano.

La aplicación de estas estrategias, además de reducir las temperaturas urbanas, ayuda a disminuir la contaminación, el costo de la energía y los gases de efecto invernadero; incrementa el valor de la propiedad, y brindan a la comunidad jardines o parques, lo que hace la ciudad más habitable.

Aprovechamiento y manejo sustentable de agua pluvial

Hay estudios que demuestran la relación entre la humedad del suelo y la mitigación de la ICU mediante la evapotranspiración del suelo húmedo por un proceso de enfriamiento del aire similar al que propicia la vegetación. Captar agua pluvial por medio de los techos verdes o las superficies permeables, que permitan la infiltración a través de concreto poroso o de materiales como adoquines y piedra, ayuda a recibir y conducir las gotas de lluvia para drenarlas hacia el suelo y posibilitar el uso del enfriamiento evaporativo para la disminución de la temperatura ambiente.

Más allá de eso, es necesario planear un adecuado sistema de manejo del agua pluvial a nivel urbano que permita captar, conducir, infiltrar, almacenar el agua y controlar los efectos de las tormentas en los desiertos, las cuales suelen caracterizarse por un alto volumen de precipitación en un periodo corto de tiempo. Los efectos no controlados de estas lluvias pueden producir problemas relevantes; por ejemplo, una elevada escorrentía y acumulación de agua en sitios no deseado de la ciudad, como calles y zonas habitacionales, todo lo cual se debe evitar. De este modo, se aprovechará el agua de lluvia, entre otros beneficios, con el fin de mitigar los efectos de la ICU, ya sea por evapotranspiración o para riego de la vegetación urbana, en lugar de padecer sus efectos.

El surgimiento de la *infraestructura verde* es parte importante del manejo del agua, entendida como “*la combinación creativa de estructuras naturales y artificiales (azules, verdes y grises) con la intención de alcanzar*

metas específicas de resiliencia con amplio apoyo del público y atención al principio de tecnología apropiada” (Staddon *et al.*, 2018). Es la infraestructura compuesta por cuerpos de agua, zonas con vegetación y estructuras artificiales, como pavimentos con pendiente, cisternas, cortes en banquetas, etcétera, que ayudan a manejar, conducir y almacenar agua de lluvia.

A microescala, elementos de infraestructura verde, como jardines de lluvia, jardines de microcuencas, glorietas, pavimentos permeables, presas filtrantes, cisternas, techos y muros verdes (IMPLAN, 2018) permiten conducir y aprovechar el agua de lluvia en áreas verdes de parques, zonas habitacionales y vialidades, además de reducir la escorrentía. A macroescala, la planeación y creación de cauces de arroyos, canales, bordos, corredores biológicos y humedales hace posible el manejo del agua urbana a nivel zonal, a fin de conducirla y almacenarla, ya sea para alimentar los mantos acuíferos, controlar el clima urbano o aprovecharla con fines recreativos. Además, se puede tratar el agua almacenada e incorporarla a la red hidráulica urbana para uso de la población, ya sea en una red de riego o como agua potable.

FOTOGRAFÍA III.1. “Oreja” en vialidad de Tucson, Estados Unidos, para disminuir la escorrentía y almacenar agua para irrigación de área verde.



FUENTE: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA III.2. Sweetwater Wetlands en Tucson, Estados Unidos. Humedal que almacena agua pluvial de toda la ciudad y sirve como espacio recreativo.



FUENTE: Elaboración propia.

Por otro lado, la aplicación en el diseño de espacios exteriores de elementos paisajísticos que utilizan el agua a manera de control climático, como fuentes, espejos de agua, micronizadores, etcétera, posibilita la disminución de la temperatura ambiente local debido al efecto del enfriamiento evaporativo. Esta reducción de la temperatura es más efectiva cuanto

menor es la humedad relativa y cuanto mayor es la radiación solar (Oke, 2017), situación frecuente en los desiertos. Los grandes cuerpos de agua tienen, además, gran capacidad para almacenar calor y moderar las oscilaciones de temperatura, ya que aumentan la inercia térmica de todo el entorno (Gunawardena *et al.*, 2017).

Para aplicar estrategias de diseño microclimático, como se mencionó, es necesario planear sistemas urbanos de captación de agua de lluvia, infiltración y almacenamiento, que posibiliten el aprovechamiento del agua.

Reducción de calor antropogénico

De acuerdo con Allen, Lindberg y Grimmond (2011), la actividad antrópica y el calor metabólico van en función del número de habitantes y del promedio metabólico; además, las actividades en los centros urbanos han cambiado y aumentado las superficies impermeables, en contraste con las zonas rurales. Por su parte, Taha (1997) afirma que el calor antropogénico es responsable del incremento de 2 °C a 3 °C en centros urbanos y su principal causa es la emisión de calor desde los edificios; la segunda es el consumo eléctrico y la emisión de calor por aire acondicionado; la tercera ocurre por calor antropogénico de los vehículos. Por ello, trabajos como el de Rizwan, Dennis y Chunchu (2008) buscan reducirlo con un diseño de techos verdes, techos reflejantes, enfriamiento evaporativo; y factores como la humidificación, el albedo y las cubiertas fotovoltaicas son algunas de las estrategias para mitigar este efecto. Otra estrategia radica en la disminución de la movilidad vehicular, que requeriría de un diseño integral del transporte urbano, para fomentar y posibilitar el uso del transporte público, de vehículos no motorizados y la movilidad peatonal.

Según Giguère (2009), hay dos aspectos que se toman en cuenta para el control de calor producido por los edificios: por un lado, las ganancias internas de calor generada por luces, computadoras y aparatos en el interior del recinto; por otro, el control de calor producido por el soleamiento de la radiación solar directa.

En el deseo de controlar la generación de calor de los edificios, se busca el aprovechamiento de luz artificial (preferentemente de baja emisión de

calor) y natural para moderar las ganancias de calor, controlando la luminosidad y considerando la ocupación humana en los diseños y en el mobiliario eficiente y programable para un menor consumo energético, así como el uso de sistemas pasivos de climatización.

Con respecto a los automóviles y su contribución de emisiones de calor antropogénico al medio ambiente, entre las principales medidas en las que hay que intervenir se encuentra la disminución de la densidad vehicular. Giguère (2009) sugiere que la densificación urbana provoca la reducción de la distancia de los viajes; por tanto, es necesario planear accesos restringidos de vehículos en determinadas zonas más densamente pobladas y construir estacionamientos cerca de paradas de autobús, para propiciar el uso de un sistema de transporte público. También debe hacer estrategias y políticas públicas que den libre acceso al sistema de transporte en días de extrema temperatura. Éstas son medidas que, combinadas, ayudarían a mitigar el calor antropogénico.

Desde la posición de Shishegar (2014), se resalta la consideración de que la mayoría de las fuentes de calor llegan instantánea y directamente a la estructura urbana, la cual absorbe la radiación durante el día y la almacena hasta el día siguiente. Mientras el ambiente comienza a refrescar por la noche, la energía y el calor retenidos en la ciudad se liberan hacia el ambiente y calientan el aire indirectamente.

Finalmente, Baker *et al.* (2002) sugieren que una planeación urbana y políticas públicas que consideren estrategias de mitigación ante los fenómenos del cambio climático son la meta a lo largo de las investigaciones y análisis realizados en distintas partes del mundo. Estas prácticas fueron comunes en las ciudades del desierto en el planeta, pero han aparecido en favor del diseño de la arquitectura contemporánea y del diseño urbano, los cuales no priorizan el factor ambiental.

CAPÍTULO IV

ISLA DE CALOR URBANA EN HERMOSILLO, SONORA. CONFIGURACIÓN DEL ESPACIO URBANO E IMPACTO DEL FENÓMENO A MESOESCALA



Características del desierto de Sonora y el clima urbano hermosillense

Al estudiar el clima y sus variaciones a escala regional y global, resaltan varios aspectos, como el recorrido solar, los cambios atmosféricos y los efectos de la actividad humana que influyen en el clima que se experimenta en cualquier localidad, como la transformación de los suelos a partir de la Revolución Industrial y las consecuencias que ésta ha producido sobre el ambiente (Villalobos, 2018).

Desde la perspectiva antropológica, el clima ha influido en el desarrollo de la civilización y las respuestas culturales; por ello interesa conocer la manera en que los individuos y grupos se han adaptado a extremas condiciones del clima en el desierto, donde se ha demostrado la presencia humana desde la prehistoria.

La geografía de Sonora, que es la zona que se estudiará como ejemplo, es un mosaico de ecosistemas en una superficie de 184 934 km², de la cual 90% se encuentra en un clima árido, por lo que su asentamientos se han visto limitados por las condiciones climáticas y por la escasez del recurso hidrológico. Esta situación preexistente ha influido sobre el desarrollo económico y la urbanización de los municipios sonorenses.

De acuerdo con Olgay¹ (1998) y su perspectiva de habitabilidad, en el mundo se encuentran regiones climáticas diversas para las que existen cua-

¹ Víctor Olgay (1910-1970), nacido en Budapest, fue arquitecto y urbanista pionero en el tema de la arquitectura bioclimática. Junto a su hermano desarrolló una obra titulada *The Bioclimatic Chart*, que trata de un instrumento que integra dos variables (temperatura y humedad) más otras medidas correctoras, como viento, radiación y evaporación, para encontrar el confort térmico.

tro clasificaciones: (a) zona fría, (b) zona templada, (c) zona cálida-árida y (d) zona cálida-húmeda, por lo que los asentamientos han ido diferenciándose conforme al clima. Los refugios que se establecieron en las zonas frías adoptaron una forma compacta, con un mínimo de exposición de la envolvente al ambiente. En la zona templada se exigían menores condicionantes térmicas debido a que el clima resultaba más favorable, lo que originó mayor diversidad en las viviendas de estas tribus. De manera contraria, las aldeas ubicadas en zonas áridas requerían una serie de condiciones para sus hogares, ya que el excesivo calor y el asoleamiento exigían consideraciones de diseño para reducir el impacto de la radiación solar y la generación de sombra en la búsqueda del confort. Asimismo los asentamientos en la zona cálida-húmeda buscaban la protección del sol y de la radiación con especial énfasis en permitir la evaporación de la humedad con ventilación natural.

Como se mencionó anteriormente, en el trabajo de Oke (1976) se señala que la atmósfera presenta diferentes escalas espaciales, que se definen de acuerdo con las distintas características que poseen: macroescala, mesoescala, escala local y microescala. Además, en su libro *Boundary Layer Climates* (1987), Oke da las siguientes definiciones:

- Macroescala:² se caracteriza por tener una gran superficie de estudio, que comprenden inclusive continente. Su extensión va de 200 a 100 000 km.
- Mesoescala:³ se refiere a la porción de la capa límite planetaria, cuyas características son afectadas por la presencia del área urbana bajo de ella. La distancia horizontal comprende de 10 a 200 km.
- Escala local:⁴ estudia los procesos en espacios que oscilan entre 100 m y 50 km. Se ve influenciada por la presencia de actividad urbana.
- Microescala:⁵ comprendida entre 1 cm y 1 000 m, se ve influenciado por la presencia de actividad urbana.

² En inglés, *macro scale*.

³ En inglés, *meso scale*.

⁴ En inglés, *local scale*.

⁵ En inglés, *micro scale*.

De acuerdo con Capelli, Piccolo y Campo (2005), el clima urbano se compone de los cambios microclimáticos que surgen a partir de la alteración de la superficie urbana efectuada por los seres humanos. El conocimiento climático a microescala permite estudiar fenómenos relacionados con el calentamiento global, como el de la Isla de Calor Urbana (ICU), y entenderlos para proponer espacios favorables en futuros asentamientos.

Para el análisis y estudio del clima urbano, las estaciones meteorológicas oficiales muchas veces no representan lo que ocurre dentro del núcleo urbano, ya que el lugar donde se sitúan sus instrumentos de medición comúnmente suele ser la periferia de las ciudades o sólo representa el clima local de determinada área. Resulta mejor estudiar las escalas climáticas de acuerdo con el tipo de investigación que se busca y con las mediciones apropiadas.

En el estudio del desierto los geógrafos analizan la causa de la aridez. Bailey (2014) reconoce dos divisiones de clima seco: el árido y el semiárido, que principalmente se diferencian por la humedad; mientras tanto, Giménez y Héau (2007) ubican tres: *los desiertos zonales*, que se encuentran lejos de las masas de aire marítim; *los desiertos costeros nubosos*, que incluyen corrientes frías, y *los desiertos continentales o desiertos de abrigo*, que se encuentran alejados de las masas oceánicas, rodeados de altas montañas, como el desierto de Sonora (véase la siguiente fotografía).

FOTOGRAFÍA IV.1. *Desierto continental de Sonora*

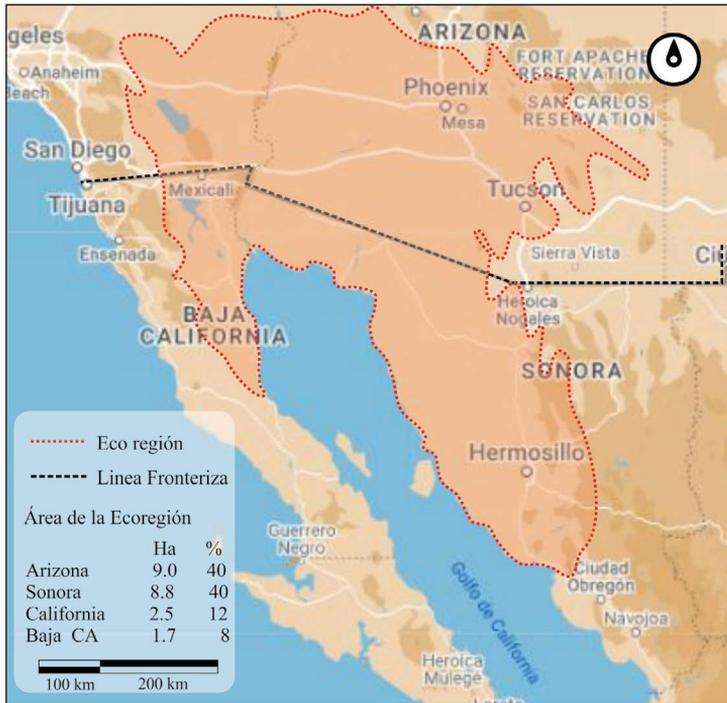


FUENTE: Elaboración propia.

El desierto continental no sólo es árido, sino que también cuenta con altas temperaturas en el aire y las superficies. Dentro de esta clasificación árida se encuentran el Norte de África (desierto del Sahara), Arabia, Irán, Pakistán (desierto de Thar), el desierto de Sonora y el gran desierto de Australia.

De acuerdo con Gutiérrez (2014), el desierto tomado como un espacio árido y poco poblado, como *territorio articulado*, se constituye como el referente de la región norte de México. La gran extensión del desierto de Sonora (311 000 km²), que comprende zonas protegidas por diversas autoridades ambientales en una región transfronteriza, está situada al norte mexicano, sobre una gran parte del estado de Sonora y Baja California y sobre otra parte al suroeste de los Estados Unidos; en su conformación, entonces, participan el sureste del estado de California, el sur de Arizona y la parte occidental de Nuevo México.

IMAGEN IV.1. Ecorregión del desierto de Sonora



FUENTE: Elaboración propia.

Esta zona constituye un referente de profunda identidad que va más allá de las fronteras actuales. Todo esto forma lo que se denomina la ecorregión del gran desierto de Sonora.

FOTOGRAFÍA IV.2. *Paraje del desierto continental de Sonora*



FUENTE: Elaboración propia.

De acuerdo con Villalobos (2018), en el desierto de Sonora se localiza uno de los más importantes biomas de ecosistemas áridos, con alrededor de 1 000 000 de km². En él se posicionan cuatro desiertos: la Gran Cuenca, el desierto de Mohave, el desierto de Sonora y el desierto de Chihuahua.

El desierto de Sonora forma un panorama rico en fauna y flora, alejado del paisaje desértico del imaginario común, que lo piensa como grandes planicies de arena y dunas. Desiertos de este tipo poseen una gran variación ecológica, climática, edáfica y topográfica (véase la fotografía IV.2).

Villalobos (2018) afirma que este ecosistema en Sonora “es un desierto cambiante, transformador y transformado, en el que culturalmente ha sido adoptado y adaptado para vivir”. Giménez y Héau (2007) hacen referencia a las características de aridez asociada con una reducida precipitación y condiciones severas, con baja humedad relativa en el día y alta por la noche, además de cambios bruscos de temperatura.

En este desierto se localiza el municipio de Hermosillo, capital del estado de Sonora, con 936 263 habitantes, de los cuales 855 553 corresponden a la huella urbana de la ciudad (INEGI, 2020) entre los paralelos 28° 13' y 29° 43' de latitud norte, los meridianos 110° 22' y 112° 14' de longitud oeste, con una altitud promedio de 200 metros sobre el nivel del mar. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, el clima es BSo (h') hw (x') (e'): seco muy extremoso. Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1998), el municipio de Hermosillo se clasifica en muy seco, muy cálido y cálido. Se localiza a 270 kilómetros al sur de la frontera de Estados Unidos de América y 133 kilómetros al norte del puerto de Guaymas.

De acuerdo con la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO, 1998), 37% del territorio sonorense es cálido (con una temperatura media anual mayor de 22 °C), 39% es semicálido (con una media anual de entre 18 y 22 °C), 23% es templado (con una media anual entre 12 y 18 °C) y 1% es semifrío y frío (con una media anual menor de 12 °C). La capital del estado, Hermosillo, se sitúa dentro del porcentaje cálido con temperaturas mayores a 22 °C (temperatura media anual), ya que se ubica en la zona de desertificación severa.

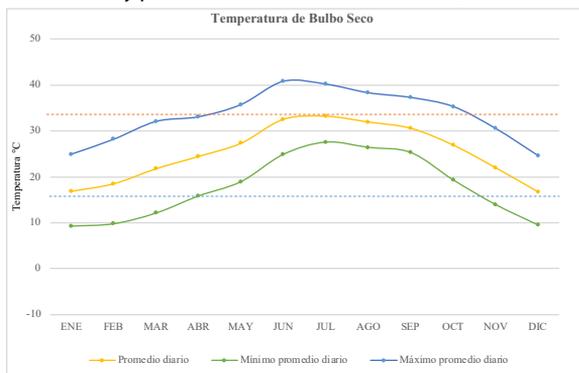
Utilizando la herramienta Climate Consultant (Liggett y Milne, 2008), que permite visualizar parámetros del clima con un archivo de datos climáticos de un compendio de más de 10 años de cualquier lugar del mundo, se ingresó el registro correspondiente a la ciudad de Hermosillo, Sonora (archivo *.epw), para así obtener la información climática respecto al caso de estudio.

Los resultados de temperatura de bulbo seco promedio diario mínimo y máximo muestran que los meses más cálidos son junio y julio, con temperaturas diarias promedio máximas de entre 40.82 y 40.20 °C respectivamente. En el periodo frío de diciembre, enero y febrero, las temperaturas mínimas promedio diarias oscilan en 9.54 °C (véase la gráfica IV.1).

Se observa en la siguiente gráfica que, en verano, la zona de confort (línea punteada naranja) es alcanzada desde abril hasta septiembre, por lo que se concluye que la mitad del año se buscan medidas de climatización al interior de los espacios.

La humedad relativa influye en la sensación térmica que se percibe: a mayor humedad, es más difícil evaporar el sudor, por lo que la sensación de calor aumenta.

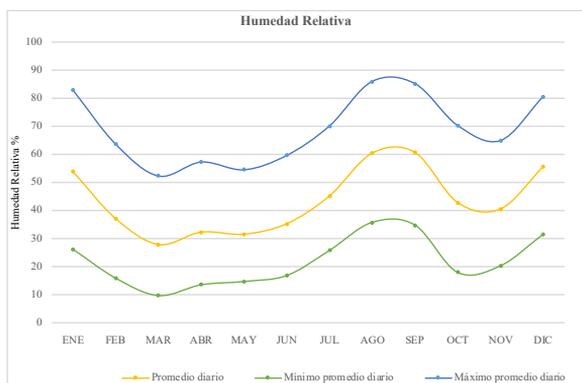
GRÁFICA IV.1. *Temperatura de bulbo seco en promedio diario, promedio mínimo y promedio máximo de Hermosillo, Sonora*



FUENTE: Elaboración propia con datos de Climate Consultant (1973-2005).

La relación entre temperatura y humedad relativa es inversa, pero hay meses en los que, por ser temporadas lluviosas, la humedad relativa sube. En el mes de junio, el más extremo en temperatura (40.82°C), se mide una humedad de 16%, que se considera baja; sin embargo, agosto, que se encuentra dentro del periodo cálido, muestra humedades de 85% (máximo promedio diario), lo cual provoca sensación térmica mayor y bochornosa a causa de las precipitaciones de la temporada (véase gráfica IV.2).

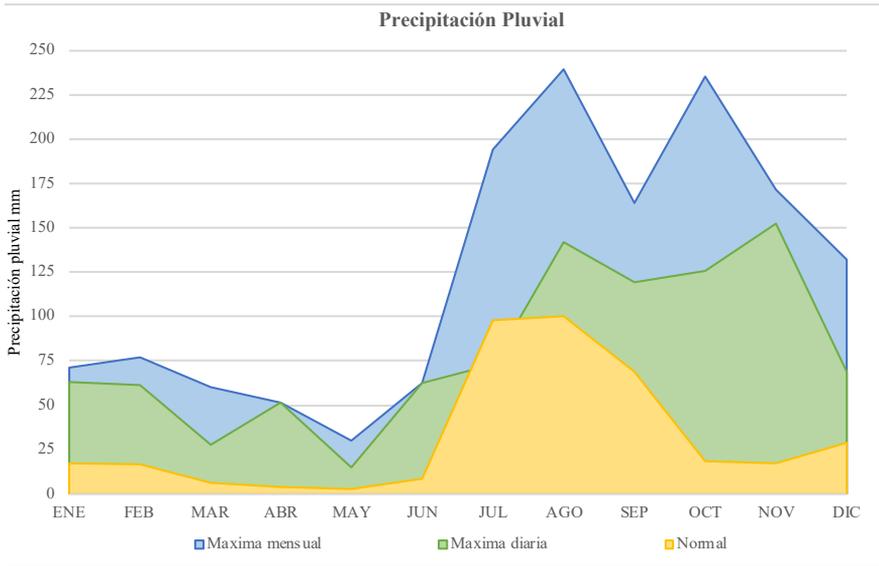
GRÁFICA IV.2. *Humedad relativa en promedio diario, promedio mínimo y promedio máximo de Hermosillo, Sonora.*



FUENTE: Elaboración propia con datos de Normales climatológicas (2004-2011).

En cuanto a la precipitación pluvial (gráfica IV.3), los meses de julio, agosto y septiembre son considerados importantes en cuanto a milímetros (normales) obtenidos tras las lluvias.

GRÁFICA IV.3. Precipitación pluvial en Hermosillo, Sonora



FUENTE: Elaboración propia con datos de Normales climatológicas (2004–2011).

Si bien se espera que la precipitación ayude a mejorar las condiciones de temperaturas en los exteriores, las lluvias son escasas y espaciadas en cuanto a los días, lo que no permite que los suelos permanezcan frescos.

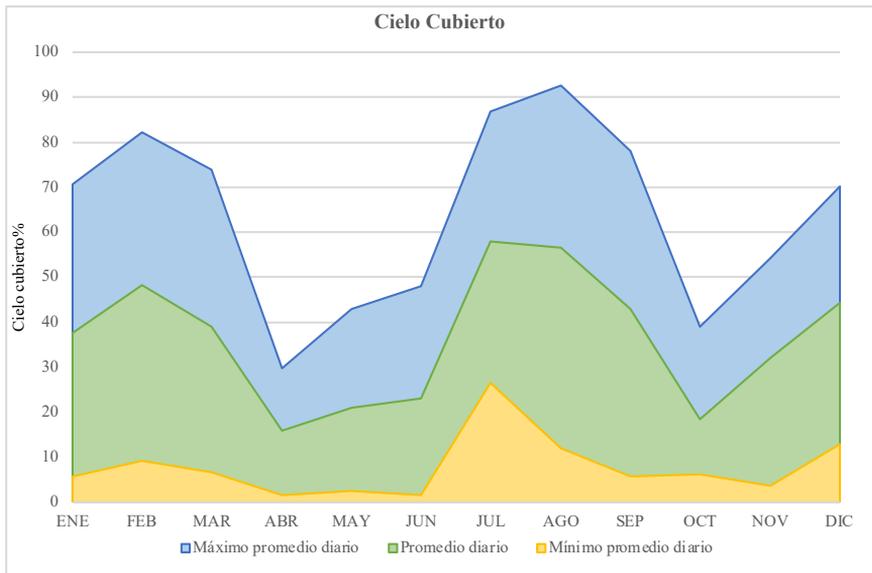
La cobertura del cielo es uno de los parámetros que influye en la intensidad de la ICU, ya que permite o no el ingreso de radiación solar directa al dosel urbano. La cobertura del cielo se refiere a la cobertura de nubes.

Se observa que hay un amplio espectro de cielo cubierto que va desde 10% hasta más de 60% en algunos meses. Esto varía por las condiciones climáticas que acompañan las nubosidades, tales como la humedad, precipitaciones y algún fenómeno climático (huracán, depresión tropical, etcétera). Sin embargo, se toma en cuenta el promedio diario mínimo para el análisis de la ICU por ser el porcentaje con mayor presencia en el año.

Aunque en julio predomina la nubosidad por sobre el resto de los demás meses, se observa en el resto del año (en el parámetro mínimo promedio

diario) una variación de 3 a 12%, es decir, poca. Esto permite concluir que en la mayor parte del año se cuenta con cielos despejados, lo que posibilita que la radiación solar directa llegue a las superficies urbanas (gráfica IV.4).

GRÁFICA IV.4. Cielo cubierto de Hermosillo, Sonora

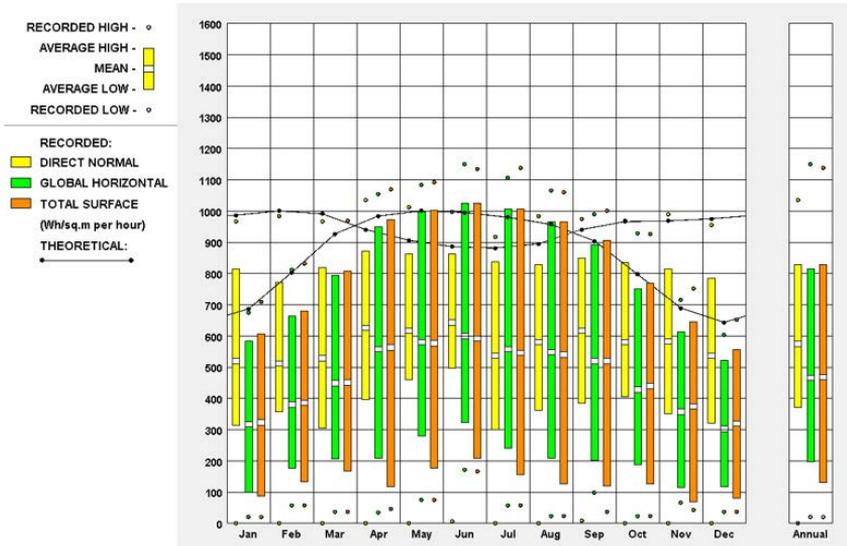


FUENTE: Elaboración propia con datos de Climate Consultant (1973–2005).

En el mes de junio se localiza la radiación solar promedio máxima, la cual supera los $1\,000\text{ W/m}^2$ por hora. En cuanto a la radiación solar directa normal, se observa una pequeña variación en los meses invernales; sin embargo, se mantiene constante de abril a octubre, entre 810 y 890 W/m^2 por hora. La radiación difusa tiene mayor rango en el mes de julio. Con respecto a la radiación solar global máxima, ésta abarca los meses de mayo, junio y julio, con valores superiores a los $1\,000\text{ W/m}^2$. La máxima registrada se presenta en los meses de junio y julio, con $1\,150\text{ W/m}^2$ por hora (véase la imagen IV.2).

De acuerdo con Taslim, Parapari y Shafaghat (2015), tener un manejo y conocimiento de la radiación solar y coordenadas solares permite estudiar la relación que éstas tienen con el entorno urbano, pues así se determina gran parte de las estrategias de diseño bioclimático.

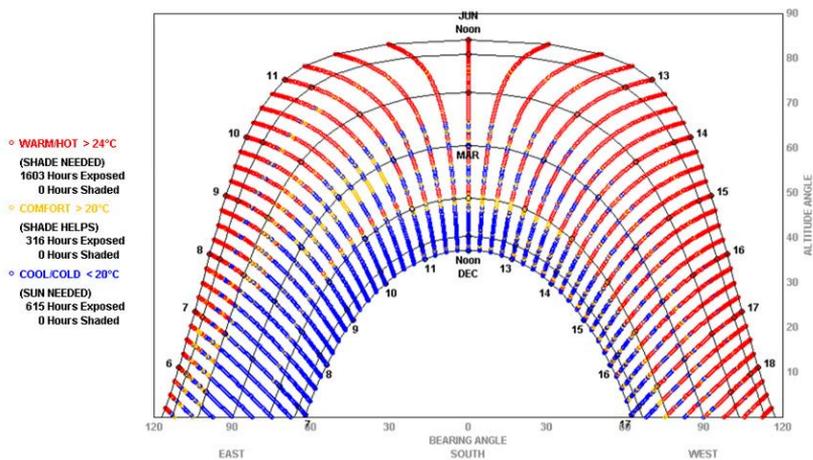
IMAGEN IV.2. Promedio mensual de radiación solar de Hermosillo, Sonora



FUENTE: Elaboración propia con datos de Climate Consultant (1973-2005).

En relación con el recorrido solar, la imagen IV.3 muestra las condiciones de soleamiento del clima árido de la ciudad de Hermosillo, Sonora, caracterizada por una intensa radiación solar.

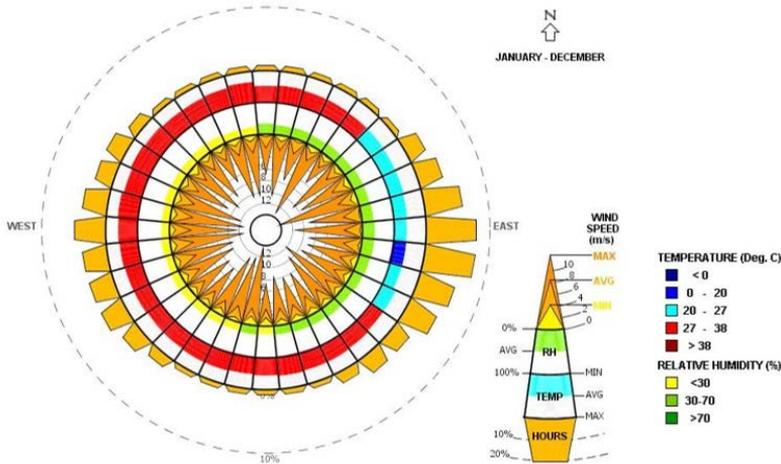
IMAGEN IV.3. Gráfica solar para Hermosillo



FUENTE: Elaboración propia con datos de Climate Consultant (1973-2005).

La dirección del viento muestra vientos frescos del este, que se relacionan con el periodo de invierno; el resto de los vientos son cálidos, provenientes del sur, poniente y norte. Es conveniente señalar que, si se analiza la temperatura y humedad junto con el viento, se obtiene que el oeste es la zona en donde la gente se debe proteger primordialmente de los vientos calurosos.

IMAGEN IV.4. Vientos en Hermosillo, Sonora



FUENTE: Elaboración propia con datos de Climate Consultant (1973-2005).

Como se mostró en los diferentes gráficos de análisis, el clima de Hermosillo tiene condiciones de radiación solar y temperatura extremas, por lo que las estrategias urbanas de climatización y de mitigación de la ICU deben apegarse a estas condicionantes.

Después de estudiar y analizar los parámetros climáticos de una ciudad, es vital comprender la importancia de la adaptación al clima en la vida urbana, así como la apropiación del territorio y el desarrollo de las civilizaciones y culturas. Giménez y Héau (2007) exponen sobre el paisaje desértico y su estrecha relación con los geosímbolos,⁶ a la vez que hacen mención a la correlación entre el paisaje-patrimonio y el paisaje-identidad, cuya fre-

⁶ El concepto *geosímbolo* fue desarrollado por el geógrafo francés Joel Bonnemaison (1981), quien lo define como "un sitio, un itinerario o un espacio que, por razones religiosas, políticas o culturales, reviste a los ojos de ciertos pueblos y grupos étnicos una dimensión simbólica que los fortalece en su identidad".

cuentación refuerza los nexos familiares y proporciona un referente simbólico de la identidad de pertenencia al grupo.

Anudado al análisis climático con respecto al estudio de caso, la transformación del uso de suelo de las tierras para la agricultura, el disturbio antropogénico, la utilización de praderas para uso pecuario, minería, urbanización y desarrollos costeros son las principales causas de los cambios en los ecosistemas de Sonora. Hermosillo es parte de estas variaciones, donde las edificaciones y pavimentos en áreas urbanizadas absorben e irradian más calor que el original desierto natural, que fue reemplazado (Rosheidat y Bryan, 2010).

La visión de las políticas urbanas en la capital sonorenses en relación con la condición climática

El desarrollo urbano de cualquier asentamiento posee un impacto que puede determinar el comportamiento social, económico, político y ambiental; por ello, al conocer la evolución y crecimiento de una localidad, es posible ofrecer una idea del panorama actual que se vive.

Para comprender y valorar el contexto de origen de una ciudad, es necesario e importante conocer su historia. En referencia a la ciudad de Hermosillo, se señala su comienzo en la localidad de Pitikín, que tuvo su primer censo de población en el año 1700, cuando registró sólo 100 habitantes. El comandante Decroix solicitó a la Nueva España el título de *villa* y generó un documento titulado *Plan de Pitic*, que establecía normas y reglamentos sociales, económicos y políticos para fundar el territorio.

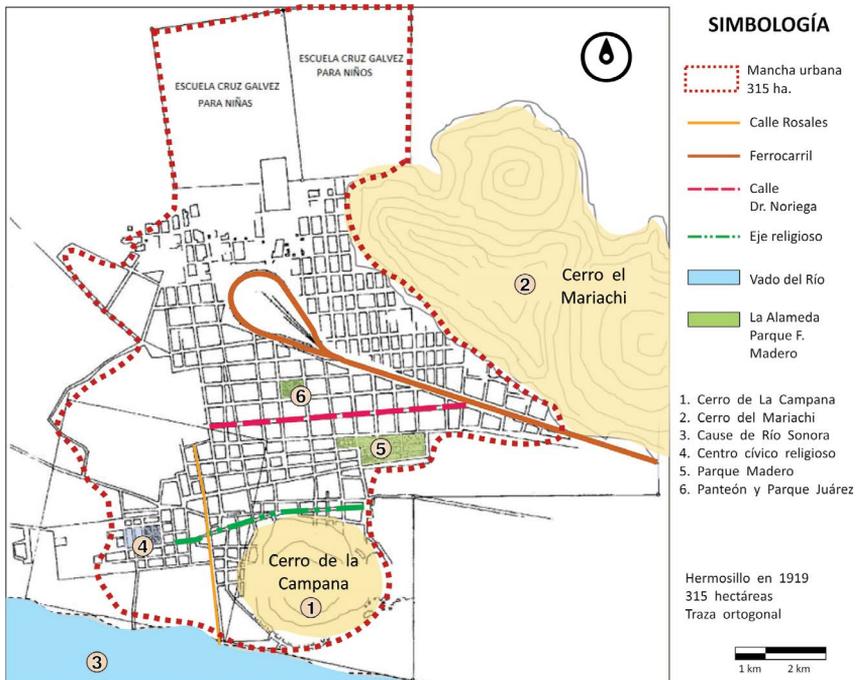
Para el año de 1828 el Congreso Constitucional del Estado Libre y Soberano de Occidente declaró la Villa de San Pedro de la Conquista del Pitic como ciudad de *Hermosillo*, que contaba con una plaza mayor, viviendas ubicadas al pie del Cerro de la Campana, sin ningún orden ni limitación, de modo que había callejones y calles angostas en una superficie de 23 hectáreas (Lagarda, Landeros y Nieblas, 2009).

En 1879 se instauró formalmente la ciudad de Hermosillo como la capital del estado y fue ratificada en la promulgación de la nueva Constitución

de 1917. A partir de la Revolución Mexicana (1910-1924) la ciudad comenzó a crecer.

Se observa en ese periodo una tendencia de crecimiento hacia el norte y oeste, junto a un tejido desarticulado con edificaciones fuera del centro urbano ya consolidado. Aparecen áreas baldías y el Cerro de la Campana, elemento natural de gran importancia, el cual aparecía como elemento ajeno a la organización de las redes viales que estaban surgiendo.

IMAGEN IV.5. Huella urbana de Hermosillo en 1919



Fuente: Elaboración propia con base en Lagarda, Landeros y Nieblas (2009).

Valenzuela (1997) señala que, durante el periodo de gobierno estatal de Abelardo L. Rodríguez (1943–1948), los primeros arquitectos del movimiento posrevolucionario fueron Leopoldo Palafox Muñoz (1912–1993) y Felipe Ortega Neri (1941–1978),⁷ quienes desplegaron edificaciones con una

⁷ Para una mayor comprensión de la relevancia del momento de conformación de imagen de la ciudad de Hermosillo, consúltese *Una modernidad edificada. La arquitectura de Felipe Ortega en Sonora*, obra de Méndez (1996).

expansión territorial hacia todas direcciones. Se proyectaron y construyeron oficinas de gobierno, equipamiento para un aeropuerto, para la salud y el edificio de rectoría (fotografía IV.3).

Hacia 1950 se desarrolla la construcción del Museo Biblioteca de la Universidad de Sonora y el majestuoso Banco de México, que hoy en día es sede de la Secretaría de Economía del Estado de Sonora (fotografía IV.3).

FOTOGRAFÍA IV.3. Rectoría en la esquina superior izquierda; Museo Biblioteca de la Universidad de Sonora en la esquina inferior izquierda; Banco de México a la derecha.



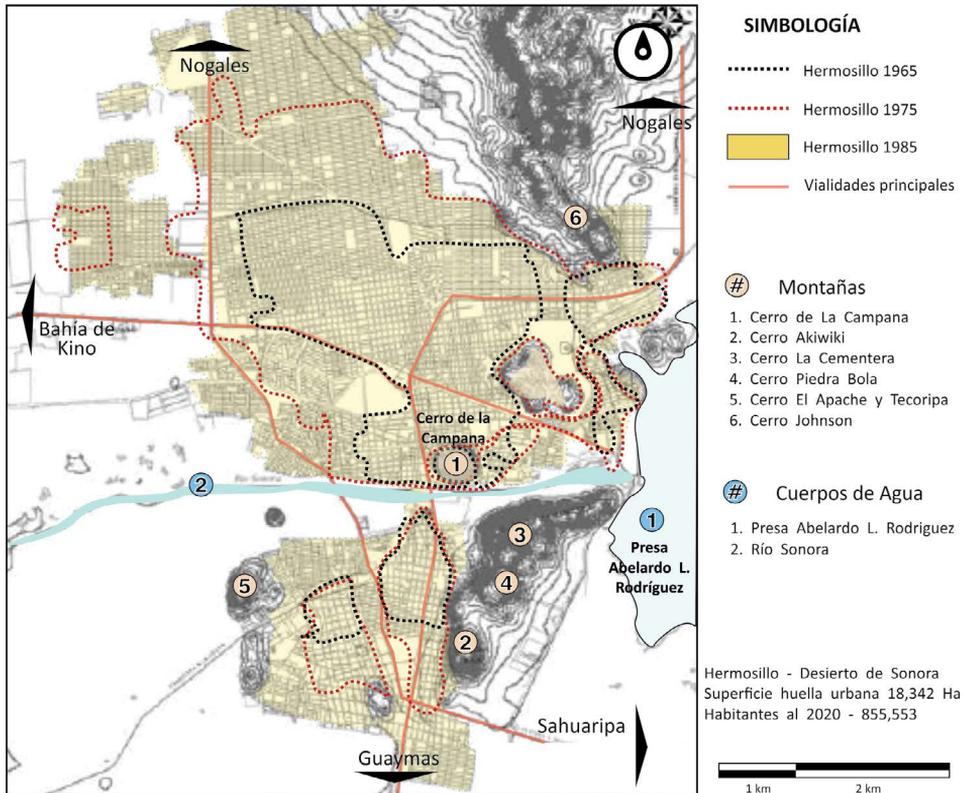
FUENTE: Elaboración propia.

Estos edificios fueron construidos con materiales de la época industrial, como el acero y el concreto; no obstante, para los proyectistas fue posible establecer una relación en cuanto a la trayectoria solar, y se pueden observar en la fotografía anterior elementos de protección solar en las fachadas, tales como pórticos, doble piel, persianas y celosías, con el fin de proteger al usuario de la radiación solar incidente.

Hacia 1957 en Hermosillo se registraron 176 596 habitantes y la huella urbana era de 3 695 hectáreas (imagen IV.6), de manera que ya alcanzaba el límite de las principales vialidades (Álvarez, 2009).

Desde inicios de la década de 1970 el estado de Sonora contaba con instrumentos ambientales; se trataba de la *Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental* (1971) y de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente (1972-1976), la cual abarcaba el campo de la salud pública y finalizó como Subsecretaría de Ecología en la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE).⁸ Posteriormente, en la década de 1980, se estableció la política ambiental en el país, la cual conformó estrategias públicas que se tradujeron en instrumentos y en normatividad (Borja y Muxi, 2003).

IMAGEN IV.6 Superficie urbana en 1965, 1975 y 1985



FUENTE: Elaboración propia con base en Lagarda, Landeros y Nieblas (2009) e IMPLAN (2016).

⁸ Institución que revisa que las empresas tengan tecnología anticontaminante. El asunto de la contingencia está a cargo de la Comisión Ambiental Metropolitana.

En este periodo surgen los primeros antecedentes de planeación urbana en México. Entre 1976 y 1982 se crea el Plan Nacional de Desarrollo (PND) durante la presidencia de Miguel de la Madrid (1982-1988), a cargo de la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP). Con respecto a este momento de la planeación territorial, de acuerdo con Gutiérrez (2014), a partir de esta administración, por influencia del modelo francés, se adopta el concepto *región* como elemento clave en la administración pública, donde los recursos disponibles, el potencial productivo y su distribución espacial constituyen la base de la Planeación Regional de Desarrollo, de donde emerge el Sistema Nacional de Planeación del Desarrollo (SNPD) con fundamento en los instrumentos jurídicos de reciente creación: la *Ley de Planeación* y el Plan Sectorial de Desarrollo Urbano; y en la región se crea un nuevo instrumento para la gestión de la planeación urbana: la *Ley número 101 de Desarrollo Urbano para el Estado de Sonora* en 1985.⁹

El 28 de enero de 1988 se promulgó la *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente* (LGEEPA, 1988), que implementa políticas ambientales para el cuidado y la preservación del medio ambiente. Entre 1988 y 1994, la Sedue, encargada de la gestión de los asentamientos humanos y planeación urbana en el país, cambia de nombre a Secretaría del Desarrollo Social (SEDESOL). En 1992, con respecto a la gestoría ambiental, se crea a nivel federal el Plan Sectorial de Ecología y Medio Ambiente y posteriormente la Procuraduría Federal del Medio Ambiente (PROFEPA).

Para 1994 surge la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), cuyas atribuciones cambian en el año 2000 y se convierte en Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). En la administración federal de la presidencia de Vicente Fox (2000-2006) se origina el Sistema Urbano Nacional (SEDESOL, SEGOB y CONAPO, 2012), por el cual se considera un desarrollo urbano que reconcilie eficiencia económica, cohesión social y equilibrio ecológico. En relación con esto surge

⁹ La publicación de esta ley en el *Boletín Oficial del Gobierno del Estado de Sonora*, sección 1, con fecha de 18 de febrero de 1985, aboga la *Ley número 18 de desarrollo urbano y rural del estado de Sonora*, publicada en el *Boletín del Estado de Sonora* el 29 de enero de 1977, junto con la *Ley número 47 de planeación y construcción del estado de Sonora* y el *Reglamento para la fusión, subdivisión, reorganización de predios y división de terrenos*, publicados en septiembre de 1982 (Gutiérrez, 2014).

en el estado la *Ley número 254 de ordenamiento territorial y desarrollo urbano del estado de Sonora*.¹⁰

En relación con la gestión del desarrollo urbano en la ciudad, durante el año 2000, bajo la administración municipal de Jorge Eduardo Valencia Juillerat (1997-2000), se crea el Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN) de Hermosillo como un organismo público que planea, regula y gestiona el ordenamiento territorial de los asentamientos humanos y del desarrollo urbano del municipio de Hermosillo. Esta institución ha publicado numerosos programas, planes y documentos relacionados con el desarrollo y planeación de su municipio. El documento *Plan Municipal de desarrollo Hermosillo 2022-2024* señala que la ciudad cuenta con 452.85 hectáreas de áreas verdes y 85 553 habitantes, lo que significa 5.29 m² de área verde por habitante, pese a que la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que un mínimo de 9 m² por habitante. Cuenta, además, con una red vial de 7 277.16 km lineales, de los cuales 65% se encuentra pavimentado. Para 2019 la ciudad contaba 363 391 automóviles registrados y se estimaban 130 000 unidades de vehículos importados, lo que da un total de 493 391 autos. Esto supone una tasa de motorización de un auto por cada dos habitantes.¹¹

En el tema ambiental, en la zona urbana del municipio de Hermosillo se realizó una evaluación de la calidad del aire en relación midiendo las partículas suspendidas totales (PST), por Cruz *et al.* (2013), donde se afirma que la calidad del aire calificó entre no satisfactoria y mala, también señalan que es un derecho fundamental el contar con una calidad de aire aceptable para subsistir, ya que la presencia de partículas en el aire puede causar o agravar enfermedades.

Con respecto a este tema, la población ha manifestado inquietudes, principalmente por la capa visible de polvo que se forma por las mañanas en periodos de otoño e invierno. La Semarnat reporta, en la Norma Oficial Mexicana (NOM) 025-SSA1-2014, que el máximo permisible anual es de 75 µg/m³, pero en la ciudad se registraron entre 126 y 565 µg/m³ en el periodo de 1990 a 1995 a causa del tráfico vehicular en las calles no pavimentadas,

¹⁰ Ley publicada en el *Boletín Oficial número 23*, sección IV, con fecha del 28 de septiembre de 2006.

¹¹ Hay 452.85 hectáreas de área verde sin contar la zona de conservación, que se refiere a cerros intraurbanos (véase la tabla 16 de dicho documento), la red vial en metros lineales (7 277 168.12; tabla 14 del documento) y los vehículos registrados hasta el 2019 (tabla 10 del documento) (IMPLAN, 2021).

el número de lotes baldíos y encapsulamiento de masas de aire sobre la mancha urbana por motivos topográficos. Esta situación provoca problemas a la salud en materia de infecciones respiratorias agudas (IRA),¹² las cuales, de acuerdo con Cruz *et al.* (2013), ocuparon en 2001 el primer lugar de atención en el servicio de urgencias y de hospitalización del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), con 548 104 casos.

En las últimas décadas se han hecho esfuerzos por monitorear de manera las condiciones de contaminación del aire en Hermosillo y en el estado de Sonora mediante una red de monitoreo atmosférico que detecta varios contaminantes (Comisión para la Cooperación Ambiental, 2014); sin embargo, las acciones y programas emprendidos (por ejemplo, el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Sonora 2017-2026) no parecen lo suficientemente eficaces para mitigar el problema aún.

Desde el punto de vista económico, en el presupuesto de entrada económica establecido en la *Ley de Ingresos del estado de Sonora* del año 2017, se señala la destinación de sólo 8.49% del presupuesto total al rubro de la salud pública (Gobierno del Estado de Sonora, 2016), porcentaje que no preve la mitigación de fenómenos climáticos extremos, como la ICU, para mejorar la calidad de vida.

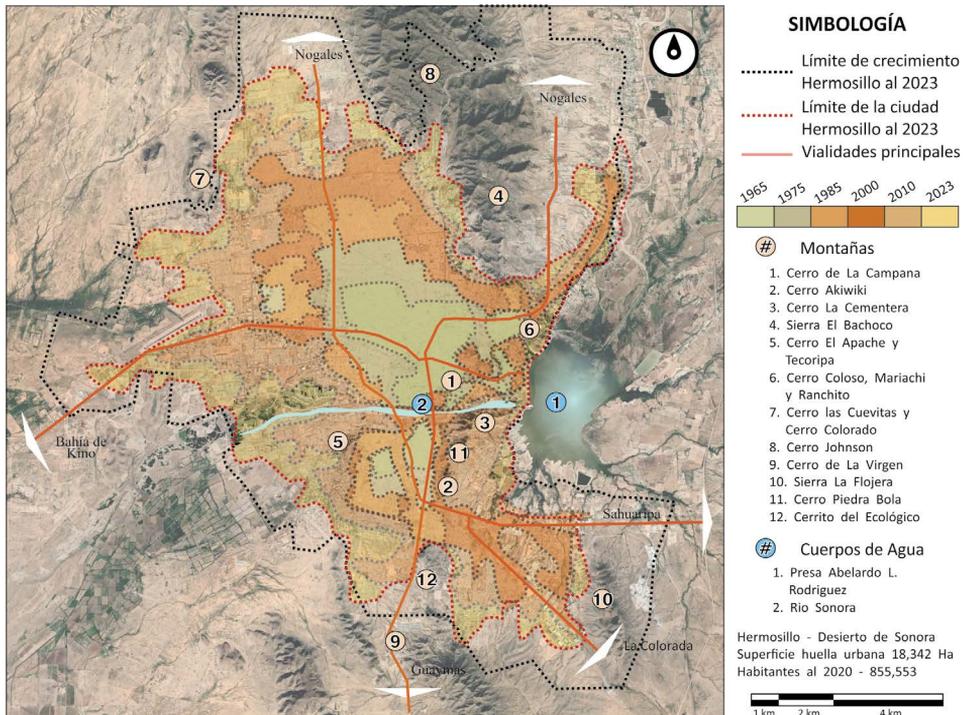
En relación con la expansión territorial de 1985 a 2021, de acuerdo con los registros de IMPLAN (2022), la mancha urbana creció exponencialmente. La Dirección General de Desarrollo Urbano y Servicios Públicos del H. Ayuntamiento de Hermosillo presenta un plano de la ciudad de 1985, con una superficie de 6 041 hectáreas; quince años más tarde se registraron 10 810 hectáreas; para 2009 aumentaba su cifra a 14 555 hectáreas; luego, en 2016, creció a 17 800 hectáreas; finalmente, en 2021, se registra la huella urbana de la capital sonorenses con una superficie de 18 342 hectáreas (INEGI, 2020) (véase la imagen IV.7).

En la opinión de Hernández (2000), en su organización de proyecto urbano, las ciudades reflejan el grupo dominante que las controla; de ahí que, en los espacios aptos para la libre circulación y encuentro, se reflejen los principios de igualdad y libertad de acuerdo con el gobierno que las toma. Estos espacios libres, llamados espacios públicos en Hermosillo de

¹² Indicador de afección en la salud son las infecciones respiratorias agudas

acuerdo con Méndez (2003), señala que los hermosillenses viven una carencia de espacio público, se encuentran desfragmentados y presentan poca conectividad entre ellos; además, se percibe Hermosillo como un lugar de transición, inseguro y no confortable. No hay áreas diseñadas para ser habitadas; provocan un encierro voluntario, lo cual hace todavía mayor el uso de los espacios privados y aumenta el uso de sistemas de climatización.

IMAGEN IV.7. Superficie urbana en 1965, 1975, 1985, 2000, 2010 y 2023



FUENTE: Elaboración propia con base en Lagarda, Landeros y Nieblas (2009), IMPLAN (2016) y el sistema de Google Earth.

A lo largo de 20 años (1985–2006) la gestión de la planeación urbana de las ciudades en el estado de Sonora no parece priorizar en las políticas públicas el aspecto ambiental en el crecimiento de los asentamientos humanos, donde los organismos y dependencias gubernamentales aparentemente están desarticulados cuando se presenta la vulnerabilidad y riesgos generados por la propia población y grandes proyectos urbanos.

En relación con eso, Estrada y Carrasco (2017) argumentan que algunas de las estrategias de planificación urbana de Hermosillo se dan a través de proyectos de gran escala que no contemplan el impacto ambiental, como la pérdida de flora y fauna local, carencia de mantos acuíferos, desviación de ríos, contaminación e impacto social con la generación de zonas baldías que terminan en basureros o falta de infraestructura para los nuevos desarrollos urbanos, pérdida de espacios públicos y áreas verdes, sólo por mencionar algunos ejemplos, dando como consecuencia impactos sociales como marginación y conflictos de integración cultural.

Carrasco y Estrada (2018) ejemplifican lo mencionado en el periodo de 2004-2009 con el plan Sonora Proyecta.¹³ Con el fin de impulsar la zona, a pesar de situarse en una de las áreas verdes más importantes del municipio, el área recreativa conformada por el Parque Villa de Seris (4.35 ha.), albercas del vado del río (3.1 ha.) y áreas naturales (15 ha.) suman 22.45 hectáreas en sus orígenes en 1970, un espacio público con 290 árboles de distintas especies (ver fotografía superior en Imagen 20), se transformó en 3 000 m² de concreto con el proyecto del Museo de Arte de Sonora “Musas” (véase la imagen IV.8) y años más tarde se proyectó el centro comercial Galerías Mall con 61 400 m², con lo que se han cubierto en total, hasta 2023, 19 hectáreas de superficie de concreto, sin reparos en las consecuencias ambientales y sociales, argumentando que la derrama económica era más importante.

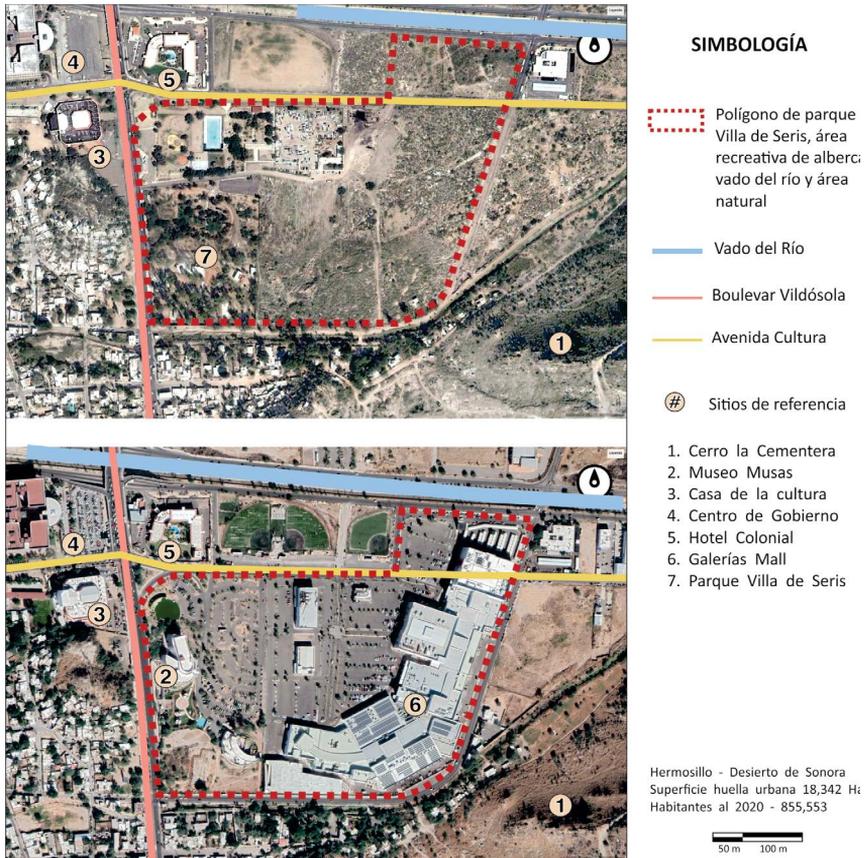
Este tipo de acciones por parte de las autoridades plantea una deficiencia en la visión en las políticas públicas de ordenamiento territorial y planificación urbana de incluir estrategias de mitigación de fenómenos climáticos como el de la ICU en los planes de desarrollo municipales.

No obstante, en el periodo de 2006 y 2012, se crean la ley número 283 de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano del Estado de Sonora (2006), la Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (2008) y la Ley General de Cambio Climático (2012). En tal sentido, Lezama y Domínguez (2006) argumentan que un programa de desarrollo urbano con enfoque ambiental busca resolver problemas específicos y tienen el com-

¹³ El Plan Sonora Proyecta, durante la administración de Eduardo Bours Castelo (2003-2009), plantea el desarrollo a la imagen e infraestructura en el estado de Sonora con más de 100 obras que alcanzaban una inversión de \$7 000 000 000. Esto dio paso a la formación del organismo denominado Operadora de Proyectos Estratégicos del Estado de Sonora (Impulsor) como operadora de los proyectos situados en el gran polígono de uso comercial en la zona del Vado del Río.

promiso de centrar la sustentabilidad en distintas acciones como regeneración de zonas degradadas o recuperar espacios públicos o verdes. Pero en países de economías emergentes, la ocupación territorial es grave y se encuentran dificultades ambientales que son abordadas sólo cuando son evidentes.

IMAGEN IV.8. Transformación del Parque Villa de Seris, parte superior 2005 y parte inferior Centro Comercial y Museo, 2023



FUENTE: Elaboración propia con base en Google Earth.

A partir del año 2013, en lo que respecta a la gestión ambiental en el país, durante la administración de la presidencia de Enrique Peña Nieto (2012-2018), se crea la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental, la Comisión Intersecretarial para el Cambio Climático (CICC), el Programa Na-

cional de Desarrollo Urbano y Ordenación del Territorio 2014-2018 y surge la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), la cual supe las funciones de planeación de los asentamientos humanos de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) y tiene el propósito de planificar, coordinar, administrar, generar y ejecutar las políticas públicas de ordenamiento territorial con sustento jurídico de la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano 2016, que sienta las bases para que la planeación de las ciudades contemplen lo social, económico y ambiental.

En un esfuerzo por incluir la sustentabilidad urbana en la planeación de la ciudad de Hermosillo, el Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN, 2018) desarrolla el Programa Parcial de Crecimiento Urbano del Sector Oeste de Hermosillo, cuyo objetivo incluye la visión sustentable de la siguiente manera: “Ordenar y regular la actividad desarrollada en el territorio del centro de población, potenciando su actividad económica y propiciando oportunidades de desarrollo competitivo, sustentable y humano con visión de largo plazo, que ofrezca una mejor calidad de vida a sus habitantes”. Asimismo, establece que el programa deberá ofrecer la inclusión de usos, destinos y actividades, a partir del espacio público. Afirma también que Hermosillo no cuenta con una red peatonal establecida como tal y que el desarrollo del sistema de rutas para bicicletas constituye una alta prioridad para la localidad y su población.

Para el año 2015 el IMPLAN, junto con un grupo de investigadores, formaron parte del Proyecto de Resiliencia Urbana ante Eventos Extremos Climáticos.¹⁴ Se trata de una red colaborativa de científicos y profesionales de diversas localidades del mundo para implementar infraestructura urbana resiliente ante futuros eventos extremos. Este estudio, coordinado desde la Universidad Estatal de Arizona (ASU, por sus siglas en inglés), se realizó en nueve ciudades de América y Latinoamérica, entre ellas Hermosillo. Se han trabajado en estudios sobre eventos climáticos extremos de ondas de calor, sequías e inundaciones.

Con respecto a la necesidad de mitigar las altas temperaturas de la región, la urbanización de los últimos 30 años y la falta de espacios verdes en

¹⁴ En inglés, Urban Resilience to Extremes Sustainability Research Network (UREXSRN).

la ciudad, se establecen nuevas pautas de planeación en el diseño urbano para lo que respecta a la movilidad y usos de suelo en las políticas de crecimiento en la ciudad, por lo que, en 2016, el IMPLAN publicó el *Manual de lineamientos de diseño de infraestructura verde para municipios mexicanos*, donde se exponen pautas de diseño a micro escala. Esta es una medida que puede ser considerada como un instrumento de participación ciudadana promovido por las autoridades para controlar los efectos de la ICU y del calentamiento global.

En el mismo año, bajo la administración municipal de Manuel Ignacio Acosta Gutiérrez (2015-2018), se lanza un programa llamado *Adopta un Bulevar* (véanse las fotografías IV.4 y IV.5), por el cual empresas u organizaciones tienen la posibilidad de rescatar una sección de un camellón y transformarlo con propuestas de pavimentos permeables, jardines cuencas, muros verdes u otros elementos de infraestructura verde y paisajismo. A pesar de las buenas intenciones, cabe destacar la carencia de estrategias para uniformizar los diseños de las áreas verdes y, peor aún, ausencia de seguimiento en cuanto a acciones de mantenimiento de dichas áreas.

Posteriormente, se lanza el Programa de Desarrollo Metropolitano de Hermosillo (IMPLAN, 2016). En sus objetivos menciona “establecer la capital como centro estratégico regional y se logrará con una visión a largo plazo y planeación a fin de alcanzar un desarrollo sustentable, asegurando una creciente calidad de vida y un área equitativa, incluyente y resiliente donde se conserven y desarrollen los recursos naturales y el patrimonio cultural urbano”, situación significativa para la implementación de estrategias de mitigación como las que se proponen en el presente libro. En el mismo año publican el *Reglamento de Desarrollo Urbano y del Espacio Público para el Municipio de Hermosillo*,¹⁵ donde se afirma que la acelerada urbanización ya rebasó la capacidad de las autoridades de planear y ordenar el territorio con un modelo de planeación de ciudad sin flexibilidad, lo cual sólo resultó en mayores problemas e informalidad, y hace mención que el espacio público se encuentra reducido, en mal estado, privatizado, desatendido, inseguro y mal administrado.

¹⁵ Publicado en el *Boletín Oficial del Gobierno del Estado de Sonora*, tomo CCII. Hermosillo, Sonora–Número 19 Secc. III, lunes 3 de septiembre de 2018.

FOTOGRAFÍA IV.4. *Intervención de bulevar Reforma, programa Adopta un bulevar*

FUENTE: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA IV.5. *Intervención de bulevar Reforma, programa adopta un bulevar*

FUENTE: Elaboración propia.

En octubre de 2017 se generó un reporte preparado por Center for International Development Harvard Kennedy School, bajo el acuerdo de investigación con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), División de Vivienda y Desarrollo Urbano en su programa de Ciudades Emergentes y Sostenibles México titulado *Rethinking Hermosillo 2017* (Segovia y Tomateo, 2017), en el cual se expone que los proyectos urbanos prioritarios siguen a los intereses del gobierno en curso.

De acuerdo con Rodríguez (2010), de nueve proyectos propuestos del Programa de Desarrollo Metropolitano, únicamente dos son espacios recreativos para el esparcimiento y disfrute, de índole público (el parque metropolitano y el centro recreativo, deportivo y cultural para personas con discapacidad), y el resto son privados, contraponiéndose con los objetivos del mismo documento. También hace mención acerca del esfuerzo de las autoridades por la construcción imaginaria de Hermosillo como una localidad moderna, limpia, ordenada, industrial, competitiva, sustentable y de buena calidad de vida. Sin embargo, se siguen presentando problemas de exclusión social, privatización del espacio público, dispersión, ausencia de planeación urbana y falta de identidad.

Esta serie de medidas, normas y programas de orden de gestoría ambiental urbana tratan de establecer un entorno para mejorar la calidad de vida con una visión más integral en la ciudad de Hermosillo, para el acceso a los equipamientos y espacios públicos con la característica de considerar en la gestión, proceso y diseño del elemento ambiental, sin embargo la condición de la zona árida todavía no prevalece como condición jerárquica.

ICU a mesoescala: Hermosillo, Sonora

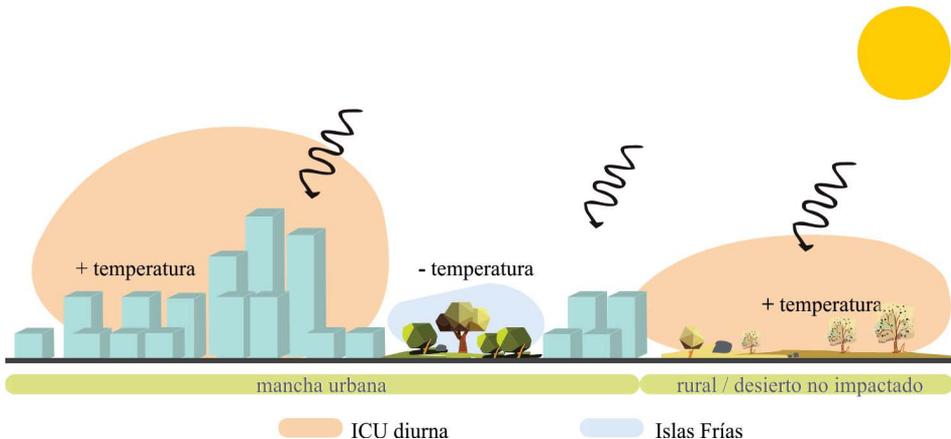
Como se ha comentado en el apartado anterior, la ciudad de Hermosillo, como ejemplo de una ciudad desértica, ha crecido rápidamente con planeación insuficiente y ausente de criterios climáticos y ambientales para su desarrollo. De acuerdo con García y Gutiérrez (2007), las ciudades tradicionales, originalmente compactas, se han expandido de tal forma que ha provocado la ausencia de grandes concentraciones humanas, ocasionando metrópolis dispersas como es el caso de la ciudad de Hermosillo, ya que como afirma Méndez (2003), la población se dispersa en desarrollos de baja densidad, discontinuos y fragmentados, además con una verticalidad que no favorece como estrategia de sombreado de las calles. Estas características de la localidad, anudado a su localización en una zona árida, impactan el territorio causando aumento de temperaturas urbanas.

El estudio y medición de todos aquellos elementos que se han descrito con anterioridad, permiten demostrar la existencia e impacto del hábitat cons-

truido a lo largo de los años, así mismo establece las causas y efectos que contribuyen a su formación, que tiene por objetivo el conocimiento básico de los procesos de planificación y diseño urbano que incluyen los aspectos climáticos y de confort térmico en las zonas desérticas, esto con el fin de llevar a cabo medidas de control al fenómeno.

En el capítulo III se describió a mesoescala la ICU en el desierto como un fenómeno cuya característica principal es su prominencia por la noche. A continuación la imagen IV.9 ilustra conceptualmente el fenómeno diurno donde habitualmente la mayor temperatura se presenta en el desierto no impactado, no obstante, dentro de la huella urbana se experimentan altas temperaturas con respecto a la zona periurbana.

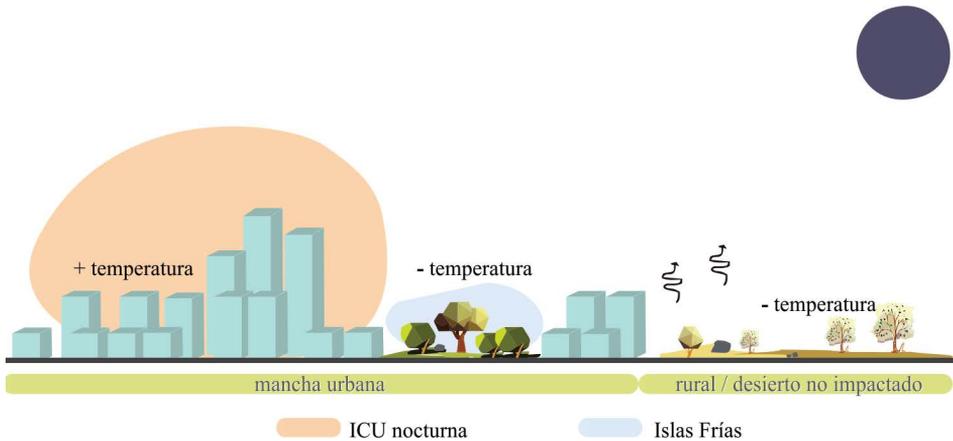
IMAGEN IV.9. Isla de Calor Urbana diurna



FUENTE: Elaboración propia.

En consecuencia, en territorio árido el fenómeno en la zona urbana se caracteriza por manifestarse con mayor intensidad por la noche a causa de que el calor almacenado en las superficies tarda en disiparse, manteniendo caliente el ambiente urbano (imagen IV.10).

Para poder estudiar las posibles estrategias de mitigación para la ciudad de Hermosillo, es necesario realizar previamente un diagnóstico de la ICU. Para ello, se utilizó una combinación de metodologías de medición y análisis, que se presentarán en este y en los siguientes capítulos, abordando desde la meso escala a la microescala.

IMAGEN IV.10. *Isla de Calor Urbana nocturna*

FUENTE: Elaboración propia.

Para abordar el diagnóstico de ICU en el desierto continental, se utiliza un enfoque cualitativo de tipo descriptivo y cuantitativo correlacional a través del caso de estudio con diseño experimental, que es la adecuada a seguir debido a que se busca probar la existencia del fenómeno de ICU por medio del diseño experimental con estaciones meteorológicas móviles y fijas con el método de transectos y correlacionar con imágenes satelitales

Además, determinar el potencial de mitigación que ofrece el desierto continental y el área de estudio, es necesario, por ello se llevó a cabo caracterizar y analizar las condiciones de cobertura de suelo, geometría urbana, superficies y entorno urbano, así como establecer las posibilidades de implementar cada estrategia de control. En consecuencia, para el caso de estudio, la unidad de análisis a meso escala es Hermosillo, Sonora, por lo que un modelo meteorológico con un análisis espacial y geo estadístico son los seleccionados, ya que los resultados dependen de las características regionales del sitio. El método para llevar a la práctica el modelo es de carácter experimental debido a que las variables analizadas son medibles y tienen control y validez, con estaciones meteorológicas móviles y fijas con el método de transectos y correlacional ya que permite relacionar distintos instrumentos y datos como imágenes satelitales, información meteorológica, levantamiento en campo y simulaciones, a su vez es transversal ya que se colecta información en tiempo de verano e invierno.

El modelo dinámico ha sido utilizado en diferentes disciplinas de la ciencia entre ellas la planeación urbana, que la toma como una herramienta útil para describir, analizar y evaluar sistemas complejos. Dicho modelo lo define Meadows (2001) como una simplificación de la realidad, es decir, brinda una descripción de los aspectos esenciales de un sistema que representan el conocimiento en una forma utilizable, es por eso por lo que la modelación dinámica es la usada para el diagnóstico de áreas de intervención.

De acuerdo con el análisis climático presentado, se eligieron fechas y horarios representativos para la toma de datos. Los meses de agosto y enero para cubrir las mediciones del periodo cálido y frío. Se seleccionan los horarios que se ven influenciadas las superficies urbanas correspondientes a las 9:00 h, ya que habrán pasado de 3 a 4 horas tras salir el sol. Las 15:00 h se seleccionan por ser el tiempo en que se desarrolla la mayor actividad humana y mayor cantidad calorífica almacenada en los materiales, mientras que las 21:00 h ayudan a observar las superficies después de oculto el sol. Además, las mediciones se hicieron en días despejados y vientos en calma.

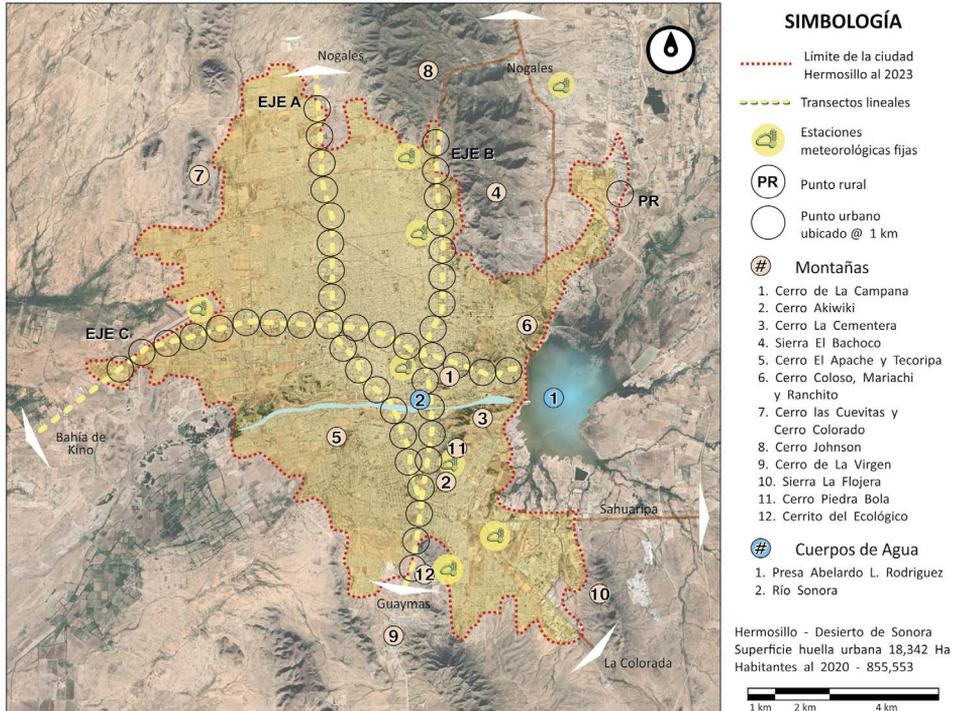
La ubicación de los transectos lineales y puntos de toma de datos fueron planificados para cubrir longitudinalmente y transversalmente la mancha urbana de la capital. Los mismos se encuentran sobre vialidades principales y se nombraron así: Eje A, central blvd. Solidaridad; Eje B, oriente blvd. Vildósola, blvd. Rodríguez y blvd. Morelos; Eje C, transversal blvd. Luis Encinas (véase la imagen IV.11).

Con respecto a la selección de áreas de intervención, se eligió el enfoque cuantitativo, experimental y transversal, haciendo uso de imágenes térmicas, estaciones meteorológicas, temperaturas superficiales, imágenes satelitales y simulaciones.

Se efectuaron mediciones de campo en los tres transectos lineales, ubicados en la imagen IV.11, recabando datos como temperaturas del aire y otras variables climáticas, además de observaciones sobre la geometría urbana, vegetación y materiales presentes. De estos se presentan los resultados del eje central A, blvd. Solidaridad donde se localizan las temperaturas del aire puntuales del periodo cálido más altas con respecto al resto de los ejes, así como del área de conurbación La Victoria (PR en la imagen anterior)

como punto representativo del punto rural o periurbano en los tres horarios de estudio.

IMAGEN IV.11. Ubicación de transectos: Eje a, Eje B, Eje C, para levantamiento de datos



FUENTE: Elaboración propia.

A continuación se muestran las tablas de las temperaturas del aire puntuales de periodo cálido y frío, cuyo objetivo es mostrar las diferencias térmicas en los distintos horarios del levantamiento y revelar los registros precisos de temperatura del aire en el transecto del eje central A, identificado como blvd. Solidaridad, donde se ubicó una ICU.

La tabla IV.1 expone el periodo cálido. En ella destacan los puntos 8, Av. de Alborada; 9, Blvd. Colosio, y 10, Blvd. Luis Encinas, como los más cálidos a las 13:00 h y se observa que el sitio más fresco se presenta en el punto 1, Boulevard Clouthier y calle Xólotl.

TABLA IV.1. *Temperaturas puntuales en Eje central A-Solidaridad; periodo cálido*

Hora:	°C																		
	8-9:00	13-14:00	21-22:00	punto															
	30.1	30.6	33.3	34	34.8	34.3	34.3	34.8	34.4	34.8	34.9	33.7	36	35.2	34	35.5	35.5	36.6	37.1
	37.6	40.7	38.3	38.8	40.1	41.2	42.7	42.6	41.5	41.5	41.5	41.4	41.2	40.2	41.5	40.4	39.7	39.6	39.8
	31.8	32.2	32.2	31.8	32.3	32.2	33	33.5	33.2	33.2	33.2	33.4	34	33.7	33.5	33.5	32.9	33.2	32.5
	1	2	3	4	5	7	8	9	11	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

FUENTE: Elaboración propia con datos colectados en agosto de 2015.

En el periodo frío, según la tabla IV.2, destacan de igual forma los puntos que en periodo cálido, revelando que al norte sigue la tendencia de un aumento de temperatura debido a que la vegetación es escasa y cuenta con mayor cantidad de tierra natural de capacidad calorífica mayor que muchos de los materiales de construcción ubicados en la zona urbana. Sin embargo, en las zonas periféricas sur, sureste y suroeste (punto 1) las temperaturas son más frescas ya que contiene más número de áreas verdes y en consecuencia mayor humedad.

El punto 9 a observar presenta temperaturas de 31.8 °C a las 13:00 h, mientras que por la mañana está en 17.4 °C. Cabe señalar que siguen presentándose como los puntos más cálidos en el periodo frío en los tres horarios detectados como ICU.

TABLA IV.2. *Temperaturas puntuales en Eje A, Solidaridad; periodo frío*

Hora:	°C																		
	8-9h	13-14h	21-22h	punto															
	12	11.8	12.1	15.9	15.5	15.7	16.7	17.4	17.1	18.5	18.7	18.7	18.8	18.8	18.8	19.5	20.1	21.4	21.3
	28.7	29.4	29.8	29.9	30.3	31.7	31.5	31.8	33.3	32.2	32.3	32.6	32.8	32.5	32.4	32.7	32.7	33.5	32.9
	21.3	22.5	21.7	22.4	22.3	22.8	22.4	21.5	22.7	22.2	21.7	21.9	21.9	22.4	22.3	22.4	22.4	21.8	20.9
	1	2	3	4	5	6	7	9	8	11	12	13	14	15	16	17	18	19	

FUENTE: Elaboración propia con datos colectados en enero de 2016.

Por su parte, la tabla siguiente muestra los datos recabados del punto periurbano o punto rural La Victoria y se da a conocer que por la mañana es la menor temperatura registrada en los tres horarios, también se observa que a las 13:00 h un notable aumento de temperatura a causa del suelo natural característico del desierto.

TABLA IV.3. *Temperatura del aire en transecto La Victoria; periodo cálido y frío*

<i>Hora</i>	<i>Periodo cálido °C</i>	<i>Periodo frío °C</i>
8-9 h	30	9.1
13-14 h	38.9	32.7
21-22 h	31.4	14.3

FUENTE: Elaboración propia con datos colectados en agosto de 2015.

Para correlacionar los datos colectados en campo, se tomaron datos de estaciones meteorológicas de temperatura del aire de estaciones urbanas y conurbanas (en Misión del Sol, ISONORAH20; en CIAD, ISONORAH37), para probar la presencia del fenómeno ICU en la mancha urbana de la capital de Sonora.

Morfología y características de ICU de Hermosillo, Sonora

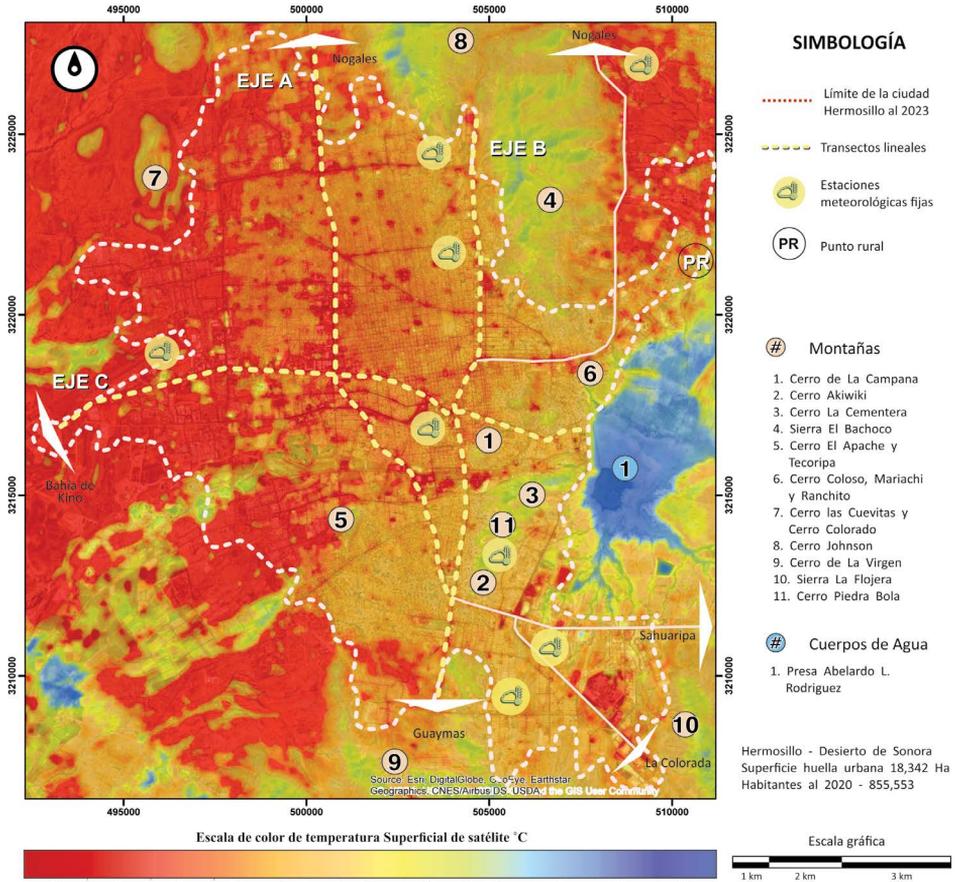
Con base en el estudio realizado de Mercado (2016), se comprobó la presencia del fenómeno de ICU en la localidad; se analizaron las distribuciones de temperaturas superficial y temperatura del aire en distintos horarios y periodos y se halló la relación entre factores y la formación de la ICU, siendo las probables causas de la formación del fenómeno en la capital: (a) cobertura urbana, (b) materiales de las superficies, (c) geometría urbana, (d) deforestación y diseño de paisaje urbano.

La temperatura superficial satelital (imagen IV.12) nos deja ver que la zona norte de la ciudad posee de manera general mayor temperatura que la zona sur. Las estaciones meteorológicas están ubicadas a manera de correlacionar las dos herramientas, mapa satelital y datos recabados en campo.

Analizando el comportamiento de la temperatura de Hermosillo se localizan áreas más cálidas con respecto a la zona periurbana en la capa dosel, destacables por poseer temperaturas más altas que las de la zona de confort,

obteniendo no solo uno sino varios puntos en la huella urbana con altas intensidades de ICU. También se identifican algunas islas frías a causa de las zonas arbóreas o cuerpos de agua.

IMAGEN IV.12. Temperatura superficial durante periodo cálido de 2015 en Hermosillo, Sonora



FUENTE: Elaboración propia.

En la imagen IV.12 se observa, dentro de la mancha urbana de la localidad, que si bien es cierto que se presentan altas temperaturas diurnas en la zona poniente periurbana y rural de la ciudad de Hermosillo, a consecuencia de la alta capacidad térmica del suelo desértico, en paralelo, dentro del perímetro de la huella urbana se forman islas de calor urbanas superfi-

ciales (ICU_s) diurnas, exhibiendo una morfología a consecuencia del uso de suelo, materiales urbanos, geometría urbana y calor antropogénico generado por el volumen vehicular y escasa vegetación en la región.

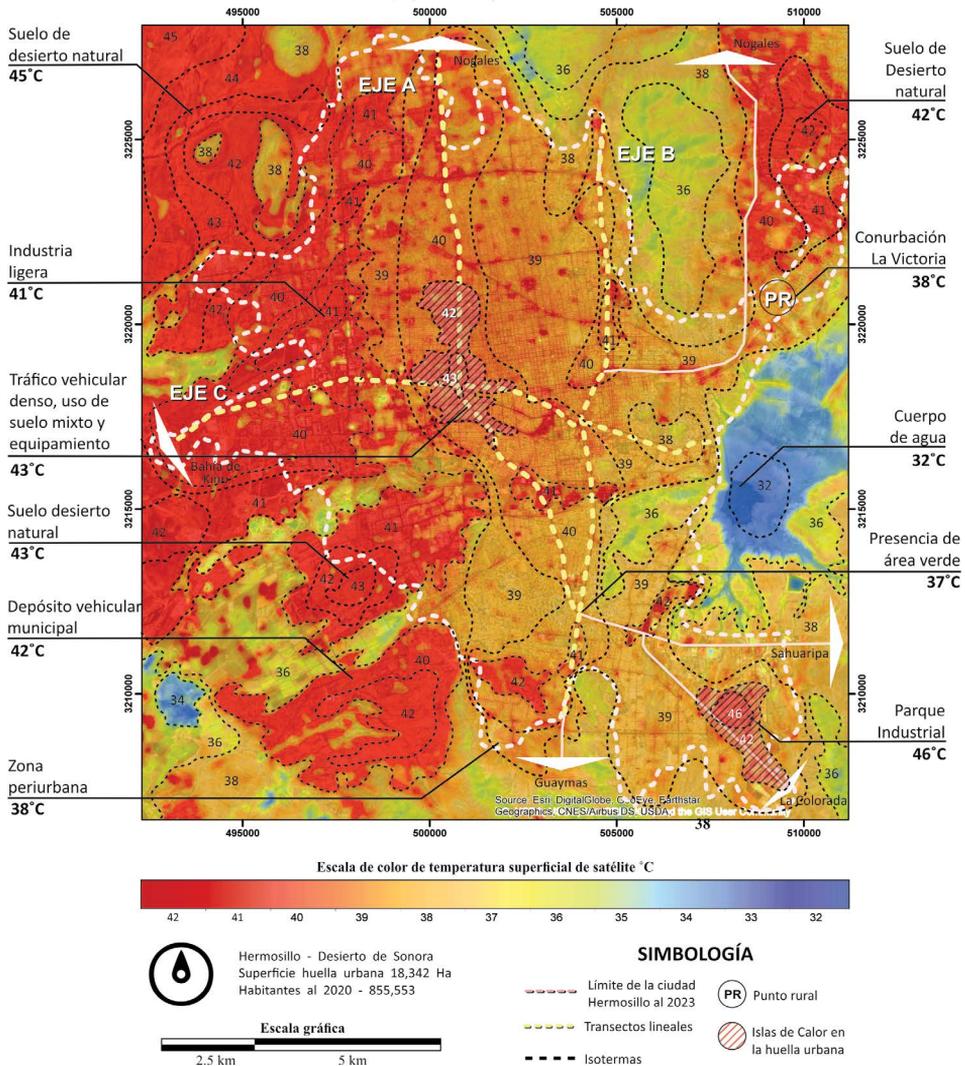
En el periodo cálido la ICU_s se presenta en el uso de suelo industrial, habitacional de densidad alta y rellenos sanitarios, mientras que la presa Abelardo L. Rodríguez es el único sitio que mantiene niveles de confort, con temperaturas más bajas. Una tendencia de incremento de temperaturas superficiales se observa en las imágenes IV.12 y IV.13 hacia el poniente, fuera de los límites de la mancha urbana por ser zonas de suelo desértico natural no urbanizado con temperaturas superiores a los 42 °C.

A continuación, en la imagen IV.13 se muestra el isoterma de la temperatura superficial satelital (escala de color) y los datos colectados en campo de transectos de la temperatura del aire del mismo día en el periodo cálido y de estaciones meteorológicas (valor numérico). Con esto se prueba la presencia de varias Isla de Calor Urbana diurna (ICU_d) así como la morfología registrada en el periodo cálido.

Al examinar el área urbanizada, se sitúan ICU_d con mayor intensidad, caracterizadas principalmente por formarse en zonas de alta densidad vehicular y poblacional, con materiales de bajo albedo (90% es asfalto en color oscuro), donde se obtiene una absorción amplia de calor proveniente de radiación solar sobre la superficie del suelo.

Puntualmente se localiza una isla de calor al centro de la zona urbanizada, identificada como blvd. Solidaridad entre blvd. Colosio y blvd. Luis Encinas (punto 9). Este sitio presenta temperaturas del aire altas (43 °C) con respecto a la zona periurbana (38 °C) con una morfología que obedece al tipo de geometría urbana, uso de suelo mixto y equipamiento, materiales no permeables de bajo albedo, escasa vegetación y calor antropogénico generado por densidad vehicular. También otra ICU_d se presenta en el uso de suelo correspondiente a la industria ligera y el aeropuerto internacional al noroeste de la ciudad de Hermosillo, registrando hasta 41 °C de temperatura del aire. Finalmente se forma otra isla en el uso de suelo industrial al sur de la localidad y su morfología respeta los límites de las empresas que arrojan CO_2 al ambiente registrando una temperatura de 46 °C.

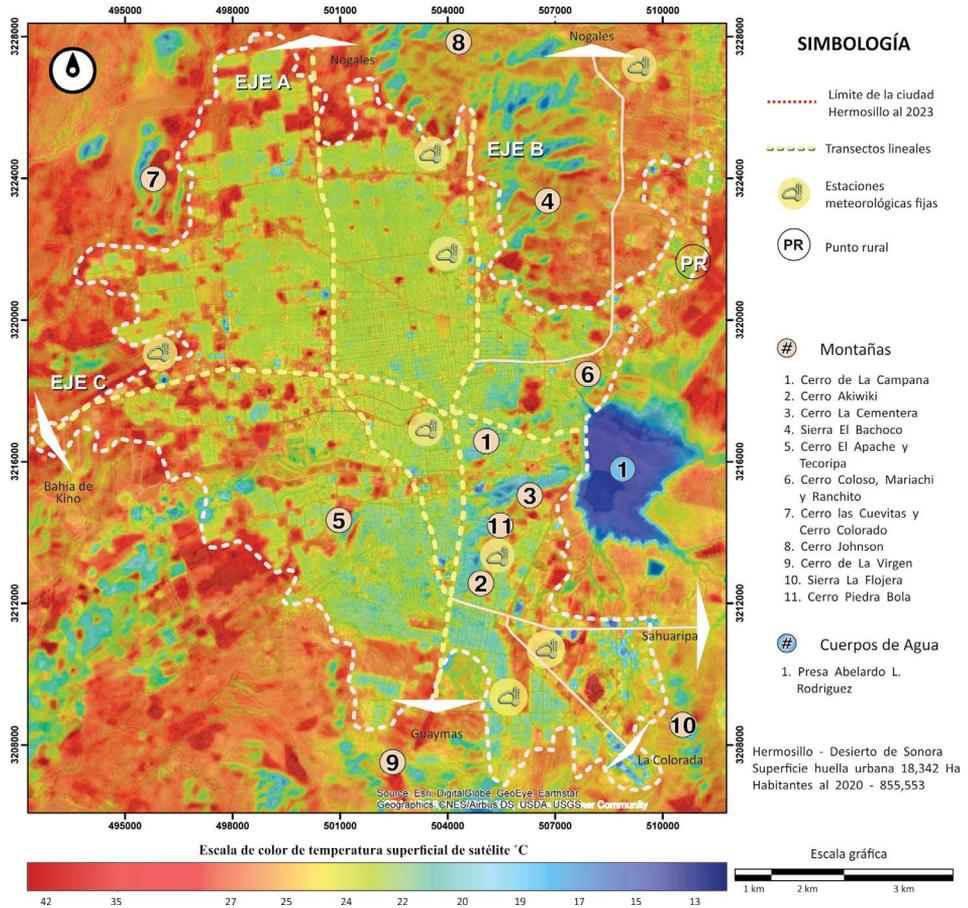
IMAGEN IV.13. Mapa de isotermas superficiales de periodo cálido



FUENTE: Elaboración propia.

Por otra parte, en la imagen IV.14, se observa una variación estacional en el periodo frío, dentro del perímetro de lo urbanizado, donde las intensidades de ICU diurnas mayores se registran al igual que en periodo cálido, del Blvd. Solidaridad y la zona industrial al sur de la ciudad.

IMAGEN IV.14. Temperatura superficial de periodo frío de 2016 en Hermosillo, Sonora



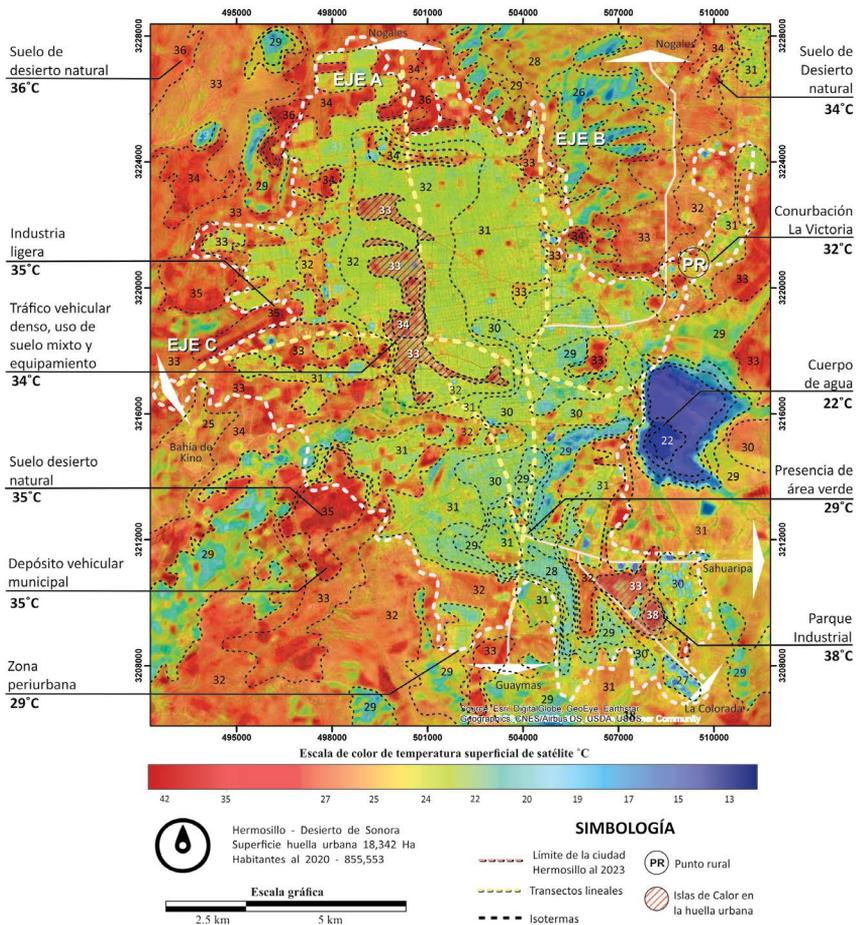
FUENTE: Elaboración propia.

La tendencia de incremento de temperaturas superficiales hacia el poniente fuera de los límites de la mancha urbana se hace presente por ser zonas de suelo desértico natural no urbanizado con temperaturas superiores a los 36 °C aún en periodo frío.

Los puntos más fríos se presentan en la cercanía a la presa Abelardo L. Rodríguez al este y al sur de la capital en el blvd. Clouthier y calle Xólotl (punto 2), donde la disminución en grados es considerable ya que hay 4.6 °C de diferencia con respecto al centro urbano, por la presencia de vegetación, vientos y materiales superficiales adecuados.

Asimismo, se observa un aumento de temperatura en el suelo natural fuera de los límites de la mancha urbana al poniente, igual que en el verano, ya que el suelo desértico por sus propiedades térmicas posee mayor temperatura que en la zona urbanizada en cualquier época del año, probando que el fenómeno ICU en Hermosillo se caracteriza como un evento nocturno por tener un comportamiento típico de suelo desértico.

IMAGEN IV.15. Mapa de Isotermas de periodo frío



FUENTE: Elaboración propia.

En el mapa de isoterma del periodo frío (imagen IV.15) se ubica la zona más cálida en el blvd. Solidaridad, entre blvd. Colosio y blvd. Luis Encinas

(34 °C) (punto 9), mientras que a lo largo de los tres ejes estudiados se observan algunos puntos más frescos dentro del centro de población como en la cercanía de la presa Abelardo L. Rodríguez al este, al pie de los cerros y en el límite sur de la huella urbana en el blvd. Clouthier y calle Xólotl (29 °C) (punto 2), esto debido a la presencia de áreas verdes identificando estas zonas como islas frías.

La morfología de la ICU_d superficial del transecto A es similar a la de verano con un ligero desplazamiento hacia el oeste. Diversas Islas de Calor se presentan en la zona de industria ligera y pesada, así como los depósitos de vehículos.

Obtenida la morfología de ICU_d en el horario de 13:00-14:00 h en la zona específica estudiada (punto 9), se determinó la intensidad del fenómeno (con datos levantados en campo de temperatura del aire) a partir de la relación que Oke (1987) ha expuesto entre las temperaturas urbanas y rurales, con el objetivo de determinar su intensidad con la expresión ΔT_{u-r} , donde:

$$\begin{aligned} \Delta T &= \text{Diferencia de temperatura} \\ u &= \text{Temperatura urbana} \\ r &= \text{Temperatura rural} \end{aligned}$$

TABLA IV.4. Cálculo de intensidad de ICU diurna (°C)

Periodo cálido	Periodo frío
ΔT_{u-r}	ΔT_{u-r}
$\Delta T = 42.6 - 45.7$	$\Delta T = 31.8 - 36$
$\Delta T = - 3.1$	$\Delta T = - 4.2$

FUENTE: Elaboración propia.

Nota: Datos colectados en agosto (periodo cálido) de 2015 y enero (periodo frío) de 2016, de 13:00 a 14:00 horas.

Como se espera, la ICU_d resulta negativa en ambos periodos, ya que el suelo natural del desierto acumula más calor que el suelo urbano. Sin embargo, si buscamos analizar y mitigar el comportamiento térmico de las superficies dentro de lo urbanizado, se toma la temperatura rural como la del área de conurbación La Victoria que presenta características de las áreas

periurbanas para determinar su intensidad (tabla IV.5) con la expresión ΔT_{u-c} , donde:

c = Temperatura de conurbación

TABLA IV.5. Cálculo de intensidad de ICU diurna de la zona urbana (°C)

Periodo cálido	Periodo frío
ΔT_{u-c}	ΔT_{u-c}
$\Delta T = 42.6 - 38.9$	$\Delta T = 31.8 - 32.7$
$\Delta T = 3.7$	$\Delta T = 0.9$

FUENTE: Elaboración propia.

Nota: Datos colectados en agosto (periodo cálido) de 2015 y enero (periodo frío) de 2016, de 13:00 a 14:00 horas.

La intensidad de ICU_d es más amplia en el periodo cálido a causa de la incidencia solar de manera más perpendicular a las superficies urbanas horizontales, que acumulan calor de la radiación solar, debido al bajo albedo de los materiales superficiales del entorno en el blvd. Solidaridad y av. de Alborada. La práctica de construir edificios con distancias pequeñas entre ellos ayuda a interceptar la radiación solar sin permitir que llegue a las superficies de pavimentos y banquetas para calentarlos. Pero en Hermosillo no sucede esta situación, debido a que se caracteriza por ser una ciudad con edificaciones en general de baja altura y no densificadas, provocando el acceso de radiación solar al cañón urbano, aumentando la temperatura superficial y haciendo el proceso de enfriamiento lento por la noche, asociado principalmente a las características térmicas de los materiales en las zonas urbanas. Por su parte, el punto de conurbación cuenta con un porcentaje más alto de superficies permeables y hay mayor presencia vegetal en la zona.

En cuanto a la auténtica ICU_n , en el horario de 21:00–22:00 h del mismo día, los resultados prueban que la ICU en la localidad de Hermosillo se presenta como un fenómeno nocturno con una intensidad de 2.5 °C en verano y 4.2 °C en invierno (tabla IV.6), afirmando que en el área urbana las temperaturas son más altas que en lo rural a consecuencia de la capacidad térmica de los materiales, ya que aún no liberan todo el calor que absorbie-

ron durante el día, mientras que el área natural es más rápida su liberación al cielo abierto desértico.

TABLA IV.6. *Cálculo de intensidad de ICU nocturna (°C)*

<i>Periodo cálido</i>	<i>Periodo frío</i>
ΔT_{u-r}	ΔT_{u-r}
$\Delta T = 33.5 - 31$	$\Delta T = 21.5 - 17.3$
$\Delta T = 2.5$	$\Delta T = 4.2$

FUENTE: Elaboración propia.

Nota: Datos colectados en agosto (periodo cálido) de 2015 y enero (periodo frío) de 2016, de 21:00 a 22:00 horas.

Al realizar el cálculo de intensidad de Isla de Calor Urbana nocturna (ICU_n) dentro de lo urbanizado, presentada en la tabla IV.7, muestra el valor numérico 7.2 °C, debido a que las superficies urbanas en el blvd. Solidaridad y av. de Alborada, principalmente de bajo albedo, aún cuentan con radiación absorbida por emitir.

TABLA IV.7. *Cálculo de intensidad de ICU_n de la zona urbana (°C)*

<i>Periodo cálido</i>	<i>Periodo frío</i>
ΔT_{u-c}	ΔT_{u-c}
$\Delta T = 33.5 - 31.4$	$\Delta T = 21.5 - 14.3$
$\Delta T = 2.1$	$\Delta T = 7.2$

FUENTE: Elaboración propia.

Nota: Datos colectados en agosto (periodo cálido) de 2015 y enero (periodo frío) de 2016.

En invierno se presenta la mayor intensidad nocturna ya que, como se mencionó anteriormente, el suelo natural se refresca de manera más rápida que las superficies artificiales. En este caso el área de conurbación, al presentar mayor porcentaje de suelos naturales, más áreas verdes y mayor flujo de viento permite mantener más fresco el ambiente por la noche de manera más rápida, mientras que al centro de la ciudad las superficies aún permanecen calientes.

Al analizar las ICU_n en la zona urbanizada, la intensidad aumenta sobre las zonas con más porcentaje de superficies construidas no reflectivas y con mayor tráfico vehicular, como es el caso del blvd. Solidaridad y av. de Albo-

rada, donde el desarrollo urbano ha impactado transformando el sector natural en uno artificial en su totalidad, con escasa flora que no provee sombras y con superficies impermeables y oscuras. En cambio, la temperatura disminuye sobre las áreas periurbanas donde se hace presente mayor vegetación regional como en el blvd. Clouthier y blvd. Xólotl.

De acuerdo con Rosenzweig *et al.* (2006), la presencia de ICU impacta a escala regional la demanda de energía eléctrica, la calidad de aire y la salud pública, ya que las altas temperaturas intensifican la problemática energética, deteriora las condiciones de confort, pone en peligro la población vulnerable y amplifica el problema de la contaminación (Santamouris, 2014; Ruiz, Correa y Cantón, 2012).

Al observar las ICU y sus intensidades en la zona urbana en verano e invierno en la capital Sonorense, se observa cómo la mayor temperatura se registra en las zonas más densas de la ciudad y con mayor tráfico vehicular, como es el caso de las intersecciones de blvd. Solidaridad con av. de Alborada, blvd. Colosio, blvd. Navarrete y blvd. Luis Encinas. Aquí el desarrollo urbano ha impactado transformando el sector natural en uno artificial en su totalidad, con flora que no pertenece a la región, no es térmicamente funcional y es ornamental, superficies impermeables y oscuras, uso de suelo mixto, actividades comerciales y geometría urbana abierta que no permite el sombreado de las calles. En cambio, la temperatura disminuye sobre las áreas urbanas, donde se hace presente mayor vegetación regional como en las intersecciones del blvd. Clouthier con blvd. Libertad y calle Xólotl, evidenciando la carencia de estrategias urbanas y micro climáticas para moderar el impacto del fenómeno.

A partir del estudio y análisis de las características y causas de la formación, morfología e intensidad de las ICU en Hermosillo, es posible proponer estrategias de mitigación aplicables a la ciudad, considerando que habrá que evaluar la efectividad de cada una de acuerdo con el sitio a micro escala, ya que el tejido urbano es una mezcla de usos de suelo, densidad poblacional, geometría urbana y vegetación, entre otros parámetros.

A continuación, se presenta una síntesis del análisis realizado describiendo las principales características y causas probables que forman la ICU en el territorio hermosillense.

TABLA IV.8. *Características y posibles causas de la ICU en Hermosillo a mesoescala*

<i>Características</i>	<i>Causa</i>
<i>Isla de Calor Urbana</i>	
La ICU se presenta como un fenómeno nocturno	El suelo desértico tiene alta capacidad de almacenamiento de calor, que libera fácilmente durante la noche, mientras que la ciudad no tiene esa facilidad de enfriamiento por la noche.
La ICU diurna presenta su mayor intensidad en la zona rural desértica	En las áreas rurales se presenta mayormente vegetación baja o arbustos que no proveen sombras
La ICU nocturna presenta su mayor intensidad en invierno	En las zonas urbanas los materiales superficiales impermeables tardan en enfriarse debido a la geometría urbana, aún con bajas temperaturas nocturnas. En la zona conurbana o periurbana se presenta mayor porcentaje de suelo natural, más áreas verdes y un incremento en el flujo de viento que permiten que el suelo y el ambiente se enfríen debido a las bajas temperaturas nocturnas.
<i>Geometría y uso de suelo urbano</i>	
La ciudad de Hermosillo se caracteriza por tener un perfil urbano de baja altura, un ancho de calles de hasta 30 metros, el 90% de calles son de asfalto y FCV de 0.8	A menor altura de edificaciones menor sombreado a las calles y mayor FCV, lo que provoca incremento de intensidad en el fenómeno diurno. Al tener superficies en calles y banquetas de asfalto y concreto expuestas a la radiación solar durante el día, por la capacidad térmica que poseen, los materiales tardan en liberar el calor que absorbieron durante el día.
<i>Vegetación</i>	
La zona sur y oriente de la ciudad son las áreas periurbanas más frescas	Tienen mayor cantidad de vegetación y materiales permeables, que propician la presencia de humedad, que permite el enfriamiento evaporativo.
En la ciudad de Hermosillo hay escasa vegetación con 5.29 m ² por habitante	Poco aporte de beneficios de sombreado y/o evapotranspiración, con lo que hay pocas posibilidades de enfriamiento.
Se presentan algunas Islas Frías en la zona urbana	Presencia de parques, plazas, cerros sin urbanizar y la presa A. L. Rodríguez, que alteran el clima a micro escala
La vegetación con riego parsimonioso es escasa, reduciendo la presencia de humedad en el ambiente y la posibilidad de enfriamiento evaporativo	El recurso hídrico es escaso.
<i>Calor antropogénico</i>	
Aumento de calor antropogénico que eleva al aumento de la intensidad del fenómeno diurno en las zonas urbanas	Por el uso de aire acondicionado que aporta calor y CO ₂ al ambiente.
Las zonas con mayor tráfico vehicular son aquellas donde se presenta mayor temperatura del área urbana	Debido al calor antropogénico que emiten los vehículos, así como su aporte de CO ₂ al ambiente
Se eleva la intensidad de la ICU diurna en zonas industriales	Debido al calor antropogénico propio de la actividad industrial
El uso de suelo industrial registra temperaturas altas	Actividades propias de cada industria, que generan calor antropogénico.

FUENTE: Elaboración propia.

A partir del resultado de ICU, se toman áreas de intervención a escala local representativas de la localidad para desarrollar estrategias de mitigación puntuales de las zonas. La importancia de acotar áreas de intervención radica en los siguientes puntos:

- (a) Permite estudiar puntualmente zonas identificadas críticas en el desarrollo de la ICU.
- (b) Las áreas de intervención propuestas ofrecen una mezcla de usos de suelo que son representativos del resto de la ciudad.
- (c) Facilita el levantamiento de datos para evaluar e interpretar los resultados lo que contribuye al conocimiento necesario para ampliar el estudio a escala local.

Abordaremos a continuación los fenómenos a escala local y microescala.

CAPÍTULO V

COMPORTAMIENTO DE LA ISLA DE CALOR URBANA A ESCALA LOCAL Y MICROESCALA



El fenómeno a escala local y microescala

En este capítulo se aborda, dentro de la temática de la Isla de Calor Urbana (ICU), cómo las características de ciertas áreas de la ciudad a escala local (entorno urbano) y micro escala (manzanas y calles) pueden influir en la distribución del clima urbano. El análisis se orienta al diseño arquitectónico urbano y de materiales utilizados en este tipo de espacios, considerando que el diseño micro climático de espacios exteriores impacta no sólo sobre el confort de los usuarios, sino también sobre el clima de ciertas porciones de la ciudad.

Para el análisis se eligen dos áreas de intervención representativas de características específicas dentro de la mancha urbana: un área dentro de la zona de mayor intensidad de una de las ICU detectada en la huella urbana y otra dentro de la Isla Fría, a fin de comparar el diseño urbano vs los efectos térmicos. Dicho análisis se efectúa siguiendo tres métodos que se presentan a continuación:

- (a) Mediciones de parámetros climáticos en las áreas de intervención tales como la temperatura del aire (bulbo seco), velocidad de viento y humedad relativa en condiciones bajo la sombra.
- (b) Fotografías infrarrojas de temperaturas superficiales de los materiales que limitan estas áreas.
- (c) Simulaciones de temperaturas del aire e intensidad de la Isla de Calor que ayudan a estimar las condiciones de las áreas de intervención respecto a la zona rural.

La intención de esta parte del estudio es caracterizar la ICU en estas áreas de la ciudad y obtener las mejores opciones de diseño microclimático que puedan impactar sobre la mitigación de este fenómeno para el mejoramiento de la calidad ambiental de los espacios exteriores.

Las zonas climáticas locales (LCZ)

Dentro del tejido urbano de una ciudad, la clasificación de zona climática local (LCZ, por sus siglas en inglés) es una alternativa que genera patrones de categorización a escala local en términos de FCV, altura de edificios, admitancia y albedo de superficies y calor antropogénico, para cubrir una muestra de la configuración observada normalmente en el contexto urbano. De este modo, se pueden identificar cualidades físicas de zonas que derivarán en determinadas características climáticas locales.

En el trabajo de Stewart y Oke (2012) ésta se describe como una cobertura uniforme de estructura urbana, materiales y actividad humana que puede expandirse desde metros a kilómetros a la redonda y la clasifican en 10 tipos de geometría urbana. Además, una clasificación de cobertura de suelo es necesaria para identificar cuantitativamente el factor de cielo visible (FCV) y albedo. Los siete principales tipos se muestran en la imagen V.1. Por último, definen los tipos de la cobertura de suelo de acuerdo con las propiedades cambiantes con patrones climáticos, prácticas agrícolas o ciclos estacionales, de las cuales se presentan cuatro:¹⁶

- (b) *Árboles desnudos*. Vegetación de hoja caduca, aumento del factor de vista del cielo y albedo reducido.
- (s) *Cobertura de nieve*. Cobertura de 10 cm de profundidad, baja admitancia y alto albedo.
- (d) *Suelo seco*. Suelo seco y árido, baja admitancia, aumento de albedo.
- (w) *Suelo húmedo*. Suelo anegado, alta admitancia, albedo reducido.

¹⁶ Las nomenclaturas de las cuatro variables de cobertura de suelo corresponden a la primera letra de su nombre en inglés: b para *bare trees*, s para *snow cover*, d para *dry ground* y w para *wet ground*.

Con las variables expuestas, la geometría urbana, tipo de cobertura de suelo y cobertura de suelo según propiedades cambiantes, se puede identificar la LCZ de un sitio.

IMAGEN V.1. Clasificación de zonas climáticas locales

	SUELO	DESCRIPCIÓN	FCV	ALBEDO
DESIERTO NATURAL SUPERFICIES PERMEABLES				
COBERTURA URBANA SUPERFICIES IMPERMEABLES				
VEGETACIÓN SUPERFICIES PERMEABLES				

FUENTE: Elaboración propia con base en Stewart y Oke (2012).

Con base en esta clasificación, se identifican tipos de zonas climáticas locales características de diferentes áreas de la ciudad de Hermosillo. En la siguiente tabla (V.1) se presentan los tipos de LCZ más relevantes en la ciudad, buscando una aproximación a las características de las clasificaciones ya descritas.

TABLA V.1. Clasificación de clima local para la ciudad de Hermosillo, Sonora

LCZ	Abierta y de mediana altura
<p>Descripción de la zona: Edificios de mediana altura, pocos o ningún árbol, ubicados de manera dispersa con sus cuatro fachadas visibles. El F_{CV} es medio con actividad humana de tipo comercial, uso de suelo mixto.</p> <p>Materiales de construcción: Concreto, acero, vidrio, block y ladrillo.</p> <p>Cobertura de suelo: Cubierta con materiales artificiales como concreto y pavimento.</p> <p>Ubicación: Al centro de la mancha urbana.</p> <p>Correspondencia: LCZ 5,8, cobertura de suelo tipo E</p>	
	
LCZ	Compacta, de baja altura y uniforme
<p>Descripción de la zona: Mezcla densa de edificación de un solo nivel, pocas veces dos niveles, ubicados de manera uniforme con pocos o ningún árbol. El F_{CV} es elevado con actividad humana de tipo habitacional, uso de suelo habitacional.</p> <p>Materiales de construcción: Concreto, acero, vidrio, block y ladrillo.</p> <p>Cobertura de suelo: Cubierta con materiales artificiales como concreto y pavimento.</p> <p>Ubicación: Al centro de la mancha urbana y en la periferia.</p> <p>Correspondencia: LCZ 3,7, cobertura de suelo tipo E.</p>	
	
LCZ	Abierta y de baja altura
<p>Descripción de la zona: Edificación de un solo nivel, pocas veces dos niveles, densidad baja a media con vegetación media y dispersa. El F_{CV} es medio con actividad humana de tipo habitacional, uso de suelo habitacional.</p> <p>Materiales de construcción: Concreto, acero, vidrio, block y ladrillo.</p> <p>Cobertura de suelo: cubierta con materiales artificiales como concreto, pavimento y pocas veces sin pavimentar.</p> <p>Ubicación: Dentro de la mancha urbana y en la periferia.</p> <p>Correspondencia: LCZ 6, cobertura de suelo tipo E.</p>	
	

<p>LCZ</p> <p><i>Ligera, abierta y de baja altura</i></p> <p>Descripción de la zona: Edificación de un solo nivel, densidad baja dispersa y con vegetación media, suelo permeable en un medio natural El F_{CV} es elevado con actividad humana y uso de suelo habitacional.</p> <p>Materiales de construcción: Block, ladrillo, madera, paja.</p> <p>Cobertura de suelo: Cubierta de suelo en su mayoría natural o terracería y construcción ligera</p> <p>Ubicación: Se ubica en la periferia, en conurbación y zona rural</p> <p>Correspondencia: LCZ 7,9, cobertura de suelo tipo C.</p> 	 
<p>LCZ</p> <p><i>Pesada y de baja altura</i></p> <p>Descripción de la zona: Edificios abiertos y de poca altura 1-3 niveles, ubicados de manera dispersa con poca o nula vegetación. El F_{CV} es elevado con actividad humana de tipo comercial, uso de suelo mixto y/o equipamiento.</p> <p>Materiales de construcción: Concreto, acero, vidrio y block.</p> <p>Cobertura de suelo: Cubierta con materiales artificiales como concreto y pavimento.</p> <p>Ubicación: Dentro de la mancha urbana.</p> <p>Correspondencia: LCZ 8, cobertura de suelo tipo E.</p> 	 
<p>LCZ</p> <p><i>Industrial</i></p> <p>Descripción de la zona: Edificios industriales de baja altura y media, ubicados de manera dispersa con poca o nula vegetación. El F_{CV} es de medio a elevado con actividad humana y uso de suelo industrial.</p> <p>Materiales de construcción: Concreto, acero y metal.</p> <p>Cobertura de suelo: Cubierta con materiales artificiales como concreto y pavimento.</p> <p>Ubicación: En la periferia y algunas zonas en la mancha urbana.</p> <p>Correspondencia: LCZ 10, cobertura de suelo tipo E</p> 	 

FUENTE: Elaboración propia.

La microescala. Selección de áreas de intervención

Con el propósito de analizar sitios representativos de ICU e isla fría, se identificaron y seleccionaron áreas a micro escala con fines de mejorar el microclima en esas zonas específicas y generar así estrategias de mitigación.

La selección se llevó a cabo a partir del análisis de la distribución espacial y temporal de la ICU de Hermosillo, así como de los datos de las medi-

ciones móviles según 3 ejes a lo largo de la ciudad y los criterios establecidos en el apartado anterior. Es así que son dos áreas de intervención, consideradas por sus dimensiones como micro escala, que fueron seleccionadas dentro de la mancha urbana de acuerdo con el siguiente criterio:

- Ubicación dentro de la ICU de la ciudad y dentro de una *Isla Fría*.
- Distintos usos de suelo, geometría urbana, densidad vehicular y densidad poblacional.
- Diferencia de cobertura vegetal.
- Presencia de viento en una de las áreas.
- Áreas con la mayor y menor temperaturas registradas en verano e invierno.
- Diversificación de superficies urbanas en ambas áreas, a fin de estudiar la variación de temperatura superficial de cada material.
- Áreas representativas del tejido urbano de la ciudad.

Estas áreas serán las representativas de la zona urbana, donde en el primero de los casos se presenta una zona con una de las intensidades de ICU más elevadas, y en el segundo caso, como una de las áreas periurbanas más frescas (*Isla Fría*). Las áreas de intervención seleccionadas dentro de la mancha urbana de Hermosillo como estudio de caso son las siguientes dos: (a) Boulevard Solidaridad y av. de Alborada (punto 9 de uno de los ejes) y (b) Boulevard Clouthier y calle Xólotl (punto 2 de uno de los ejes). Se ubicaron en cada caso cuadrículas de 180×180 m, que corresponden a 3.2 hectáreas. Estas dimensiones de área de análisis de Sistema de Información Geográfica se seleccionaron para cubrir la superficie necesaria de análisis mediante las simulaciones, que se describirán más adelante.

Boulevard Solidaridad y avenida de Alborada

Generalidades

En el boulevard Solidaridad y la avenida de Alborada se presenta una ICU con alta intensidad dentro de la zona urbanizada. El uso de suelo es mixto con densidad habitacional media, tiene una proporción del 27% de áreas

pavimentadas y 2.24% con vegetación ubicada en camellones al centro de la vialidad y algunas jardineras sobre las banquetas. Posee la mayor densidad vehicular de la ciudad, con 274 000 vehículos al día, distribuidos en ocho carriles vehiculares de asfalto, que aportan calor antropogénico al ambiente. El área tiene un FCV moderado. Lo anterior descrito junto con el clima local, contribuye a tener una alta temperatura del periodo cálido.¹⁷ Perteneció al grupo *abierto y mediana altura* en la clasificación de LCZ.

Entorno urbano

Las características del entorno en el cañón urbano del sitio se registran en la tabla V.2, donde se observa un área cubierta en su totalidad con vialidades de asfalto y escasa vegetación, razones por las cuales se hace presente la ICU_d.

TABLA V.2. Registro de superficies urbanas en punto de estudio Solidaridad-Alborada

Punto	% Vegetación	% Pavimento	% Edificación	% Área cubierta	Número de carriles	Altura edificios en niveles
Bld. Solidaridad y av. de Alborada	2.24	27	32	100	8	2-6

FUENTE: Elaboración propia.

Estudiar las superficies del suelo con bajo albedo, como banquetas de concreto y vialidades de asfalto, además de otros espacios carentes de vegetación, permite comprender el comportamiento de la energía absorbida e irradiada o reflejada hacia las áreas verticales de los edificios, que pueda causar un aumento de la temperatura urbana. En la gráfica 5 se expone el tipo de material del que están compuestas las superficies, así como el área en m².

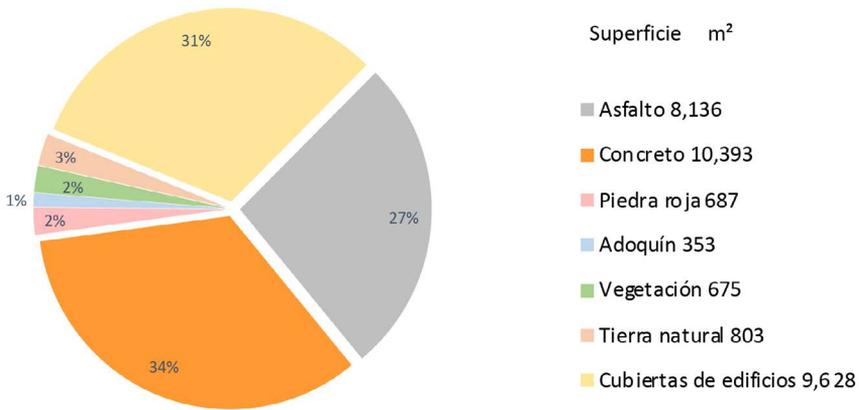
La vegetación existente está compuesta por Benjamina (*ficus benjamina*) y de algunas palmas de abanico del desierto (*washingtonia robusta*), su uso paisajístico es en camellones, arriates, jardines y área peatonal. Dentro de

¹⁷ Datos recabados en campo de agosto 2019.

las 3.2 ha se tienen 674.67 m², que representa solo el 2.24% del área total y con una población, de acuerdo con INEGI (2020), de 672 personas. Esto se traduce en 1m² de área verde por habitante en esta zona.

Al estudiar las superficies urbanas, hay una proporción mucho mayor entre la cantidad de asfalto, concreto, edificación y superficies impermeables contra las áreas de vegetación, lo cual se presume es de las principales causas del aumento de temperaturas en el sitio en el periodo cálido, así como en el periodo frío, con temperaturas de 41.6°C en el verano y de 26.9°C en el invierno.¹⁸

GRÁFICA V.1. *Materiales en superficies urbanas del área de intervención Solidaridad-Alborada*



FUENTE: Elaboración propia.

Boulevard Clouthier y calle Xólotl

Generalidades

El área representativa de menor temperatura en verano se ubica sobre el boulevard Manuel J. Clouthier y calle Xólotl, se caracteriza por estar en la zona periurbana de la ciudad y colindante al Cerrito del Ecológico, por ello

¹⁸ Datos levantados en campo en agosto y enero de 2019.

se encuentran superficies construidas y naturales, causa probable por la que las temperaturas permanecen más frescas que en el área urbana. La densidad vehicular es 66 000 vehículos al día, la vialidad se compone de 8 carriles de concreto, y cuenta con un bajo FCV. Lo anterior descrito contribuye a tener 39.5°C de temperatura del aire en el periodo cálido¹⁹.

Pertenece al grupo *abiertos y de baja altura* en la clasificación de las LCZ.

Entorno urbano

El entorno en el cañón urbano del sitio se registra en la tabla V.3, se observa un área cubierta y edificada a 66%, con superficies de concreto y algunas construcciones de tipo industrial, hay presencia de vegetación y zonas de tierra natural.

TABLA V.3. Registro de superficies urbanas en punto de estudio Clouthier-Xólotl

Punto	% Vegetación	% Pavimento	% Edificación	% Área cubierta	Número de carriles	Altura edificios en niveles
Blvd. Clouthier y calle Xólotl	9	22	11	66	8	2

FUENTE: Elaboración propia.

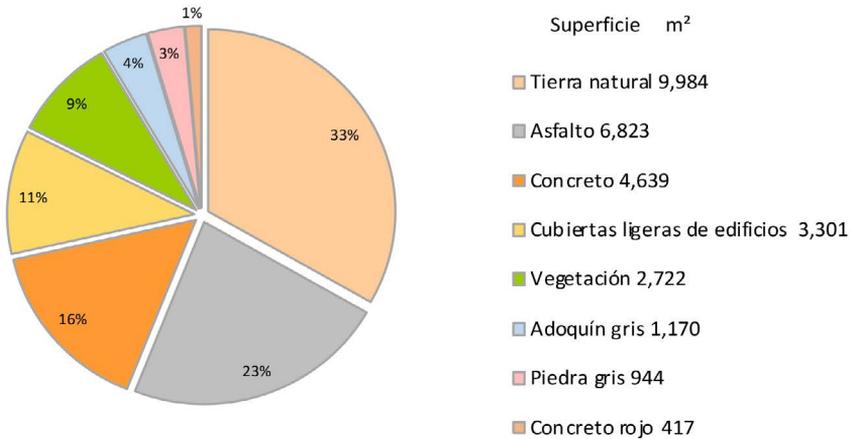
En la gráfica V.2 se muestran el área (m²) y el tipo de material del que están compuestas las superficies horizontales en un radio de 3.2 ha: en las superficies verticales predomina el uso de block en todas las edificaciones, sin embargo, hay comercios informales que cuentan con cubierta de lámina y estructura de acero. En cuanto a las superficies horizontales, predomina la tierra natural con 33% de la superficie, además el asfalto y el concreto de banquetas y vialidades.

La vegetación de la zona se compone de Mezquites (*prosopis velutina chilensis*) y pitayo dulce (*Stenocereus thurberi*), la cual cubre una superficie de 571.2 m²; además, cuenta con 2 151 m² de Zacate buffel (*Cenchrus ciliaris*) dando un total de 2 722.20 m² de superficie cubierta que representa el

¹⁹ Datos recabados en campo en agosto de 2019.

9.07% del área total. Es relevante señalar que la superficie de tierra natural es de 9 984 m² correspondiente a 33.28%, lo que sumado con el área verde da un total de 42.35% de superficies naturales y permeables. Además, tiene una población de 189 personas (INEGI, 2020) en esta zona, lo que resulta en 14 m² de área verde por habitante cumpliendo con los valores óptimos que busca la ONU, que en su preocupación por la salud pública recomienda 16 m² de área verde por persona, y la Organización Mundial de la Salud establece al menos 9 m². La vegetación se encuentra ubicada en el perímetro de la vialidad, sin embargo, aunque su ubicación no favorece para sombrear el pavimento de la vialidad o banquetas, el porcentaje cubierto por superficies arbóreas es de las principales razones por las que este lugar es el área más fresca en ambas estaciones del año.

GRÁFICA V.2. *Materiales en superficies urbanas del área de intervención Clouthier-Xólotl*



FUENTE: Elaboración propia.

Estudio de las áreas de intervención mediante mediciones de parámetros climáticos

Boulevard Solidaridad y avenida de Alborada *Temperaturas del aire de periodo cálido*

Para referenciar y complementar los datos de las estaciones meteorológicas del periodo 2015-2016, se registraron en las áreas seleccionadas parámetros climáticos como temperatura del aire, temperatura superficial, humedad relativa y viento. También se utilizó la referencia de datos de estaciones fijas de temperatura del aire de la estación meteorológica urbana (Misión del Sol, ISONORAH20) y temperatura del aire de la estación meteorológica conurbación (CIAD, ISONORAH37) del año 2019 del periodo cálido, tomando como día representativo el 27 de agosto.

Se observa en la tabla V.4 que el punto seleccionado como el más cálido de la mancha urbana presenta una temperatura de 41.6 °C y un flujo de viento de 0.5 m/s a las 15:00 h, mientras que el área donde se ubica la estación meteorológica urbana ISONORAH20 al noreste de la ciudad se registra 1.7 °C menos, ya que cuenta con mayor número de áreas verdes a su alrededor y el tránsito vehicular es menor.

TABLA V.4. *Parámetros climáticos Solidaridad-Alborada, periodo cálido*

<i>Ubicación: Boulevard Solidaridad y avenida de Alborada</i>					<i>Fecha: agosto de 2019</i>	
<i>Datos medidos en campo</i>					<i>Datos de estaciones meteorológicas</i>	
<i>Hora</i>	<i>Temperatura urbana del aire °C (local)</i>	<i>% Humedad urbana (local)</i>	<i>Viento (m/s) urbano (local)</i>	<i>Temperatura del aire °C en La Victoria, conurbación</i>	<i>Temperatura de estación meteorológica urbana °C ISONORAH20</i>	<i>Temperatura de estación meteorológica (conurbación) °C ISONORAH37</i>
9:00 h	37.0	47	0.3	35.8	34.4	33.4
15:00 h	41.6	34	0.5	34.2	39.9	38.0
21:00 h	33.3	50	0.0	31.7	32.4	31.7

FUENTE: Elaboración propia con datos medidos en campo en agosto de 2019.

Con los datos tomados en campo de 2019 a las 15 h, se calcula la intensidad ΔT_{u-c} , donde:

T_c Temperatura conurbación

Se observa en la tabla V.5 que la máxima intensidad de ICU de la zona urbana $\Delta T_{u-c}=7.4$ entre el punto Solidaridad-Alborada y la zona conurbana La Victoria, resultando más fresca el área de conurbación, ya que posee mayor número de superficies naturales que contribuyan al menor calentamiento de las superficies, lo que habla de un impacto del entorno construido ante la temperatura urbana del sitio a escala local.

TABLA V.5. Cálculo de intensidad de ICU de periodo cálido ($^{\circ}\text{C}$), Solidaridad-Alborada

Hora	Temperatura del aire urbana (u) $^{\circ}\text{C}$	Temperatura del aire en La Victoria $^{\circ}\text{C}$ conurbación (c)	Intensidad de ICU ΔT_{u-c}
9:00 h	37.0	35.8	1.2
15:00 h	41.6	34.2	7.4
21:00 h	33.3	31.7	1.6

FUENTE: Elaboración propia con datos medidos en campo en agosto de 2019.

A fin de generar estrategias de mitigación, se requiere conocer el comportamiento de las superficies en el punto de análisis, para con ello determinar si las existentes son de las causas primarias y proponer cambios en caso de ser necesario. En la siguiente tabla se registran las temperaturas en los tres horarios establecidos de las superficies en el sitio de estudio.

TABLA V.6. Registro de materiales y temperaturas superficiales, Solidaridad-Alborada, periodo cálido

Material	9:00 h Temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$)	15:00 h Temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$)	21:00 h Temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$)
Concreto bajo la sombra	33.9	49.0	41.4
Concreto expuesto al sol	46.4	59.7	–
Asfalto bajo la sombra	42.0	53.2	44.6
Asfalto expuesto al sol	47.7	57.6	–
Piedra roja bajo la sombra	32.2	51.6	39.2
Piedra roja expuesta al sol	46.1	57.7	–
Árbol	31.3	44.4	36.3
Adoquín bajo la sombra	29.2	42.8	39.6
Adoquín expuesto al sol	41.2	55.8	–

FUENTE: Elaboración propia con datos medidos en campo en agosto de 2019.

Por la mañana el asfalto expuesto al sol presenta la mayor temperatura de 47.7 °C aumentando casi 10 °C en ocho horas. Por la noche, con dos horas de oculto el sol, disminuye 13 °C registrando 44.6 °C y representando la temperatura más alta del resto de los materiales en este horario, ya que en el día recibe radiación calentando la superficie y el calor acumulado que es liberado lentamente, provocando que la superficie tenga un retardo para estar en temperatura ambiente. Por su parte, el concreto registra 46.4 °C por la mañana, aumentando 13.3 °C a las 15:00 h; presenta la mayor temperatura en este horario del resto de los materiales con 59.7 °C, para las 21:00 h disminuye hasta llegar a 41.4 °C, por lo que se posiciona en segundo lugar de material con mayor temperatura.

Es así, que el concreto y el asfalto son las superficies con mayor temperatura en este sitio que contribuyen al efecto de ICU relacionado con el estrés térmico, ya que provocan un aumento de la temperatura del aire. Sin embargo, se observa que al estar bajo la sombra se reduce hasta en 12 °C, anotación primordial para la ubicación de estos materiales en la geometría urbana. La piedra roja, debido a su color, se encuentra a 2 °C más de diferencia con el concreto, lo que indica que el color también contribuye a aumentar su temperatura al estar expuesto al sol. De los materiales que presentaron menor temperatura es el adoquín con 42.8 °C a las 15:00 h por ser una superficie permeable que permite el paso del agua, aire y vapor para absorber la radiación recibida y mantener fresco el pavimento.

Boulevard Solidaridad y avenida de Alborada Temperaturas del aire de periodo frío

Los datos climáticos del periodo frío se capturan en las tablas V.8 y V.9, en ellos se observa una diferencia de temperatura entre las urbanas y las de conurbación. En cuanto a la zona urbanizada, el área de análisis presenta mayor temperatura a las 15:00 h con 26.9 °C, en contraste con la estación meteorológica urbana ISONORAH20 (con 23.5 °C), debido a que en la estación fija se ubican zonas vegetales que favorece al enfriamiento y sombreadamiento. Con respecto al viento, al igual que en el periodo cálido, la velocidad es baja registrando 0.4 m/s.

Por la mañana el área urbana posee menor temperatura (14.4 °C) que la conurbación (17.7 °C), esto por los suelos naturales característicos del clima cálido-seco que rodean el sitio La Victoria que a tan solo dos horas de salir el sol ya muestran mayor temperatura que las superficies artificiales del entorno urbano del blvd. Solidaridad y av. de Alborada. Por otra parte, las temperaturas capturadas en el sitio La Victoria son mayores que en la estación meteorológica CIAD-ISONORAH37, ya que ésta última se encuentra

TABLA V.7. *Parámetros climáticos Solidaridad-Alborada, periodo frío*

<i>Ubicación: Boulevard Solidaridad y avenida de Alborada</i>					<i>Fecha: enero 2019</i>	
<i>Datos medidos en campo</i>					<i>Datos de estaciones meteorológicas</i>	
<i>Hora</i>	<i>Temperatura urbana del aire °C (local)</i>	<i>% Humedad urbana (local)</i>	<i>Viento (m/s) urbano (local)</i>	<i>Temperatura del aire °C La Victoria conurbación</i>	<i>Temperatura de estación meteorológica urbana °C ISONORAH20</i>	<i>Temperatura de estación meteorológica (conurbación) °C ISONORAH37</i>
9:00 h	14.4	56	0.4	17.7	14.6	12.4
15:00 h	26.9	34	0.4	25.4	23.5	22.6
21:00 h	19.6	60	0.2	15.3	17.3	14.9

FUENTE: Elaboración propia con datos medidos en campo en enero 2019.

rodeada de masas vegetales, mientras que la primera contiene pasto artificial y áreas de suelo desértico natural.

En la tabla V.8 se obtienen intensidades negativas por la mañana ($\Delta T_{u-c} = -3.3$), ya que en la zona urbana la temperatura es menor que en la conurbación por el tipo de suelo natural en el que están situados, a las 15:00 h la ΔT_{u-c} es de 1.5 y por la noche se presenta la mayor intensidad de ΔT_{u-c} con 4.3, lo cual prueba que el fenómeno de ICU en Hermosillo es nocturno debido a que aún no se alcanzan a enfriar los materiales de la zona urbana y en la conurbación las superficies tienen más posibilidad de liberar el calor.

TABLA V.8. *Cálculo de intensidad de ICU de periodo frío (°C), Solidaridad-Alborada*

<i>Hora</i>	<i>Temperatura del aire °C urbana (u)</i>	<i>Temperatura del aire en La Victoria °C, conurbación (c)</i>	<i>Intensidad de ICU ΔT_{u-c}</i>
9:00 h	14.4	17.7	-3.3
15:00 h	26.9	25.4	1.5
21:00 h	19.6	15.3	4.3

FUENTE: Elaboración propia con datos medidos en campo en enero de 2019.

A partir de esto, se hace relevante conocer el comportamiento térmico de las superficies en el punto de análisis y determinar si es de las principales causas de intensidad de ICU y así proponer un cambio de estas.

Por ello a continuación en la tabla V.9, se registran las temperaturas de las superficies que rodean el punto Solidaridad y Alborada del periodo frío. Por la mañana se observa que el material de menor temperatura es el concreto a la sombra con 7.4 °C y el de mayor temperatura es el asfalto expuesto al sol con 11.9 °C. A las 15:00 h la superficie más fresca es el adoquín, el asfalto y el concreto bajo la sombra y el más caliente es el concreto al sol con 33.6 °C. Por la noche donde la intensidad de ICU es más amplia, la superficie más fresca es el concreto con 14.1 °C y la más cálida la piedra roja con 18.3 °C; sin embargo, cabe señalar que los m² de piedra roja son pocos y sólo representan 3.63% de las superficies horizontales, comparados con las superficies de asfalto y concreto.

TABLA V.9. Registro de materiales y temperaturas superficiales, Solidaridad-Alborada, periodo frío

<i>Material</i>	<i>9:00 h Temperatura superficial (°C)</i>	<i>15:00 h Temperatura superficial (°C)</i>	<i>21:00 h Temperatura superficial (°C)</i>
Concreto bajo la sombra	7.4	19.7	14.1
Concreto expuesto al sol	9.0	33.6	-
Asfalto bajo la sombra	7.5	22.5	17.0
Asfalto expuesto al sol	11.9	32.1	-
Piedra roja bajo la sombra	-	-	18.3
Piedra roja expuesta al sol	10.5	31.0	-
Árbol	11.0	22.0	18.5
Adoquín bajo la sombra	-	18.0	16.4
Adoquín expuesto al sol	8.4	24.9	-

FUENTE: Elaboración propia con datos levantados en campo en enero de 2019.

Es así, que el concreto y el asfalto son las superficies que protagonizan los análisis, por registrar las mayores temperaturas que contribuyen a una intensidad de ICU_n amplia.

Al analizar las temperaturas de las superficies de ambos periodos, se concluye que los materiales con más alta emisividad como el concreto y asfalto son los causantes del incremento de la temperatura superficial, mientras que las áreas permeables como el adoquín, resultan menos impactantes

para la temperatura urbana. También la ausencia de área verde (m^2/hab -tante) es de los principales factores para que no se presente sombreado en las superficies, evitando su calentamiento y no se dé el efecto de enfriamiento evaporativo que brinda la vegetación.

Boulevard Clouthier y calle Xólotl ***Temperaturas del aire de periodo cálido***

Como se ha mostrado, el área de Clouthier-Xólotl presenta menor temperatura que Solidaridad-Alborada debido a la presencia de áreas verdes, menor flujo vehicular y por el tipo de superficies urbanas. El primero tiene mayor porcentaje de humedad a causa de la vegetación, así como un incremento en la velocidad de 1.5 m/s del viento por estar en la periferia de la ciudad sin obstrucciones, que, de acuerdo con Puliafito *et al.* (2013) y Oke (1987), es un elemento que influencia la sensación térmica exterior y a la intensidad de la ICU.

TABLA V.10. *Parámetros climáticos Clouthier-Xólotl, periodo cálido*

<i>Ubicación: Boulevard Clouthier y calle Xólotl</i>					<i>Fecha: agosto 2019</i>	
<i>Datos medidos en campo</i>					<i>Datos estaciones meteorológicas</i>	
<i>Hora</i>	<i>Temperatura del aire °C Urbana (local)</i>	<i>Humedad % Urbana (local)</i>	<i>Viento (m/s) Urbana (local)</i>	<i>Temperatura del aire °C La Victoria, conurbación</i>	<i>Temperatura estación meteorológica urbana °C ISONORAH20</i>	<i>Temperatura estación meteorológica conurbación °C ISONORAH37</i>
9 h	33.0	55	1.0	35.8	34.4	33.4
15 h	39.5	44	1.5	34.2	39.9	38.0
21 h	33.2	48	1.0	31.7	32.4	31.7

FUENTE: Elaboración propia con datos levantados en campo en agosto de 2019.

Realizando una comparación de la temperatura del área en conurbación Clouthier-Xólotl, éste se encuentra a las 15:00 y las 21:00 h por encima del sitio La Victoria, ya que tiene superficies impermeables como el concreto y asfalto que aportan mayor temperatura al ambiente urbano.

Con respecto a la intensidad calculada en la tabla V.11, la máxima se obtiene a las 15:00 h con $\Delta T_{uc}=5.3$; sin embargo, es menor que el punto Solidaridad-Alborada. Por la mañana la intensidad es negativa ya que se encuentra más cálida el área de conurbación La Victoria por las superficies

de tierra expuestas a la radiación, mientras que en el blvd. Clouthier y calle Xólotl hay masas vegetales importantes y la topografía del sitio beneficia el enfriamiento por ventilación natural y por las sombras proyectadas.

TABLA V.11. *Cálculo de intensidad de ICU de periodo cálido (°C) Clouthier-Xólotl*

<i>Hora</i>	<i>Temperatura del aire °C urbana (u)</i>	<i>Temperatura del aire La Victoria °C, conurbación (c)</i>	<i>Intensidad de ICU ΔT_{u-c}</i>
9:00 h	33.0	35.8	-2.8
15:00 h	39.5	34.2	5.3
21:00 h	33.2	31.7	1.5

FUENTE: Elaboración propia con datos medidos en campo en agosto de 2019.

En la tabla V.12 se registran las temperaturas de las superficies que se encuentran en el sitio 2 Clouthier-Xólotl. Por la mañana el concreto de color rojo presenta el valor numérico más alto con 38.3 °C; a las 15:00 h el asfalto alcanza los 50.6 °C y por la noche vuelve a encabezar el concreto rojo rugoso con 37.3 °C. En cuanto a la tierra natural, a las 15:00 h tiene la mayor temperatura superficial con 53.6 °C, hecho que afirma la alta capacidad calorífica que tiene, una característica del suelo árido.

TABLA V.12. *Registro de materiales y temperaturas superficiales, Clouthier-Xólotl, periodo cálido*

<i>Material</i>	9:00 h	15:00 h	21:00 h
	<i>Temperatura superficial (°C)</i>	<i>Temperatura superficial (°C)</i>	<i>Temperatura superficial (°C)</i>
Concreto a la sombra	17.0	26.5	34.9
Concreto al sol	30.6	44.2	-
Asfalto a la sombra	20.8	31.9	35.9
Asfalto expuesto al sol	31.2	50.6	-
Concreto en calle con sombra	23.9	45.0	36.5
Concreto en calle al sol	32.6	49.8	-
Piedra gris a la sombra	20.3	25.2	32.1
Piedra gris al sol	35.5	39.2	-
Tierra natural a la sombra	21.2	37.2	31.9
Tierra natural al sol	36.5	53.6	-
Zacate buffel a la sombra	19.4	26.7	32
Zacate buffel al sol	28.1	39.6	-
Adoquín gris a la sombra	22.3	28.3	35.5
Adoquín gris al sol	32.2	41.4	-
Concreto rojo al sol	38.3	49.6	-
Concreto rojo sombra	27.2	37	37.3

FUENTE: Elaboración propia con datos levantados en campo en agosto 2019.

Por su parte la piedra gris a la sombra presenta la menor temperatura con 25.2 °C a las 15:00 h por ser una superficie permeable que permite el paso del agua, aire y vapor para absorber la radiación recibida y mantener fresco el pavimento, además se ubica bajo la sombra ya que las superficies expuestas al sol suben 14 °C, registrando 39.2 °C. Aun así, sigue siendo el de menor temperatura. El concreto y el asfalto sombreado reducen su temperatura hasta 18 °C respecto del expuesto al sol.

Boulevard Clouthier y calle Xólotl ***Temperaturas del aire de periodo frío***

En el periodo de frío, el sitio boulevard Clouthier y calle Xólotl (punto 2) presenta las menores temperaturas del área urbana. Los datos climáticos se capturan en las tablas V.13 y V.14; en ellos se observa una diferencia entre las temperaturas urbanas y las de conurbación. La zona urbana presenta una temperatura a las 15:00 h de 23.2 °C, 3.7 °C menor que el punto Solidaridad-Alborada (26.9 °C) debido a que en este sitio se ubican zonas vegetales que favorecen al enfriamiento y al sombreado. Con respecto al viento, al igual que en el periodo cálido, la velocidad es baja, pues registra 0.2 m/s.

TABLA V.13. *Parámetros climáticos Clouthier-Xólotl, periodo frío*

<i>Ubicación: Boulevard Clouthier y calle Xólotl</i>					<i>Fecha: enero 2019</i>	
<i>Datos medidos en campo</i>					<i>Datos de estaciones meteorológicas</i>	
<i>Hora</i>	<i>Temperatura urbana del aire °C (local)</i>	<i>% Humedad urbana (local)</i>	<i>Viento (m/s) urbano (local)</i>	<i>Temperatura del aire (°C) en La Victoria, conurbación</i>	<i>Temperatura de estación meteorológica urbana (°C) ISONORAH20</i>	<i>Temperatura de estación meteorológica, conurbación (°C) ISONORAH37</i>
9:00 h	15.3	58	0.6	17.7	14.6	12.4
15:00 h	23.2	47	0.2	25.4	23.5	22.6
21:00 h	16.7	61	0.5	15.3	17.3	14.9

FUENTE: Elaboración propia con datos levantados en campo en enero de 2019.

Se observa que la humedad relativa en Clouthier-Xólotl aumenta en comparación con el punto 9 (Solidaridad-Alborada) por mayor cantidad de vegetación. En cuanto a la temperatura del aire, existe una similitud con la

temperatura de la estación móvil del área conurbación La Victoria, ya que las características del entorno periurbano son similares a la de este sitio. Los valores de la estación meteorológica CIAD (ISONORAH37) registran menores temperaturas ya que cuenta con más flora que el resto de los sitios, disminuyendo la temperatura del aire.

Por la mañana la zona urbana tiene menor temperatura (15.3 °C) que la conurbación (17.7 °C), esto por los suelos naturales del punto La Victoria, que a dos horas de salir el sol ya muestran mayor temperatura que las superficies artificiales del entorno urbano. Al comparar el sitio con la zona urbana Solidaridad y av. Alborada, a las 9:00 h, ésta última registra menor temperatura (14.4 °C) debido a que tiene menos superficies naturales.

La noche es el único momento en donde las temperaturas son más altas en el punto periurbano (punto 2) con 16.7 °C que en *La Victoria* con 15.3 °C y la estación ISONORAH37 (CIAD) con 14.9 °C, a consecuencia de las superficies artificiales que se calientan con la radiación recibida durante el día y que las rurales son superficies naturales que tienen más rápida liberación de radiación.

En los puntos 9 y 2 por la mañana la temperatura oscila entre 14.4 °C y 15.3 °C respectivamente, por lo que la sensación térmica es de frío que produce discomfort en el ambiente urbano, las variaciones de temperatura evidentemente son a causa de las superficies que los rodean.

En el periodo frío por la mañana el área de conurbación (La Victoria) se encuentra con 17.7 °C, dentro del rango de confort para exteriores de periodo frío²⁰ (13.9 °C – 20.4 °C), pero a las 15:00 h sube a 25.4 °C sobrepasando el límite, al igual que el punto Solidaridad-Alborada y Clouthier-Xólotl con 26.9 °C y 23.2 °C respectivamente.

En la tabla V.14 la intensidad resulta negativa $\Delta T_{u-c} = -2.4$ a las 9 h y $\Delta T_{u-c} = -2.2$ a las 15:00 h, ya que las superficies naturales de la conurbación se calientan más rápido que las áreas artificiales del punto Clouthier-Xólotl. Es por la noche cuando la intensidad es positiva $\Delta T_{u-c} = 1.4$, puesto que en el área conurbación La Victoria por vez primera la temperatura es menor que en el punto periurbano por las superficies naturales, confirmando el fenómeno como un evento nocturno.

²⁰ Esto de acuerdo con un estudio realizado en la ciudad de Mexicali, B. C., donde se establecieron rangos de confort térmico con enfoque adaptativo para distintos niveles de actividad (Bojórquez, 2010).

TABLA V.14. Cálculo de intensidad de ICU del periodo frío, Clouthier-Xólotl

Hora	Temperatura del aire (°C) urbana (u)	Temperatura del aire en La Victoria, conurbación (c)	Intensidad de ICU ΔT_{u-c}
9:00 h	15.3	17.7	-2.4
15:00 h	23.2	25.4	-2.2
21:00 h	16.7	15.3	1.4

FUENTE: Elaboración propia con datos medidos en campo en 2019.

Si bien la intensidad por la noche es positiva en el sitio Clouthier-Xólotl ($\Delta T_{u-c} = 1.4$), es menor que en el punto Solidaridad-Alborada ($\Delta T_{u-c} = 4.3$) debido a la mayor cantidad de superficies artificiales que rodean el área urbana, probando que se presenta una ICU en el sitio 9.

TABLA V.15. Registro de materiales y temperaturas superficiales, Clouthier-Xólotl, periodo frío

Material	9:00 h Temperatura superficial (°C)	15:00 h Temperatura superficial (°C)	21:00 h Temperatura superficial (°C)
Concreto a la sombra	-	-	18.4
Concreto al sol	13.7	26	-
Asfalto a la sombra	-	-	18.7
Asfalto expuesto al sol	10.9	27.1	-
Concreto en calle con sombra	-	-	19.6
Concreto en calle al sol	17.5	21.4	-
Piedra gris a la sombra	-	8.8	15.8
Piedra gris al sol	14.3	32.7	-
Tierra natural a la sombra	-	-	15.8
Tierra natural al sol	13.2	26.8	-
Zacate buffel a la sombra	-	-	16.5
Zacate buffel al sol	14.7	21.2	-
Adoquín gris a la sombra	-	10.7	17.5
Adoquín gris al sol	11.2	30.0	-
Concreto rojo al sol	18.0	20.2	-
Concreto rojo sombra	-	-	19.4

FUENTE: Elaboración propia con datos levantados en campo en enero de 2019.

El registro de las temperaturas de las superficies en el cruce del transecto Clouthier-Xólotl se encuentra en la tabla siguiente. Se observa que por la mañana, cuando la temperatura es la más baja de todo el día, el asfalto es el material expuesto al sol con menor temperatura (10.9 °C) y la mayor es el concreto rojo (18 °C) colocado en el camellón alrededor de las vialidades,

lo que afirma que las condiciones son difíciles para el peatón. A las 15 h la piedra gris, el adoquín gris y el asfalto registran la mayor temperatura con 32.7 °C, 30 °C y 27.1 °C respectivamente y la mínima la tienen la piedra gris (8.8 °C) y el adoquín gris (10.07 °C) ambos bajo la sombra. Por la noche la superficie que se alcanza a enfriar más rápido es la tierra natural (15.8 °C), característica del desierto habitado.

Comparación entre las áreas de intervención estudiadas

La imagen V.2 muestra las temperaturas superficiales tomadas en campo a las 15:00 h en el punto blvd. Solidaridad y av. de Alborada del periodo cálido. El concreto, el asfalto y la piedra roja son las superficies artificiales que presentan las temperaturas más altas con 59 °C y 57 °C, bajo la sombra llegan a reducir su temperatura hasta 10 °C. La tierra natural como era de esperarse posee la mayor temperatura superficial (62 °C), sin embargo, a la sombra hay una reducción de 12 °C.

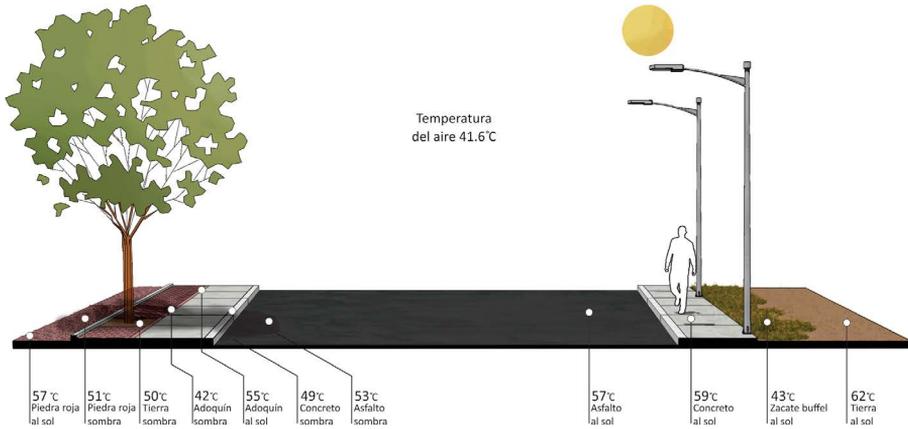
De manera general, se prueba que las superficies permeables mejoran las condiciones térmicas que las superficies impermeables (siempre y cuando tengan cierto grado de irrigación) y que toda superficie artificial bajo la sombra reduce considerablemente su temperatura.

Por su parte, la imagen V.3 expone las temperaturas superficiales en su valor puntual tomadas en campo a las 15:00 h en el punto blvd. Clouthier y calle Xólotl del periodo frío. Los materiales permeables como la piedra gris y el adoquín al sol en este caso cuentan con las mayores temperaturas superficiales encontrándose a 8.8 °C, más altos que la temperatura del aire (23.2 °C). Las superficies de asfalto y concreto oscilan entre 26 °C y 27 °C, pero el concreto con color integrado rojo registró 6 °C menos que el concreto natural. Por otra parte, con respecto a las superficies naturales, el zacate buffel tiene 21 °C y la tierra natural se sitúa 3 °C por encima de la temperatura del aire.

Es de notar que las superficies a la sombra reducen su temperatura hasta por 24 °C como el caso de la piedra gris y 17 °C en el adoquín, lo que muestra el significativo salto térmico que experimentan las superficies permeables sombreadas. Las temperaturas superficiales se ven influenciadas

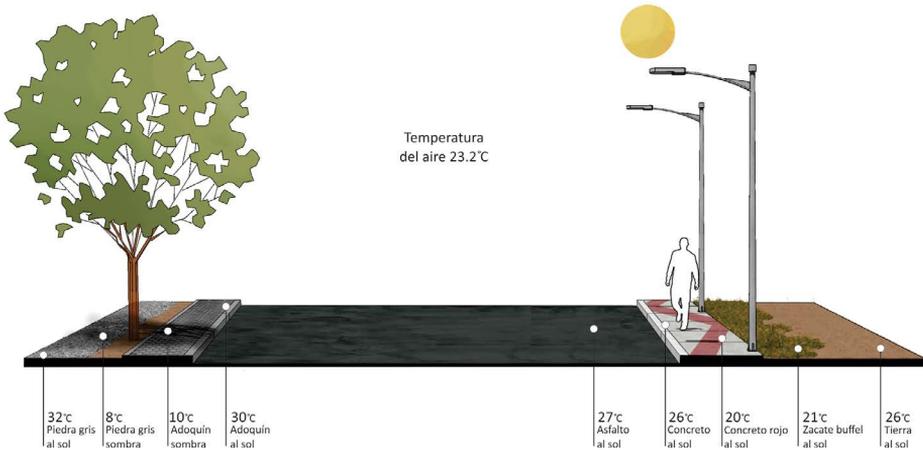
por las propiedades térmicas de los materiales y por su exposición al sol, tal vez varias horas antes de tomadas las temperaturas, dependiendo además del recorrido solar.

IMAGEN V.2. *Temperaturas superficiales en blvd. Solidaridad y avenida Alborada, periodo cálido, 15:00 h*



FUENTE: Elaboración propia con base en datos medidos en campo.

IMAGEN V.3. *Temperaturas superficiales en blvd. Clouthier y calle Xólotl, periodo frío, 15:00 h*



FUENTE: Elaboración propia con base en datos medidos en campo.

Al analizar las temperaturas de las superficies de ambos sitios y periodos, se concluyen varios aspectos. En el sitio Clouthier-Xólotl, las áreas verdes poseen mayor humedad, la topografía del sitio y la morfología de la traza urbana favorecen la presencia de vientos y masas vegetales, estos aspectos contribuyen al enfriamiento de las superficies, también hay suelos permeables como la piedra gris que no ayudan a una disminución de calor si no cuentan con la presencia de sombra y humedad, por el contrario, aportan igual o mayor radiación que el concreto impermeable. También, hay que tener presente que las actividades del lugar son distintas a las del sitio Solidaridad-Alborada por lo que la densidad vehicular disminuye, contribuyendo a menores temperaturas a causa del menor calor antropogénico.

Al comparar los materiales y su comportamiento térmico de los sitios de estudio a micro escala, se muestran variaciones a causa del viento, humedad, geometría urbana, calor antropogénico y vegetación. Se observa que el concreto presenta la mayor temperatura en el punto Solidaridad-Alborada, y el asfalto en el punto Clouthier-Xólotl. Las mediciones se realizaron el mismo día a las 15:00 h, se buscó que la superficie tuviese las mismas condiciones de horas al sol para hacer factible la comparación.

Una vez estudiados y analizados los elementos registrados en ambos puntos de intervención a micro escala de verano e invierno resultan conclusiones a tomar en cuenta para las propuestas de mitigación y buscar aquellas que sean las más efectivas en estas áreas de estudio.

En las zonas áridas, la vegetación urbana arbórea es de las principales estrategias de diseño para mitigar el efecto de ICU por el beneficio que aporta de enfriamiento evaporativo y primordialmente por brindar sombras a las superficies. Además, en su preocupación por la salud pública la ONU recomienda 16 m² de área verde por persona y la OMS establece al menos 9 m². A micro escala, en el sitio de intervención blvd. Solidaridad y av. de Alborada (punto 9) tiene 1 m² de área verde por habitante mientras que en el cruce blvd. Clouthier y calle Xólotl (punto 2) resultan 14 m² de área verde por habitante, cumpliendo con los valores óptimos que establecen las organizaciones citadas. Sin embargo, hay que analizar las áreas verdes registradas en el punto Clouthier-Xólotl ya que algunas de ellas no proveen sombras y no todas son de tipo xerófilas.

TABLA V.16. *Resumen de puntos importantes para análisis de la ICU de la zona urbana de Hermosillo*

<i>Características generales</i>
<ul style="list-style-type: none"> • El punto 2 tiene 14 m² de área verde por habitante y el punto 9 tiene 1 m² de área verde por habitante • El punto 2 tiene mayor área de tierra natural, con 9984 m² • En el punto 2 la densidad vehicular es 66000 vehículos al día, mientras en el punto 9 es de 274 000 vehículos
<i>Puntos importantes para análisis de intervención de ICU diurna</i>
<p>En verano a las 15:00 h:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El punto 9 es el más cálido, con 41.6 °C de temperatura del aire y mayor intensidad (de 7.4). • La superficie más cálida es el concreto, con 61.1 °C en el punto 9. • En el punto 9 el adoquín es la superficie más fresca, con 44.8 °C. • En el punto 2 la superficie más fresca expuesta al sol es la piedra gris, con 25.2 °C. • En el punto 2 la superficie más cálida es la tierra natural, con 53.6°C. • El concreto bajo la sombra registra temperatura de 26.5 °C y el asfalto de 31.9 °C. • El concreto y el asfalto expuestos al sol tienen temperaturas de 44.2 y 50.6 °C respectivamente. <p>En invierno a las 15:00 h:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El punto 9 es el más cálido, con 26.9 °C de temperatura del aire. • Las superficies más frescas son el concreto y adoquín bajo la sombra, con 18 °C. • Expuesto al sol, el adoquín rojo es el de menor temperatura, con 24.9 °C. • En el punto 2 las superficies con la temperatura superficial mínima son piedra y adoquín gris bajo la sombra, con 7.8 °C. • En el punto 2 la superficie más caliente es el concreto expuesto al sol, con 34 °C.
<i>Puntos importantes para análisis de intervención de ICU nocturna</i>
<p>En verano a las 9:00 h:</p> <ul style="list-style-type: none"> • En el punto 9 el asfalto es el que presenta mayor temperatura, con 53.5 °C. • En el punto 9 la superficie con menor temperatura es el adoquín, con 38.8 °C. • En el punto 2 la superficie más cálida es el concreto, con 56 °C. • En el punto 2 la superficie más fresca es el zacate buffel, con 32 °C, y la tierra natural. <p>En invierno a las 9:00 h:</p> <ul style="list-style-type: none"> • En el punto 9 la superficie más cálida es la piedra roja, con 18.3 °C, y la más fresca es el concreto, con 14.1 °C. • El punto 9 tiene la intensidad más alta, con 4.3 °C. • En el punto 2 la temperatura más alta la registra el concreto, con 19.6°C. • En el punto 2 la temperatura más baja pertenecen a la tierra natural, piedra gris y adoquín, con 7.8°C.

FUENTE: Elaboración propia.

Nota: el punto 2 corresponde al blvd. Clouthier y calle Xólotl. El punto 9 corresponde al blvd. Solidaridad y av. de Alborada.

Así mismo en el clima desértico, las superficies urbanas son otro elemento significativo que ofrece estrategias de mitigación ante el fenómeno, de aquí la importancia de conocer su comportamiento específicamente a micro escala, y con ello evaluar los materiales que favorecen al control de la temperatura urbana. En los puntos 2 (Clouthier-Xólotl) y 9 (Solidaridad-Alborada) hay contrastes en cuanto a las superficies que componen su entorno urbano, como los numerosos metros cuadrados de construcción del sitio 9 contra el alto porcentaje de tierra natural del sitio 2, ambos contribuyen al calentamiento de temperaturas urbanas. El FCV, la densidad ve-

hicular, actividades de la población y las áreas verdes alrededor son otros elementos que muestran diferencias entre los puntos analizados. También, hay similitudes como el uso común de calles de asfalto de ocho carriles y el uso de concreto en camellones y banquetas. A continuación, se expone un resumen de los puntos importantes del levantamiento de datos para el análisis de intervención de ICU diurna y nocturna.

Mediante todo el análisis de características urbanas y de diseño, así como su resultado en el comportamiento térmico, es posible formular estrategias de mitigación de ICU apropiadas para cada caso, que se presentarán más adelante.

Estudio de las áreas de intervención mediante imágenes termográficas

A partir del registro y estudio del entorno urbano, superficies urbanas, temperaturas superficiales, temperaturas del aire, humedad, viento, materiales, actividades, tránsito vehicular y vegetación del punto de intervención 9, donde se presenta la ICU de la zona urbana (blvd. Solidaridad y av. de Alborada), y el sitio 2, donde se presenta la Isla Fría de Hermosillo (blvd. Clouthier y calle Xólotl) en ambos periodos, se busca enriquecer la información con imágenes térmicas tomadas de las superficies, para comparar la información durante un día típico del periodo cálido, el 27 de agosto y uno del periodo frío, el 13 de enero ambos de 2019 y validar las temperaturas del sitio ya que estos materiales forman parte vital de la formación e intensidad de ICU nocturna y diurna, de manera que, en la toma de decisión para la selección de materiales superficiales urbanos de las propuestas de estrategias de mitigación de ICU a escala local y micro escala, se tome la opción más efectiva.

Boulevard Solidaridad y avenida de Alborada.

Temperaturas de las superficies de periodo cálido

El amanecer del día 27 de agosto de 2019 ocurrió a las 6:00 h y a las 18:50 h el sol se ocultó. Se registraron 12 horas y 50 minutos con sol a lo largo del día.

Las fotografías V.1 y V.3, capturadas sobre la parte central del camellón muestran el material de piedra roja colocada al centro y el asfalto en las vialidades. En esta sección el FCV es moderado, por lo que el asfalto es sombreado algunos minutos de la mañana.



FOTOGRAFÍA V.1. *Vista al norte, periodo cálido.* FUENTE: Elaboración propia.



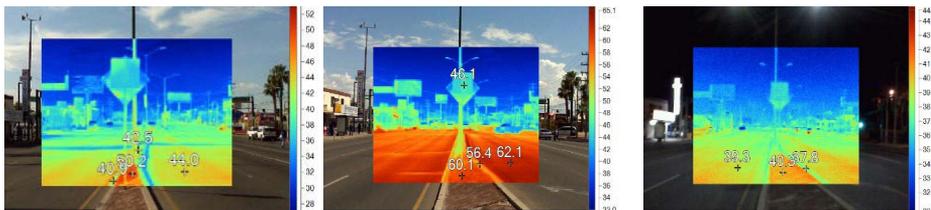
FOTOGRAFÍA V.2. *Vista al sur, periodo cálido.* Elaboración propia.



FOTOGRAFÍA V.3. *Vista al norte, periodo cálido.* Elaboración propia.

En cuanto a las variaciones de temperatura durante el día a las 9:00, 15:00 y 21:00 h, se observa que el asfalto a las 15:00 h tiene la mayor temperatura con 62.1 °C, por la noche desciende 23.1 °C hasta llegar a los 39.3 °C, mientras que el material de piedra color rojo que registraba 60.1 °C a las 15:00 h, sólo baja 19.8 °C con tres horas de ocultarse el sol (imagen V.4).

IMAGEN V.4. *Vista sur, variación de temperaturas de superficie en tres horarios de izquierda a derecha: 9:00, 15:00 y 21:00 h. Periodo cálido*

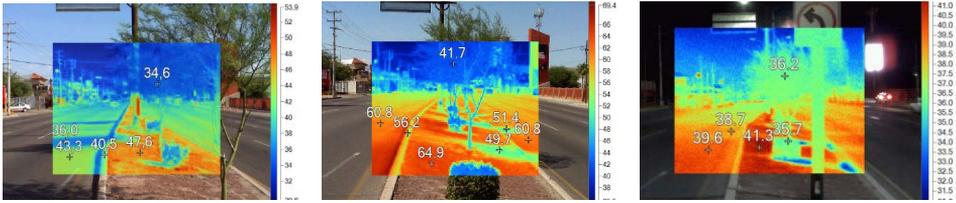


FUENTE: Elaboración propia.

En la imagen V.5, se observa la superficie de piedra roja que continúa siendo la de mayor temperatura en los tres horarios, seguida del asfalto y por último el concreto. Por otra parte, la vegetación se encuentra 19.1 °C de menor temperatura (41.7 °C) que el asfalto (60.8 °C) a las 15 h, por la mañana hay una diferencia de 8.7 °C y sólo 1.4 °C por la noche. A medio día el asfalto presenta alta temperatura, contribuyendo a un aumento de temperatura urbana. La piedra roja colocada en el camellón como diseño

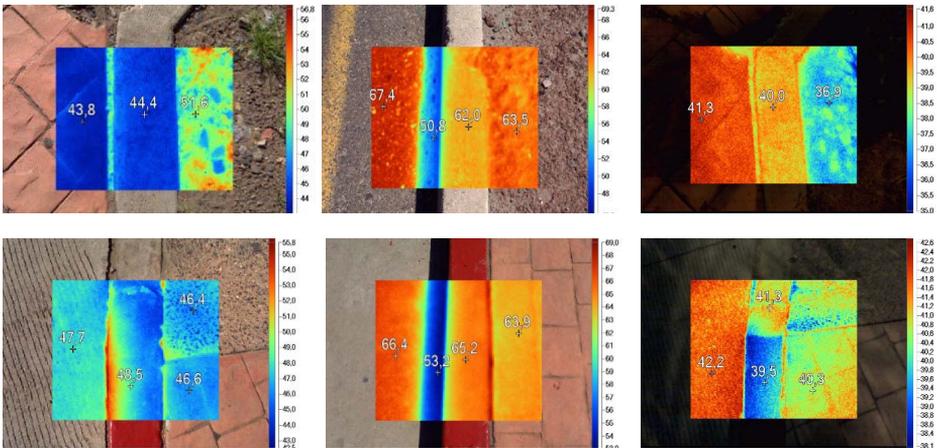
de paisaje es de las superficies más cálidas, por lo que habrá que planear reemplazar ese material por uno que favorezca al enfriamiento de la temperatura urbana.

IMAGEN V.5. Vista norte, variación de temperaturas de superficie en tres horarios de izquierda a derecha: 9:00, 15:00 y 21:00 h. Periodo cálido



FUENTE: Elaboración propia.

IMAGEN V.6. Variación de temperaturas de superficie urbanas en tres horarios de izquierda a derecha: 9:00, 15:00 y 21:00 h. Periodo cálido



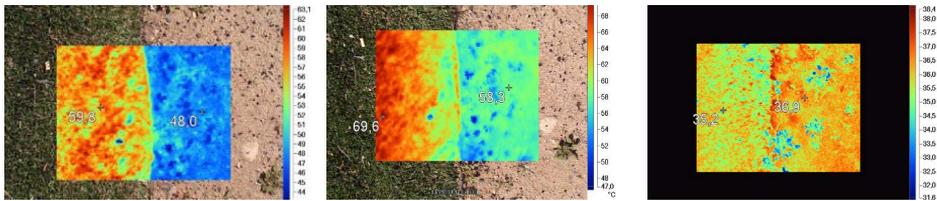
FUENTE: Elaboración propia.

En la imagen V.6, por la mañana la guarnición de concreto color rojo registra la mayor temperatura con 48.5 °C, por la tarde el asfalto se sitúa en primer sitio con 67.4 °C y en segundo sitio el concreto con 66.4 °C y solo 2.5 °C abajo está el adoquín color rojo, por la noche a dos horas oculto el sol el concreto y adoquín color rojo son los materiales artificiales de menor temperatura con 39.5 °C y 40.3 °C respectivamente, mientras que la tierra

es el más fresco con 35.9 °C. El concreto y asfalto redujeron entre 24 °C y 26 °C con solo tres horas de no recibir radiación solar.

En cuanto al material de pasto sintético que se ha utilizado recurrentemente en el municipio de Hermosillo para enverdecer la imagen urbana, presenta temperaturas más altas a las 15:00 h que el propio concreto o asfalto registrando 69.6 °C (imagen V.7).

IMAGEN V.7. Variación de temperaturas de superficie pasto sintético en tres horarios, de izquierda a derecha 9:00, 15:00 y 21:00 h. Periodo cálido



FUENTE: Elaboración propia.

Después de analizar las temperaturas puntuales de los sitios de los datos colectados en campo y de las imágenes térmicas en los distintos horarios, se concluye que:

- El asfalto y el concreto son los materiales con las mayores temperaturas superficiales en todo el año, puesto que alcanzan hasta 67 °C a las 15:00 h.
- Los beneficios de la vegetación brindan en algunos casos hasta 23 °C menos que las superficies artificiales.
- La tierra natural expuesta al sol presenta temperaturas más altas que las superficies construidas, aunque por la noche desciende rápidamente.
- Toda superficie bajo la sombra favorece la disminución de la temperatura del aire.
- Superficies permeables a la sombra hasta 10 °C menos que el asfalto en verano.
- Los colores más oscuros en las superficies artificiales contribuyen a un aumento de temperatura diurna.

Con esto se muestra lo determinante en la presencia de vegetación para sombreado y óptima selección de materiales superficiales, así como la ubicación, color y rugosidad de estos.

***Boulevard Solidaridad y avenida de Alborada
Temperaturas de las superficies de periodo frío***

El 13 de enero de 2019, el amanecer ocurrió a las 7:19 h y a las 17:45 h el sol se ocultó. Se registraron 10 horas y 26 minutos con horas de sol en el transcurso del día.



FOTOGRAFÍA V.4. *Vista al norte, periodo frío.* FUENTE: Elaboración propia.



FOTOGRAFÍA V.5. *Vista al sur, periodo frío.* FUENTE: Elaboración propia.



FOTOGRAFÍA V.6. *Vista al paramento poniente, periodo frío.* FUENTE: Elaboración propia.

Las fotografías de arriba se capturaron en el horario matutino (9:00 h). Es relevante señalar que estas vialidades presentan mayor sombreado por las alturas de las construcciones aledañas, por ello las temperaturas son menores que en el punto 2 en este horario de periodo frío. Los señalamientos metálicos muestran temperaturas mayores, pero no se consideran para el estudio.

En el camellón en la parte central de la vialidad, se encuentra material de piedra roja colocado entre las guarniciones que por la mañana se encuentra sombreado por algunos edificios colindantes a la vialidad o bien por la vegetación colocada sobre el camellón. En el paramento poniente se encuentran tres superficies horizontales, concreto, asfalto y adoquín. En cuanto a las superficies verticales, la fachada del edificio es de material Durock con color terracota (fotografía V.6).

En cuanto a las variaciones de temperatura durante el día (imagen V.8) a las 9:00, 15:00 y 21:00 del día 13 de enero, se observa que por la noche con

3 horas de haberse ocultado el sol las superficies disminuyeron su temperatura 18.9 grados de 29.8 °C a 10.9 °C. A las 15:00 h la superficie de concreto al sol registra 29.8 °C, mientras que a la sombra de la vegetación arbórea registra 22.1 °C, una notable diferencia de 7.7 °C. Sin embargo, es por la mañana cuando se registran las temperaturas más bajas, ya que las superficies solo tienen una hora con exposición a la radiación solar con 6.5 °C de temperatura en el asfalto. Por la noche, cuando la ICU nocturna se hace presente, el concreto tiene la mayor temperatura con 13 °C. Estas diferencias son por diversos factores como el calor antropogénico del tránsito vehicular, menor flujo de viento y menor FCV en el sitio, respecto a otras partes de la ciudad.

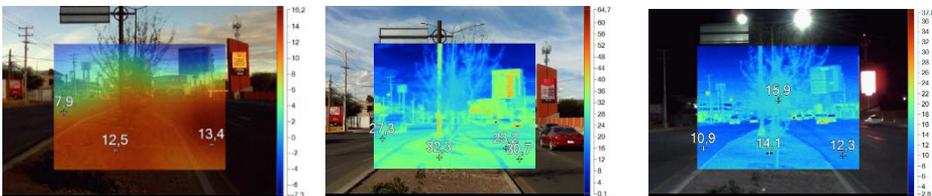
El asfalto registra a las 15:00 h cambios importantes de temperatura con respecto a las superficies sombreadas con 30.7 °C al sol y 23.2 °C bajo la sombra, mientras que por la noche es la superficie más fresca (10.9 °C).

IMAGEN V.8. Vista sur, variación de temperaturas de superficie en tres horarios de izquierda a derecha: 9:00, 15:00 h, 21:00 h. Periodo frío



FUENTE: Elaboración propia.

IMAGEN V.9. Vista norte, variación de temperaturas de superficie en tres horarios: de izquierda a derecha: 9:00, 15:00, 21:00 h. Periodo frío

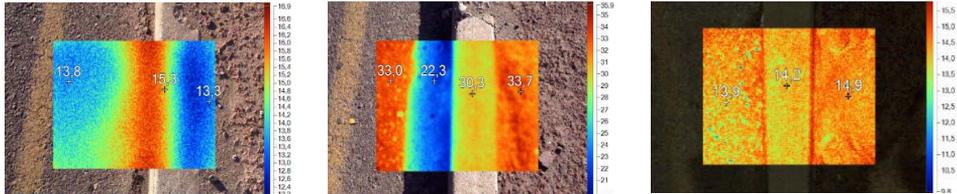


FUENTE: Elaboración propia.

En la imagen siguiente se observa el cambio de temperaturas en las superficies, donde la mayor se presenta a las 15:00 h en la piedra o gravilla

color rojo y la más fresca a medio día es la guarnición de concreto, probado que es más favorable con respecto al asfalto.

IMAGEN V.10. Variación de temperaturas de superficie en tres horarios, de izquierda a derecha: 9:00, 15:00, 21:00 h. Periodo frío



FUENTE: Elaboración propia.

Boulevard Clouthier y calle Xólotl ***Temperaturas de las superficies de periodo cálido***

El amanecer del día 27 de agosto de 2019 ocurrió a las 6:00 h y a las 18:50 h el sol se ocultó. Se registraron 12 horas y 50 minutos con horas de sol en el transcurso del día.



FOTOGRAFÍA V.7. Vista al sur, periodo cálido. FUENTE: Elaboración propia.



FOTOGRAFÍA V.8. Vista al sur, periodo cálido. FUENTE: Elaboración propia.



FOTOGRAFÍA V.9. Vista al sur, periodo cálido. FUENTE: Elaboración propia.

En las fotografías de arriba, con vista al sur, se observan materiales de tierra natural y concreto hidráulico, además de la guarnición de concreto y vegetación.

Con vista al norte sobre el blvd. Clouthier la fotografía V.10 muestra la intersección una calle de asfalto y la banqueta de concreto, en ella actualmente no existe ningún árbol que a esta hora del día brinde protección solar.

En la fotografía V.11 se muestra el acceso al Centro Ecológico de Sonora que se compone de un elemento de block, el suelo de adoquín permeable y un jardín desértico (fotografía V.12).



FOTOGRAFÍA V.10. *Vista al norte, periodo cálido.* FUENTE: Elaboración propia.



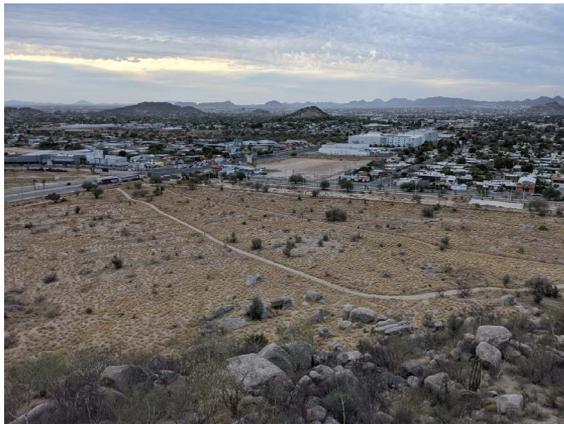
FOTOGRAFÍA V.11. *Vista al acceso del Centro Ecológico, periodo cálido.* FUENTE: Elaboración propia.



FOTOGRAFÍA V.12. *Vegetación en acceso del Centro Ecológico, periodo cálido.* FUENTE: Elaboración propia.

En cuanto a las áreas naturales que rodean la zona de *blvd. Clouthier* y *calle Xólotl* se encuentran, el *Cerrito del Ecológico* al este (fotografía V.13) y un amplio terreno baldío con zacate buffel y tierra natural (fotografía V.9).

FOTOGRAFÍA V.13. *Vista de lo alto del Cerrito del Ecológico*

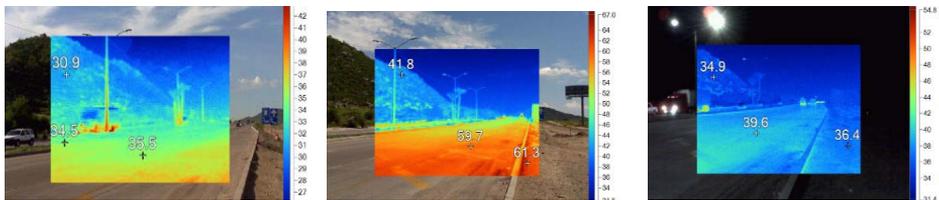


FUENTE: Elaboración propia.

En cuanto a las variaciones de temperatura durante el día del periodo cálido a las 9:00 h, 15:00 y 21:00 h, se muestra en la imagen V.11 que el concreto alcanza la temperatura de 59.7 °C a las 15:00 h, y para las 21:00 h

con dos horas sin exposición al sol bajó $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, registrando $39.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que muestra la importancia de mantener sombreadas estas superficies. Por otra parte, el salto térmico del concreto fue de $24.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el de la vegetación es de $10.9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Con respecto a la tierra natural se observa a las 15:00 h que es la superficie con mayor temperatura, pero por la noche permanece más fresco que las superficies artificiales, lo cual prueba que libera más rápido el calor almacenado.

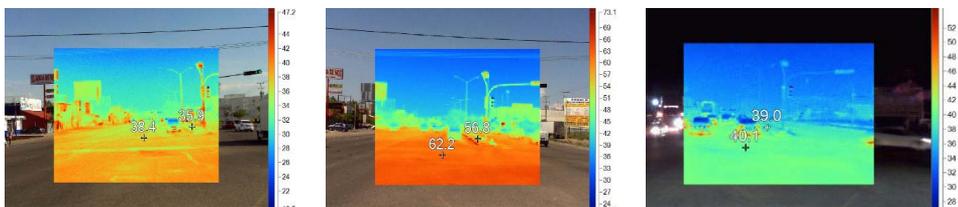
IMAGEN V.11. Punto 2, vista sur. Variación de temperaturas de superficie en tres horarios de izquierda a derecha: 9:00, 15:00 y 21:00 h. Periodo cálido



FUENTE: Elaboración propia.

El asfalto muestra un comportamiento similar al concreto, sin embargo, posee la temperatura más cálida con $62.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, misma que disminuyó a $40.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ por la noche con dos horas de ocultado el sol, obteniendo una reducción de $22.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (imagen siguiente).

IMAGEN V.12. Punto 2, vista norte, variación de temperaturas de superficie en tres horarios de izquierda a derecha: 9:00, 15:00 y 21:00 h. Periodo cálido

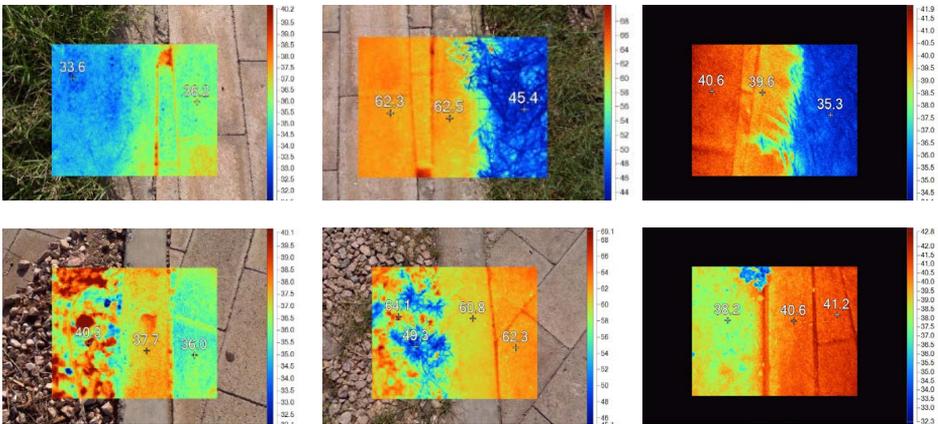


FUENTE: Elaboración propia.

En la imagen V.13 se ve que, por la mañana el adoquín es el que tiene menor temperatura con $36\text{ }^{\circ}\text{C}$, la guarnición de concreto registra $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la piedra roja aumenta a $40.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, destaca la vegetación con una sustancial disminución de $6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que resulta en $33.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. En la tarde, a las 10 horas

de estar expuestos al sol la piedra roja presenta la mayor temperatura con 64.1 °C, sin embargo, el adoquín se sitúa a solo 2 °C menos con 62.3 °C, las superficies artificiales aumentaron hasta 26 °C y la vegetación aumentó 11.8 °C. Finalmente, durante la noche, a sólo dos horas oculto el sol, el adoquín es el que registra más alta temperatura con 40.6 °C, la piedra roja disminuyó casi 26 °C ubicándose en 38.2 °C, muy cercano a la vegetación, que registra 35.3 °C. Se concluye que las superficies permeables como en este caso la piedra y el adoquín, son ideales únicamente bajo el sombreado y con presencia de humedad.

IMAGEN V.13. Punto 2, vista norte. Variación de temperaturas de superficie en tres horarios de izquierda a derecha: 9:00, 15:00 y 21:00 h. Periodo cálido



FUENTE: Elaboración propia.

Boulevard Clouthier y calle Xólotl ***Temperaturas de las superficies de periodo frío***

El 13 de enero de 2019, el amanecer ocurrió a las 7:19 h y a las 17:45 h el sol se ocultó. Se registraron 10 horas y 26 minutos con horas de sol en el transcurso del día.

Las fotografías V.14, V.15 y V.16 se capturaron a las 9:00 h en el cruce del boulevard Clouthier y calle Xólotl. Se observan las superficies de concreto y asfalto en vialidades, banquetas de concreto color gris y en el camellón concreto rojo rugoso.

En cuanto a las zonas naturales se muestra una diferencia con respecto al periodo cálido, ya que no están enverdecidas las áreas del Cerrito del Ecológico ni el baldío de terreno natural y zacate buffel (fotografías V.13, V.14 y V.16), pues el periodo de lluvias más intenso se registra en el verano, por lo que en enero su vegetación pinta otros colores mismos que influyen en las temperaturas urbanas.



FOTOGRAFÍA V.14. Punto 2, vista al sur, periodo frío. FUENTE: Elaboración propia.



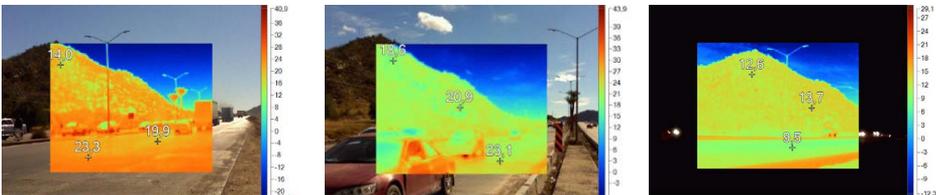
FOTOGRAFÍA V.15. Punto 2, vista al norte, periodo frío. FUENTE: Elaboración propia.



FOTOGRAFÍA V.16. Punto 2, vista al acceso del centro ecológico, periodo frío. FUENTE: Elaboración propia.

En cuanto a las variaciones de temperatura durante el día, se observa que a las 15:00 h, tras ocho horas de exposición al sol, la temperatura del concreto aumentó $3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ de $19.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $23.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y por la noche, tras tres horas después de ocultarse el sol, las superficies rápidamente bajaron su temperatura $13.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, llegando el concreto a $9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. El asfalto experimenta saltos de temperatura mayores principalmente por la noche disminuyendo hasta $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

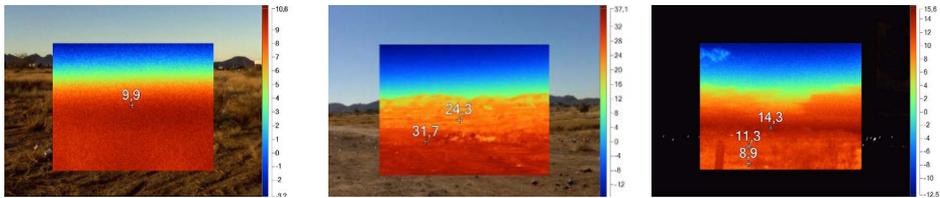
IMAGEN V.13. Punto 2, vista sur. Variación de temperaturas de superficie en tres horarios de izquierda a derecha: 9:00, 15:00 y 21:00 h. Periodo frío



FUENTE: Elaboración propia.

Las superficies naturales en el Cerrito del Ecológico se comportan de manera similar: 4.6 °C de las 9:00 h a las 15:00 h y bajan 6 °C a las 21:00 h. En cuanto a la tierra natural por la mañana presenta 9.9 °C de temperatura superficial por la tarde sube 21.8 °C, alcanzando los 31.7 °C y por la noche desciende 22.8 °C bajando a 8.9 °C grados confirmando la rápida captación y liberación de calor (imagen V.14).

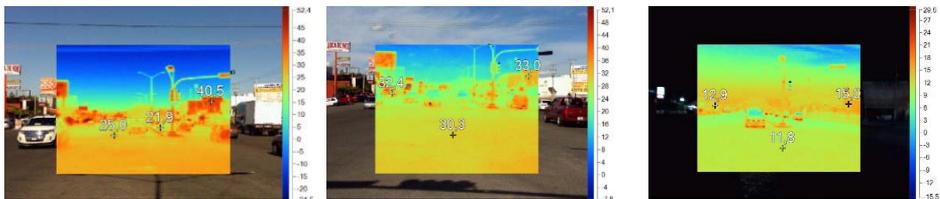
IMAGEN V.14. Punto 2, vista poniente. Variación de temperaturas de superficie en tres horarios de izquierda a derecha: 9:00, 15:00 h y 21:00 h. Periodo frío



FUENTE: Elaboración propia.

En la imagen V.15 se muestra el aumento de temperatura del asfalto de las 9 h a las 15 h de tan solo 5 °C; sin embargo, para la noche disminuye 18.5 °C llegando a 11.8 °C un referente del comportamiento del asfalto ante ambientes frescos.

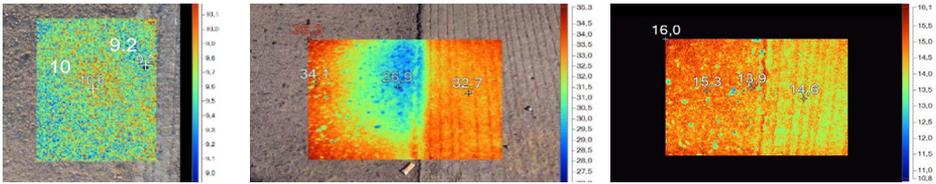
IMAGEN V.15. Punto 2, vista norte. Variación de temperaturas de superficie en tres horarios, izquierda a derecha: 9:00, 15:00 h y 21:00 h. Periodo frío



FUENTE: Elaboración propia.

En relación con los materiales horizontales, el asfalto y concreto presentan similitudes en sus saltos térmicos subiendo entre 23 y 24 °C de las 9:00 h a las 15:00 h, hasta alcanzar 34.1 °C y 32.7 °C respectivamente; tres horas después de oculto el sol, disminuyen 18 °C, lo cual muestra que aún no liberan el calor almacenado completamente.

IMAGEN V.16. Punto 2, variación de temperaturas de superficie en tres horarios, izquierda a derecha: 9:00, 15:00 h y 21:00 h. Periodo frío



FUENTE: Elaboración propia.

Estudio de las áreas de intervención mediante simulación de ICU

El estudio de las áreas de intervención se abordó complementariamente mediante simulaciones, las cuales permiten visualizar la distribución de temperaturas superficiales de los sitios de estudio, así como evaluar mediante gráficas de evolución de temperaturas a lo largo de un día.

Para generar la simulación de ICU se utiliza el *software* Urban Weather Generator (UWG), un modelo desarrollado por Bueno *et al.* (2014), basado en balances de energía aplicados a volumen de dosel urbano y capa límite urbana. Fue desarrollado para evaluar el desempeño ambiental de cualquier sitio urbano. El efecto del calentamiento se evalúa en relación a la diferencia de temperaturas entre las zonas urbanas y rurales de referencia, con el uso de un archivo climático urbano representativo en formato epw de la localidad.

El UWG requiere de más de 50 parámetros relacionados con microclima y diseño urbano, tales como características urbanas y de vegetación, entre ellos, información de morfología urbana, cobertura vegetal, calor antropogénico por el tránsito vehicular, propiedades constructivas de los edificios, densidad edificada, albedo de las superficies, usos de suelo, entre otros. Sin embargo, estudios de Bueno *et al.* (2012) han expuesto que (a) densidad edificada, (b) la relación entre la fachadas de los edificios y el área de cobertura y (c) la vegetación son los parámetros más sensibles para la simulación del fenómeno.

Matlab (acrónimo de *Matrix Laboratory*: laboratorio de matrices) es un sistema algebraico computacional que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Uti-

liza un archivo epw rural como base de origen y genera a su vez un archivo epw del sitio de estudio. Actualmente, el algoritmo Matlab de UWG está empaquetado en un archivo ejecutable, que se ejecuta en el entorno de Windows. La interpretación paramétrica se hace con el *software* ArcGIS, donde se obtiene la información que se ingresará en UWG, además de imágenes térmicas e isotermas de los sitios de intervención.

Para aplicar esta metodología se tomaron los mismos ejemplos de áreas de intervención ya presentados, con áreas de análisis que abarcan microescalas y áreas locales. Se ubicaron en cada caso cuadrículas de 180×180 m que corresponde a $32\,400$ m².

Boulevard Solidaridad y avenida de Alborada

Punto 9

El punto 9 corresponde a un uso de suelo mixto, equipamiento, habitacional densidad media e industria de riesgo bajo. Se clasifica, de acuerdo con este libro, como una LCZ abierta y de mediana altura y una densidad vehicular de $274\,000$ volumen de tránsito promedio diario (VTPD).

La imagen satelital de temperatura tiene una resolución de 30×30 m por 1 píxel, por lo que, para la recolección de datos a utilizar en el simulador, se toman 6 pixeles, que equivalen a una cuadrícula de 180×180 m para analizar información en campo y simulación a escala local.

En la tabla que aparece a continuación se observan los datos para utilizarse en la simulación UWG, tomados de ArcGIS del punto 9 correspondiente al blvd. Solidaridad y avenida de Alborada. La información se especifica como sigue:

- Superficie urbana: es la malla de trabajo de 180×180 m seleccionada previamente.
- Densidad edificada: es la obtenida de la suma del área de los edificios entre la superficie del lugar.
- Cobertura de árboles: es el área vegetal entre la superficie total.
- Promedio de la altura media: se refiere al promedio de la altura de los edificios dentro de la superficie.

- Parámetro de promedio de superficie de alzados: se obtiene dividiendo la suma del perímetro de los edificios entre la superficie del lugar.
- Calor antropogénico: De acuerdo al trabajo de Smith, Lindley y Levmore (2009) con respecto al calor antropogénico se encontró que en las grandes ciudades varía dependiendo de parámetros como el tiempo, ancho de calles, consumo de gasolina, tipo de autos y velocidad (Iamarino, Beevers y Grimmond, 2011). En un estudio realizado en Manchester, Alemania se determinó que las calles sin pavimentar y sin autos emiten 0 W/m², las calles rurales con pocos autos sin pavimento tienen 70 W/m², las intersecciones mayores 500 W/m² y los corredores con tráfico al centro de la ciudad 100 W/m² esto en una densidad de 41 119 vehículos, por lo que se toma como referencia para el presente análisis.
- Calor liberado por sistemas HVAC: se refiere al calor liberado al cañón urbano liberado por algún sistema de enfriamiento. Se toma 1 en verano y 0 en invierno.

TABLA V.17. Registro de estructura urbana del punto 9

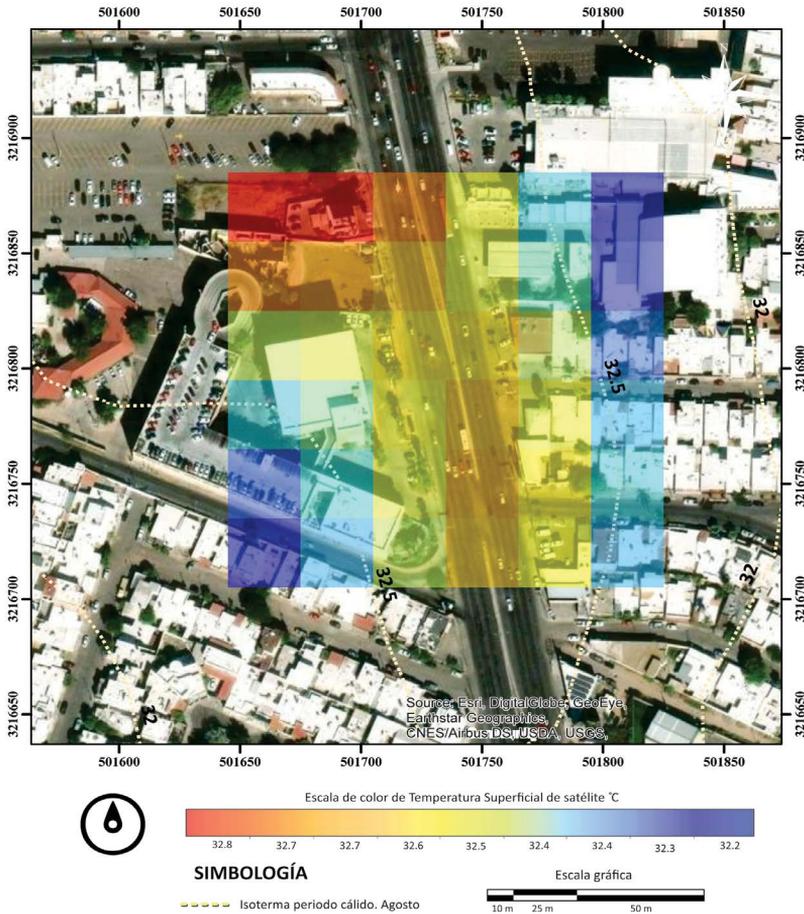
<i>Características urbanas</i>	<i>Ítem en UWG</i>	<i>Unidad</i>	<i>Abreviación</i>	<i>Cantidad</i>
Superficie urbana	<i>Urban area</i>	m ²	A	32400.0000
Densidad edificada	<i>Building density</i>	m ²	SC	0.2800
Cobertura de árboles	<i>Urban area tree coverage</i>	m ²	Ga	0.0200
Promedio de altura media	<i>Average building Height</i>	m	Hm	7.8564
Promedio de superficie de alzados	<i>Vertical to horizontal ratio</i>	m	F	0.6939
Velocidad de viento mínima	<i>Minimum wind velocity</i>	m/s	W	0.2000
Calor antropogénico	<i>Sensible anthropogenic heat</i>	W/m ²	AH	500.0000
Calor liberado por sistemas HVAC	<i>HVAC 0-1</i>	–	–	1.0000
Volumen de tránsito diario promedio	–	piezas	VTDP	274000.0000

FUENTE: Elaboración propia.

En el periodo de verano las temperaturas más frescas se presentan en las superficies sombreadas por los edificios de más de dos niveles (imagen

V.17). En cuanto a los materiales de mayor temperatura, destacan las áreas de concreto y asfalto alcanzando los 32.8 °C a las 17:52 h. Es relevante señalar que la diferencia de temperatura a micro escala oscila 1 °C en la imagen satelital de invierno y medio grado en verano.

IMAGEN V.17. Punto 9. Temperatura superficial e isoterma de verano 2015, 17:52 h

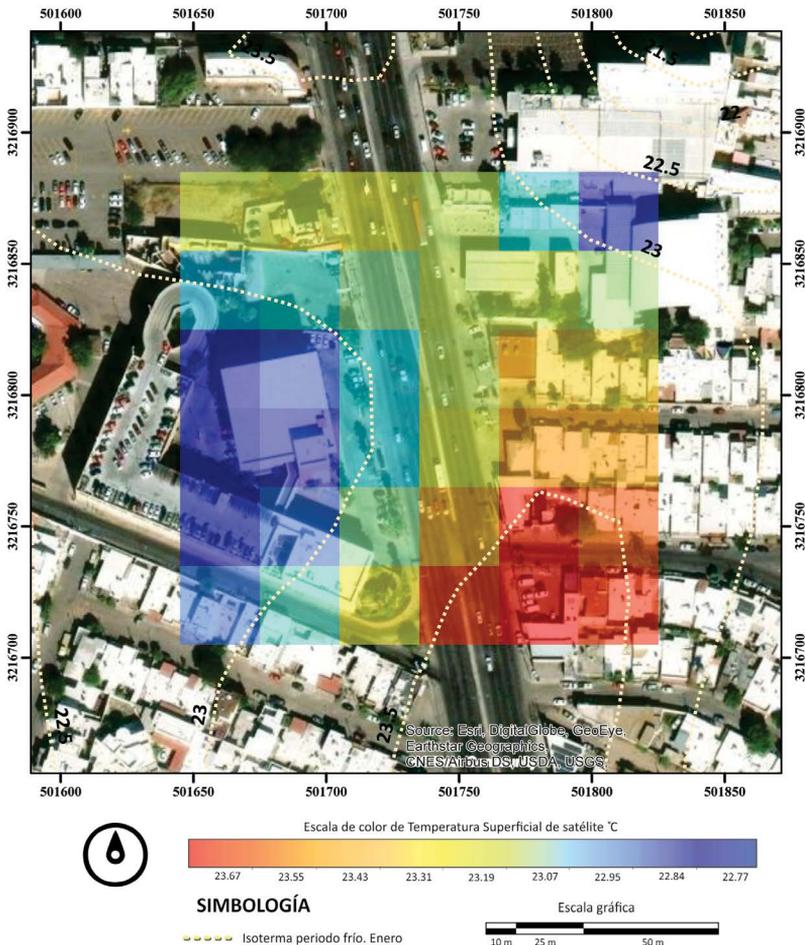


FUENTE: Elaboración propia ayuda de Landsat (29/08/2015, 17:52 h), obtenido de ArcGIS.

Por su parte, la imagen V.18 muestra la temperatura superficial del día 5 de enero de 2016 y en la Imagen 45 el día 29 de agosto de 2015, ambos a las 17:52 h, así como la isoterma a cada 0.5 °C en un área de 32 400 m².

De la simulación se observa que en el periodo frío las edificaciones en el área estudiada de más de dos niveles, y que proveen sombras al exterior durante el día, mantienen temperaturas superficiales más frescas registrando 23 °C y 22.5 °C. Por su parte, las zonas comerciales y abiertas con superficies artificiales como el asfalto y concreto sin vegetación (estacionamientos y vialidades), tienen las temperaturas más altas del área analizada (23.67 °C).

IMAGEN V.18. Punto 9. Temperatura superficial e isoterma de invierno 2016, 17:52 h



FUENTE: Elaboración propia, con ayuda de Landsat (05/01/2016) 17:52 h, obtenido de ArcGIS.

Boulevard Clouthier y Calle Xólotl

Punto 2

El punto 2 corresponde a un uso de suelo mixto, habitacional densidad baja, habitacional densidad media y contiene una sección de zona de conservación. Se clasifica de acuerdo con este documento con una LCZ abierta y de baja altura y la densidad vehicular es de 66 000 VTDP.

La imagen satelital de temperatura tiene una resolución de 30×30 m por 1 píxel, por lo que, para la recolección de datos a utilizar en el simulador, se toman 6 pixeles, que equivalen a una cuadrícula de 180×180 m para analizar información en campo y simulación a escala local.

En la tabla siguiente se observan los datos para utilizarse en la simulación UWG, tomados de ArcGIS del punto 2, boulevard Clouthier y calle Xólotl.

TABLA V.18. *Registro de estructura urbana, punto 2*

<i>Características urbanas</i>	<i>Ítem en UWG</i>	<i>Unidad</i>	<i>Abreviación</i>	<i>Cantidad</i>
Superficie urbana	Urban area	m ²	A	32 400.0000
Densidad edificada	Building density	m ²	SC	0.0979
Cobertura de árboles	Urban area tree coverage	m ²	Ga	0.0487
Promedio de altura media	Average building Height	m	Hm	3.7482
Promedio de superficie de alzados	Vertical to horizontal radio	m	F	0.0946
Velocidad de viento mínima	Minimum wind velocity	m/s	W	0.6000
Calor liberado por sistemas HVAC	HVAC 0-1	-	-	0.0000
Calor antropogénico	Sensible anthropogenic heat	W/m ²	AH	60.0000
Volumen de tránsito diario promedio	-	pieza	VTDP	66 000.0000

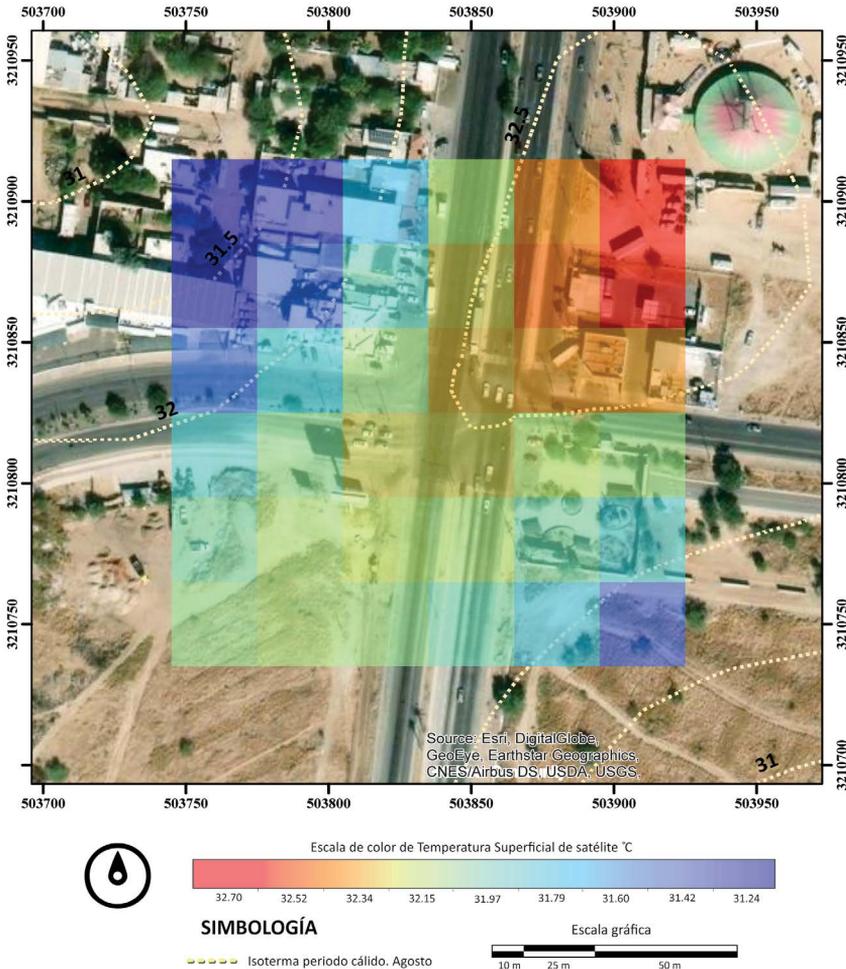
FUENTE: Elaboración propia.

En las siguientes páginas, la imagen V.20 muestra la temperatura superficial del 5 de enero de 2016 y en la imagen V.19 la del día 29 de agosto de 2015, ambas a las 17:52 h, así como el isoterma a cada 0.5 °C en un área de 32 400 m².

En el periodo de verano se observan temperaturas más altas en las vialidades, en los corredores del blvd. Clouthier y en la esquina nororiente por

la actividad comercial de la zona, alcanzando los 33 °C. El área de menor temperatura (31.24 °C) se presenta en las viviendas y comercios que proveen sombras exteriores al igual que en el invierno.

IMAGEN V.19. Punto 2. Temperatura superficial e isoterma de verano 2015, 17:52 h

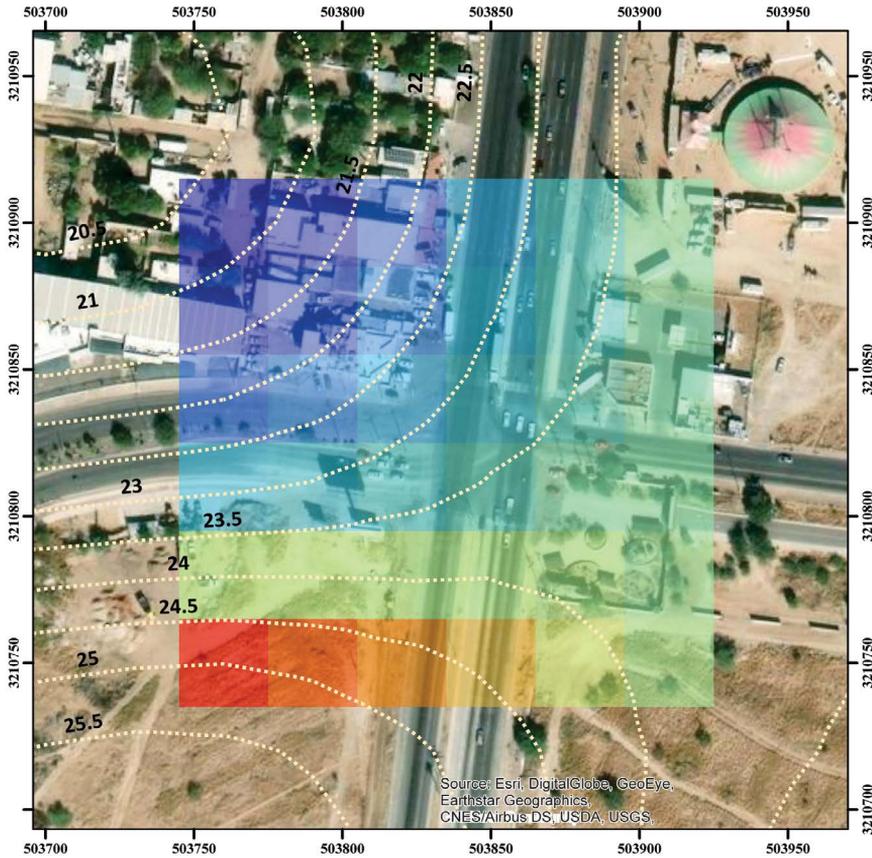


FUENTE: Elaboración propia con ayuda de Landsat (05/02/2016) 17:52 h, obtenido de ArcGIS.

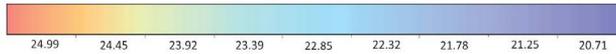
Se observa en el periodo de invierno un área más fresca en el área donde árboles y edificaciones provocan sombras y el ambiente exterior presenta temperaturas de 20.5 °C, por el contrario, en el área abierta y de terreno natural se registra un aumento de 3 a 4 °C, alcanzando los 25.5 °C, tenden-

cia en aumento hacia el área de suelo natural. En relación a las vialidades, se muestran con temperaturas entre 23 °C y 24 °C ya que no son superficies que estén bajo la sombra (imagen V.20).

IMAGEN V.20. Punto 2. Temperatura superficial e isoterma de invierno 2016, 17:52 h



Escala de color de Temperatura Superficial de satélite °C



SIMBOLOGÍA

--- Isotherma periodo frío. Enero

Escala gráfica



FUENTE: Elaboración propia con ayuda de Landsat (05/01/2016) 17:52 h, obtenido de ArcGIS.

Una observación en relación con los dos sitios y en sus dos estaciones, es que el punto 9 presenta diferencias de temperaturas en cada uno de sus mapas de entre 0.5 y 1 °C, mientras que en el punto 2 hay diferencias de

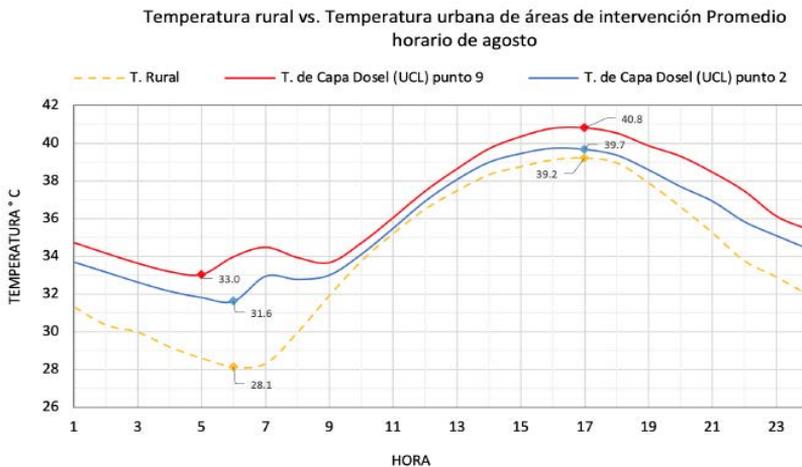
hasta por 5 °C en el periodo invernal y de 1.5 °C en verano. Esto muestra que las zonas periurbanas tienen un espectro más amplio de temperaturas por poseer mayor vegetación, encontrarse en un área abierta y las características morfológicas del sitio, mientras que en el punto 9 un área más compacta y mayor densidad, la variación microclimática no es alta, lo que implica que las temperaturas permanecen altas por mayor tiempo a lo largo del día.

Simulación UWG y discusión de resultados

Periodo de verano

La simulación muestra los perfiles de temperatura rural y de la UCL de ambas áreas de intervención en cada periodo. A continuación se muestra la gráfica V.3, correspondiente al periodo de verano.

GRÁFICA V.3. Perfil de temperatura rural y urbana de verano



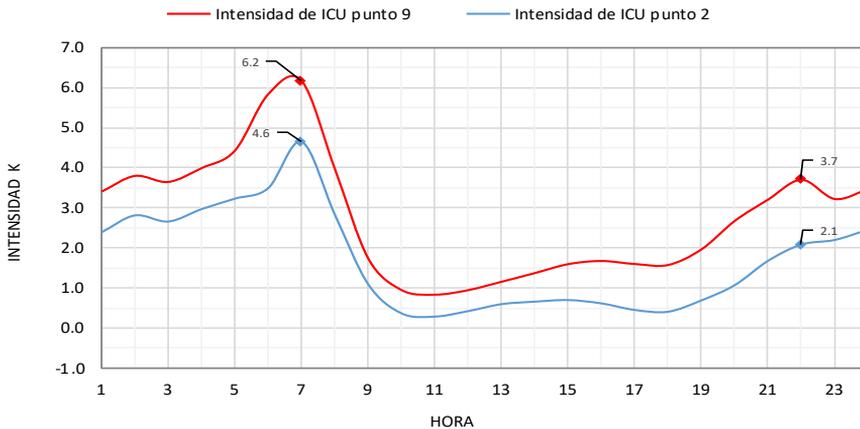
FUENTE: Elaboración propia a partir de Matlab y UWG.

En ella se exhibe que la temperatura rural, a pesar de que el sitio tiene suelos con gran capacidad calorífica, se encuentra por debajo de ambos puntos y evidentemente el punto 9 presenta la mayor temperatura en la UCL: registra 40.8 °C, y un grado menos registra el punto 2. Esto a las 17:00 h que está dentro del rango horario donde se alcanzan las mayores temperaturas.

Las temperaturas más bajas se registraron entre 5 y 6 de la mañana, justo al amanecer, antes del calentamiento de las superficies. También la zona rural evidencia durante toda la noche temperaturas más bajas, debido a su mayor potencial de enfriamiento.

Con respecto a la intensidad de ICU en verano mostrada en la gráfica V.4, cada línea corresponde a la intensidad en ambos sitios de estudio, el programa la calcula tomando como referencia la temperatura rural del archivo epw y la de cada sitio con los parámetros modificados en relación a las características de geometría urbana, de vegetación y climáticas. La simulación registra la más alta de las intensidades con 6.2 °C en el punto 9 a las 7:00 h. Esto quiere decir que, una vez ocurrido el amanecer (6:00 h), en tan sólo una hora las superficies artificiales ya calentaron el ambiente urbano logrando esta diferencia entre lo rural y lo urbano. En comparación con el punto 2 ocurre el mismo evento a la misma hora, sólo que la diferencia es de 1.6 °C, es decir, las superficies en tal sitio no aportan tanto calor al ambiente como las del 9.

GRÁFICA V.4. *Intensidad de ICU de verano*
 Intensidad de ICU en áreas de intervención
 Promedio horario de agosto

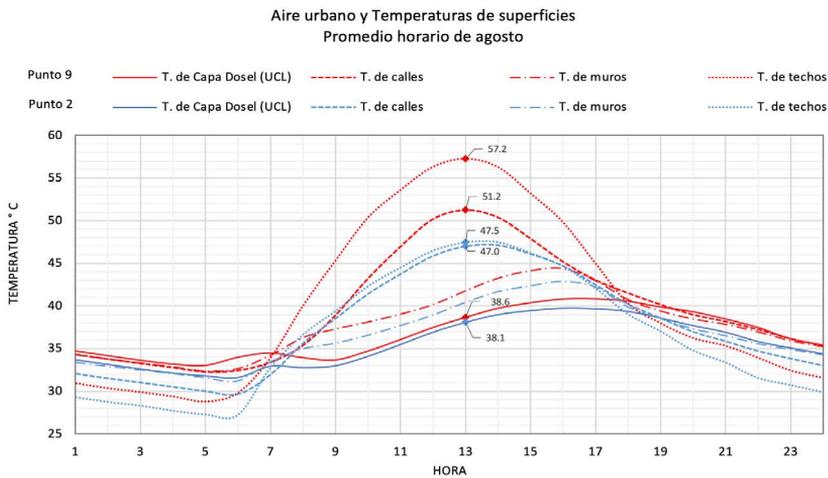


FUENTE: Elaboración propia a partir de Matlab y UWG.

A las 22:00 h se presenta otro máximo de ICU. Cuatro horas después de oculto el sol (18:00 h), probando que las superficies artificiales aún permanecen calientes liberando lentamente al ambiente urbano su calor.

Uno de los resultados en la simulación interesante para analizar es la diferencia de temperaturas entre las distintas superficies a su alrededor y su comparación con la temperatura de la UCL mostrada en la gráfica V.5.

GRÁFICA V.5. Aire urbano y temperaturas de superficies de verano



FUENTE: Elaboración propia a partir de Matlab y UWG.

Se muestra que ambos puntos tienen una relación en cuanto al calentamiento del tipo de superficies siendo el más caliente el techo, seguida por las calles y finalmente los muros, así mismo los perfiles de temperatura más bajos fueron los de la UCL.

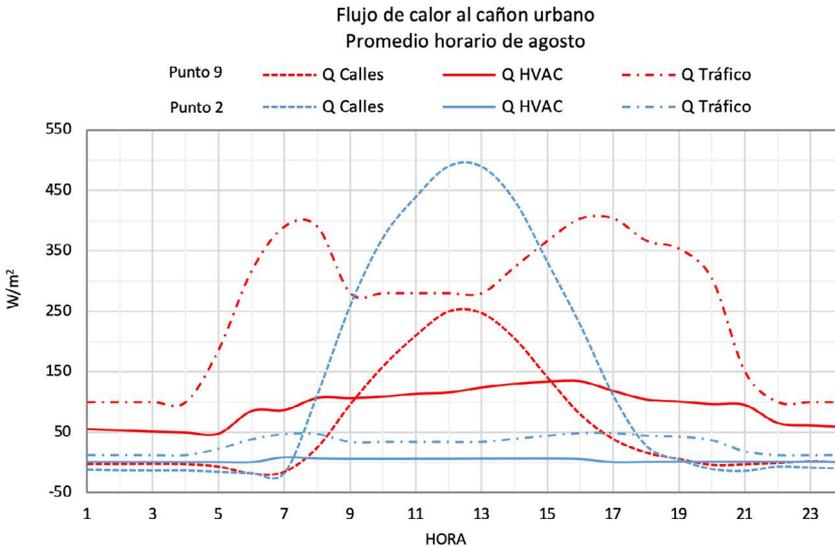
La superficie más cálida en ambos puntos es la de los techos alcanzando en el punto 9, 57.2 °C a las 13 h, 18.6 °C más que la temperatura de la UCL. En relación a esto, los techos en ese sentido no aportan temperatura al cañón urbano, este calor lo estaría liberando sobre la capa límite superficial. Por lo contrario, las calles que sí aportan calor al ambiente urbano, registran 51.2 °C en el punto 9 y 47 °C en el punto 2, lo que representa un aumento de 12.6 y 8.9 °C respectivamente con respecto a la UCL, mostrando lo relevante de la materialidad y sombreado de estas superficies. Cabe desta-

car que estas diferencias entre las temperaturas superficiales, siendo más altas las horizontales, se debe en gran medida a la geometría de la trayectoria solar en la ciudad.

El amanecer tuvo lugar a las 6:00 h y el atardecer a las 18:00 h, justo en el instante cuando ocurren inversiones de temperaturas en la gráfica.

Uno de los parámetros a ingresar en el simulador es el calor antropogénico aportado del tránsito vehicular y el aportado por los sistemas de acondicionamiento interior de los edificios, en ese sentido la gráfica V.6 muestra el flujo de calor de las calles, del tráfico y del calor aportado por los aires acondicionados.

GRÁFICA V.6. Flujo de calor al cañón urbano de calles, HVAC y tránsito vehicular



FUENTE: Elaboración propia a partir de Matlab y UWG.

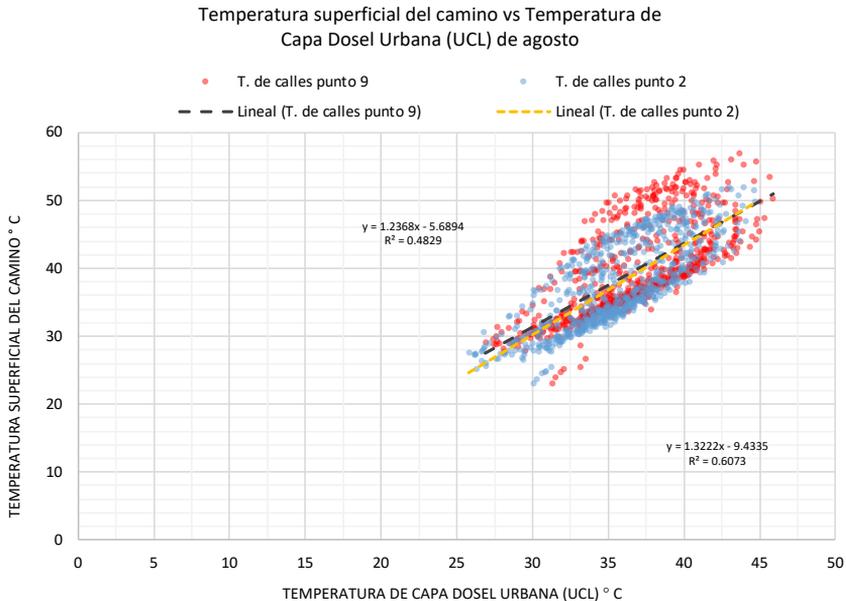
Con respecto al punto 2, el flujo de calor mayor lo presenta la calle, por ser una vialidad bastante amplia y sin sombrear, además las alturas de las edificaciones tampoco permiten sombrear estas superficies. El calor aportado por el tráfico y el aire acondicionado es menor, ya que la densidad de ambos parámetros es poca.

En relación con el punto 9, el mayor flujo de calor lo aporta el tráfico vehicular, es de señalarse que es uno de los sitios con mayor tránsito que

registra la localidad hermosillense, la gráfica además muestra los máximos donde el tránsito se da con mayor volumen, siendo estos por la mañana y por la tarde alcanzando los 360 W/m^2 . Con respecto a la materialidad de la calle, la temperatura permanece estable cuando está bajo la sombra (noche) pero una vez ocurrido el amanecer, la temperatura aumenta y también alcanza valores altos a medio día. El calor antropogénico aportado por el aire acondicionado presenta aportaciones de hasta 135 W/m^2 de manera constante al ambiente, ya que se estima que los aires se encienden y permanecen así durante todo el día y la noche.

Finalmente la gráfica V.7 muestra la dispersión de temperatura de la UCL contra la temperatura superficial de vialidades de asfalto de ambos puntos en verano.

GRÁFICA V.7. *Dispersión de temperatura superficial del camino y temperatura de UCL*



Fuente: Elaboración propia a partir de Matlab y UWG.

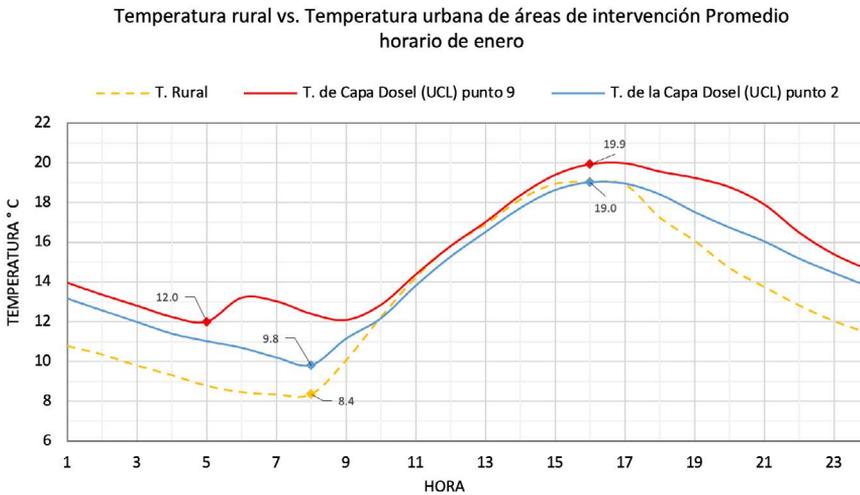
Se observa que las temperaturas empiezan a crecer de manera proporcional, pero al llevar los 40°C la temperatura de la calle se eleva, cuando se obtiene una temperatura de 45°C de UCL, la temperatura de la superficie

alcanza los 56 °C. Esta conclusión es relevante para sugerir cambios de albedos y mayor sombreadamiento en las vialidades.

Simulación UWG y discusión de resultados
Periodo de invierno

La simulación muestra los perfiles de temperatura rural y de la UCL de ambas áreas de intervención en cada periodo. A continuación se muestra la gráfica V.8 correspondiente al periodo de invierno.

GRÁFICA V.8. Perfil de temperatura rural y urbana de invierno



FUENTE: Elaboración propia a partir de Matlab y UWG.

Las oscilaciones de temperaturas en el transcurso del día entre ambos sitios de intervención son similares, posicionándose el punto 9 encima del punto 2 en todo momento, alcanzando la máxima temperatura a las 16 h de 19.9 °C. Sin embargo, la diferencia entre este sitio y el área rural y el punto 2 es solo de 0.9 °C por distintas razones, la más relevante sería el calor aportado por las superficies naturales del desierto presentes en la zona rural y en la zona periurbana. Esta razón también es causante de la inversión observada entre las 10:00 h y las 16:00 h entre el punto 2 y el sitio rural, inclusive a las 12:00 de medio día la temperatura rural es igual que el sitio

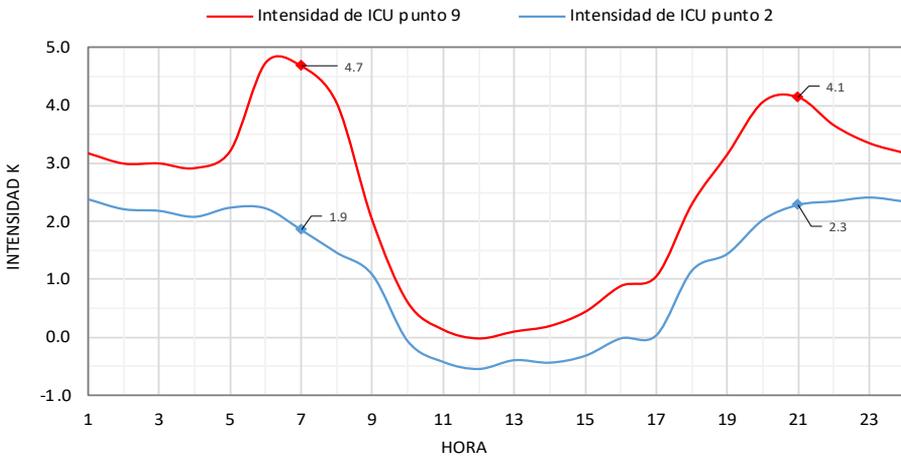
9 por la gran capacidad calorífica de las superficies naturales. Por la noche la diferencia de temperaturas es más amplia.

En relación a las temperaturas más bajas, cada sitio la presenta a distintas horas, esto tiene que ver con la geometría del sitio en relación con la trayectoria solar, la materialidad de las superficies y la presencia de vegetación en los alrededores.

La gráfica V.9 exhibe la intensidad de ICU de invierno, cada línea corresponde a la intensidad en ambos sitios de estudio, el programa la calcula tomando como referencia la temperatura rural del archivo epw y la temperatura de cada sitio con los parámetros modificados en relación a las características de geometría urbana, de vegetación y climáticas.

GRÁFICA V.9. *Intensidad de ICU de invierno*

Intensidad de ICU en áreas de intervención
Promedio horario de enero



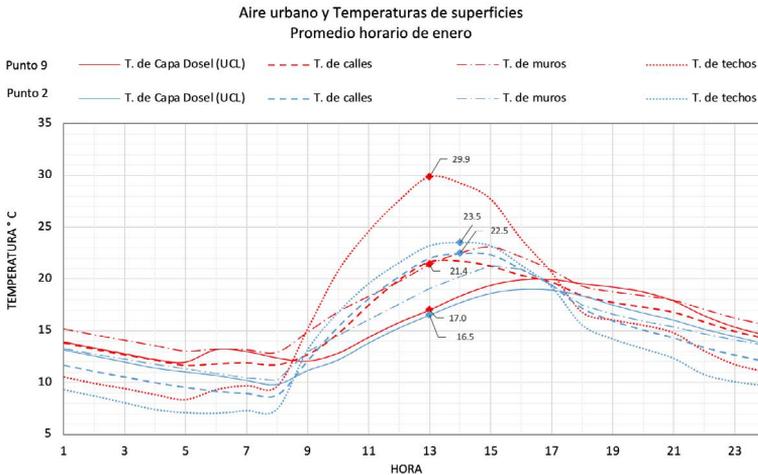
Fuente: Elaboración propia a partir de Matlab y UWG.

La simulación muestra el perfil de intensidad del punto 2 con valores negativos entre las 10:00 h y 17:00 h, ya que en ese horario es cuando el área rural tiene mayor temperatura que la urbana, situación que se presenta únicamente en el periodo de invierno, por su parte el punto 9 llega a tener valor de 0 a las 12:00 h por la misma razón.

Los perfiles muestran en esta gráfica el fenómeno nocturno alcanzando 4.1 °C en el punto 9 y 2.3 °C en el punto 2 a las 21:00 h y de 4.7 °C en el

punto 9 y 1.9 °C en el sitio 2 a las 7:00 h, a razón de que el entorno rural se encuentra más fresco y liberando el calor almacenado del día y se recuperan en su totalidad permaneciendo más frescas por la noche que las superficies artificiales de la zona urbana.

GRÁFICA V.10. Aire urbano y temperaturas de superficies de invierno



FUENTE: Elaboración propia a partir de Matlab y UWG.

En cuanto al resultado de la simulación en relación a la temperatura de la UCL y las superficies a su alrededor se muestra en la gráfica V.10.

Si bien se observa que en ambos puntos la temperatura de los techos al igual que en el verano es la de mayor aportación, para nuestro estudio es relevante aquellas temperaturas liberadas a nivel del cañón urbano, es así que la siguiente es la temperatura de las calles registrando 23.5 °C en el punto 2 y 21.4 °C en el punto 9. Esto equivale a un aumento de 5.8 y 4.4 °C respectivamente en relación a la temperatura de la UCL, las diferencias de temperaturas no son tan altas como en el verano, pero sí representan una aportación de calor al ambiente.

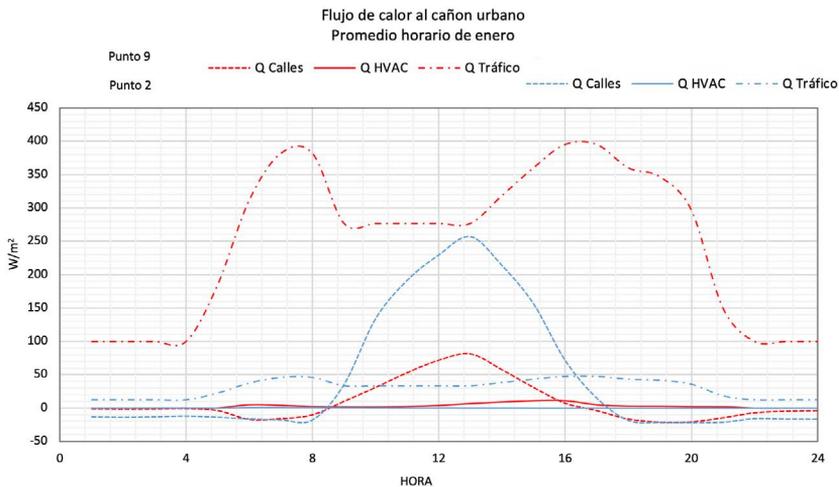
Otra observación es que la tendencia de crecimiento de la temperatura Dosel se genera después de mediodía mientras que en las superficies la tendencia comienza desde que estas son calentadas por el sol a primeras horas del día. Esta sería una de las razones por las cuales el ambiente se encuentra en disconfort desde tempranas horas hasta más allá de oculto el sol.

En este periodo invernal el amanecer ocurrió a las 7:19 h y a las 17:45 h el sol se ocultó, justo en el instante cuando ocurren inversiones de temperaturas en la gráfica.

El calor antropogénico también es simulado en invierno, donde se observan los flujos de calor de las calles y del tráfico. En este periodo el calor aportado por los equipos de acondicionamiento ambiental es cero debido a que en la localidad no se acostumbra a encender calefacción.

El dato más alto que se muestra en la gráfica V.11 es el aportado por el tráfico vehicular en el sitio 9, es de señalarse que es uno de los sitios con mayor tránsito que registra la localidad hermosillense. La gráfica además muestra los máximos donde el tránsito se da con mayor volumen, siendo estos por la mañana y por la tarde, alcanzando los 400 W/m^2 . El punto 2 también presenta aportación de calor a través de las vialidades, pero estos no superan los 50 W/m^2 .

GRÁFICA V.11. Flujo de calor al cañón urbano de calles, HVAC y tránsito vehicular



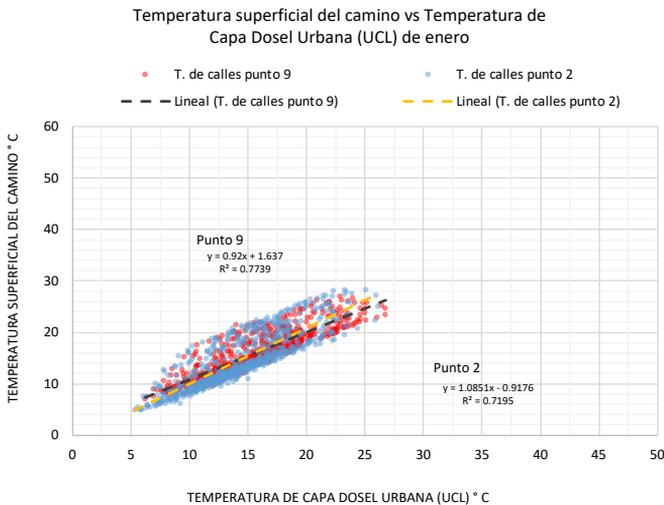
FUENTE: Elaboración propia a partir de Matlab y UWG.

Con respecto a la materialidad de la calle, la temperatura permanece estable cuando está bajo la sombra (noche) pero una vez ocurrido el amanecer, la temperatura aumenta y también alcanza valores altos a medio día en ambos periodos con 260 W/m^2 en el punto 2 y 90 W/m^2 en el punto 9, ya que son vialidades generalmente abiertas sin sombras. Sin embargo, la

amplitud es menor en el punto 9 por tener edificaciones más altas que alcanzan a sombrear sus calles en algunas horas del día.

Finalmente, la gráfica V.12 muestra la dispersión de temperatura de la UCL contra la temperatura superficial del camino de asfalto de ambos puntos en invierno. Se observa que las temperaturas empiezan a crecer de manera proporcional y ligeramente se eleva la temperatura superficial del camino cuando la temperatura de la UCL sube más de 15 °C. También se observa que en el punto 2 la temperatura del camino tiende a crecer más debido a su geometría y poco sombreadamiento.

GRÁFICA V.12. *Dispersión de temperatura superficial del camino y temperatura de UCL*



FUENTE: Elaboración propia a partir de Matlab y UWG.

Se han mostrado ejemplos de tres métodos que permiten evaluar las condiciones térmicas a micro escala en sitios específicos de una ciudad desértica como Hermosillo, para lo que se mostraron dos áreas: una considerada como isla de calor en la zona urbana y otra como isla fría, resultados de invierno y verano.

El uso de cualquiera de estos métodos dependerá de las condiciones particulares del lugar, los objetivos específicos de lo que se quiere analizar y los recursos disponibles. de para otros casos en condiciones similares.

Los ejemplos de evaluación no sólo sirven de diagnóstico de las condiciones térmicas, sino que los resultados de la comparación entre materiales empleados, FCV, tránsito vehicular y uso de la vegetación de ambos sitios nos da un indicio sobre posibles estrategias de intervención para otros casos en condiciones similares.



CAPÍTULO VI

**ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN PARA CIUDADES
DEL DESIERTO CONTINENTAL A MESOESCALA
Y MICROESCALA EN HERMOSILLO, SONORA, BAJO
LA PERSPECTIVA DEL DISEÑO URBANO**

Propuestas de mitigación a mesoescala para ciudades en el desierto

Actualmente existen numerosas estrategias de mitigación de la Isla de Calor Urbana (ICU), con impactos positivos en el clima local y global, que surgen de distintos campos profesionales que las estudian, como la planeación urbana, la arquitectura, la gestión del transporte, el cuidado de los recursos naturales, la salud pública, entre otros.

En una ciudad desértica las alternativas de mitigación se reducen por las características climáticas típicas de una localidad de clima árido. Para el caso del desierto continental, que posee variaciones ecológicas, climáticas, edáficas y topográficas, donde no sólo es cálido seco sino también cuenta con altas temperaturas en el viento y de superficie, el microclima varía en el cañón urbano dependiendo del entorno construido, impactando el confort urbano.

Es de tomar en cuenta que las estrategias de mitigación conllevan impactos diurnos y nocturnos, pero en el desierto se busca principalmente la mitigación del fenómeno en el día (ICU_d), caracterizado por una intensa radiación solar y como consecuencia se verán favorecidas las temperaturas nocturnas, reduciéndose la intensidad de ICU_n , característica de las zonas áridas.

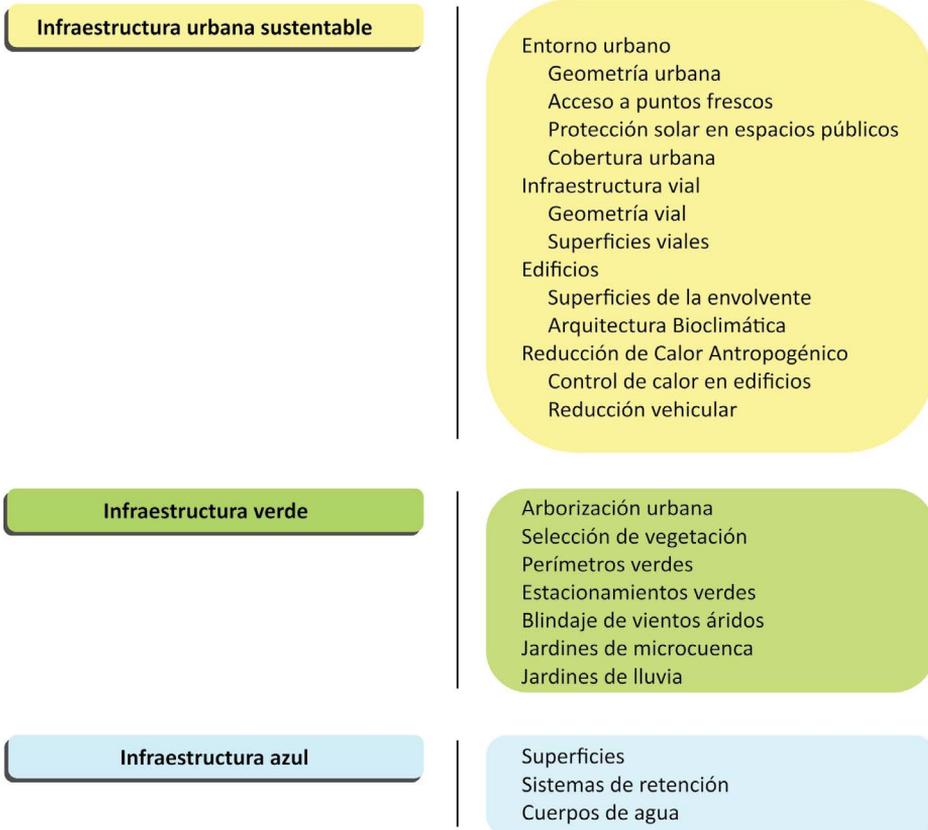
Por ello, en ciudades de clima cálido seco el énfasis de control de la ICU se presenta en el conocimiento de la trayectoria solar y la relación que tiene con la altura de los edificios y anchos de las calles de los cañones urbanos, expresados con el FCV. Otros aspectos para considerar son las características del entorno como la vegetación y superficies urbanas, además de otras

estrategias importantes como el manejo adecuado del recurso hídrico y control de calor antropogénico (Taslim *et al.*, 2015).

Es así que a nivel meso escala, se plantean tres categorías para clasificar las estrategias de mitigación de ICU para cualquier ciudad en el desierto continental.

- (a) Infraestructura urbana sustentable
- (b) Infraestructura verde
- (c) Infraestructura azul

IMAGEN VI.1. *Categorías de estrategias de mitigación para el desierto continental*



FUENTE: Elaboración propia.

1. *Infraestructura urbana sustentable*

La planeación urbana se ve reflejada en la organización física y espacial del entorno urbano, lo que produce cambios en el ambiente, causando la presencia de fenómenos climáticos como el de la ICU, por ello la regulación y soluciones propuestas son procesos esenciales como medidas de mitigación ante el cambio climático (Healthy Air Living, 2011).

Las metas de control ante las temperaturas por la infraestructura urbana deben ser tratadas por profesionistas e investigadores que analicen el desarrollo y la influencia ambiental, entendiendo que es un fenómeno multidisciplinario, y que comprendan del espacio urbano, de la cultura y hábitos de las personas, de lo existente, del uso de las infraestructuras sustentables, entre otros aspectos.

Es así que, desde el punto de vista del diseño urbano, se presentan las estrategias de mitigación aplicables al desierto continental en materia de la infraestructura urbana, las cuales dividiremos en cuatro categorías: Entorno urbano, Infraestructura vial, diseño de edificios y calor antropogénico, que a su vez se subdividen para una mejor explicación.

Entorno urbano

La morfología urbana, el tamaño de una ciudad, la forma de los edificios y la geometría del cañón urbano, tienen un rol en la formación de la ICU, ya que la altura, orientación, vialidades, ventilación y calor antropogénico impactan las temperaturas urbanas. A continuación, se exponen las mitigaciones con relación al entorno urbano dividiéndose en geometría urbana, acceso a puntos frescos, protección solar en espacio público y cobertura urbana.

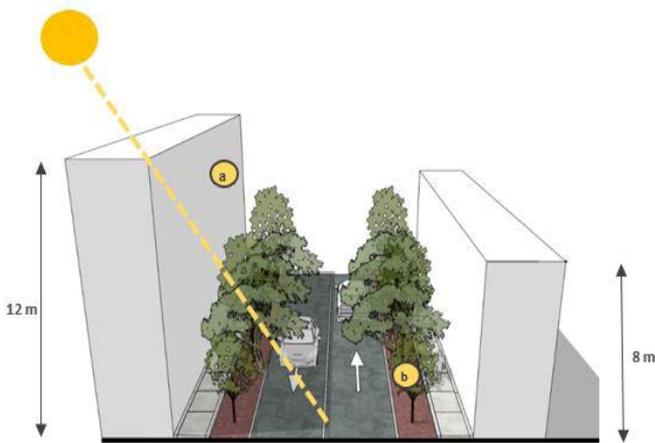
Geometría urbana

En ciudades del desierto la geometría urbana tiene un papel trascendental en las temperaturas urbanas y recibe, por ello, el principal énfasis en la relación entre la geometría urbana y el recorrido solar y su relación con el FCV, ya que se afirma que es de las principales consecuencias de la presencia de

ICU. Por ello, generar estrategias de mitigación en torno a la orientación, forma y estrategias pasivas es lo óptimo especialmente en ciudades áridas donde se espera radiación solar máxima mayor a $1\,000\text{ W/m}^2$ (Taslim *et al.*, 2015; Shalaby, 2011; Synnefa *et al.*, 2008). Al respecto podemos mencionar:

- Densificar mediante el diseño urbano vertical, compacto y denso para sombrear espacios públicos exteriores y vialidades.
- Calcular el FCV de tal manera que se encuentre la relación ideal entre altura de edificaciones para sombrear la vialidad y ancho de calles que permita dejar salir la radiación de onda larga a la atmósfera.
- Hacer uso de estrategias pasivas urbanas de enfriamiento como adecuada orientación, uso de vegetación nativa y uso de ventilación natural en calles y edificios.
- Aprovechar la ventilación natural a fin de refrescar y generar microclimas en el ambiente urbano.
- Considerar la topografía y relieve del sitio por la altura y vientos de cualquier asentamiento urbano, así como tener pleno conocimiento de los tipos de suelos como arena, roca, seco, húmedo, hierba seca, campo frondoso, desierto o área urbana y su capacidad térmica.

IMAGEN VI.2. Estrategias de mitigación en geometría urbana para ciudades en el desierto continental



FUENTE: Elaboración propia.

En la imagen anterior se ilustran las recomendaciones de mitigación de ICU referentes a la geometría urbana.

- (a) Densificar y diseñar con un FCV de acuerdo con la latitud del sitio, que permita sombrear las vialidades en el día y por la noche dejar salir el calor a la capa límite urbana (UBL). En una latitud 29° a las 14:00 h de junio la altura solar es de $62^\circ 34'$.
- (b) Diseñar vialidades estrechas, la vegetación deberá ser de copa moderada que permita la salida de calor por la noche.

Acceso a puntos frescos

Proveer de puntos frescos de fácil acceso es esencial para proporcionar refugio a los habitantes de las ciudades áridas de los efectos adversos de las altas temperaturas urbanas.

- Incluir instalaciones de agua tales como fuentes, espejos de agua, estanques, jardines de lluvia como amortiguadores de temperatura y generar microclimas menos cálidos mediante enfriamiento evaporativo.
- Tener en los espacios públicos, áreas específicas para hidratarse con bebederos, y para refrescarse como sistemas de aspersión y zonas de descanso sombreadas.
- Ubicar parques con numerosa arborización a manera de brindar espacios de descanso ente los recorridos de los peatones.

Protección solar en espacios públicos

En las áreas urbanas las variaciones de temperatura son causadas por el tipo y cantidad de superficies expuestas a la alta radiación solar que reciben, almacenan y reflejan al entorno urbano, modificando el balance energético y contribuyendo a la presencia de ICU, afectando al confort térmico y provocando mayor riesgo de morbilidad. Por ello las siguientes recomendaciones son sugeridas:

- Incorporar elementos de protección solar como pergolados, lonarías, parasoles, etcétera, en espacios públicos.
- Plantar vegetación perenne que provea sombra en todo el año e intercepte los rayos solares (dependiendo del clima local específico).

Cobertura urbana

Conocer y trabajar sobre las propiedades ópticas de los materiales como el albedo y emisividad de las superficies horizontales y verticales de una ciudad ubicada en el desierto es de los principales elementos para evaluar y determinar el potencial de mitigación, ya que representan una enorme fuente de reducción de calor (Alchapar *et al.*, 2010).

- Seleccionar materiales óptimos de acuerdo con las propiedades térmicas: baja absorción, alta emisividad y alto albedo para el diseño urbano.
- Reemplazar materiales oscuros por unos de alto albedo con superficies claras, éstas tienen mayor duración porque reflejan radiación, permanecen frescas y sufren menos dilatación térmica y contracción.
- Utilizar superficies permeables como adoquín, que posibilita la filtración de agua y permite mantener fresca la superficie de calles, caminos y banquetas.
- Utilizar superficies permeables con vegetación o concretos perforados que permitan el crecimiento de pasto y/o árboles.
- Incluir cobertura vegetal desértica en suelos exteriores no transitados, ya que la vegetación no almacena calor y sombrea las superficies.
- Evitar zonas baldías o superficies de tierra natural, ya que el suelo tiene una gran capacidad de absorción de calor.
- Evitar el uso de césped sintético, ya que incrementa la temperatura superficial.

A continuación, se muestran en la imagen VI.3 las recomendaciones de mitigación de ICU enfocadas en el entorno urbano.

IMAGEN VI.3. *Estrategias de mitigación en entorno urbano para ciudades en el desierto continental*



FUENTE: Elaboración propia.

- (a) Recuperar espacios públicos vacíos (explanadas de concreto) e incluir fácil acceso a puntos frescos con numerosa arborización perennifolia que provea sombras todo el año para proveer refugio al intenso calor que experimenta el peatón, con áreas sombreadas de descanso y espacios para hidratarse.
- (b) Evitar grandes superficies de concreto, plazoletas, explanadas, entre otros (de bajo albedo) y utilizar materiales permeables como adoquines para proveer de filtraciones de agua y que el espacio sea aprovechado por la comunidad para mejorar una calidad de vida urbana. Incluir estacionamiento para bicicletas para brindar acceso a estos espacios públicos.
- (c) Incluir callejones verdes con superficies permeables para crear un espacio público atractivo para caminar e interactuar. Estos caminos a menudo corren paralelos a la red vial principal y brindan acceso directo a las propiedades. Deberán estar sombreados por las edificaciones de alrededor o arborización y es esencial tener una óptima iluminación para la seguridad pública.

- (d) Los materiales de la envolvente de edificios deberán ser de alta inercia térmica y alto albedo. Incluir en las edificaciones jardines interiores y espacios exteriores ajardinados.

Infraestructura vial

La orientación y morfología de las vialidades son significativos para la cantidad de ventilación que la ciudad recibe, así como la densidad edificada que emiten radiación de onda larga y contribuyen al calentamiento del entorno urbano (Takebayashi y Moriyama, 2009). Dicho lo anterior, se proponen estrategias de mitigación en torno a la infraestructura vial de una ciudad en el desierto, dividiéndose en geometría vial y superficies viales.

Geometría vial

En la literatura estudiada se ha mostrado que la relación que tiene la altura de los edificios y el ancho de las vialidades conocido como FCV se encuentra directamente relacionada con la formación de ICU, por ello la geometría de las calles es uno de los conceptos a tomar en cuenta para la mitigación (Bourbia y Boucheriba, 2010).

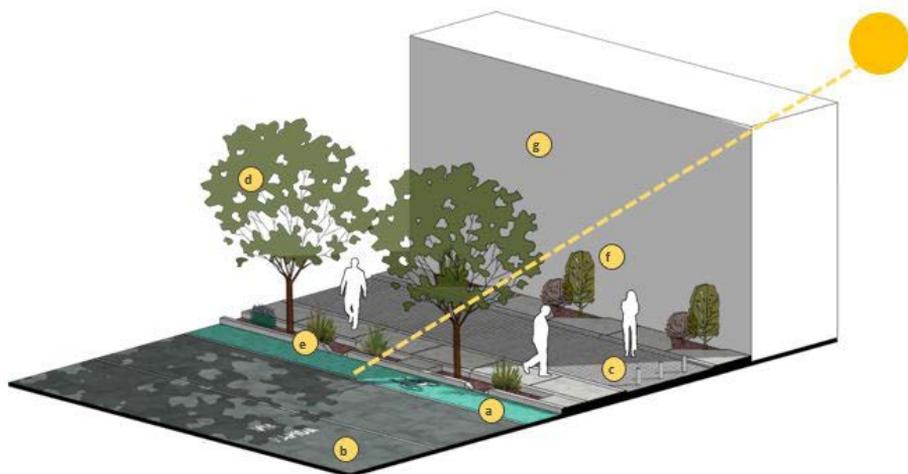
- Tener vialidades estrechas o medianamente amplias, para poder ser sombreadas por los edificios aledaños.
- Combinar calles para automóviles con banquetas peatonales y vialidades para ciclistas. De esta manera se propone reducir el número de carriles en las calles y ceder el espacio a ciclovías, circulación peatonal y arborización, que generan menor calor antropogénico.

En la imagen VI.4 se muestran las medidas de mitigación a la ICU enfocadas a la infraestructura vial.

- (a) Compartir calle para automóviles con ciclovía y banqueta.
- (b) Destinar un carril de vía rápida para automóviles que transporten más de una persona y con esto reducir el uso personal del auto.

- (c) Peatonalizar, semi peatonalizar o tener acceso restringido de autos en algunas zonas para disminuir el calor antropogénico.
- (d) Incluir perímetros verdes con vegetación xérica, evitando radiación directa, reflejada y difusa y proveer de sombra a los pavimentos, así mejorar la habitabilidad de los caminos.
- (e) Incluir jardines de microcuencia o jardines de lluvia en banquetas, parques y espacios públicos de manera que capten agua pluvial directamente de la calle para regar la vegetación.
- (f) Espacios exteriores forestados para obtener sombreadamiento en las fachadas perimetrales.
- (g) Aumentar el albedo de las superficies en la geometría urbana como en la envolvente de edificios, vialidades y banquetas.

IMAGEN VI.4. Estrategias de mitigación para ciudades en el desierto continental



FUENTE: Elaboración propia.

Superficies viales

El asfalto del pavimento, el concreto y superficies oscuras en ambientes urbanos son de las principales causas de ICU en las ciudades, ya que absorben la radiación solar, incrementando la temperatura de la superficie (Ibrahim *et al.*, 2018). Por ello, investigadores como Wang y Akbari (2015) hacen énfasis en la arborización urbana para proveer sombras a los caminos pa-

vimentados. Por su parte Ibrahim *et al.* (2018) prueban la efectividad en cuanto a comportamiento térmico y costo de tener infiltración de agua en superficies viales como medidas de mitigación ante las altas temperaturas superficiales.

- En vialidades de bajas velocidades y tráfico ligero, con pavimentos y asfalto, instalar una fina capa de material bituminoso y colocar agregado con alto albedo al menos de 0.60 para aumentar la reflectividad de la superficie expuesta.
- En vialidades de velocidad media o alta, aplicar una capa de concreto de 2.5 cm sobre el asfalto, ya que el concreto tiene un albedo mayor (0.30 a 0.40 cuando es nuevo) que el asfalto.
- Hacer uso de pavimentos permeables, asfalto poroso, asfalto de corcho, concreto permeable para proveer de filtraciones de agua, para mantener fresca la superficie.
- Incluir colores al asfalto y concreto que ayuden a aumentar el albedo.
- Utilizar en materiales en calles, con albedo de 0.35 como máximo para evitar deslumbramiento y discomfort visual.

Edificios

En un clima cálido-seco, la radiación que llega a las edificaciones tiene impactos en su interior y al exterior; en interior provoca un aumento en el consumo energético causando un impacto negativo en la sustentabilidad urbana (Wong y Mercado, 2002), y al exterior a través de las superficies de la envolvente tales como muros y/o techos, las cuales son el primer contacto de los rayos solares con el inmueble que poseen propiedades térmicas que influyen en la temperatura urbana (Puliafito *et al.*, 2013). Es así como las estrategias de mitigación de ICU con relación a los edificios se dividen en aplicaciones de superficies de la envolvente y en diseño bioclimático.

Superficies de la envolvente

A diferencia de las superficies urbanas, en los edificios se debe cuidar la proporción de superficies reflejantes y de alto albedo, ya que de lo contrario generaría deslumbramiento y discomfort visual (Akbari, 2005). Por ello las

estrategias a continuación deberán aplicarse de manera cuidadosa y tomando en cuenta el entorno urbano donde se encuentra el edificio.

- Considerar el uso de revestimientos con albedos ≤ 0.65 .
- En muros y suelos utilizar acabados con revestimientos de alto albedo, salvo que por el deslumbramiento sea perjudicial en algunas áreas exteriores adyacentes al edificio.
- Diseñar acabados en techos con alto albedo y alta emisividad.

Arquitectura bioclimática

En la búsqueda del confort, el diseño arquitectónico es de los primeros recursos para incorporar estrategias de control climático con el uso de principios bioclimáticos. Por ello, las medidas de mitigación para el control de la ICU enfocadas en el diseño arquitectónico presentadas a continuación, están planteadas para contribuir a la habitabilidad no sólo en el interior de los edificios sino también en el área urbana.

- Hacer uso de estrategias pasivas de enfriamiento como adecuada orientación, vegetación, humidificación y uso de ventilación natural, para disminuir el uso de energía.
- Incorporar elementos de protección solar como pergolados, louvers, balcones, pórticos, persianas, toldos, entre otros, en la envolvente de los edificios no solo para sombrear ventanas sino muros y cubierta en la búsqueda de una mejora en la eficiencia energética del interior de los edificios.
- Emplear de ventanas de doble vidrio, adhesivos o películas para bloquear la radiación solar.
- Diseñar techos verdes intensivos con plantas y árboles para provocar sombreado. Esta estrategia es más efectiva en edificaciones menores a 10 metros y su mayor influencia es en la ICU diurna.
- Incluir en los edificios jardines interiores con vegetación xérica o xerófila, ya que es la más adecuada para el desierto por tener baja demanda de riego y generar sombra.

- Emplear en la envolvente materiales de alta inercia térmica de baja difusividad (velocidad de calor para penetrar el material) y alta efusividad (capacidad del material para absorber y liberar el calor), que acumulen y almacenen exceso de calor previniendo que se eleve la temperatura del aire. El calor contenido en estos materiales se liberará horas más tarde.
- Promover el uso de celdas fotovoltaicas en edificios públicos gubernamentales y escuelas, entre otros, para optimizar el uso de la energía.

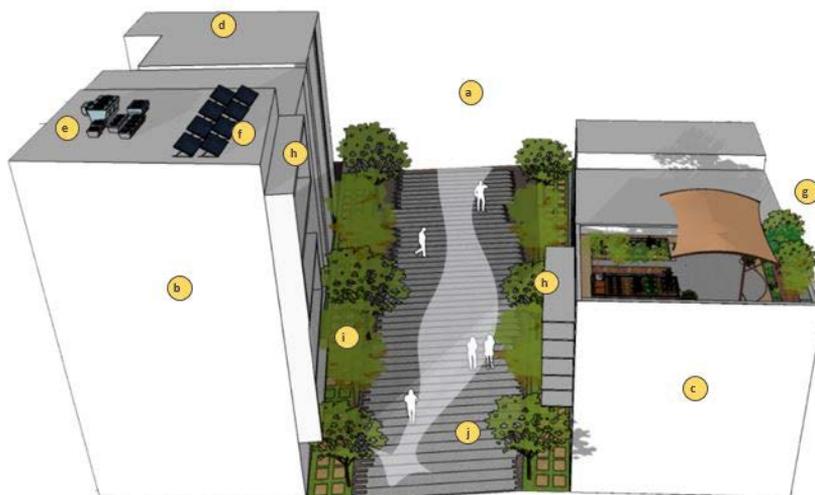
Con estas estrategias, es posible controlar hasta cierto punto las temperaturas en el interior de los edificios, y con esto, utilizar menor energía eléctrica de enfriamiento en verano, emitiendo así menor cantidad de calor hacia la ciudad.

A continuación se plantean en la imagen VI.5 estrategias de mitigación a las altas temperaturas aplicadas en edificios.

- (a) Aplicar estrategias de enfriamiento como orientación, vegetación y ventilación natural en calles y edificios para generar microclimas más resilientes a la intensa radiación solar de verano.
- (b) Densificar a través del diseño urbano vertical compacto y denso para sombrear espacios públicos exteriores y vialidades.
- (c) Utilizar materiales en la envolvente de alta inercia térmica de baja difusividad y alta efusividad
- (d) Utilizar acabados en techos con alto albedo de 0.70 como mínimo.
- (e) Ubicar compresores de equipo de aire acondicionado en las azoteas para evitar que el calor de éstas se emita a nivel del cañón urbano.
- (f) Promover el uso de celdas fotovoltaicas para optimizar el uso de la energía al interior.
- (g) Diseñar techos verdes intensivos con plantas y árboles para provocar sombreamiento sobre el techo del edificio.
- (h) Incorporar elementos de protección solar en la envolvente de los edificios para sombrear ventanas y muros y así mejorar la eficiencia energética al interior del inmueble.

- (i) Plantar arborización endémica o adaptada en el perímetro de los edificios para aprovechar las caídas de aguas pluviales de las azoteas. Además, brindar espacios de descanso entre los recorridos peatonales y obtener sombreado en las fachadas perimetrales.
- (j) Utilizar superficies permeables con vegetación que permita el crecimiento de pasto o árboles, y el paso del agua a través de sus cavidades.

IMAGEN VI.5. Estrategias de mitigación para ciudades en el desierto continental



FUENTE: Elaboración propia.

Reducción de calor antropogénico

Aplicar estrategias de mitigación para el control de calor antropogénico en el desierto es una medida eficaz para reducir temperaturas urbanas, ya que la magnitud depende en gran medida del uso de energía para el aire acondicionado, donde los valores de consumo son elevados. Por otro lado depende de la densidad y tipo de sistemas de transporte y de la actividad industrial.

Cabe destacar que las ciudades desérticas son típicamente ciudades extendidas en el territorio, dispersas, y las grandes distancias a recorrer desde un punto a otro de la ciudad incrementan el uso del auto. Aunado a esto, la circunstancia de las altas temperaturas urbanas hace muy difícil la movilidad

peatonal o en bicicletas, y esto repercute en un amplio uso del automóvil particular. Esto a su vez incrementa el calor antropogénico de la ciudad, creando un círculo vicioso.

A continuación, se presentan las medidas de control de calor antropogénico, desglosadas en control de calor en edificios y reducción vehicular.

Control de calor en edificios

La producción de calor dentro del edificio aunado a la radiación solar directa sobre su envolvente y a través de las ventanas contribuyen al sobrecalentamiento de la edificación, por ello las estrategias a continuación van en función de reducir el calor antropogénico generado dentro de los edificios.

- Reducir el uso de aire acondicionado en el interior de las edificaciones a través de estrategias bioclimáticas o estrategias pasivas de enfriamiento.
- Tener un control de óptimo del funcionamiento de aire acondicionado para mejorar la eficiencia del equipo.
- Tener restricciones de tiempo para uso de equipo de aire acondicionado en edificios públicos y privados, de acuerdo con los horarios de uso.
- Ubicar los compresores y equipos en los techos de los edificios para evitar que el calor de estos se emita a nivel del cañón urbano, y facilitar así la emisión del calor hacia el cielo.
- Diseñar la arquitectura considerando la integración de paneles fotovoltaicos en los techos.
- Tener iluminación artificial eficiente.
- Emplear diseño lumínico para aprovechar al máximo la luz natural.

Reducción del calor vehicular

El calor emitido por los vehículos contribuye a un aumento de temperatura del aire y en consecuencia al desconfort, además los mismos aportan contaminación al ambiente. De aquí la importancia para reducir la genera-

ción de calor vehicular en ambientes urbanos mediante las siguientes estrategias de mitigación:

- Reducir el número de carriles ayuda a reducir el volumen de tránsito vehicular y ceder ese espacio a banquetas o ciclovías.
- Al densificar los centros de población se reducirán las distancias que recorren los vehículos.
- Promover el uso de transporte en empresas privadas y públicas de manera gratuita ayuda a reducir el uso del automóvil.
- Destinar un carril de vía rápida para automóviles que transporten más de una persona o bien para el transporte público ayuda a reducir el uso personal del automóvil.
- Tener acceso restringido de autos en algunas zonas muy densas de la ciudad favorece la disminución del calor antropogénico.
- Tener libre acceso al sistema de transporte público en horas o días de olas de calor protege a la población de los efectos nocivos para la salud.

2. Infraestructura verde

Akbari(2002), Golden (2010) y Wang *et al.* (2016) han probado en sus investigaciones la importancia de la vegetación para mitigar el efecto de ICU diurna y nocturna. En el desierto, la flora logra enfriar a través de distintos procesos como el de sombreado de superficies, aporte de enfriamiento evaporativo y blindaje de vientos cálidos (Zinzi y Agnoli, 2012; Wang *et al.*, 2016), además, provee otras ventajas en las ciudades como el mejoramiento de la calidad de aire, ahorro del recurso hídrico, control de erosión de suelo y beneficios en la salud pública brindando protección solar, reduciendo eventos de golpe de calor y proveyendo de espacios habitables (Healthy Air Living, 2011; Chow y Brazel, 2012).

Existen diversas estrategias para incorporar vegetación en la infraestructura urbana, a continuación, se presentan las opciones para localidades en el desierto continental.

Arborización urbana

Con el objetivo de incrementar la densidad de espacios verdes en la infraestructura urbana y edificaciones en una ciudad de clima cálido-seco, las estrategias de mitigación propuestas son:

- Incluir arborización urbana con vegetación en línea o grupos para generar puntos frescos que ayuden a disminuir las emisiones de carbono e intercepten radiación solar por las sombras de los árboles, disminuyendo las temperaturas superficiales bajo ellos.
- Moderar el clima urbano a través de áreas verdes en espacios públicos.
- Diseñar caminos verdes cómodos para los peatones.
- Incluir árboles en las vialidades y camellones ya que la presencia de vegetación en el cañón urbano modifica los factores radiativos de las capas urbanas.
- Incluir en el ambiente urbano la arborización para limpiar el aire contaminado.
- Promover el cuidado de parques en las comunidades y su mantenimiento, con beneficios de descuento en servicios públicos.
- Incrementar la cobertura vegetal por vivienda y promover programas de gratificación.
- Informar sobre estrategias de arborización a la población en general.
- Aplicar las estrategias de techos fríos y forestación en edificios gubernamentales o escuelas públicas.

Selección de vegetación

Uno de los principales motivos para hacer efectiva la mitigación de la ICU con ayuda de la vegetación es la óptima selección de las especies. Se busca que los árboles tengan un crecimiento adecuado, lo cual depende de la calidad del suelo, disponibilidad de agua y espacio para optimizar el beneficio.

- Procurar utilizar vegetación endémica o bien adaptada a la región.
- Ubicar la flora de acuerdo con sus características como follaje, densidad, uso, riego, raíces, tierra, orientación, cobertura de suelo por sombra, entre otros, para maximizar el beneficio de la mitigación.
- La vegetación xérica o xerófila es la más adecuada para el desierto donde el recurso del agua es escaso, ya que tiene baja demanda de riego y genera sombras, aliviando el estrés térmico de los espacios públicos en busca de crear un ambiente cómodo cercano al confort térmico urbano.
- Los paisajes méxicos (hábitats donde hay moderada humedad), no son recomendables ya que requieren irrigación moderada y aunque aportan evotranspiración y humidifican el ambiente, no se recomienda en ciudades donde la escasez de agua se hace evidente, como el desierto.

Perímetros verdes

Colocar vegetación alrededor de los edificios permitirá proteger los muros de la radiación solar directa, reflejada y difusa, por otro lado, con respecto a las banquetas o caminos, es conveniente proponer vegetación arbórea que permita sombrear los caminos, que favorecerá el recorrido del peatón.

- Generar perímetros verdes en banquetas evitando radiación directa, reflejada y difusa, proveer de sombras para mejorar la habitabilidad de los caminos.
- Un perímetro forestado en las edificaciones que provoquen sombras en su envolvente lo que se traduciría en un ahorro en el consumo de aire acondicionado.
- Promover que las empresas privadas y públicas que cuiden su banqueta y/o camellón y generen perímetros verdes.

Estacionamientos verdes

La urbanización de las ciudades ha causado un aumento en la cantidad de vehículos en las urbes. Típicamente los estacionamientos son de pavimento de asfalto, un material de bajo albedo que contribuye al incremento de la intensidad de ICU, de modo que para reducir el calor almacenado se recomienda el uso de estrategias de vegetación en estos espacios (Onishi *et al.*, 2010).

- Ubicar vegetación arbórea perimetral para sombrear los materiales de bajo albedo.
- Colocar vegetación dentro del estacionamiento de altura media para proveer sombras y no obstruir la visibilidad del funcionamiento vial.
- Incluir superficies permeables o concretos perforados que permitan el crecimiento de la vegetación.

Blindaje de vientos áridos

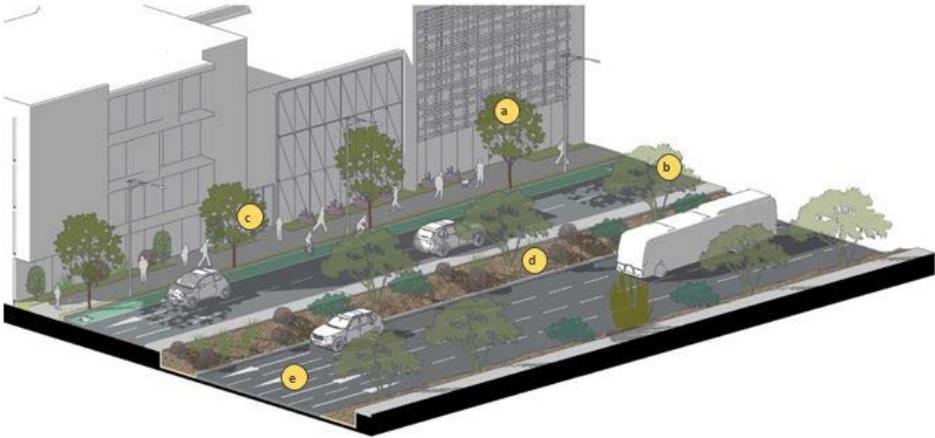
En un desierto típico, los vientos del día en el verano se caracterizan por ser cálidos y secos, es por eso que obstruirlos es el principal objetivo. Por la noche el viento es primordial para que el proceso de enfriamiento se lleve a cabo, por lo que es esencial conocer la velocidad, dirección y temperatura del mismo a modo de no obstruirlo por la noche y/o reducir su temperatura en el día (Akbari, 2002). Esta estrategia también es útil en eventos de tormentas de arena o tierra.

- Bloquear los vientos áridos con vegetación continua o en masas para evitar vientos calientes diurnos tanto de día como por la noche que permita su paso de acuerdo con la orientación de los vientos dominantes, por ejemplo, con barreras de árboles o arbustos,
- Tomar en cuenta la variación estacional (primavera, otoño, verano e invierno) y plantear el uso de vegetación perennifolia o caducifolia para un mayor beneficio.

A continuación, se muestran las recomendaciones de mitigación de ICU enfocadas en la vegetación (imagen VI.6).

- (a) Selección de especies xerófilas con baja demanda de riego, raíces no invasivas, preferentemente de gran altura para aprovechar la sombra, amplio diámetro de la copa y que cumpla con el uso paisajístico del entorno, se recomienda árboles como el palo verde o mezquite.
- (b) Aumento de forestación en el entorno urbano principalmente en banquetas, camellones y vialidades para sombrear superficies, arbustos para filtrar las partículas suspendidas de los autos y cubrir suelos para regular el calentamiento de la superficie siempre y cuando estén bajo la sombra.
- (c) Protección de vientos áridos y brindar sombreamiento en las calles y banquetas mediante los perímetros verdes. Deberá estudiarse la orientación de la arborización colocada de manera lineal para determinar si debe ser de vegetación con copa densa o moderada, la altura adecuada, de tipo perennifolia si se quiere sombrear todo el año o caducifolia si se requiere asoleamiento en invierno y estudio en sitio de dirección de vientos de día y de noche, ya que se busca que por el día funcione como rompe vientos disminuyendo su velocidad y por la noche se espera un flujo moderado para ayudar al proceso de enfriamiento urbano.
- (d) Superficies permeables bajo la sombra que permitan filtraciones de agua que mantengan a menor temperatura las superficies.
- (e) Diseñar la geometría vial de tal manera de incluir corredores de baja velocidad para fomentar un sistema en el que el peatón y ciclista se encuentren activamente en la vialidad y un corredor para un volumen de tránsito mayor que brinde mayor seguridad a los peatones así como al área circundante. Se recomienda agregar vía para bicicletas, reducir el ancho total de la vialidad y ensanchar las banquetas peatonales para ofrecer una experiencia de calidad a la vida urbana.

IMAGEN VI.6. *Vegetación como estrategia de mitigación para ciudades en el desierto continental*



FUENTE: Elaboración propia.

Jardines de microcuenca

Son depresiones con vegetación, diseñadas para almacenar el agua pluvial e infiltrarla gradualmente en el suelo. Son fáciles de construir y de bajo costo. Las estrategias de uso serían:

- Implementar un conjunto de microcuencas para mayor captación pluvial.
- Ubicar jardines de microcuenca en banquetas, parques y espacios públicos.

Jardines de lluvia

Los jardines de lluvia son de bajo costo y fáciles de construir, tienen mayor capacidad de captación que los jardines de cuenca y se componen de una cama vegetal capaz de resistir humedad y condiciones cálidas o de piedra diseñada de manera que permita la infiltración lenta hacia el subsuelo, además puede incluirse capas inferiores para depurar el agua de lluvia (Giguère, 2009). Las estrategias de uso serían:

- Colocarlos en el perímetro de los edificios para aprovechar las caídas de aguas pluviales de las azoteas.
- Ubicar jardines de lluvia en las banquetas de manera que capte agua pluvial directamente de la calle.
- Proponer jardines de lluvia en terrenos con pendiente para regular la escorrentía y captar agua.

Infraestructura azul

De acuerdo con Wang *et al.* (2016), la infraestructura azul contribuye a la resiliencia de los ecosistemas urbanos ya impactados, es así que incluir un plan estratégico de cuidados de agua es primordial cuando se considera implementar estrategias de arborización urbana, principalmente en regiones desérticas donde el recurso hídrico es limitado.

A continuación, se presentan medidas de mitigación de ICU para aprovechar el agua pluvial del desierto continental divididas en superficies, sistemas de retención y cuerpos de agua.

Superficies

Las superficies permeables permiten que el agua se infiltre a través de ellas llegando a una capa de sustrato que facilite la infiltración profunda, facilitando además el proceso de la evotranspiración por el suelo húmedo.

- Superficies de adoquín entrelazados de manera que permitan que el agua se filtre en sus uniones.
- Concreto poroso que permita el paso del agua a través de sus cavidades.
- Suelos permeables a base de sistemas de malla con celosías, metal o concreto perforado, que permita el crecimiento de pasto y árboles.
- Captación de agua pluvial a través de techos para su utilización en la irrigación de la vegetación.
- Humidificación de superficies impermeables con agua reciclada es un método eficaz para reducir las temperaturas de los materiales urbanos.

Sistemas de retención

Los sistemas de retención pluvial permiten su infiltración al suelo, facilitando el proceso de la evotranspiración por el suelo húmedo. Las zanjas de retención son depresiones excavadas en el suelo que reciben el agua pluvial y la distribuyen en toda su superficie para que se infiltre al suelo. Pueden incluirse también trincheras para su captación. Como estrategias de aplicación se pueden mencionar:

- Incluir zanjas de retención en zonas cercanas a cerros o terrenos con gran pendiente.
- Ubicar zanjas de retención húmedas que consisten en incluir vegetación arbórea y de baja altura capaces de resistir condiciones de humedad y aridez extrema.
- En espacios públicos diseñar zanjas de retención secas que consisten en incluir piedras, y suelos permeables de manera que pueda ser un espacio caminable para el habitante.
- Implementar trincheras en las zanjas de retención para captar agua pluvial.
- Implementar pozos secos para recibir el agua que corre en el área urbana para su infiltración en el suelo, se recomienda ubicarlas en zonas vulnerables ante las inundaciones, además son de fácil diseño y requieren poca superficie para su colocación.

Cuerpos de agua

Los cuerpos de agua urbanos como las presas, lagos urbanos, humedales, entre otros, favorecen la humidificación del aire y la disminución de la oscilación térmica, atenuando las diferencias de temperatura a lo largo del día. Además, constituyen espacios propicios para la recreación y para la formación de ecosistemas naturales dentro de la ciudad, mismos que generan oportunidades de regeneración y cohesión social.

En ese mismo orden de ideas de acuerdo a Volker *et al.* (2010), que las ciudades cuenten con este tipo de paisajes, provocan la presencia de diversas especies de aves, invitando a su vez a la contemplación, generando ambientes o entornos que contribuyen de manera significativa en los procesos

de fortalecimiento y restauración de la salud humana (Molina y Rubio, 2016).

- Conservar o rescatar de cuerpos de agua autónomos para beneficio de paisaje urbano, regulación del clima urbano, conservación de la biodiversidad, entre otros
- Rehabilitar o restaurar lagos naturales o cuerpos de aguas deteriorados
- Plantear la construcción de lagos artificiales en localidades donde carecen de ellos

Tanto la infraestructura verde como la azul son complementarias y pueden combinarse para lograr una gestión más integrada y sostenible de los ecosistemas y los recursos naturales.

Las estrategias de control de ICU para el desierto continental expuestas en este apartado, muestran diversas opciones para mitigar los efectos del fenómeno. El principal énfasis corresponde al conocimiento de la trayectoria solar, ya que se busca controlar el calentamiento de las superficies y se explora como base fundamental el sombreamiento de las mismas a través de vegetación.

Sin embargo, incluir arborización urbana conlleva a un mayor mantenimiento, uso de agua principalmente al inicio de su plantación, uso de tierra y además toma algunos años llegar a su crecimiento total para maximizar el efecto de mitigación; por ello se sugiere utilizar primeramente las estrategias en cambio de albedo para efectos inmediatos en superficies de pavimento, banquetas y techos. Las mismas se pueden aplicar en las intervenciones, remodelaciones y mantenimiento, así como en nuevos desarrollos. La inversión inicial varía dependiendo del área a cubrir para un cambio de material, pero como se mencionó anteriormente, esto puede formar parte del mantenimiento regular del material, haciendo de esta una estrategia rentable ya que se obtienen grandes beneficios a un costo mínimo.

Se recomienda planear el uso de distintas estrategias para optimizar el recurso económico y el beneficio de la mitigación.

El uso de las medidas de superficies frías (alto albedo) junto con aumento de vegetación urbana incrementa en gran medida la efectividad de la

mitigación de las islas de calor urbanas en el desierto, mejorando los niveles de confort térmico en espacios exteriores.

La mitigación en la ciudad de Hermosillo, Sonora

A fin de estudiar a mesoescala el fenómeno de la ICU del desierto continental, se toma como caso de estudio la ciudad de Hermosillo, Sonora, de esta manera se analizan las diferencias térmicas de las zonas urbanas, conurbaciones y rurales para identificar características y distinciones en las principales causas que provocan la ICU dentro de la urbe y con ello ofrecer estrategias de mitigación aplicables a tipologías climáticas regionales representativas de las ciudades áridas.

La capital de Sonora se caracteriza por ser una ciudad de baja altura de edificios donde el ancho de las calles es mayor a la altura de los edificios. Es una localidad dispersa (Méndez, 2003) con una extensión territorial que al 2010 registraba 17 559.2 hectáreas (SEDESOL, SEGOB y CONAPO, 2012). La clasificación del uso del suelo ha sido cambiante a través de los años, actualmente la urbanización ha alcanzado tal dispersión en la ocupación del suelo que aquel destinado a uso industrial, hoy la ciudad ya lo alcanzó y comparte el uso de suelo con el habitacional.

Como se mostró en el capítulo cuatro, las condiciones climáticas locales de Hermosillo tienen un impacto particular en las ICU formadas ya que, al registrar velocidades de viento bajas, situaciones de cielo claro y baja humedad, las diferencias de temperatura ente lo urbano y lo conurbano se amplifican, incrementando la intensidad del fenómeno.

Para balancear este calentamiento urbano se han desarrollado medidas de mitigación y tecnologías de adaptación específicas en cada región. Las estrategias presentadas a continuación son a meso escala para la ciudad de Hermosillo, Sonora, y se clasifican en tres grupos: (a) infraestructura urbana, (b) infraestructura vial y (c) infraestructura verde y azul.

Infraestructura urbana

Contribuir con el rescate de espacios públicos y habitabilidad urbana en función al confort térmico del ambiente urbano, es de los motivos principales para el control de los fenómenos climáticos que afectan a la localidad de Hermosillo, las cuales se abordan a través de estrategias de mitigación del fenómeno, desglosadas en seis temas para su intervención: densificación, orientación, configuración del cañón urbano, protección solar, superficies urbanas y control de calor antropogénico.

Densificación

Aumentar la densidad edificada es de las propuestas de mitigación que la ciudad de Hermosillo puede aplicar, ya que actualmente se encuentra dispersa, lo que provoca grandes distancias de recorridos y en consecuencia mayor infraestructura vial. Además, la baja altura de los edificios no contribuye al efecto de sombreado que el edificio vertical provee. Así mismo, el tejido urbano está fragmentado ubicando vacíos urbanos que provocan mayor temperatura, por las superficies naturales del desierto. Es así como se presentan las siguientes medidas:

- Promover el diseño urbano vertical, compacto y denso para sombrear espacios públicos exteriores y vialidades.
- Intervenir y cambiar el uso de suelo de algunos sitios, para que la población tenga fácil acceso entre áreas verdes y edificios a menos de 20 minutos.
- Que el valor numérico del COS y el CUS determinado por el reglamento de construcción del municipio esté calculado con base en el FCV.
- El diseño vertical debe estar calculado tomando en cuenta el FCV para no obstruir la emisión de calor a la atmósfera y permitir que las superficies se refresquen por la noche.
- Combinar calles para automóviles con banquetas peatonales y vialidades para ciclistas. De esta manera, se propone reducir el número

de carriles en las vialidades y ceder el espacio a ciclovías, áreas verdes, banquetas y arborización.

- Evitar lotes baldíos, ya que la tierra del desierto tiene una gran capacidad de absorción de calor.

Orientación de la traza urbana

La orientación es un concepto fundamental por estudiar, en orden de controlar la cantidad de radiación solar que llega a las superficies en la ciudad de Hermosillo, ya que, con los datos colectados en campo, se ha mostrado como una estrategia que aporta beneficios para la reducción de temperatura superficial (Takebayashi y Moriyama, 2009). A continuación se enlistan las recomendaciones:

- Hacer uso de estrategias pasivas urbanas de enfriamiento con el uso de la ventilación natural y la vegetación, a través del estudio de la orientación del sitio y así generar microclimas en el ambiente urbano.
- Estudiar la orientación de las vialidades existentes (según las diferentes colonias) y diseñar objetos arquitectónicos con la altura adecuada para proveer de sombras a las calles y aprovechar la ventilación natural, considerando las necesidades de ventilación a lo largo del año.
- Tomar en cuenta la orientación en los nuevos asentamientos urbanos a fin de diseñar las vialidades y zona habitacional a favor del peatón.

Configuración del cañón urbano (FCV)

En un clima cálido seco como el de la capital de Sonora, la relación que tiene el recorrido solar con la altura de los edificios y el ancho de las calles (FCV) es de los principales conceptos para aplicar estrategias de sombreado y lograr una reducción en la intensidad de ICU_a . En consecuencia, se presentan las siguientes medidas de aplicación:

- Modificar el FCV de tal manera que se encuentre la relación ideal entre altura de edificaciones para sombrear vialidades y ancho de calles que permita dejar salir el calor hacia la atmósfera.

- Evitar vialidades anchas, ya que eso representa un significativo porcentaje de área pavimentada que aporta calor a la superficie.
- Tomar en cuenta el tipo de arborización a elegir para que no obstruya la emisión de calor a la atmosfera y evitar que el calor quede atrapado bajo su copa.

Protección solar

En la ciudad de estudio, las superficies que permanecen bajo la sombra se encuentran a temperaturas más favorables para el clima extremo que se experimenta, lo que se traduce en una reducción de temperatura superficial. Es por esto que la estrategia de mitigación en función al recorrido solar es la que tiene mayor énfasis en cualquier urbe del desierto (Taslim *et al.*, 2015).

- Incorporar elementos de protección solar como pergolados o lonarías en espacios públicos desde banquetas a plazas y parques para brindar sombras y puntos frescos en la geometría urbana, que mitiguen los efectos adversos de las altas temperaturas.
- Plantar vegetación perenne en camellones, banquetas y espacios públicos que provea sombra en todo el año e intercepte los rayos solares. Se recomienda el uso de mezquite chileno por su amplia copa, lo que se traduce en mayor área sombreada.
- Diseñar vialidades, caminos y banquetas estrechas para buscar sombreadamiento por las edificaciones.
- Incorporar elementos de protección solar como parasoles, louvers, balcones, pórticos, persianas, toldos, entre otros, en la envolvente de las edificaciones para sombrear ventanas, muros, cubierta y mejorar la eficiencia energética del interior de los edificios.

Superficies urbanas

Tomando en cuenta que se presentan varias ICU diurnas en la huella urbana de Hermosillo y que además la ICU nocturna es la de mayor intensidad, a causa del calor almacenado por los materiales artificiales, es relevante el uso de estrategias de mitigación en torno a las superficies para controlar el fe-

nómeno. De acuerdo con Giner *et al.* (2010), 76% de las calles de la capital sonorense están pavimentadas con carpeta asfáltica o concreto hidráulico al 2010, lo que representa una gran superficie que, de acuerdo con la información colectada en campo, aporta altas temperaturas al ambiente urbano. Por ello, a continuación, se exponen las estrategias relativas a las superficies urbanas:

- Seleccionar materiales óptimos de acuerdo con las propiedades térmicas, baja absorción, alta emitancia y alto albedo.
- Evitar el uso de césped sintético, ya que incrementa la temperatura superficial hasta 10 °C más.
- Reemplazar materiales oscuros por unos de alto albedo con superficies claras, éstas tienen mayor duración por que reflejan radiación, permanecen frescas y sufren menos expansión térmica y contracción.
- Se propone en la envolvente de las edificaciones revestimiento con acrílicos blancos de albedos con un valor de 0.70.
- Considerar albedos altos en techos de mínimo 0.70 y 0.90 como óptimo.
- Proponer materiales de alta inercia térmica para acumular y almacenar exceso de calor liberando el calor horas más tarde cuando el ambiente sea más fresco. En las orientaciones mayormente expuestas al calor y/o sol proponer materiales con aislamiento térmico en edificaciones.
- Proveer de vegetación en las zonas peatonales, evitando radiación directa, y mejorar la habitabilidad del camino.
- Hacer uso de los lotes baldíos públicos o vacíos urbanos como puntos frescos para disminuir las emisiones de carbono y reducir las temperaturas urbanas.
- Promover información veraz con respecto al uso de césped sintético y el daño térmico que provocan al hacer uso de este.

Calor antropogénico

Son dos las posibles causas de ICU relacionadas con el calor antropogénico en la ciudad de Hermosillo. Una de ellas es el uso continuo de aire acondi-

cionado, ya que en un día típico de verano la radiación solar recibida supera los 1 000 W/m² por lo que los habitantes recurren al uso del sistema artificial de climatización con demandas de al menos 12 horas o más al día para disminuir las temperaturas. Por otra parte, el parque vehicular que se contaba en la ciudad al 2010 era de 1.29 autos por persona (INEGI, 2015), el cual ha ido aportando calor antropogénico al ambiente urbano.

A continuación, se presentan estrategias de mitigación en relación con el control de calor antropogénico.

- Reducir el uso de aire acondicionado en el interior de las edificaciones a través de medidas bioclimáticas o estrategias pasivas de enfriamiento.
- Contar con un equipo eficiente de aire acondicionado.
- Tener restricciones de tiempo para uso de equipo de aire acondicionado en edificios públicos y privados.
- Ubicar los compresores y equipos en los techos de los edificios para evitar que el calor de estos se emita a nivel del cañón urbano.
- Convertir vialidades para autos a calles peatonales en zonas de alta densidad para reducir el calor antropogénico.
- Tener acceso restringido de autos en algunas zonas de la ciudad como en el centro histórico para disminuir el calor antropogénico.
- Promover estrategias de movilidad con el uso de transporte en empresas privadas y públicas de manera gratuita para reducir el uso del automóvil.

Infraestructura vial

En Hermosillo la red vial se conforma de tres tipos de calles clasificadas de acuerdo con su función, capacidad, sección y velocidad, éstas son *vialidades primarias* conformada por bulevares y pares viales de altas velocidades que conectan puntos extremos, *vialidades secundarias* compuesta por pares viales o bulevares de corta trayectoria a velocidad media y finalmente las *vialidades colectoras y locales* que son caminos que se ligan a las secundarias y operan al interior de colonias. Este sistema resulta ineficiente, ya que el crecimiento de la ciudad y el aumento del parque vehicular ha provocado

una mayor densidad vehicular, provocando accidentes, tráfico y un aumento de calor antropogénico (IMPLAN, 2014).

Las siguientes estrategias apuntan a reducir los efectos de la ICU principalmente mediante reducción del calentamiento de las superficies urbanas y reducción del calor antropogénico.

Movilidad y superficies viales

El sistema vial de Hermosillo en la capital sonorenses está compuesto en 76.96% de pavimento a base de carpeta asfáltica o concreto hidráulico y 23.04% se encuentran sin pavimentar, es decir, son de tierra natural. Las banquetas en su mayoría no son aptas para los peatones ya que son no mayores a dos metros, se encuentran expuestas al sol, algunas obstaculizadas para el flujo peatonal y no son adecuadas para el tránsito de personas con discapacidad (Giner *et al.*, 2010).

Ambas superficies (vialidades y banquetas) aportan altas temperaturas al ambiente, por lo que son puntos de oportunidad para aplicar estrategias de mitigación de ICU.

- En vialidades de velocidad media o alta, incluir pigmentos al asfalto y concreto que ayuden a aumentar el albedo.
- En vialidades de bajas velocidades y tráfico ligero de pavimentos y asfalto poner una fina capa de material bituminoso y colocar agregado con alto albedo al menos de 0.60 para aumentar la reflectividad de la superficie expuesta.
- Hacer uso de pavimentos permeables, asfalto poroso, concreto permeable, ladrillo o adoquín y así posibilitar las filtraciones de agua para absorber la radiación y mantener fresca la superficie de calles caminos y banquetas.
- Incluir vegetación en banquetas y camellones que ayuden a sombrear las superficies viales.

Infraestructura verde y azul

A lo largo de la investigación, se han establecido los efectos favorables que tiene la infraestructura verde para reducir la temperatura urbana a través de la evotranspiración o por efecto del sombreado, por ello en la ciudad de Hermosillo que hasta el 2022, de acuerdo con la Dirección de Parques y Jardines (2022) se contaban con 5 505 814 m² de áreas verdes, lo cual representa solo el 3.09% de la superficie total urbana (17 800 ha), traducidas en 5.88 m² de área verde por habitante (IMPLAN, 2014), teniendo un déficit de tan importante infraestructura, cuando la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda al menos 9 m² por persona. Estas áreas verdes están distribuidas en plazas, jardines y bulevares, los cuales muchas veces no son espacios aptos para su disfrute o bien no se diseñan y utilizan para obtener todo el potencial de su beneficio. Es así que a continuación se exponen las distintas maneras de aplicar infraestructura verde y azul de manera significativa.

Vegetación

En una ciudad desértica las alternativas de infraestructura verde por árboles xéricos es de las estrategias más atractivas a aplicar, ya que requiere menor irrigación, así mismo incluir un plan estratégico de cuidados de agua es primordial principalmente cuando el recurso hídrico es escaso como en el caso de Hermosillo, Sonora. A continuación se enlistan las medidas de mitigación a la ICU en relación con la vegetación:

- Incrementar la densidad de arborización en el entorno urbano.
- Plantar vegetación en inmuebles públicos como escuelas, edificios del gobierno, hospitales.
- Incrementar la arborización urbana xerófila y proveer de sombras naturales al peatón y a vialidades para moderar el clima urbano, en corredores viales, camellones y espacios públicos.
- Ubicar la flora de acuerdo con sus características como follaje, densidad, uso, riego, raíces, tierra, orientación, cobertura de suelo

por sombra entre otros, para maximizar el beneficio de la mitigación.

- Incluir en los edificios jardines interiores, así como perímetros verdes con vegetación xérica o xerófila.
- Incluir grupos de árboles en los puntos frescos para promover la reducción de temperatura y la adaptación a los fenómenos climáticos de la región.
- Incluir en el diseño arquitectónico espacios exteriores forestados para provocar sombreado en las fachadas y obtener un ahorro en el consumo de aire acondicionado.
- Incluir cobertura vegetal desértica en suelos exteriores no transitados y en muros exteriores, ya que la vegetación no almacena calor y sombrea las superficies.
- Ubicar superficies permeables con vegetación, celosías o concreto perforado que permita el crecimiento pasto y/o árbol en el entorno urbano y en estacionamientos.
- Informar de estrategias de forestación y cuidado del agua a la población en general.
- Asignar el parque de barrio al comité de vecinos para el cuidado y mantenimiento de mismo con beneficios de descuento en el servicio del agua para la comunidad.
- Incrementar la cobertura vegetal por vivienda al 30%, y de hacerlo, gratificarlo con algún descuento de servicio público.

Red verde

Se refiere a una red estratégicamente planificada de áreas no cementadas, que conserven características de naturalidad, aunque no necesariamente tengan césped, árboles o arbustos, por ejemplo, suelos permeables para modificar el microclima, controlar de ruido y mejorar la calidad del aire, que constituyen una alternativa sustentable a la planificación urbana tradicional. Anudado a lo anterior, los espacios verdes urbanos se establecen hoy en día como uno de los aspectos para medir la calidad de vida de la población (Basanta, 2012).

Partiendo de esa premisa, es en el 2016 cuando el Instituto Municipal de Planeación de Hermosillo muestra interés en incluir la sustentabilidad urbana en la planeación de la ciudad por medio de distintos instrumentos, como el Programa Parcial de Crecimiento Urbano del Sector Oeste de Hermosillo 2018 o el *Manual de lineamientos de diseño de infraestructura verde* en el 2016, programas de adopción de espacios vacíos como camellones para promover la forestación y para el 2018 se establecen programas para la inclusión del uso del espacio público. Es por ello que es un área de oportunidad para generar estrategias de mitigación de ICU en función de una red estratégica en la capital de Sonora, con el fin modificar el microclima y buscar la habitabilidad urbana.

- Generar perímetros verdes evitando radiación directa, reflejada y difusa para mejorar la habitabilidad de los caminos.
- Planear fácil acceso a áreas verdes, puntos frescos y edificios a menos de 20 minutos entre ellos.
- Diseñar caminos verdes (o no cementados) cómodos para los peatones con protección solar y arborización urbana.
- Aumentar la cantidad de arborización en los parques y espacios públicos para generar puntos frescos que ayuden a disminuir las emisiones de carbono y al mismo tiempo las sombras de los árboles disminuirán las temperaturas urbanas.
- Incluir árboles en las vialidades y camellones ya que la presencia de vegetación en el cañón urbano modifica los factores radiativos de las capas urbanas y provee de sombras a las superficies pavimentadas.
- Promover que las empresas privadas tomen su banqueta y/o camellón y generen perímetros verdes.
- Incluir espacios para ejercitarse y áreas de juegos infantiles sombreados con pérgolas, lonas y árboles a fin de fomentar la cohesión social, el bienestar emocional, disminuir el estrés y mejorar la salud física.

Barreras naturales

En Hermosillo la mayoría de los caminos y banquetas son abiertos, es decir no proveen sombras ni protección contra ruidos o vientos, por ello se presentan las siguientes estrategias de mitigación de ICU:

- Incluir en la geometría urbana la arborización como barrera del asoleamiento y proveer de sombras en banquetas y vialidades, limpiar el aire contaminado y moderar el clima urbano.
- Aprovechar la topografía del sitio para brindar de blindaje de vientos cálidos buscando la mejor orientación en espacios públicos.
- Bloquear los vientos áridos de verano con vegetación continua o en masas de acuerdo con la orientación de los vientos dominantes.
- Incluir en las banquetas arbustos bajos y medianos como barreras naturales de partículas suspendidas que provocan contaminación, además de proteger contra el calor que libera el automóvil en las vialidades.

Aprovechamiento de agua pluvial

A consecuencia del cambio climático, el ciclo hidrometeorológico ha cambiado manifestándose principalmente en escasez de agua en áreas desérticas como la localidad de Hermosillo, anudado a las características desérticas del territorio que traen con él eventos de sequía.

De acuerdo con Salazar y Pineda (2010), en la década de 1970, la ciudad de Hermosillo se abastecía de la presa Abelardo L. Rodríguez, pero a causa de la explosión demográfica se recurrió a otras fuentes como pozos que para el 2005 dieron muestra de una disminución del recurso. Actualmente, la presa está vacía y los espacios principales de abastecimiento son alrededor de cien pozos que se abastecen de aguas subterráneas, y acueductos que la conducen hasta el centro de población.

De acuerdo con el Programa de Desarrollo Metropolitano de Hermosillo, la fuente principal de agua en el municipio es el acuífero Costa de Hermosillo, seguida del acuífero Mesa del Seri-La Victoria y finalmente

el Acueducto Independencia, que transvasa agua desde la presa *El Novillo* (IMPLAN, 2016).

La baja disponibilidad del recurso ya se ha manifestado provocando una disminución de producción agropecuaria, incremento en costos de producción, pérdida de cobertura vegetal, erosión, entre otras afectaciones más. Una de las estrategias de cuidados del agua que ha establecido el municipio, va en función de la disponibilidad de agua condicionando por horarios su uso y en un esfuerzo por sanear las aguas residuales de la ciudad, surgen cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales que llevan por nombre Los Arroyos, San Pedro, La Saucedá y la última, inaugurada a finales del año 2016, Planta Tratadora de Aguas Residuales (PTAR) de Hermosillo, que inició sus operaciones al poniente de la ciudad sobre el bulevar Camino del Seri, contribuyendo al control de la contaminación del aire, ya que las aguas negras no permanecen a cielo abierto, a la recuperación de los mantos acuíferos con la mejora en cuanto a la calidad del agua que llega a ella y para recuperación de áreas verdes. También, en el 2018 el ayuntamiento publicó su documento *Programa de drenaje pluvial e infraestructura verde del centro de población de Hermosillo* (PDP), el cual persigue analizar y determinar obras hidráulicas para el manejo adecuado de aguas pluviales, ya que el municipio es vulnerable a las precipitaciones de alta intensidad (IMPLAN, 2018).

La escasez de este recurso en Hermosillo condiciona la sustentabilidad de cualquier proyecto (Díaz y Camou, 2005), por ello el aprovechamiento de las aguas pluviales es una estrategia de mitigación principalmente para llevar a cabo el riego de los sistemas arbóreos urbanos que se proponen en el presente libro.

A continuación, se exponen las estrategias de mitigación para el aprovechamiento de agua pluvial.

- Planear una adecuada pendiente en las vialidades para captar el agua pluvial y almacenarla.
- Ubicar jardines de microcuenca o jardines de lluvia en banquetas, parques y espacios públicos.
- Hacer uso de superficies permeables como adoquín, concreto poroso y asfalto poroso, asfalto de corcho para proveer de filtraciones

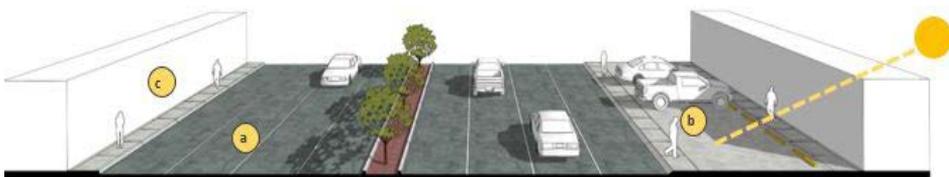
de agua para absorber la radiación y mantener fresca la superficie de calles, caminos y banquetas.

- Diseñar suelos permeables a base de sistemas de malla con celosías o concreto perforado, metal o concreto que permita el crecimiento de pasto y árboles.
- Captar el agua pluvial a través de techos para su utilización en la irrigación de la vegetación.
- Aprovechar la topografía del sitio para conducir, controlar y utilizar el agua pluvial.

Una vez expuestas las medidas anteriores, se muestran entonces las estrategias de mitigación de la ICU a mesoescala, donde se aplican la estrategias de (a) infraestructura urbana, (b) infraestructura vial y (c) infraestructura verde y azul a tres tipos de corredores viales con los que cuenta la ciudad de Hermosillo, Sonora.

La imagen VI.7 muestra la red vial primaria tipo de la ciudad de Hermosillo. Es un boulevard ejemplo en la localidad ubicado en uso de suelo mixto que separa dos áreas comerciales, el ancho de la calle corresponde a cuatro carriles en cada sentido divididos por un camellón, son vías de acceso de alta velocidad difíciles de cruzar por el peatón con un alto volumen de tránsito en hora pico con alta actividad durante todo el día, aun así, existen oportunidades para mejorar estos corredores en beneficio de la comunidad.

IMAGEN VI.7. Red vial primaria tipo de la ciudad de Hermosillo, Sonora



FUENTE: Elaboración propia.

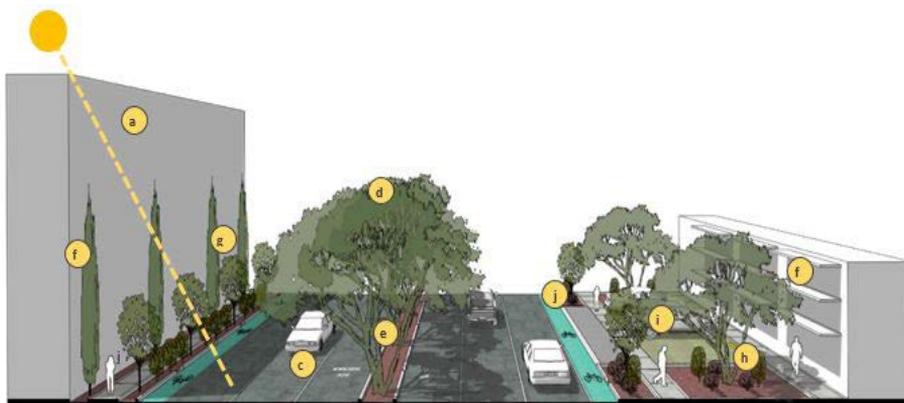
- (a) Vialidad de asfalto de bajo albedo expuestas a la radiación solar.
- (b) Estacionamiento de concreto o asfalto impermeable

- (c) Edificios de baja altura que no proveen sombras ni espacios arbolados exteriores en banquetas para el peatón.

Una de las estrategias claves en el sitio es el cambio de la configuración del cañón urbano con la reducción de carriles de automóviles y ceder el espacio para ciclo vías, banquetas y arborización (imagen VI.8). El cambio de superficies es otra propuesta efectiva para este corredor con resultados inmediatos. A continuación se muestran las estrategias de control a la ICU en la red vial primaria tipo de la ciudad de Hermosillo, Sonora.

- (a) Densificar con diseño vertical y sombrear banquetas y vialidades, calculando el FCV para encontrar la relación ideal entre altura de edificios y ancho de calle que permita salir la radiación de onda larga. En esta propuesta se calculó un sombreadamiento en los meses de junio, julio y agosto a las 14:00, 15:00 y 16:00 h, cuando la altura solar sombrea por la mañana la banqueta perimetral del paramento este y al poniente la banqueta, ciclovía y un carril de vialidad.

IMAGEN VI.8. Estrategias de mitigación de ICU en red vial primaria tipo de la ciudad de Hermosillo, Sonora



FUENTE: Elaboración propia, 2023.

- (b) Reducir un carril en cada sentido, agregar ciclovía y ceder el espacio para áreas verdes, banqueta y arborización. También reemplazar materiales por unos de alto albedo.

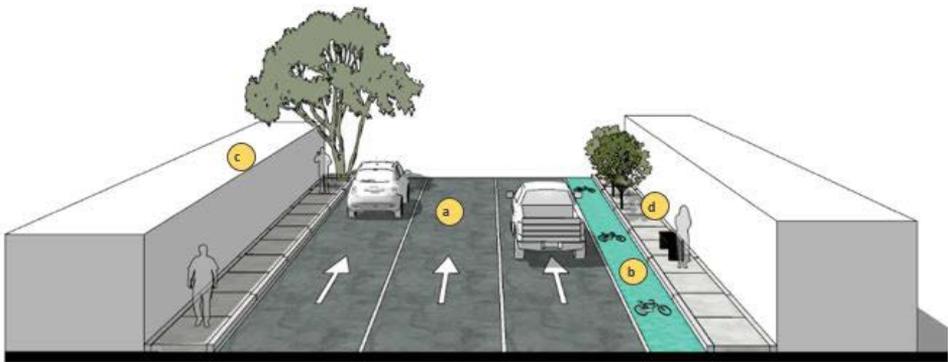
- (c) Designar un carril de vía rápida para automóviles que transporten más de una persona y reducir el volumen de tránsito.
- (d) Aplicar estrategias pasivas urbanas de enfriamiento con vegetación y ventilación natural. Incrementar la vegetación arbórea xerófila en el entorno urbano que proveen sombra todo el año e intercepten rayos solares para moderar el clima urbano.
- (e) Ubicar jardines de lluvia en camellón para aprovechar las aguas pluviales.
- (f) Incluir sistemas de sombreado en el perímetro de los edificios con vegetación o parasoles, toldos, persianas, entre otros para sombrear muros y ventanas.
- (g) Incluir grupos de árboles o perímetros verdes para evitar radiación directa, reflejada y difusa.
- (h) Proveer de vegetación en zonas peatonales evitando radiación directa y mejorar la habitabilidad del camino, así como arbustos bajos y medianos como barreras naturales de partículas suspendidas para proteger contra el calor que libera el auto en la vialidad y estacionamiento.
- (i) Proveer de estacionamiento verde a base de sistema de concreto perforado que permita el crecimiento de pasto.
- (j) Hacer uso de superficies permeables como adoquín, concreto poroso en ciclovía y banquetas para proveer de filtraciones de agua.

Estas mejoras reducen la temperatura urbana al tener las superficies sombreadas por la densificación o por la arborización, cambio de materiales por otros de alto albedo y ganar espacio en la banqueta que provee actividad peatonal a la zona.

Otra propuesta gráfica se desarrolla en la red vial secundaria tipo de la capital del estado de Sonora. En la imagen VI.9 se muestra la situación actual: un camino de recorrido de sur a norte en un solo sentido con tres carriles de ancho y banquetas de concreto de bajo albedo sin vegetación, se ubica una parada de autobús típica en el paramento este de la vialidad.

- (a) Vialidad de asfalto de bajo albedo expuestas a la radiación solar.
- (b) Ciclovía de 1.00 m de ancho comprometiendo la seguridad del ciclista.
- (c) Edificios de baja altura que no provee sombras ni espacios arbolados exteriores en banquetas ni vialidades.
- (d) Parada de autobús comúnmente sin protección solar y, de tenerla, no está diseñada con la trayectoria solar de Hermosillo.

IMAGEN VI.9. Red vial secundaria tipo de la ciudad de Hermosillo, Sonora



FUENTE: Elaboración propia.

Hasta hace un par de años se agregó al ancho de la vialidad el carril de ciclovía, sin embargo, el ancho de esta no cumple con el estándar internacional de 1.82 m (6 pies) o el mínimo 5 pies correspondiente a 1.52 m, ya que actualmente miden entre 0.80 m a 1.20 m en algunas secciones. Además, los carriles de autos se redujeron en su ancho, comprometiendo la seguridad y eficiencia vial.

Hoy en día, muchas de estas calles operan significativamente por debajo de su capacidad y crean franjas de pavimento vacío aumentando las temperaturas urbanas.

La propuesta para este tipo de vialidad secundaria se muestra en las imágenes VI.10 y VI.11, donde las estrategias de mitigación de ICU principalmente van en función a beneficio del peatón, que en la *pirámide de movilidad urbana* es el de mayor prioridad ya que es el medio de desplazamiento universal y actualmente el más vulnerable. Se reduce un carril de

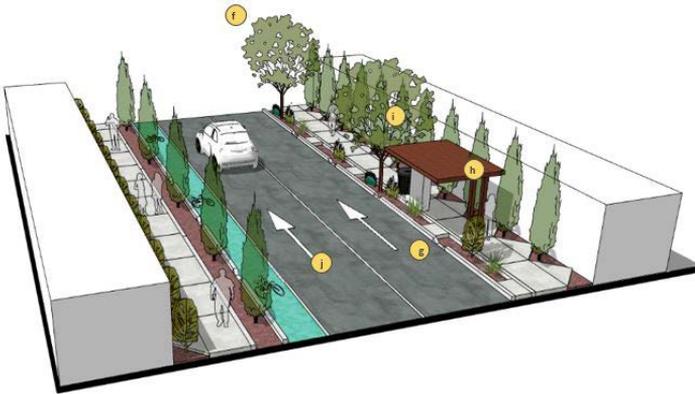
automóvil y con el espacio ganado se amplían las banquetas, se reubica la ciclovia a lado izquierdo de la calle para eliminar posibles conflictos con el tráfico de autobuses y brindar mayor seguridad al ciclista. Se agrega arborización urbana que favorece al peatón, evitando radiación directa, y jardines de lluvia para un aprovechamiento del agua pluvial. El aumento de albedo en superficies horizontales es otra medida efectiva.

IMAGEN VI.10. Estrategias de mitigación de ICU en red vial secundaria tipo de la ciudad de Hermosillo, Sonora



FUENTE: Elaboración propia.

IMAGEN VI.11. Estrategias de mitigación de ICU en red vial secundaria tipo de la ciudad de Hermosillo, Sonora



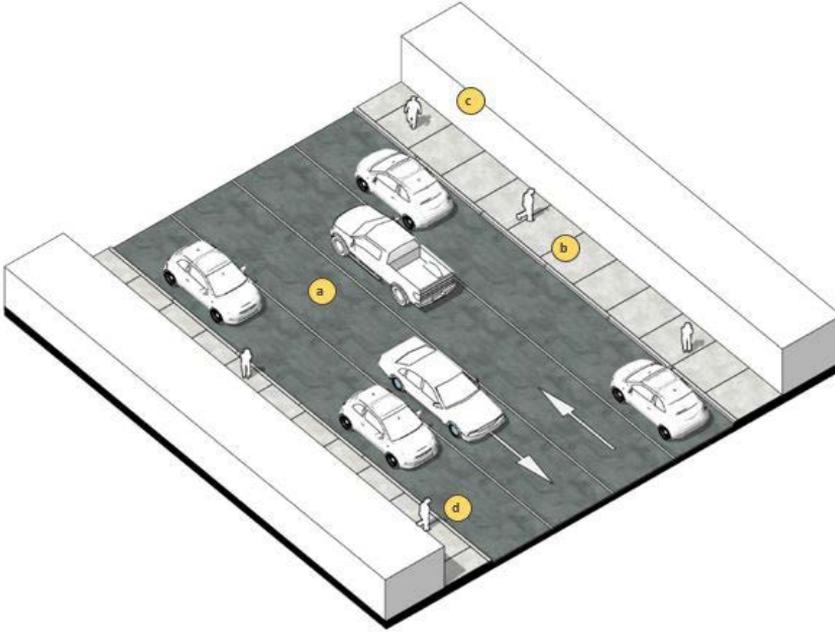
FUENTE: Elaboración propia.

- (a) Combinar calles de automóviles con banquetas peatonales y vialidades para ciclistas. De manera que se propone reducir un carril vial y el espacio ganado para banquetas y arborización.
- (b) Ubicar la ciclovía del lado izquierdo de la vialidad para eliminar posibles conflictos con el tráfico de autobuses.
- (c) Proponer materiales de alta inercia térmica para acumular y almacenar exceso de calor previéndose se caliente al ambiente liberando horas más tarde. En las orientaciones más expuestas a la radiación solar proponer materiales con aislamiento térmico.
- (d) Generar perímetros verdes evitando radiación directa, reflejada y difusa que provea sombra en todo el año e intercepte los rayos solares y además que bloquee los vientos áridos de verano.
- (e) Incrementar la arborización urbana xerófila para proveer de sombras naturales al peatón y a vialidades ya que la presencia de vegetación en el cañón urbano modifica los factores radiativos de las capas urbanas y provee de sombras a las superficies pavimentadas.
- (f) Ubicar la flora de acuerdo con sus características como follaje, densidad, uso, riego, raíces, tierra, orientación, cobertura de suelo por sombra entre otros, para maximizar el beneficio de la mitigación.
- (g) Ubicar jardines de microcuenca o jardines de lluvia en banquetas.
- (h) Diseñar sistemas de sombreamiento en el perímetro de los edificios para mejorar la eficiencia energética al interior.
- (i) Diseñar sistemas de sombreamiento en paradas de autobús de acuerdo con el sitio, trayectoria solar, orientación y vientos dominantes.
- (j) En vialidades de bajas velocidades y tráfico ligero de pavimentos y asfalto poner una fina capa de material bituminoso y colocar agregado con alto albedo al menos de 0.60 para aumentar la reflectividad de la superficie expuesta.

Las calles que operan dentro del área habitacional se denominan vialidades locales. En la imagen VI.12 muestra una vialidad de un carril bidireccional con espacios de estacionamiento en cada uno de sus lados, ban-

quetas de concreto y escasa o nula vegetación, típicamente se encuentra rodeada de viviendas de un nivel o dos niveles.

IMAGEN VI.12. Red vial local tipo de la ciudad de Hermosillo, Sonora



FUENTE: Elaboración propia.

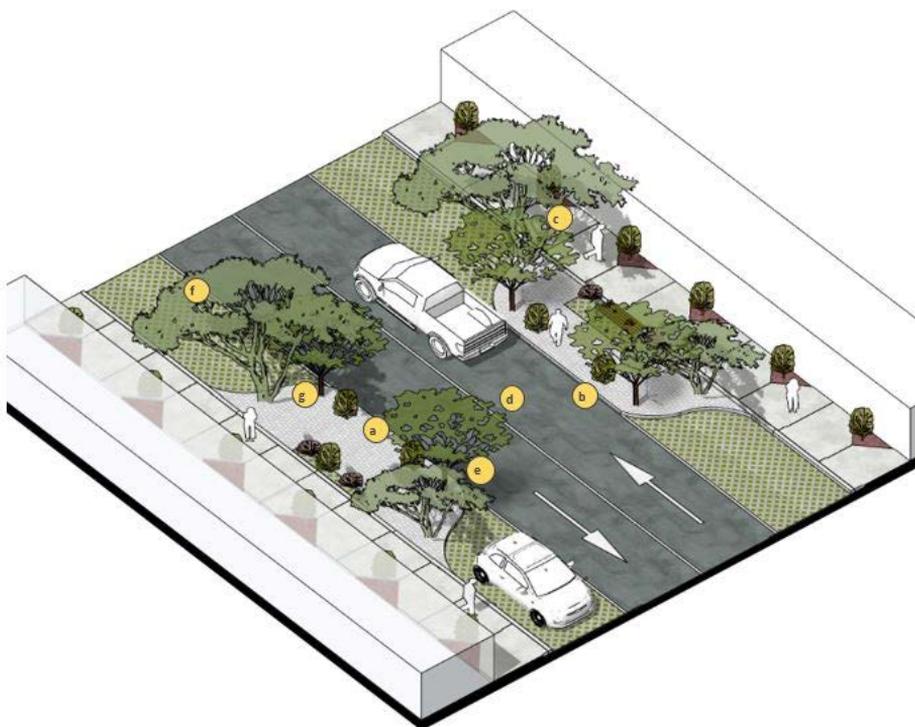
- (a) Vialidad de asfalto de bajo albedo expuestas a la radiación solar.
- (b) Banquetas de concreto de bajo albedo sin protección solar
- (c) Edificios de baja altura que no provee sombras ni espacios arbolados exteriores en banquetas ni vialidades.
- (d) La geometría urbana no permite interacción social.

Para la propuesta de este tipo de red vial, se tomó en cuenta que el uso es estrictamente por los habitantes del lugar y las calles locales en los barrios se subutilizan como espacios de juego y ocio, por ello ofrecer lugares seguros y atractivos para caminar con acceso directo a tiendas y escuelas locales es de los principales objetivos.

Muchas de estas vialidades tienen grandes secciones de estacionamiento fuera de la calle y la utilización es baja, por ello el esquema de aparca-

miento en islas mejorarían la funcionalidad de la vialidad. La propuesta de mitigación de ICU para calles locales combina características de extensión de banquetas, elementos de control de velocidad, administración de agua pluvial e instalaciones para bicicletas que fomenten velocidades seguras, así como hacer uso de estrategias pasivas urbanas de enfriamiento con el uso de la vegetación y ventilación natural a través del estudio de la orientación del sitio y así generar microclimas en el ambiente urbano (imágenes VI.13 y VI.14).

IMAGEN VI.13. Estrategias de mitigación de ICU en red vial local tipo de la ciudad de Hermosillo, Sonora



FUENTE: Elaboración propia.

IMAGEN VI.14. *Estrategias de mitigación de ICU en red vial local tipo de la ciudad de Hermosillo, Sonora*



FUENTE: Elaboración propia.

- (a) Reducir el espacio de estacionamiento y crear islas frescas con numerosa arborización xerófila para promover la reducción de temperatura y la adaptación a los fenómenos climáticos de la región, así como fomentar la cohesión social.
- (b) Incluir vegetación en banquetas y camellones que ayuden a sombreadar las superficies viales.
- (c) Diseñar una red peatonal que provea sombras y conexión a puntos frescos.
- (d) Evitar vialidades anchas ya que eso representa un enorme porcentaje de superficie pavimentada que aporta calor al ambiente.
- (e) Plantar vegetación en banquetas que provea sombra en todo el año e intercepte los rayos solares. Se recomienda el uso de mezquite chileno por su amplia copa lo que se traduce en mayor área sombreada.
- (f) Hacer uso de superficies permeables como adoquín, concreto poroso en ciclovia y banquetas para proveer de filtraciones de agua
- (g) Incluir en el diseño arquitectónico espacios exteriores forestados para provocar sombreadamiento en las fachadas perimetrales y obtener un ahorro en el consumo de aire acondicionado.
- (h) Ubicar superficies permeables con vegetación, celosías o concreto perforado que permita el crecimiento pasto o árbol en el entorno urbano y en estacionamientos.

Estrategias de control a microescala en áreas de intervención

Cada una de las áreas de intervención posee variación climática, ecológica y topográfica, así como características del entorno construido, lo que permite un análisis más específico sobre las estrategias aplicables en las zonas representativas, que facilita la evaluación e interpretación de resultados de aplicación de estrategias.

A continuación se presentan las estrategias de mitigación de ICU a escala local y microescala para el caso específico de las áreas de intervención correspondientes al punto 9 en el cruce de boulevard Solidaridad y avenida de Alborada y el sitio 2 en boulevard Clouthier y calle Xólotl, bajo la perspectiva del diseño urbano. Se categorizan en los siguientes grupos: superficies urbanas, vegetación, densificación, manejo de agua pluvial, protección solar, puntos frescos, red verde peatonal y control de calor antropogénico.

Boulevard Solidaridad y avenida de Alborada (punto 9)

Ubicado en el boulevard Solidaridad y avenida de Alborada, el sitio presenta una ICU superficial de mayor intensidad. Las características físicas del entorno urbano en una superficie de 3.24 hectáreas son: 2.24 % de vegetación, 1 m² de área verde por habitante, uso de suelo mixto y densidad de tránsito de 274 000 vehículos al día con ocho carriles de asfalto que contribuyen a tener 42.7 °C de temperatura del aire en el periodo cálido.

El sitio se encuentra en una de las principales vialidades de la ciudad que la recorren de norte a sur, aquí se localizan centros de negocio, locales comerciales y equipamiento en las colindancias del blvd. Solidaridad. Por ello, grandes superficies de estacionamiento son localizadas en la zona que además es rodeada de áreas habitacionales de alta densidad (imagen VI.15).

IMAGEN VI.15. Estado actual del cruce entre blvd. Solidaridad y avenida de Alborada

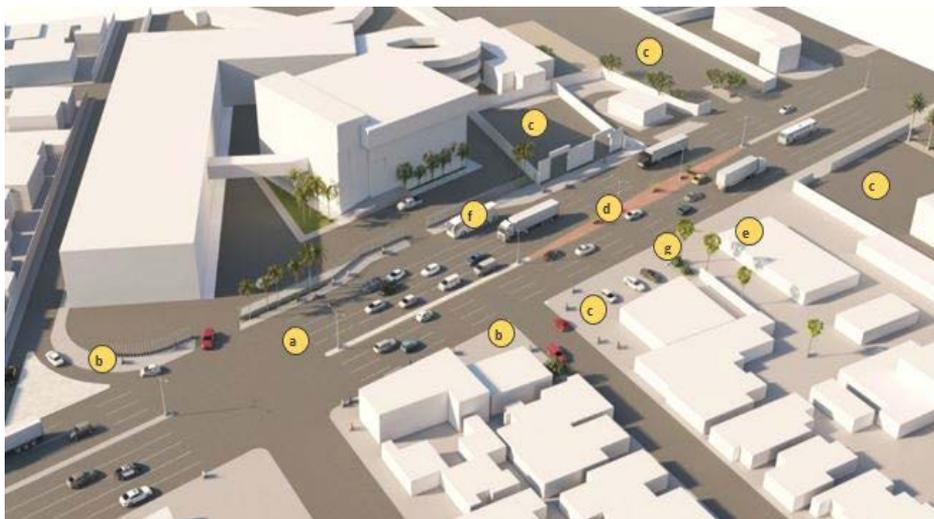


FUENTE: Elaboración propia.

El presente cruce registra una ICU_d y una ICU_n con altas intensidades en el periodo cálido y el frío; por ello es fundamental realizar un estudio y análisis sobre las estrategias de mitigación posibles a aplicar. A continuación, en la imagen VI.16, se exponen las características que causan el aumento de temperaturas y en consecuencia una intensidad mayor de ICU .

- (a) Vialidad de asfalto de bajo albedo expuestas a la radiación solar.
- (b) Banquetas de concreto de bajo albedo sin protección solar.
- (c) Estacionamientos de concreto o asfalto impermeable sin protección solar.
- (d) Camellón de concreto natural y color rojo sin protección solar.
- (e) Edificios de baja altura que no provee sombras ni espacios arbolados exteriores en banquetas, estacionamientos ni vialidades.
- (f) Existen paraderos de autobús sin diseño de protección solar con la trayectoria solar de Hermosillo.
- (g) Escasa vegetación y se ubica pasto sintético, aportando calor al ambiente.

IMAGEN VI.16. Características del entorno en cruce blvd. Solidaridad y avenida de Alborada



FUENTE: Elaboración propia.

En el momento en que la ICU diurna se presenta, la superficie más cálida es el concreto y asfalto, mientras que la más fresca es el adoquín. Cuando la ICU nocturna aparece, la superficie más cálida es la piedra roja y el más fresco el concreto. De aquí la importancia de la selección de superficies y su exposición al sol para el control de las temperaturas urbanas.

Debido a que la zona se encuentra totalmente construida, las propuestas a continuación van en función al reemplazo de superficies existentes.

Estrategias urbanas

- (a) Incluir pigmentos al asfalto o aplicar una capa de concreto de 2.5 cm sobre el asfalto.
- (b) Hacer uso de superficies permeables como adoquín, concreto poroso y asfalto poroso, asfalto de corcho, entre otros.
- (c) Reemplazar materiales oscuros como en el caso del camellón del blvd. Solidaridad de piedra roja por unos de alto albedo con superficies claras.
- (d) Reemplazar las superficies de estacionamientos del sector por permeables.

- (e) Evitar el uso de césped sintético.
- (f) Sombrear las vialidades con vegetación de copa ancha.

IMAGEN VI.17. *Propuestas de mitigación en superficies del cruce blvd. Solidaridad y avenida de Alborada*



FUENTE: Elaboración propia.

A pesar de encontrarse recintos de entre 2 y 4 niveles de altura, son pocos en el área estudiada por lo que la estrategia de densificación con diseño vertical es viable. Por otra parte, en la zona se identifican edificios que no contribuyen sombras ni vegetación en su perímetro y su envolvente no favorece al ahorro energético del mismo, por ello se muestran a continuación en la imagen VI.18 estrategias de mitigación a la ICU en función de la densificación y medidas pasivas de enfriamiento en edificios.

IMAGEN VI.18. *Medidas de mitigación para aplicar en edificaciones del blvd. Solidaridad y avenida de Alborada*



FUENTE: Elaboración propia.

- (a) Densificar por medio del diseño urbano vertical, compacto y denso para sombrear espacios públicos exteriores y vialidades aumentando el FCV.
- (b) Diseñar acabados en techos con albedos de 0.70 como mínimo y óptimo de 0.90.
- (c) Incorporar elementos de protección solar en la envolvente de los edificios.
- (d) Incluir en los edificios perímetros verdes para tener sombreadamiento en las fachadas.
- (e) Incluir en los edificios jardines interiores con vegetación xérica.
- (f) Promover el uso de celdas fotovoltaicas en edificios para optimizar el uso de la energía.
- (g) Tener iluminación artificial eficiente al interior del edificio.
- (h) Captar el agua pluvial a través de techos para irrigación de la vegetación.

Debido al tránsito vehicular denso registrado en este sitio, el calor antropogénico aumenta, incrementando las temperaturas urbanas, además el

consumo energético por el uso de aire acondicionado aporta CO_2 y calor al ambiente. Es así como se muestran estrategias de mitigación en función al *calor antropogénico* y *geometría urbana* en la imagen VI.19 a continuación.

IMAGEN VI.19. *Medidas de mitigación en función al calor antropogénico y geometría urbana del blvd. Solidaridad y avenida de Alborada*



FUENTE: Elaboración propia.

- (a) Combinar calles de automóviles con banquetas peatonales y vialidades a ciclistas. De manera que se propone reducir un carril de cada dirección en el boulevard Solidaridad y ceder el espacio a áreas verdes, ciclovías y arborización.
- (b) Destinar un carril de vía rápida para automóviles que transporten más de una persona.
- (c) Promover el uso de transporte en empresas privadas y públicas de manera gratuita para reducir el uso del automóvil.
- (d) Tener libre acceso al sistema de transporte público en horas o días de Olas de calor.
- (e) Reducir el uso de aire acondicionado en el interior de las edificaciones a través de estrategias bioclimáticas o medidas pasivas de enfriamiento.
- (f) Hacer uso de estrategias pasivas urbanas de enfriamiento como adecuada orientación, uso de vegetación y uso de ventilación natural en calles y edificios.

- (g) Aprovechar la ventilación natural a fin de refrescarlo y generar microclimas en el ambiente urbano.
- (h) Ubicar los compresores y equipos en los techos de los edificios para evitar que el calor de estos se emita a nivel del cañón urbano y facilitar la emisión del calor hacia el cielo y tener un control de óptimo funcionamiento de aire acondicionado para mejorar la eficiencia del equipo.
- (i) Tener restricciones de tiempo para uso de equipo de refrigeración en edificios públicos y privados.

Estrategias de infraestructura verde

El sitio cuenta actualmente con 1 m² de área verde por habitante en un área de 3.24 ha. lo que equivale a una superficie de 674.67 m² lo que demuestra la falta de infraestructura verde en la zona, privando del beneficio que la vegetación regala como el mejoramiento en la calidad de aire, protección solar y enfriamiento evaporativo. Además, estas escasas zonas vegetadas se encuentran en arriates o jardineras lejos del disfrute del peatón, no favorecen al sombreado de calles ni banquetas por lo que se concluye que tanto su ubicación como la selección de especie no es las favorables para brindar beneficios de sombra. A continuación, en las imágenes VI.20 y VI.21, se muestran estrategias de mitigación de ICU a favor de la arborización urbana.

- (a) Incrementar la densidad de arborización en el entorno urbano.
- (b) Diseñar caminos verdes cómodos para los peatones.
- (c) Incluir en la geometría urbana arborización como barrera del asoleamiento en banquetas y vialidades, limpiar el aire contaminado y moderar el clima urbano.
- (d) Ubicar la flora de acuerdo con sus características para maximizar el beneficio de la mitigación.
- (e) Incluir en los estacionamientos grupos de árboles que permitan sombrear las superficies.

IMAGEN VI.20. *Medidas verdes de mitigación en blvd. Solidaridad y avenida de Alborada*

FUENTE: Elaboración propia.

IMAGEN VI.21. *Medidas verdes de mitigación en blvd. Solidaridad y avenida de Alborada*

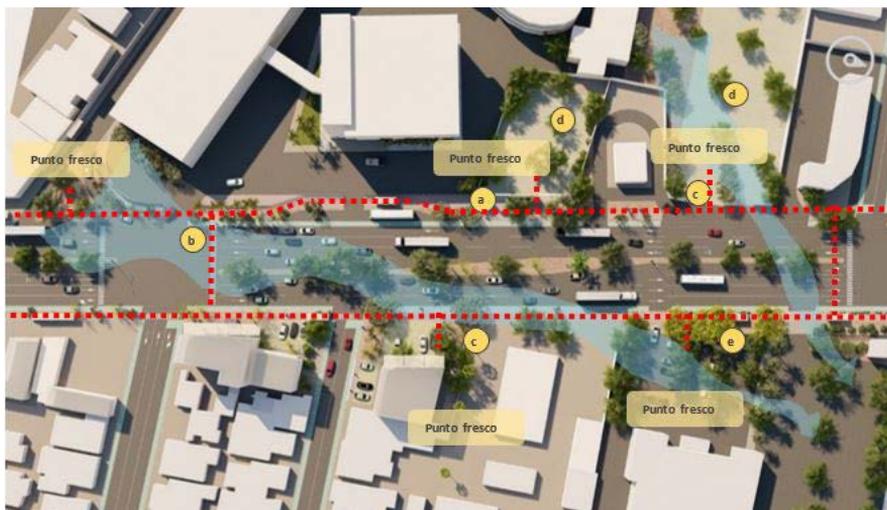
FUENTE: Elaboración propia.

- (f) Generar perímetros verdes en banquetas para evitar radiación directa, reflejada y difusa para mejorar la habitabilidad de los caminos principalmente en la banqueta oriente del blvd. Solidaridad que recibe la fuerte radiación de la tarde.

- (g) Incluir vegetación en camellones del blvd. Solidaridad que ayuden a sombrear las superficies viales de asfalto.
- (h) Incluir en el diseño arquitectónico de los edificios espacios exteriores forestados para obtener sombreado en las fachadas perimetrales y provocar un ahorro en el consumo de aire acondicionado.
- (i) Promover que las empresas privadas cuiden su banqueta y/o camellón y generen perímetros verdes.
- (j) Bloquear los vientos áridos con vegetación continua o en masas para evitar aires calientes de acuerdo con la orientación de los vientos dominantes, por ejemplo, con barreras de árboles o arbustos.

El punto de intervención 9 es uso de suelo mixto, en ella se encuentran comercios, equipamiento y área habitacional de alta densidad, sin embargo, actualmente no existe conectividad urbana y los trayectos de recorrido son a base de concreto sin protección solar tampoco cuenta con puntos frescos haciendo pesados los traslados para el peatón. En las imágenes VI.22 y VI.23 se presenta la propuesta de *conectividad y puntos frescos*.

IMAGEN VI.22. *Propuesta de conectividad y puntos frescos en blvd. Solidaridad y avenida de Alborada*



FUENTE: Elaboración propia.

- (a) Diseñar caminos verdes (o no cementados) cómodos para los peatones con protección solar, arborización urbana y tengan conexión a puntos frescos.
- (b) Hacer uso de estrategias pasivas urbanas de enfriamiento y así generar microclimas en el ambiente urbano.
- (c) Incorporar trayectorias de conectividad urbana (red peatonal) con protección solar naturales (arboles perennes) o artificiales (pergolados, lonarias, ente otros).
- (d) Incorporar vegetación en masas para generar puntos frescos en los estacionamientos de los comercios de alrededor, como Caffenio, el Abajillo Restaurant, Centro de Negocios Las Palmas, el auditorio INAM y la Plaza Comercial Paseo Plaza.
- (e) Abrir al público general los estacionamientos verdes para brindar un punto fresco de descanso en su trayecto.

IMAGEN VI.23. *Propuesta de conectividad y puntos frescos en blvd. Solidaridad y avenida de Alborada*



FUENTE: Elaboración propia.

- (f) Incorporar elementos de protección solar como pergolados o lonarias en espacios públicos para brindar sombras y puntos frescos.
- (g) Plantar vegetación perenne en camellones, banquetas y espacios públicos que provea sombra en todo el año e intercepte los rayos solares.

- (h) Ubicar un perímetro vegetal entre la vialidad y la banqueta para proveer de sombras a estos espacios y agregar arbustos perimetrales de tal manera que el calor generado por el auto no llegue de manera directa a la banqueta.
- (i) Ya que en la zona se sitúan paradas de autobús fabricados de acero que no considera la trayectoria solar por lo que generalmente no se utilizan, se propone un mobiliario urbano sustentable en función de reducir la temperatura de la superficie.

Sobre el blvd. Solidaridad, se localizan camellones que incluyen árboles de la región (palo verde) sin embargo, son escasos y no brindan sombras amplias a las calles pavimentadas de asfalto que aportan altas temperaturas al ambiente. En la zona tampoco se aprovechan las aguas pluviales que recolectan estas vialidades principales, por lo que *estrategias de manejo de agua sustentable* y mejoramiento de camellones se muestran en la imagen VI.24.

IMAGEN VI.24. *Medidas de manejo de agua sustentable y mejoramiento de camellones en blvd. Solidaridad y avenida de Alborada*



FUENTE: Elaboración propia.

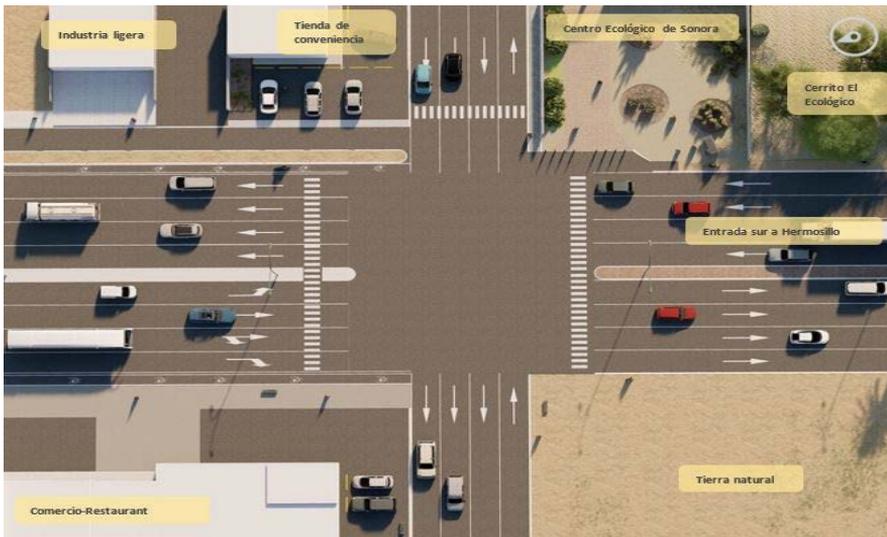
- (a) Implementar un conjunto de microcuencas o jardines de lluvia en el camellón del blvd. Solidaridad para mayor captación pluvial, así como en banquetas, parques y espacios públicos.
- (b) Ubicar jardines de microcuenca o jardines de lluvia.

- (c) Incluir suelos permeables.
- (d) Tener una adecuada pendiente en las vialidades para captar el agua pluvial y almacenarla.

Boulevard Clouthier y calle Xólotl, punto 2

Ubicado en la periferia sur de la ciudad con temperaturas superficiales de menor intensidad que en la ICU se encuentra el cruce del blvd. Clouthier y calle Xólotl, identificado como isla fría. Las características del entorno urbano en un área de 3.24 hectáreas son: 9.07% de vegetación y 33% de zonas con tierra natural, 14 m² de área verde por habitante, densidad vehicular de 66 000 vehículos al día y la vialidad se compone de 8 carriles de concreto y asfalto. El uso de suelo es mixto, por lo que se ubica actividad comercial e industrial ligera. Su principal característica es que es el ingreso sur a la ciudad de la carretera 15 Hermosillo-Guaymas, por lo que existen locales comerciales dirigidos a la comida sobre el blvd. Clouthier, además posee un hito importante que es el Centro Ecológico del Estado de Sonora (imagen VI.25).

IMAGEN VI.25. Estado actual cruce blvd. Clouthier y calle Xólotl

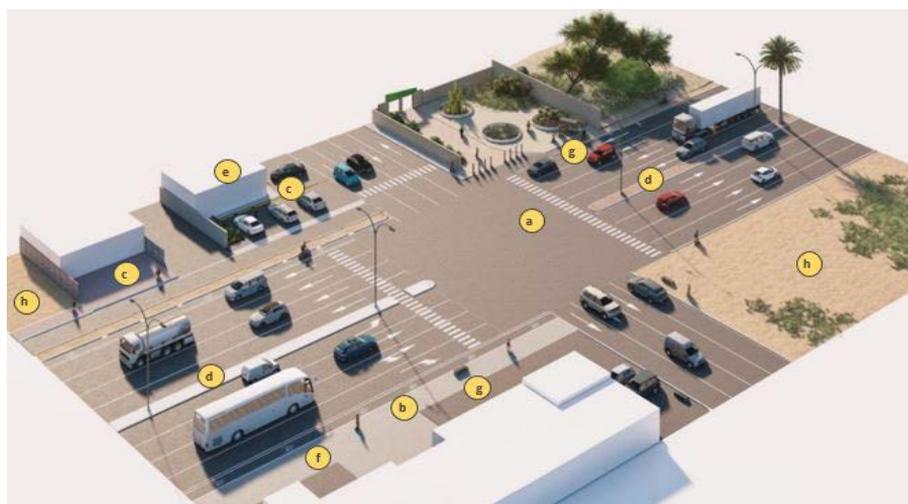


FUENTE: Elaboración propia.

El sitio es uno de los puntos más frescos en la mancha urbana; sin embargo, las temperaturas en verano e invierno se sitúan arriba del rango de confort para espacios exteriores, por lo que es fundamental conocer, analizar y estudiar las características que dan pie a un aumento de temperatura y proponer estrategias de mitigación a manera de prevención.

A continuación, en la imagen VI.26 se presentan las características actuales del cruce del blvd. Clouthier y calle Xólotl.

IMAGEN VI.26. Características del entorno en cruce blvd. Clouthier y calle Xólotl



FUENTE: Elaboración propia.

- (a) Vialidad de asfalto y concreto, ambos de bajo albedo expuestas a la radiación solar.
- (b) Banquetas de concreto de bajo albedo sin protección solar.
- (c) Estacionamientos de concreto o asfalto impermeable sin protección solar.
- (d) Camellón de concreto natural y color rojo sin protección solar.
- (e) Edificios de baja altura que no proveen sombras ni espacios arbolados exteriores en banquetas, estacionamientos ni vialidades.
- (f) La geometría urbana no permite interacción social. El sitio es el ingreso sur a la ciudad de Hermosillo, por ello se ubican locales comerciales en el paramento poniente de afluencia vehicular para

turistas, sin embargo, la geometría urbana no permite un descanso confortable ni una movilidad hacia el entorno inmediato.

- (g) Existen paraderos de autobús sin protección solar acorde a la trayectoria solar de Hermosillo.
- (h) Terrenos baldíos con tierra natural se localizan a los alrededores, aumentando la temperatura superficial

En verano, cuando la ICU diurna se presenta, la superficie más cálida es la tierra natural, además las superficies viales pavimentadas están expuestas al sol todo el día lo que contribuye a un aumento de temperatura. En el momento en el que la ICU nocturna aparece, la superficie más cálida es el concreto y la más fresca es la tierra.

En invierno con la presencia de la ICU diurna la superficie más cálida es el concreto y la más fresca el adoquín y piedra gris, por la noche con la ICU nocturna el concreto es la superficie más cálida.

IMAGEN VI.27. *Propuestas de mitigación en superficies del cruce blvd. Clouthier y calle Xólotl*



FUENTE: Elaboración propia.

Estrategias urbanas

- (a) Incluir pigmentos al asfalto y concreto que ayuden a aumentar el albedo sobre el blvd. Clouthier de 0.35 como máximo.

- (b) Incluir en las nuevas banquetas superficies permeables para proveer de filtraciones de agua y absorber el calor.
- (c) Intercambiar las superficies de asfalto en estacionamiento por superficies permeables que permita el crecimiento pasto o árboles.
- (d) Para las nuevas intervenciones en los inmuebles se propone seleccionar materiales óptimos de acuerdo con las propiedades térmicas como baja absorción, alta emisión y alto albedo.
- (e) En camellones se recomienda que la piedra esté bajo la sombra el mayor tiempo posible.
- (f) Evitar el uso de césped sintético.

En cuanto al calor antropogénico generado por el uso del vehículo, el sitio no registra alta densidad vehicular, sin embargo, hay que tomar en cuenta que es la entrada a la carretera Guaymas-Hermosillo y la vialidad se encuentra de una extensión amplia (ocho carriles), de al menos 28 m de ancho, además, en el paramento este el *blvd. Clouthier* tiene vialidades terciarias de asfalto que actualmente sólo utiliza el tránsito local de dos locales comerciales, por lo que se desaprovecha ese espacio, cuando podría brindarse para áreas verdes, banquetas o ciclovías. En la imagen VI.28 se proponen estrategias de mitigación de ICU en función de la *geometría urbana y control de calor antropogénico*.

IMAGEN VI.28. Propuesta de mitigación en función de la geometría urbana y calor antropogénico en *blvd. Clouthier* y *calle Xólotl*



FUENTE: Elaboración propia.

- (a) Combinar calles de automóviles con banquetas peatonales y vialidades a ciclistas, de manera que se propone tomar el carril terciario del blvd. Clouthier y semi peatonalizarlo para áreas verdes, banquetas y arborización.
- (b) Promover el uso de transporte en empresas privadas y públicas de manera gratuita para reducir el uso del automóvil.
- (c) Diseñar cicloavía en la red vial con protección solar.
- (d) Tener libre acceso al sistema de transporte público en horas o días de Olas de calor.
- (e) Sobre la calle Xólotl tener vialidad bidireccional y ceder el carril sobrante para banquetas y arborización.
- (f) Planear diseño urbano vertical a futuro para cambiar el FCV y favorecer con sombreadamiento a las superficies adyacentes.

Estrategias de infraestructura verde

A pesar de que se cuenta con una significativa superficie de áreas verdes, éstas se localizan como cubre suelos en uno de los cuadrantes de la zona, por lo que las superficies viales y caminos peatonales se encuentran sin área arbórea que ofrezca sombra. A partir de esto, se proponen las siguientes estrategias de mitigación en las imágenes VI.29, VI.30 y VI.31.

IMAGEN VI.29. *Medidas verdes de mitigación en blvd. Clouthier y calle Xólotl*



FUENTE: Elaboración propia.

IMAGEN VI.30. *Medidas verdes de mitigación en blvd. Clouthier y calle Xólotl*

FUENTE: Elaboración propia.

- (a) Incrementar la densidad de arborización en el entorno urbano.
- (b) Incluir arborización urbana de copa ancha con vegetación en línea en el camellón del blvd. Clouthier para interceptar la radiación solar por las sombras de los árboles disminuyendo las temperaturas superficiales del asfalto y concreto de las calles.
- (c) Diseñar perímetros y caminos verdes cómodos para los peatones en las banquetas del blvd. Clouthier ya que se encuentran sin sombras y sin vegetación.
- (d) Promover que las empresas privadas industriales que se encuentran sobre el boulevard Clouthier en el paramento de orientación este, cuiden su banqueta o camellón y generen perímetros verdes.
- (e) Evitar lotes baldíos y agregar grupos de árboles de modo que provea sombras a las superficies de tierra natural.
- (f) Agregar arbustos perimetrales a la vialidad de tal manera que el calor generado por el auto no llegue de manera directa a la banqueta.
- (g) Ubicar vegetación arbórea en el uso de suelo comercial donde se ubican restaurantes y tiendas de conveniencia sobre el blvd. Clouthier de modo que provea sombras a las superficies de bajo albedo o a la tierra natural.

- (h) Incluir en los edificios perímetros verdes para tener sombreadamiento en las fachadas perimetrales y provocar un ahorro en el consumo de aire acondicionado.
- (i) Implementar superficies permeables que permita el crecimiento de pasto en el entorno urbano y en estacionamientos.
- (j) Diseñar perímetros verdes para los peatones y ciclistas que transitan en el blvd. Clouthier.
- (k) Plantar vegetación de copa ancha en la banqueta para dar sombra a la vialidad.
- (l) Utilizar vegetación endémica o bien adaptada a la región.
- (m) En el diseño de paisaje es posible agregar piedra de color procurando que este bajo la sombra el mayor tiempo posible.
- (n) Moderar el clima urbano con ayuda de áreas verdes que provean sombras en espacios públicos como el acceso al Centro Ecológico y accesos a los comercios de la zona.
- (o) Ubicar superficies permeables con vegetación, celosías o concreto perforado que permita el crecimiento de pasto o árboles en el entorno urbano.
- (p) Brindar sombras naturales y artificiales a las paradas de autobús que se localizan en la vialidad y diseñarlas de acuerdo con su ubicación, orientación y trayectoria solar.

IMAGEN VI.31. *Medidas verdes de mitigación en blvd. Clouthier y calle Xólotl*



FUENTE: Elaboración propia.

La zona es dispersa y a su alrededor no existe blindaje de vientos áridos, además la topografía del cerro del Centro Ecológico de Sonora no es aprovechada como fuente de captación de agua pluvial. Es así como se proponen en la siguiente imagen las estrategias de mitigación en función de la *densificación, aprovechamiento sustentable del agua pluvial y protección de vientos áridos*.

IMAGEN VI.32. Medidas de mitigación en función de la densificación, aprovechamiento de agua y blindaje de vientos áridos en blvd. Clouthier y calle Xólotl



FUENTE: Elaboración propia.

- (a) Planear el uso de suelo para que se tenga fácil acceso entre áreas verdes y edificios a menos de 10 minutos.
- (b) Diseñar caminos verdes (o no cementados) cómodos para los peatones con protección solar y perímetros verdes con arborización urbana.
- (c) Bloquear los vientos áridos de verano provenientes del suroeste y oeste con árboles xéricos de copa densa y arbustos ubicados en masa o de manera continua.
- (d) Existe una zona de vacío urbano que actualmente se encuentra cubierto de tierra, su Uso de Suelo es Mixto, lo que equivale que en un futuro se construirán edificios comerciales o de equipamiento,

por lo que se propone un diseño vertical que sirva para sombrear espacios públicos y vialidades.

- (e) Evitar zonas baldías de superficies de tierra natural ya que tienen una alta capacidad de absorción de calor, por lo que se propone que estos sean utilizados como puntos frescos aumentando la arborización para disminuir las emisiones de carbono y reducir las temperaturas urbanas.
- (f) Proponer jardines de lluvia y zanjas de retención con trincheras en terrenos con pendiente o cercanos al cerro del Centro Ecológico.
- (g) Corregir la pendiente de las vialidades para que estas favorezcan al riego de jardines propuestos a través del agua pluvial.

En el punto de intervención 2 no se cuenta con áreas de estar ni puntos frescos en las trayectorias peatonales, lo que ocasiona un discomfort térmico a peatones que recorren la zona o bien para aquellos que andan en bicicleta o transporte público. Además, las paradas de autobús que se encuentran en el sitio están fabricados de acero, lo que contribuye a un aumento de temperatura y a un abandono del espacio para su función ya que los habitantes de la zona prefieren esperar el camión bajo un árbol que le provee de sombra y menor temperatura. En la imagen VI.33 se exponen las propuestas referentes a los *puntos frescos*.

Imagen VI.33. Propuesta de puntos frescos en blvd. Clouthier y calle Xólotl



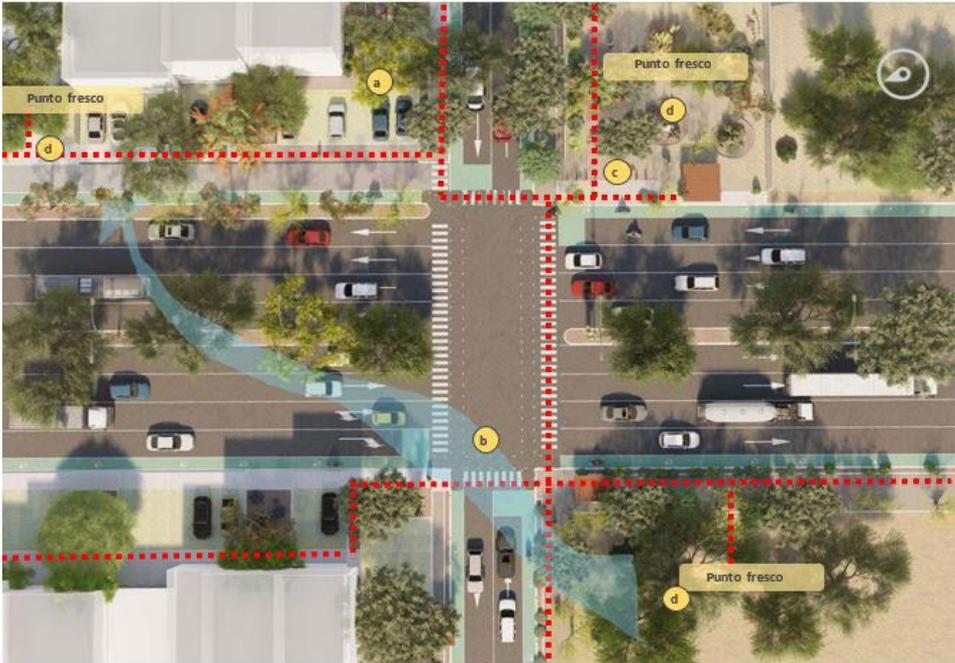
FUENTE: Elaboración propia.

- (a) Brindar sombras naturales (arborización) o artificiales (pérgola, lonarías, entre otros) a las paradas de autobús que se localizan en la vialidad.
- (b) Proponer mobiliario urbano sustentable en función de reducir la temperatura de la superficie y sean utilizados para lo que fueron diseñados.
- (c) Incluir grupos de árboles para generar puntos frescos y promover la reducción de temperatura y la adaptación a los fenómenos climáticos de la región.
- (d) Planear fácil acceso a áreas verdes en línea o grupos para generar puntos frescos a menos de 10 minutos.
- (e) Tener en los espacios públicos como el acceso al Centro Ecológico de Sonora, áreas específicas para hidratarse con bebederos y zonas de descanso sombreadas.

A pesar de contar con un hito valioso como lo es el Centro Ecológico de Sonora, este y el resto de los espacios públicos de alrededor no se encuentran conectados entre ellos por lo que, al recorrer la trayectoria para llegar de un punto a otro, el peatón experimenta una sensación de disconfort térmico tanto en invierno como en verano. De aquí surgen estrategias de mitigación con relación a las *trayectorias y conectividad urbana* (imagen VI.34).

- (a) Hacer uso de estrategias pasivas urbanas de enfriamiento como adecuada orientación, uso de vegetación y uso de ventilación natural en calles y edificios.
- (b) Aprovechar la ventilación natural a fin de refrescarlo y generar microclimas en el ambiente urbano.
- (c) Incorporar trayectorias de conectividad urbana (red peatonal) con protección solar naturales (árboles perennes) o artificiales (pergolados, lonarías, entre otros).
- (d) Planear fácil acceso a áreas verdes en línea o grupos para generar puntos frescos a menos de 10 minutos.

IMAGEN VI.34. Propuesta de conectividad en blvd. Clouthier y calle Xólotl



FUENTE: Elaboración propia.

Comentarios finales

Durante el proceso de investigación se comentó de qué manera, mediante diferentes factores que originan la isla de calor urbana (ICU), como el creciente desarrollo económico, la urbanización poco planeada y su impacto en las ciudades, se han causado cambios en el ambiente y en el microclima urbano, los que se asocian con respuestas culturales de los asentamientos humanos. El aumento de la temperatura urbana conlleva retos de la población para adaptarse a condiciones extremas del clima, principalmente en ciudades desérticas, por ser un ecosistema con mayor vulnerabilidad ambiental.

Por otro lado, la vida urbana refleja una sociedad que requiere de espacios culturales, sociales y para vivienda, por lo que para el desarrollo de estas actividades, se da lugar a un incremento de vivienda, que implica el reemplazo de superficies naturales por dotación de infraestructura, impactando las temperaturas urbanas, la salud, el consumo energético, la estética del paisaje y la memoria colectiva, que tienen relación directa con la habitabilidad y el confort térmico de una población. Es así que los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), promovidos por la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), son oportunos y relevantes, ya que en uno de sus apartados hace referencia a urbes más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles, en atención al acelerado crecimiento urbano donde más de la mitad de la población mundial vive en las ciudades.

A lo largo del tiempo, las ciudades se han convertido en grandes generadoras de contaminación ambiental, aunque originalmente deberían ser

consideradas como elementos de protección, ya que son la forma territorial más eficaz de la modernidad donde se desenvuelve la vida urbana. Para minimizar los efectos negativos se requiere la planeación de una estructura urbana sustentable, donde el factor ambiental sea una condición de diseño para la interacción social y cultural, que sean resilientes al clima extremo y a fenómenos como el de la ICU. Debido a esto, se hace relevante diagnosticar este fenómeno, analizarlo y proponer estrategias de mitigación. En este caso se estudiaron las ciudades del desierto, y se tomó como ejemplo particular la ciudad de Hermosillo, Sonora, localizada en el noroeste de México, y que forma parte de las ciudades asentadas en la gran superficie transfronteriza que abarca el desierto de Sonora.

Mediante metodologías aplicadas en diversas ciudades con características de zona árida (como Phoenix en Arizona, Kuwait en Asia occidental, Abu Dhabi en Emiratos Árabes Unidos, Eilat en Israel, Sri Lanka Pettah en India, Argelia en África del Norte, Lima en Perú, Guayaquil en Ecuador y Santiago, Valparaíso y Antofagasta en Chile), fue posible identificar y presentar las características de la ICU que impactan la habitabilidad urbana en el desierto continental de Sonora y se propusieron estrategias de mitigación a meso escala, escala local y micro escala.

Durante la elaboración de este libro, y después de reflexión, investigación y búsqueda de responder al objetivo general de la presente investigación, ha permanecido siempre la idea de plantear una aportación a la temática de vulnerabilidad de la condición de los asentamientos humanos bajo la perspectiva del diseño urbano en el desierto.

En el transcurso de las visitas en campo se observó, más allá de las condiciones ambientales y las características de diseño urbano, a la comunidad hermosillense con apego al automóvil, difícilmente dispuesta al cambio de hábitos de movilidad para recorrer cortas distancias, y pareciese que es indiscutible renunciar al uso del automóvil, por lo que a manera de introspección, consideramos que trabajar investigaciones con grupos interdisciplinarios que cambien el paradigma actual de la movilidad urbana a fin del disfrute de las calles, caminos, cielo, aire, árboles y la vida social, se lograrían transformaciones de impacto social y ambiental, enriqueciendo las culturas y las comunidades en climas desérticos como en la capital sonoreense.

Hace falta, sin duda, investigar más elementos sobre este tema: se puede profundizar en el estudio de los materiales de las regiones donde se buscan aplicar estrategias de mitigación, ya que las características térmicas, forma, rugosidad, variables ópticas, hidrológicas, durabilidad, costo, cobertura y geometría en la estructura urbana son variables fundamentales con influencia sobre la temperatura urbana. Otro nicho de investigación es sobre la vegetación xerófila, donde se exploren las especies, crecimiento, altura, densidad de follaje, color, olor, raíz, riego y diseño paisajístico recomendados para cada situación, que satisfagan las necesidades funcionales como sombreadamiento, que sean de bajo mantenimiento y requieran poca agua.

Clasificar las *zonas climáticas locales* (LCZ, por sus siglas en inglés) de una localidad, como la ciudad de Hermosillo, es una ventana de oportunidad en el campo de investigación urbana ambiental, para categorizar a escala local las áreas de intervención y sea posible la aplicación de estrategias de mitigación a la ICU para cada zona.

Finalmente, como se ejemplificó con el caso específico de las ICU en la ciudad de Hermosillo, la implementación de las medidas de mitigación tendría el efecto de reducir la temperatura urbana, ya que entre mayor volumen de arborización se tenga, más áreas estarán sombreadas, reduciendo las temperaturas superficiales y en consecuencia las temperaturas del aire en el cañón urbano, que junto con la sustitución de materiales impermeables por permeables y de bajo albedo por unos de alto albedo, así como la implementación de puntos frescos, reducción de carriles viales y aprovechamiento de agua, posibilitaría lograr mejores niveles de confort urbano.

Por esto, consideramos que la aplicación de estas medidas de mitigación a las ICU en los asentamientos humanos, nos plantea un desafío importante para los planificadores y desarrolladores urbanos en el siglo XXI, ya que se estima que dos tercios de la población mundial vivirán en ciudades para 2050 (WRI, 1988).

Por ello, esta investigación puede ofrecer una gran oportunidad para ampliar la visión de nuevos instrumentos para la gestión y diseños urbanos sustentables, inclusivos y resilientes, mediante estrategias de mitigación de eventos de cambio climático, como la ICU, a fin de ofrecer beneficios en la calidad de vida de la población asentada en zonas áridas en la búsqueda de la calidad ambiental de la habitabilidad urbana.

Referencias bibliográficas

- Akbari, H. (2002). Shade trees reduce building energy use and CO₂ emissions from power plants. *Environmental pollution*, 119-126.
- (2005). Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation. *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 1-19.
- Alchapar, N., Correa, E., y Cantón, A. (2010). Isla de Calor Urbana en zonas áridas. Comportamiento térmico de pavimentos peatonales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14, 97-104.
- Alcoforado, M. J. (2010). Planning with urban Climate in different climatic zones. *GEOGRAPHICALIA*, 5-39.
- Allen, L., Lindberg, F., y Grimmond, C. S. (2011). Global to city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability. *International Journal of Climatology*, 31(13), 1990-2005.
- Álvarez, R. B. (2009). *Hermosillo, una visión de futuro*. Hermosillo, Sonora: Universidad de Sonora.
- Azuela, D. I. (1978). La evolución del Derecho Urbanístico Mexicano en los últimos diez años. *Revista Jurídica. Anuario del Departamento de Derecho de la Universidad Iberoamericana*, 584-607.
- Bailey, R. G., y Bailey, R. G. (2014). Ecoregions and climate change. *Ecoregions: The Ecosystem Geography of the Oceans and Continents*, 95-103.
- Baker, L. A. et al. (2002). Urbanization and warming of Phoenix (Arizona, USA): Impacts, feedbacks and mitigation. *Urban ecosystems*, 6(3), 183-203.
- Banco Interamericano de Desarrollo (2015). *Estrategias de mitigación y métodos para la estimación de las Emisiones de Gases Efecto Invernadero en el sector transporte*. New York: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Banco Mundial. (2018). *Tres grandes ideas para lograr ciudades y comunidades sostenibles*. Washington D. C.
- Basanta, C. E. (2012). Oportunidad de complementar la red verde interior de Vito-

- ria-Gasteiz, a través de las cubiertas de los equipamientos públicos. *Territorios en formación*, 7-26.
- Bazant, J. (1991). *Manual de criterios de diseño urbano*. México, D.F.: Trillas.
- BID, B. I. (2015). *Estrategias de mitigación y métodos para la estimación de las Emisiones de Gases Efecto Invernadero en el sector transporte*. Nueva York: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Bojórquez, M. G. (2010). Confort térmico en exteriores: actividades en espacios recreativos en clima cálido seco extremo. *Tesis*. Colima, México: Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura.
- Bonnemaison, Joël (1981), "Voyage autour du territoire", *L'Espace Géographique*, núm. 4, pp. 249-262.
- Borja, J., y Muxi, Z. (2003). *El espacio público, ciudad y ciudadanía*. Barcelona: Electa.
- Bourbia, F. y Boucheriba, F. (2010). Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). *Renewable Energy*, 35(2), 343-347.
- Brañes, B. R. (2000). *Manual de Derecho Ambiental* (2da Edición ed.). (F. d. Económica, Ed.) México: Fundación Mexicana para la Educación Ambiental.
- Bueno, B., Norford, L., Hidalgo, J., y Pigeon, G. (2012). The urban weather generator. *Journal of Building Performance Simulation*, 269-281.
- Bueno, R., Roth, M., Norford, L., y Li, R. (2014). Computationally efficient prediction of canopy level urban air temperature at the neighbourhood scale. *Urban Climate*, 9, 35-53.
- Cabrerizo, S. C., y Rodríguez, C. I. (2010). Ciudad y territorio en clave de paisaje urbano. *Cuadernos de vivienda y urbanismo*, 182-195.
- Cafferatta, N. A. (2004). *Introducción al derecho ambiental*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología (INE), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- Camargo, F. M. (2016). El derecho a la ciudad: de Herni Lefebvre a los análisis sobre la ciudad capitalista contemporánea. *Universidad Pedagógica Nacional Facultad de Humanidades*, 3-19.
- Capelli, D. S., Piccolo, M. C., y Campo, D. F. (2005). Clima Urbano de Bahía Blanca. *Revista Universitaria de Geografía*, 183-186.
- Carrasco, C., Palme, M., y Gálvez, M. Á. (2016). Factor de cielo visible y el efecto isla de calor en Valparaíso. *Urbano*, 26-33.
- Carrasco, G. B., y Estrada, S. Y. (2018). Megaproyectos como productores de suelo urbanizable. Análisis de tres casos de estudio en Hermosillo, Sonora (2004-2015). *Contexto*, 53-66.
- Cengel, Y. A., y Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa*. México, D.F.: Mc Graw Hill.
- Chatzipoulka, C., Nikolopoulou, M., y Watkins, R. (2015). The impact of urban geometry on the radiant environment in outdoor spaces. *ICUC9 -9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*.
- Chi-Ru, C., Ming-Huang, L., y Shyh-Dean, C. (2007). A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, 386-395.

- Chombart de Lauwe, M. J., Bonnin, P., Mayeur, M., Rieunier, C., Perrot, M., y De la Sou-diere, M. (1978). Espace d'enfants: la relation enfants-environnement, ses conflits. *Vie (La) Urbaine. Revue de l'UER de l'Institut d'Urbanisme de Paris Paris*, 17-27.
- Chow, W. T., y Brazel, A. J. (2012). Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. *Building and Environment*, 47, 170-181.
- , Brennan, D., y Brazel, A. J. (2012). Urban Heat Island research in Phoenix, Arizona: Theoretical contributions and policy applications. *American Meteorological Society*, 93(4), 517-530.
- CONAVIO (1998). *La diversidad biológica de México; estudio del país 1998*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- (2020). *Biodiversidad mexicana*. Obtenido de <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/cobertura-suelo>
- Correa, E. N., Alchapar, N., y Cantón, M. A. (2010). Estrategias de mitigación de la Isla de Calor en ciudades de zonas áridas. El caso de los materiales. *Trabajo presentado en ENTAC*.
- Costes, L. (2011). Del "derecho a la ciudad" de Henri Lefebvre a la universalidad de la urbanización moderna. *Urban*, 2, 89-100.
- Cruz, C. M., Gómez, Á. A., Quintero, N. M., y Varela, S. J. (2013). Evaluación de la calidad del aire respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) en la Ciudad de Hermosillo, Sonora, México, durante un periodo anual. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 29(4), 269-283.
- CSG (2012). *Guía Práctica Clínica. Prevención y diagnóstico del golpe de calor en pacientes de 19 a 59 años en el primer nivel de atención. Evidencias y Recomendaciones Catálogo Maestro de Guías de Práctica Clínica: SEMAR-571-12*. CENETEC.
- Díaz, C. R., y Camou, H. E. (2005). El agua en Sonora: tan cerca y tan lejos. Estudio de caso del ejido Molino de Camou. *Región y sociedad*, 127-165.
- EcuRed (2018). Obtenido de [https://www.ecured.cu/Phoenix_\(Arizona\)](https://www.ecured.cu/Phoenix_(Arizona))
- Ellis, J., Terraza, H., Faure, M. S., Derigibus, B., Lew, S., y Andrés, S. V. (2016). *Voces Emergentes: Percepciones sobre la calidad de vida urbana en América Latina y el Caribe*. Washington D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Emmanuel, R., y Fernando, H. J. (2007). Urban heat islands in humid and arid climates: Role of urban form and thermal properties in Colombo, Sri Lanka and Phoenix, USA. *Climate Research*, 34(3), 241-251.
- Enrique, S., Bochaca, F., y Allende, D. (2013). Mitigación de ICU en ciudades de zonas áridas. *Proyecciones*, 29-45.
- EPA (2009). Urban Heat Island Basics, Reducing Island Heat Islands Compendium of Strategies. *Environmental Protection Agency, U.S.* Recuperado el Septiembre de 2014, de <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>
- Estrada, S. Y. y Carrasco, G. B. (2017). Impactos ambientales y sociales de los megaproyectos urbanos en Hermosillo, Sonora. En B. V. Gallegos, *Megaproyectos Urbanos y productivos* (págs. 83-92). Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México.

- FAO (2017). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Obtenido de <http://www.fao.org/forestry/urbanforestry/87025/en/>
- Fei, C. (2014). *Urban Morphology and Citizens' Life*. Springer, Dordrecht.
- Fernández, Á. R. (2013). Metodología para la caracterización y diferenciación de las unidades de paisaje de un espacio de montaña: las sierras de béjas y candelario. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 101-127.
- FIDE (2020). *FIDE, Fideicomiso para el ahorro de energía eléctrica*. Obtenido de <http://www.fide.org.mx/>
- Foro Social Mundial (2005). Carta Mundial por el Derecho a la Ciudad. *Cuadernos Geográfico*, 52, 368-380.
- García, P. J., y Gutiérrez, P. J. (2007). La ciudad dispersa: cambios recientes en los espacios residenciales de la Comunidad de Madrid. *Anales de Geografía*, 27(1), 45-67.
- Geoinnova, T. (2018). *Geo innova*. Obtenido de <https://geoinnova.org/blog-territorio/libro-verde-de-medio-ambiente-urbano/>
- Giguère, M. (2009). *Urban Heat Island Mitigation Strategies*. Québec: Institut National de Santé Publique du Québec (INSPQ).
- Giménez, G., y Héau, L. C. (2007). El desierto como territorio, paisaje y referente de identidad. *Culturales*, 7-42.
- Giner, M. E., Sánchez, S. J., Cervera, G. L., Vázquez, V., Balarezo, V., Herrerías, V., y Rojas, V. (2010). *Diagnóstico de Necesidades de Pavimentación por Imágenes Satelitales para Hermosillo, Sonora*. Hermosillo, Sonora: Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF), Secretaría de Infraestructura y Desarrollo Urbano (SIDUR), Gob. Edo. de Sonora.
- Gobierno del Estado de Sonora (2016). *Decreto No. 107 del Presupuesto de Egresos del Gobierno del Estado de Sonora*. Boletín Oficial del Estado, Hermosillo, Sonora.
- Golden, J. S. (2010). The built environment induced urban heat island effect in rapidly urbanizing arid regions - a sustainable urban engineering complexity. *Environmental Sciences*, 1-4, 321-349.
- González, A. S., y Larralde, C. A. (2019). La forma urbana actual de las zonas metropolitanas en México: indicadores y dimensiones morfológicas. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 11-42.
- Goodland, R. J., y Anhang, J. (2009). Livestock and climate change: what if the key actors in climate change are... cows, pigs, and chickens? *World Watch*, 10-19.
- Guhathakurta, S., y Gober, P. (2007). The impact of The Phoenix Urban Heat Island on Residential Water Use. *American Planning Association*, 73(3), 317-329.
- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., y Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of the Total Environment*, 584, 1040-1055.
- Gutiérrez, S. L. (2014). Tesis Doctoral titulada : Acteurs et aménagement du territoire dans l'état du Sonora. L'émergence d'une région au Nord-Ouest du Mexique. Université Paris III- Sorbonne Nouvelle,, Paris Francia.
- Habitat, O. (2005). *Carta mundial por el derecho a la ciudad*. Barcelona.

- Hansen, R., Lorance, R. E., Chapman, E., y Rolf, W. (2017). *Urban Green Infrastructure Planning: A Guide for Practitioners*. Munich, Alemania: Freising.
- Healthy Air Living (2011). *Urban heat island mitigation: An innovative way to reduce air pollution and energy usage*. San Joaquin Valley: San Joaquin Valley, Air pollution control district.
- Henderson, V. (2003). The Urbanization Process and Economic Growth: The So-What Question. *Journal of Economic Growth*(8), 47-71.
- Hernández, A. (2000). Barrios y equipamientos públicos, esencia del proyecto democrático de la ciudad. *Documentación social*, 79-93.
- Hien, W. N., Yok, T. P., y Yu, C. (2007). Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate. *Building and Environment*, 42(1), 25-54.
- Humphreys, M., y Nicol, F. (1998). *Understanding the adaptative approach to thermal comfort*. Atlanta: ASHRAE transactions, Technical Bulletin, 104 (1).
- Iain Stewart, T. O. (2009). Newly developed thermal climate zones for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer. *Symposium on urban environment*.
- Iamarino, M., Beevers, S., y Grimmond, C. (2011). High-resolution (space, time) anthropogenic heat emissions: London 1970-2025. *International Journal of Climatology*, 1754-1767.
- Ibrahim, S., Ibrahim, N., Wahid, J., Goh, N., Koesmeri, D., y Nawati, M. (2018). The impact of road pavement on Urban Heat Island (UHI) phenomenon. *International Journal of Technology*, 1597-1608.
- IMPLAN (2014). *Plan Municipal de Desarrollo Urbano 2013-2015*. Hermosillo, Sonora.
- (2016a). *Manual de lineamientos de diseño de infraestructura verde para municipios mexicanos*. Hermosillo, Sonora.
- IMPLAN (2016b). *Programa de desarrollo metropolitano de Hermosillo*. Hermosillo, Sonora: Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo.
- (2018). Programa de drenaje pluvial e infraestructura verde del centro de población de Hermosillo. Hermosillo, Sonora: Instituto Municipal de Planeación de Hermosillo.
- (2021). Plan municipal de Desarrollo Hermosillo 2022-2024. Instituto Municipal de Planeación de Hermosillo. Hermosillo, Sonora: H. Ayuntamiento de Hermosillo.
- INEGI (2015). *Instituto nacional de estadística y geografía*. <http://www.inegi.org.mx/>
- (2020). *Instituto nacional de estadística y geografía*. <http://www.inegi.org.mx/>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. Ciudad de México: Gobierno de México.
- Jacob, J. (2010). Urbanización resiliente - Primera respuesta al cambio climático en las costas del golfo de México. *Impactos del cambio climático sobre la zona costera*, 67-90.
- Kolokotroni, M., Giannitsaris, I., y Watkin, R. (2006). The effect of the London urban

- heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies. *Solar Energy*, 80(4), 383-392. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.03.010>.
- Konijnendijk, C., Annerstedt, M., Busse, N. A., y Maruthaveeran, S. (2013). *Benefits of Urban Parks*. The International Federation of Parks and Recreation Administratio.
- Lacomba, R., Ferreira, H., Fuentes, V., García, J., Gutiérrez, S., Hernández, M., y Olivares, N. (1991). *Manual de arquitectura solar*. México D.F.: Trillas.
- Lagarda, I. L., Landeros, M. V., y Nieblas, J. L. (2009). *Hermosillo a través de los mapas*. Hermosillo, Sonora: H. Ayuntamiento de Hermosillo.
- Lau, K. K.-L., Lindberg, F., Rayner, D., y Thorsson, S. (2014). The effect of urban geometry on mean radiant temperature under future climate change: a study of three European cities. *International journal of biometeorology*, 59. 10.1007/s00484-0.
- Lazzarini, M., Marpu, P. R., y Ghedira, H. (2016). Temperature-land cover interactions: The inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas. *Remote Sensing of Environment*, 130, 136-152.
- Lezama, J. L., y Domínguez, J. (2006). Medio Ambiente y sustentabilidad urbana. *Papeles de Población*, 153-176.
- LGEPPA (1988). *Artículo 28 de la LGEPPA publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988, que estuvo en vigor hasta diciembre de 1996, cuando se publicaron reformas y adiciones a la Ley*. México: Secretaría de Gobernación.
- Liggett, R., y Milne, M. (2008). Climate Consultant 5.5. UCLA.
- Ludwig, J. H., Morgan, G. B., & McMullen, T. B. (1970). Trends in urban air quality. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 51(5), 468-475
- Maderero, F. (2017). *Forestal Maderero*. Obtenido de <https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/que-es-el-informe-brundtland.html>
- Maderero, F. (2017). *Forestal Maderero*. <https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/que-es-el-informe-brundtland.html>.
- Maillard, P.-L. (2009) *Association canadienne du ciment*. Entretien téléphonique le 10 mars 2009.
- McPherson, E. (2001). Sacramento's parking lot shading ordinance: environmental and economic costs of compliance. *Landscape and Urban Planning*, 57(2), 105-123. doi:[https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(01\)00196-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(01)00196-7).
- Méndez, S. E. (1996). *Una modernidad edificada. La arquitectura de Felipe Ortega en Sonora*. Hermosillo, Sonora: El Colegio de Sonora.
- (2003). *Hermosillo en el siglo xx. Urbanismos incompletos y arquitecturas emblemáticas*. Hermosillo, Sonora: El Colegio de Sonora.
- Mercado, L. (2016). *Isla de Calor Urbana de periodo cálido y frío. Caso: Hermosillo, Sonora*. Tesis. Hermosillo, Sonora: Universidad de Sonora.
- Mercado, M. L., y Marincic, L. I. (2017). Morfología de Isla de Calor Urbana en Hermosillo, Sonora y su aporte hacia una ciudad sustentable. *Biocencia*, 9, 27-33. doi:<https://doi.org/10.18633/biocencia.v19i0.407>
- Micheli, J. (2002). Política ambiental en México y su dimensión regional. *El Colegio de Sonora*, 129-169.

- Molina, P. L., y Rubio, F. D. (2016). Elementos de urbanismo azul: lagos naturales y artificiales. *Línea de investigación: Arquitectura, Ciudad, Medio Ambiente*, 22+44.
- Moreno, O. S. (2008). La habitabilidad urbana como condición de calidad de vida. *Palapa, III*(11), 47-54.
- Nasrallah, H. A., Brazel, A. J., y Jr., R. C. (2006). Analysis of the Kuwait city urban heat island. *International Journal of Climatology*, 10(4), 401-405.
- Nikolopoulou, M. I. (2004). Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach. *Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces*.
- Oke, T. (1976). The Distinction Between Canopy and Boundary-Layer Urban Heat Islands. *Atmosphere*, 14(4), 268-277. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422>
- (1987). *Boundary Layer Climates* (Segunda Edición ed.). London Editorial.
- (1995). The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects. In *Wind climate in cities*, 81-107. Netherlands, Springer.
- , Mills, G., Christen, A., y Voogt, J. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Olgay, V. (1998). *Arquitectura y Clima, Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Gustavo Gili.
- OMS (2020). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de <https://www.who.int/es/who-we-are/constitution>
- Onishi, A., Cao, X., Ito, T., Shi, F., y Imura, H. (2010). Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots. *Urban Forestry & Urban Greening*, 323-332.
- ONU (2015). *Informe 2015 sobre los Objetivos de Desarrollo del Milenio*. Nueva York. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Palme, M., Lobato, A., y Carrasco, C. (2016). Quantitative Analysis of Factors Contributing to Urban Heat Island Effect in Cities of Latin-American Pacific Coast. *Procedia Engineering*, 169, 199-206.
- Pomerantz, M., Akbari, H., Chang, S. C., Levinson, R., y Pon, B. (2003). *Examples of cooler reflective streets for urban heat-island mitigation: Portland cement concrete and chip seals*. California: University of California.
- Population Stat, world statistical data* (s.f.). Obtenido de <https://populationstat.com/kuwait/kuwait-city>
- Puliafito, S. E., Bochaca, F. R., y Allende, D. G. (2013). Mitigación de la Isla de Calor Urbana en ciudades de zonas áridas. *Proyecciones*, 29-45.
- Rasul, A., Balzter, H., y Smith, C. (2015). Spatial variation of the daytime Surface Urban Cool Island during the dry season in Erbil, Iraq Kurdistan, from Landsat 8. *Urban Climate*, 176-186.
- Real Academia Española. (2001). *Diccionario de la lengua española*. Madrid, España.
- Rizwan, A., Dennis, L., y Chuncho, L. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120-128.

- Rodríguez, P. A. (2010). De la ciudad imaginada a la ciudad habitada: prácticas-vivencias espaciales en Hermosillo, Sonora, México. *El Colegio de Sonora*.
- Romero, H., y Vásquez, A. (2005). Evaluación ambiental de proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *EURE*, 97-117.
- Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Bretz, S., Sailor, D., y Taha, H. (1993). Mitigation of Urban Heat Islands: Materials, Utility Programs, Updates. *Energy of Efficiency*, 1(1), 255-275.
- Rosenzweig, C., Solecki, W., Parshall, L., Gaffin, S., Lynn, B., Goldberg, R., y Hodges, S. (2006). Mitigating New York City's Heat Island with urban forestry, living roofs, and light surfaces. *A report to the New York State Energy Research and Development Authority*.
- Rosheidat, A., y Bryan, H. (2010). Optimizing the effect of vegetation for pedestrian thermal comfort and urban heat island mitigation in a hot arid urban environment. *SimBuild*, 4(1), 230-237.
- Rueda, S. (1996). Habitabilidad y calidad de vida. *Textos sobre sostenibilidad*, 29-33.
- (2010). El urbanismo ecológico. *Agencia de ecología urbana de Barcelona*, 1-34.
- Ruiz, M. A., Correa, E. N., y Cantón, M. A. (2012). Función ambiental de parques urbanos en zonas áridas: clima y confort térmico. *Encuentro Nacional de Tecnología do Ambiente Construido*, 3 472-3 483.
- Salazar, A. A., y Pineda, P. N. (2010). Escenarios de demanda y políticas para la administración del agua potable en México: el caso de Hermosillo, Sonora. *Región y sociedad*, 105-122.
- Salvatore, M., Ferrara, A., Rossi, S., Biancalani, R., Federici, S., Jacobs, H. y Flammini, A. (2014). *Agriculture, forestry and other land use, Emissions by Sources and Removals by Sinks*. FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/019/i3671e/i3671e.pdf>
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 682-703.
- (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of The Total Environment*, 582-598.
- , y Kolokotsa, D. (2016). *Urban Climate Mitigation Techniques*. New York: Routledge.
- Schjetnan, M., Calvillo, J. y Peniche, M. (1997). *Principios de diseño urbano ambiental*. México, D.F.: arbol editorial.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Recursos Hidráulicos, Pesca y Acuicultura. (2016). *Programa de Mediano Plazo Agrícola 2016-201*. Hermosillo: Gobierno del estado de Sonora.
- Secretaría de Salud (2009). *Temporada de calor, Lineamientos para su atención*. México, D.F.: Secretaría de Salud.
- SEDESOL, SEGOB, Y CONAPO. (2012). *Catálogo Sistema Urbano Nacional*. México, D.F.: Secretaría de Gobernación.

- Segovia, S. M., y Tomateo, S. R. (2017). *Rethinking Hermosillo*. Hermosillo: The Inter-American Development Bank.
- Shalaby, A. S. (2011). URBAN HEAT ISLAND AND CITIES DESIGN: A Conceptual Framework of Mitigation Tools in Hot-arid Regions. *J. Urban Res*, 8, 42-63.
- Sharifi, E., y Lehmann, S. (2014). Local measures to mitigate the urban heat island effect in hot and humid climate: Comparative case study of Sana'a, Bushehr and Dubai Marina. *International Journal of Development and Sustainability*, 3(1), 38-54.
- Shishegar, N. (2014). The Impact of Green Areas on Mitigating Urban Heat Island Effect: A Review. *The International Journal of Environmental Sustainability*, 9(1), 119-130.
- Smith, C., Lindley, S., y Levemore, G. (2009). Estimating spatial and temporal patterns of urban anthropogenic heat fluxes for UK cities: the case of Manchester. *Theor Appl Climatol*, 19-35.
- Sofer, M., y Potchter, O. (2006). The urban heat island of a city in an arid zone: the case of Eilat, Israel. *Theoretical and Applied Climatology*, 85(1-2), 81-88.
- Sosa, C. M., Correa, C. E., y Cantón, M. A. (2017). Influencia de la morfología urbana sobre la habitabilidad térmica exterior en una ciudad de clima árido. *Revista Hábitat Sustentable*, 44-53.
- Spornken-Smith, R. A., y Oke, T. R. (1999). Scale modelling of nocturnal cooling in urban parks. *Boundary-Layer Meteorology*, 93, 287-312.
- Staddon, C., Ward, S., De Vito, L., Zuniga-Teran, A., Gerlak, A. K., Schoeman, Y., y Booth, G. (2018). Contributions of green infrastructure to enhancing urban resilience. *Environment Systems and Decisions*, 38, 330-338.
- Stewart, I. D., y Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *American Meteorological Society*, 1879-1900.
- Sugawara, H., Tanaka, H., Narita, K. I., Nakano, T., y Mikami, T. (2008). How much cool air does an urban green park produce. *Geogr. Rep. Tokyo Metropolitan Univ.*, 43,83-89
- Synnefa, A., Dandou, A., Santamouris, M., Tombrou, M., y Soulakellis, N. (2008). On the Use of Cool Materials as a Heat Island Mitigation Strategy. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(11), 2846-2856.
- Taha, H. (1997). Urban Climates and Heat Islands; Albedo, Evapotranspiration, and Anthropogenic Heat. *Energy and Buildings*, 03-30 y
- Takebayashi, H., y Moriyama, M. (2009). Study on the urban heat island mitigation effect achieved by converting to grass-covered parking. *Solar Energy*, 83(8), 1211-1223.
- Taslim, S., Parapari, D. M., y Shafaghat, A. (2015). Urban Design Guidelines to Mitigate Urban Heat Island (UHI) Effects In Hot-Dry Cities. *Jurnal Teknologi*, 74(4), 119-124.
- Tejeda, M. A. (2019). Reseña de Oke, T. R.; Mills, G.; Christen, A.; y Voogt,. *Revista de Investigación en Geografía*, 125-128.
- United States Census (2016). Retrieved from <https://www.census.gov/programs-surveys/decennial-census.html>
- UNSW Sydney (s.f.). Obtenido de <https://research.unsw.edu.au/people/professor-mat-theos-santamouris>

- Valenzuela, A. F. (1997). *Historia general de Sonora. Tomo IV. Sonora moderno, 1880-1929*. Hermosillo, Sonora: Gobierno del Estado, Instituto Sonorense de Cultura.
- Valls, M. F. (2008). *Derecho Ambiental* (1era Edición ed.). Buenos Aires, Argentina: Abeledo-Perrot.
- Vernez, M. A. (1997). Urban morphology as an emerging interdisciplinary field. *Urban-Morphology*, 3-10.
- Villalobos, A. C. (2018). Cambio climático y arqueología en el desierto de Sonora. *Anales de Antropología*, 37-53.
- Villanueva-Solis, J., Ranfla, A., y Quintanilla-Montoya, A. L. (2013). Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo. *Información tecnológica*, 24(1), 15-24.
- Völker, S., Baumeister, H., Claßen, T., Hornberg, C., y Kistemann, T. (2013). Evidence for the temperature-mitigating capacity of urban blue space—A health geographic perspective. *Erdkunde*, 355-371.
- Wang, Y. y Akbari, H. (2015). A simulation study of the effects of street tree planting on Urban Heat Island mitigation in Montreal. *Climate Change Technology*.
- Wang, Z.-H., Zhao, X., Yang, J., y Song, J. (2016). Cooling and energy saving potentials of shade trees and urban lawns in a desert city. *Applied Energy*, 161, 437-444.
- Winkelman, T. J. (2005). *White topping performance in Illinois*. Physical Research Report, number 148.
- Wong, E., y Mercado, E. (2002). Opportunities to Advance Heat Island Mitigation Policy. *Teaming for Efficiency: Energy and environmental policy*, 395-406.
- Wong, J., y Lau, L. (2013). From the 'urban heat island' to the 'green island'? A preliminary investigation into the potential of retrofitting green roofs in Mongkok district of Hong Kong. *Habitat International*, 25-35.
- World Commission on Environment and Development (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press.
- World Meteorological Organization (2015). *Heatwaves and health: guidance on warning-system development*. Geneva 2, Switzerland: WMO-No.1142.
- World Population Review (2020). Retrieved from <https://worldpopulationreview.com/countries/kuwait-population>
- WRI (1988). *UNDP and the World Bank. World Resources*, 99.
- Yang, J., y Santamouris, M. (2018). Urban Heat Island and Mitigation Technologies in Asian and Australian Cities—Impact and Mitigation. *Urban Science*.
- Zinzi, M., y Agnoli, S. (2012). Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 66-76.

Sobre las autoras

Laura Mercado Maldonado

Licenciada de Arquitectura por la Universidad de Sonora con la tesis titulada *Evaluación térmica de casa bioclimática*. Es Maestra y Doctora en el Programa de Humanidades de la Universidad de Sonora, en los que se tituló con mención honorífica por su trabajo sobre Isla de Calor Urbana. Actualmente es profesora del Departamento de Arquitectura y Diseño en la Universidad de Sonora, en materias de proyecto arquitectónico y de arquitectura y medio ambiente. Profesionalmente se ha desempeñado como gerente de proyectos arquitectónicos y urbanos. Su principal línea de investigación es el clima urbano, la arquitectura bioclimática, el diseño sustentable, el urbanismo y los estudios del medio ambiente. Ha publicado capítulos de libros, artículos y ponencias en congresos nacionales e internacionales. Es candidata a investigadora nacional por el SNI del Conahcyt.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7687-4554>

ACADEMIA: <https://uson.academia.edu/LauraMercado>

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Laura-Mercado-3>

Irene Marincic Lovriha

Doctora en Ingeniería. Profesora de tiempo completo en el Departamento de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Sonora. Sus líneas de investigación son la eficiencia energética en edificios, el confort térmico, la sustentabilidad en edificios y los espacios exteriores. Participa activamente en proyectos de investigación y redes de colaboración mexicanas e internacionales con varias universidades, así como en consultorías especializadas en temas energéticos. Pertenece al Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables (México) y es miembro del SNI, nivel 3, del Conahcyt.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8609-2748>

ACADEMIA: <https://independent.academia.edu/IreneMarincicLovriha>

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Irene-Marincic>

*Isla de Calor Urbana en ciudades
del desierto continental. Estrategias de mitigación,*
de Laura Mercado Maldonado e Irene Marincic
Lovriha, publicado por la Universidad de Sonora y Ediciones
Comunicación Científica S. A. de C. V., se terminó de imprimir en
diciembre de 2023 en Litográfica Ingramex S. A. de C. V., Centeno 162-
1, Granjas Esmeralda, 09810, Ciudad de México. El tiraje fue de 100
ejemplares impresos y en versión digital para acceso abierto en en los formatos
PDF, Epub3 y HTML5.

El proceso de urbanización se ha acelerado en las últimas décadas; como resultado, más de la mitad de la población mundial vive en ciudades. Esta tendencia conlleva una serie de consecuencias negativas, como cambios en el ambiente, en el clima y en las respuestas culturales de los asentamientos humanos.

Uno de los principales impactos de la urbanización es la formación de Islas de Calor Urbanas (ICU). La ICU se produce cuando la temperatura en las ciudades es más alta que en las zonas rurales circundantes. Este fenómeno se debe a una serie de factores, como el uso de materiales de construcción que absorben el calor, la falta de vegetación, tráfico vehicular y todo tipo de actividades antropogénicas. Las consecuencias son relevantes, ya que afectan la salud y el bienestar de las personas que viven en las ciudades, además de provocar un aumento del consumo eléctrico.

En el presente libro se destacan las características de la Isla de Calor Urbana en cualquier ecosistema y se hace hincapié en el desierto continental. Se explican los fenómenos térmicos particulares que suceden en este tipo de ambientes, donde coexisten los elementos del ambiente natural con el entorno urbano, sus habitantes y las actividades que en él se desarrollan. Estos efectos son aún más importantes cuando se trata de ciudades del desierto, donde se parte de una condición climática extrema. Se presentan varios métodos para detectar y estudiar este fenómeno. Si bien los impactos al ambiente y a la vida urbana son inevitables, estos pueden minimizarse, aplicando estrategias adecuadas para mitigar la ICU en climas desérticos, como la selección apropiada de materiales, el diseño adecuado del cañón urbano, la incorporación de vegetación, el manejo del agua pluvial y la reducción del calor antropogénico, entre otras.



Laura Mercado Maldonado es Doctora y Maestra en Humanidades por la Universidad de Sonora. Actualmente es profesora indeterminada del Departamento de Arquitectura y Diseño de la Facultad Interdisciplinaria de Humanidades y Artes en la Universidad de Sonora. Asimismo es investigadora, nivel candidato, del SNII del Conahcyt.



Irene Marincic Lovriha es Doctora en Ingeniería y profesora de tiempo completo en el Departamento de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Sonora, asimismo es Investigadora, nivel III, del SNII del Conahcyt.



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA** PUBLICACIONES
ARBITRADAS
HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS

www.comunicacion-cientifica.com



Dimensions



WEB OF SCIENCE



[DOI.ORG/10.52501/CC.174](https://doi.org/10.52501/CC.174)



9 786075 185262

ISBN (USON): 978-607-518-526-2
ISBN (ECC): 978-607-59988-6-2