



CENTRO DE ESTUDIOS DEMOGRÁFICOS, URBANOS Y AMBIENTALES

EXPOSICIÓN A EVENTOS EXTREMOS DE ALTA TEMPERATURA BAJO  
TRAYECTORIAS DE URBANIZACIÓN EN EL CONTEXTO DE CAMBIO  
CLIMÁTICO EN MÉXICO.

Tesis presentada por

LUIS ALEJANDRO HERRERA LLAMPALLAS

Para optar por el grado de

MAESTRO EN ESTUDIOS URBANOS

Director de tesis

LANDY LIZBETH SÁNCHEZ PEÑA

CIUDAD DE MÉXICO 30 DE JUNIO DEL 2021

## Agradecimientos

*‘el individuo, como el átomo, es una abstracción’*  
Unamuno, 2019

El conocimiento desarrollado en esta investigación es producto del trabajo individual, pero también del esfuerzo de otros investigadores que sentaron las bases para poder seguir avanzando en el desarrollo del quehacer científico. Además, ese esfuerzo propio ha sido nutrido por las aportaciones y apoyo constante de muchos otros individuos con los que comparto tiempo y espacio.

Por ello quiero dar las gracias, primero, al motor de vida; mi familia. A mi madre, Alejandra Llampallas, por ser ejemplo de vida y por darme toda su comprensión y apoyo para la realización de mis objetivos, sin importar las dificultades que implique alcanzarlos. A mi hermano José Ricardo por ser la razón por la que cuido mis pasos, pero también por ser quien me motiva para continuar dándolos. Gracias a mi padre, Luis Herrera Haro, por mostrarme el camino y ayudarme a entender lo que realmente es importante en esta vida.

Agradezco a mi compañera de vida, la Ing. Ariana Luque Delgadillo, por ser uno de los pilares más importantes, por apoyar mis sueños y objetivos, por ser motivo de orgullo y gran ejemplo de ser humano y por engrandecerme a cada paso a su lado con el cariño y comprensión que me regala.

Como bien menciona Wainerman en su texto “Acercas de la formación de investigadores en ciencias sociales”; *‘...no hay método que pueda remplazar la relación artesanal maestro-discípulo...’*. Por ello, quiero agradecer encarecidamente a mi directora de tesis, la Dra. Landy Lizbeth Sánchez Peña, por la oportunidad de trabajar bajo la tutela de tan importante investigadora y de tan admirable ser humano, por el tiempo invertido, por su guía en la concepción de la idea que detonó el presente estudio, por sus oportunos consejos y recomendaciones que dieron luz a la penumbra de un texto en progreso y por la charla y los ánimos constantes que me permitieron superar los obstáculos que, por momentos, me parecieron infranqueables. ¡Gracias!

De igual forma, quiero dar las gracias a mi lectora de tesis, la Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez, por el genuino interés mostrado en mi trabajo, por los oportunos y finos consejos

que sumaron a este trabajo calidad y pertinencia, también le agradezco por su eterna sonrisa en cada sesión en la que compartimos espacio, aunque ese solo fuera virtual, no hay duda de que es un gran ejemplo tanto profesional como personalmente.

No puedo dejar fuera de mis agradecimientos al Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas, porque su pasión tanto por la investigación como por el estudio de temas relacionados al cambio climático me encaminaron hacia la elección de esta temática, y por ser ejemplo de vida. De igual forma, le agradezco su confianza en mí como profesional cuando las oportunidades eran escasas, gesto que jamás olvidare.

Agradezco a mis profesores de maestría, porque cada uno de ellos aportó una parte fundamental a mi formación. Especialmente quiero agradecer al Dr. Carlos López por tan enriquecedora forma de compartir sus conocimientos y por sus oportunos consejos a lo largo de la maestría, y al Dr. Sergio Rincón por su particular forma de impulsarme a trabajar habilidades en las que mis carencias quedaban de manifiesto y en las que hoy, gracias a su apoyo, puedo decir que soy mucho mejor que ayer.

Agradezco a mis compañeros de clase, porque sus constantes aportaciones enriquecieron inmensamente mi estancia en El Colegio de México, porque las pláticas entre los pasillos, en las aulas, el comedor y la biblioteca avivaron mi interés y curiosidad por la investigación, pero también les agradezco por los maravillosos seres humanos que son, por la constante colaboración que entablamos, por el apoyo que me brindaron y por ser uno de los motivos por los que diariamente, durante un año, cruzaba la Ciudad de México, desde Texcoco hasta las instalaciones de El Colegio de México.

A El Colegio de México y al Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales, por brindarme los medios para alcanzar uno de los logros más importantes en mi vida y permitirme compartir espacio con algunas de las mentes más brillantes del país y seres humanos maravillosos.

Al pueblo de México que, a través del apoyo brindado por el CONACYT, me ha permitido cursar dos años de maestría en una de las instituciones más importantes del país, proveyéndome de los medios para completar, con el más elevado nivel de dedicación, interés y compromiso, el presente trabajo de investigación.

## **Resumen**

El incremento de la temperatura media del planeta, impulsado por el cambio climático, reconfigura la intensidad, frecuencia y distribución de las temperaturas máximas estableciendo, en conjunto con los patrones de expansión de las urbes, un nuevo tablero de riesgos y exposición a fenómenos extremos de alta temperatura (Baker, 2012; K. Chen et al., 2015; IPCC, 2012; Jones et al., 2015; Jones, Tebaldi, O'Neill, Oleson, & Gao, 2018). Y es que, la gravedad de los impactos producidos por los eventos de calor extremo dependen tanto de la naturaleza de los propios fenómenos como de la exposición y la vulnerabilidad de las poblaciones humanas (Jones et al., 2015, 2018), elementos que se encuentran en cambio constante, y cuyo análisis futuro se vuelve de gran interés. Por ello, la presente investigación analiza los cambios en la magnitud de la exposición a los FEAT para dos horizontes temporales (2015-2039 y 2045-2069), tomando en cuenta dos posibles trayectorias de urbanización (SSP3 y SSP5), y lo hace desde dos métricas distintas de tal urbanización, una centrada en el crecimiento de la población y otra que pone énfasis en el aumento del suelo urbano. Además, considera la evolución de las temperaturas máximas bajo un escenario de cambio climático (HADGEM2ES) con un RCP 8.5, lo que supone un incremento en la temperatura igual o superior a los 2°C, tomando en cuenta un umbral de temperaturas máximas de 35.0°C y uno de 38.9°C como definiciones de los FEAT. Los resultados muestran un incremento constante y los mayores niveles de exposición en la SSP3, para ambos umbrales y para ambas visiones de urbanización, pudiendo observar una mayor injerencia por parte de las variaciones en las temperaturas máximas sobre la evolución de los patrones de exposición a los FEAT, pero con la clara participación del crecimiento de la urbanización en la determinación del aumento en la superficie que alcanza mayor exposición. Hay una diferencia marcada entre las trayectorias de urbanización que subyacen en las SSPs. Mientras la SSP3 proyecta el mayor crecimiento en la población urbana, la SSP5 muestra un mayor crecimiento en la superficie de distribución de dicha población, pese a ello la población urbana expuesta debido a los altos niveles de población en la SSP3 debido a los mayores niveles de crecimiento poblacional en ese escenario. Desde la métrica de la urbanización del crecimiento del suelo urbano, la SSP3 también impulsa los mayores niveles de exposición, aunque ambas SSPs mantienen un crecimiento constante en cuanto a los niveles de exposición futura.

# Contenido

<b>Agradecimientos</b> .....	I
<b>Resumen</b> .....	III
<b>Introducción general</b> .....	1
<b>Capítulo 1. Bases teóricas para la evaluación de la exposición a los FEAT; los elementos fundamentales</b> .....	4
<b>1.1 Introducción</b> .....	4
<b>1.2 Cambio climático y su papel en la exposición a fenómenos climáticos extremos</b> 5	
1.2.1 El cambio climático y sus impactos.....	6
1.2.2 Fenómenos climáticos extremos en un contexto de cambio climático.....	8
1.2.3 El cambio climático como catalizador de los fenómenos extremos de alta temperatura .....	11
1.2.4 La constitución fundamental del riesgo; la exposición a fenómenos climáticos extremos <sup>13</sup>	
1.2.5 La configuración de la exposición a fenómenos extremos de alta temperatura bajo escenarios de cambio climático .....	16
<b>1.3 La urbanización como elemento fundamental de la exposición</b> .....	17
1.3.1 La urbanización desde dos miradas; estructural y demográfica.....	17
1.3.2 El papel de la urbanización futura en la exposición a fenómenos extremos de alta temperatura.....	22
1.3.3 La urbanización y el cambio climático en rumbo de colisión .....	23
<b>1.4 Proyección de las condiciones climáticas y de urbanización; los SSP y los MCG</b> 26	
1.4.1 Los patrones de urbanización futura; las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP).....	27

1.4.2	Los cambios futuros en los fenómenos extremos de alta temperatura; la modelación del cambio climático.....	32
<b>1.5</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>34</b>
<i>Capítulo 2. La distribución de las temperaturas máximas como elemento determinante de la exposición potencial a los FEAT</i> .....		
		36
<b>2.1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>36</b>
<b>2.2</b>	<b>El factor climático como impulsor de la exposición a fenómenos extremos de alta temperatura</b> .....	<b>37</b>
2.2.1	<i>El incremento de los gases de efecto invernadero y su relación con los fenómenos extremos de alta temperatura</i> .....	38
2.2.2	<i>El incremento de los fenómenos extremos de altas temperatura; las olas de calor</i>	42
<b>2.3</b>	<b>Los fenómenos extremos de alta temperatura en México; ¿Cómo evaluar el aumento de las temperaturas máximas?</b> .....	<b>46</b>
2.3.1	<i>Los Fenómenos climáticos extremos de alta temperatura y su importancia en el país</i>	47
2.3.2	<i>Tendencias del cambio climático para México: la proyección de las temperaturas máximas en a través de un modelo HADGEM con RCP 8.5</i> .....	51
<b>2.4</b>	<b>Fenómenos extremos de alta temperatura; una definición para el país</b> .....	<b>53</b>
2.4.1	<i>La definición de los FEAT; La ocurrencia de las temperaturas altas extremas como impulsor del riesgo a desastre</i> .....	53
<b>2.5</b>	<b>Impulsores de la exposición; la distribución de los FEAT bajo escenarios de cambio climático en México</b> .....	<b>59</b>
2.5.1	<i>El papel del cambio climático en la distribución de los FEAT</i> .....	60
2.5.2	<i>El aumento frecuencia e intensidad de los FEAT en dos horizontes temporales; 2015 – 2039 y 2045 - 2069</i> .....	61
<b>2.6</b>	<b>El cambio en la distribución de la exposición potencial a los FEAT</b> .....	<b>71</b>

2.6.1	<i>Los principales cambios en las temperaturas máximas en el país</i> .....	71
2.6.2	<i>Conclusiones</i> .....	77
<b>Capítulo 3. La exposición urbana a los FEAT: el incremento y distribución de la población</b> .....		79
<b>3.1</b>	<b>Introducción</b> .....	79
<b>3.2</b>	<b>Las ciudades mexicanas ¿impulsoras de la exposición a FEAT?</b> .....	80
3.2.1	<i>La urbanización en México; tendencias de crecimiento</i> .....	81
3.2.2	<i>Las trayectorias socioeconómicas compartidas; una mirada al futuro de las ciudades mexicanas</i> .....	82
3.2.3	<i>La urbanización como catalizador de la exposición a los FEAT</i> .....	87
<b>3.3</b>	<b>La exposición a los FEAT en las áreas urbanas de México desde una mirada poblacional</b> .....	91
3.3.1	<i>El aumento poblacional y su distribución espacial como impulsor de la exposición a los FEAT en México</i> .....	91
3.3.2	<i>La exposición histórica de la población a los fenómenos extremos de alta temperatura en México</i> .....	95
<b>3.4</b>	<b>La exposición futura a los FEAT. La evolución de las áreas urbanas mexicanas y las temperaturas máximas en un contexto de cambio climático</b> .....	98
3.4.1	<i>La exposición futura a fenómenos extremos de alta temperatura en México; la evolución de la urbanización desde las SSP</i> .....	99
3.4.2	<i>La exposición futura a los FEAT en las áreas urbanas; dos trayectorias en colisión</i> .....	104
<b>3.5</b>	<b>Conclusiones</b> .....	111
3.5.1	<i>El papel de la evolución urbana en la distribución de la exposición a los FEAT</i> .....	111
3.5.2	<i>El aumento en la distribución, frecuencia e intensidad de la exposición a los FEAT en dos horizontes temporales</i> .....	113

<b>Capítulo 4. La exposición urbana a los FEAT. Una mirada desde el uso urbano del suelo</b>	116
4.1 Introducción	116
4.2 La urbanización del suelo en México como determinante de la exposición presente a los FEAT	117
4.2.1 La urbanización del suelo desde las trayectorias socioeconómicas compartidas	118
4.2.2 La urbanización en el país como producto del crecimiento de la mancha urbana	121
4.2.3 La urbanización estructural y sus implicaciones en la exposición futura a fenómenos extremos de alta temperatura en México	124
<b>4.3 La exposición futura a los FEAT; el crecimiento del suelo urbano como generador de las urbes mexicanas en un contexto de cambio climático</b>	127
4.3.1 El cambio en la dimensión del suelo urbano desde las SSP	128
4.3.2 La exposición futura de los FEAT en las ciudades mexicanas; el suelo urbano y las temperaturas máximas	133
<b>4.4 Conclusiones</b>	140
4.4.1 La urbanización y el papel del cambio climático en la distribución de los FEAT	140
4.4.2 La mancha urbana y el aumento en la distribución, frecuencia e intensidad de los FEAT en dos horizontes temporales	142
<b>Conclusiones generales; la exposición a los FEAT en México</b>	145
1. El crecimiento de la urbanización como constitutivo de los FEAT	145
2. La evolución de la exposición de la población urbana a eventos extremos de alta temperatura en México	149
3. El incremento de la superficie de exposición a los FEAT a través de las dos miradas; distribución poblacional y de suelo urbano	151
4. Los datos y su análisis; limitaciones y oportunidades de mejora	155

5. <i>La exposición presente y futura a los FEAT; el camino a seguir</i> .....	156
<b>Referencias</b> .....	159
<b>Anexos</b> .....	167
<i>Anexo 1. La variabilidad de la exposición a fenómenos extremos de alta temperatura en el país</i> .....	167
<i>Anexo 2. La variabilidad de la exposición futura de los FEAT en las ciudades mexicanas</i> .....	171
<i>Anexo 3. El papel de la variabilidad climática como modelador de la exposición a FEAT</i> .....	178
<i>Anexo 4. Las dinámicas de exposición futura a los FEAT en las ciudades mexicanas; la variabilidad mensual en las temperaturas máximas</i> .....	182

### **Índice de Cuadros**

<i>Cuadro 1. Resumen de supuesto demográficos para cinco SSPs.</i> .....	27
<i>Cuadro 2. Arquitectura de matriz de escenarios que muestra las asignaciones SRES sugeridas en SSP (en azul) y en RCP (rojo).</i> .....	31
<i>Cuadro 3. Proyección del cambio en la temperatura media global del aire en la superficie y de la elevación media mundial del nivel del mar para mediados y finales del siglo XXI, en relación con el período de referencia 1986-2005.</i> .....	41
<i>Cuadro 4. Grupos de temperaturas de interés.</i> .....	50
<i>Cuadro 5. Superficie de distribución por grupo de temperaturas máximas y porcentaje que representa en relación al país.</i> .....	55
<i>Cuadro 6. Resumen de supuesto demográficos para cinco SSPs</i> .....	84
<i>Cuadro 7. Variables socioeconómicas y físicas para la estimación de la posibilidad de ocurrencia de superficies urbanas.</i> .....	120
<i>Cuadro 8. Crecimiento urbano simulado entre 2015 y 2100 para cada SSP.</i> .....	129

### **Índice de Gráficos y Figuras**

<i>Figura 1. Muertes según tipo de desastre.</i> .....	10
<i>Figura 2. Muertes anuales por 'olas de calor'</i> .....	11

<i>Figura 3. Gestión de riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para la adaptación al cambio climático.</i>	14
<i>Figura 4. Población urbana estimada y proyectada en el mundo, para las regiones más desarrolladas y para las menos desarrolladas en el periodo de 1950 a 2050.</i>	19
<i>Figura 5. Conformación de la exposición de las poblaciones por procesos de urbanización cambiante y fenómenos climáticos extremos en un contexto de cambio climático.</i>	24
<i>Figura 6. Panorama de las SSP: espacio de desafíos que identifica cinco escenarios con disimiles retos socioeconómicos de mitigación y adaptación.</i>	29
<i>Figura 7. Emisiones de CO<sub>2</sub> y forzamiento radiativo antropogénico para el siglo 21, consistentes con el enfoque de CMIP5, ligadas a las narrativas de las SSP.</i>	34
<i>Figura 8. Estimaciones de forzamiento radiativo en 2011 respecto de 1750, e incertidumbres agregadas de los principales impulsores del cambio climático.</i>	39
<i>Figura 9. Cambio en la temperatura media global en superficie.</i>	42
<i>Figura 10. Experiencia humana del calentamiento actual; calentamiento relativo a la era preindustrial en la temporada de calor de mayor intensidad.</i>	44
<i>Figura 11. Anomalía de la temperatura media anual en grados Celsius (°C), la barra en color rojo corresponde a la anomalía nacional estimada en 2020.</i>	45
<i>Figura 12. Clasificación del clima respecto a la precipitación y temperatura media anual a nivel nacional.</i>	46
<i>Figura 13. Defunciones por temperaturas extremas de 2017 a 2020.</i>	48
<i>Figura 14. Horizontes del escenario de cambio climático HADGEM2ES desarrollado por UNIATMOS.</i>	52
<i>Figura 15. Distribución de valores promedio de las temperaturas máximas para el periodo de mayo a agosto de 1950 a 2000.</i>	55
<i>Figura 16. Frecuencia de municipalidades por grupo de temperaturas máximas; promedios y máximas durante los meses de mayo a agosto del promedio histórico de 1950 a 2000.</i>	57
<i>Figura 17. Variación de los valores con respecto a la línea de base del valor promedio para cada variable bioclimática.</i>	60
<i>Figura 18. Variación de los valores escalados de diferencias entre modelos, el círculo indica 2 desviaciones estándar de la media del conjunto.</i>	61
<i>Figura 19. Distribución de valores promedio de las temperaturas máximas para el periodo de mayo a agosto de 2015 a 2039.</i>	62
<i>Figura 20. Frecuencia de municipalidades por grupo de temperaturas máximas; medias y máximas para el periodo de mayo a agosto para el periodo de 2015 a 2039.</i>	64
<i>Figura 21. Distribución de valores promedio de las temperaturas máximas para el periodo de mayo a agosto de 2045 a 2069.</i>	67
<i>Figura 22. Frecuencia de municipalidades por grupo de temperaturas máxima en un horizonte medio; medias y máximas para el promedio de los meses de mayo a agosto.</i>	69
<i>Figura 23. Crecimiento de la superficie de distribución de las temperaturas máximas por grupo.</i>	72
<i>Figura 24. Cambios en la superficie de exposición potencial para el grupo 2 de temperaturas máximas, para los tres horizontes (35.1-38.8°C).</i>	74
<i>Figura 25. Cambios en la superficie de exposición potencial para el grupo 3 de temperaturas máximas, para los tres horizontes (&gt;38.9°C).</i>	76

<i>Figura 26. Cambios en la superficie de exposición potencial para las temperaturas máximas mayores de 40°C, que forman parte del grupo 3, para los tres horizontes (&gt;40°C).</i> .....	77
<i>Figura 27. (a)–(e) Densidad de población proyectada para las cinco SSPs (2100), y (f)–(j) el cambio correspondiente proyectado de población (2010-20100).</i> .....	86
<i>Figura 28. Cortes temporales para los horizontes cercano y medio para las proyecciones de población desarrolladas por Jones &amp; O'Neill (2016).</i> .....	90
<i>Figura 29. Población nacional y urbana para el año 2000.</i> .....	92
<i>Figura 30. Municipios agrupados por nivel de población.</i> .....	93
<i>Figura 31. Superficie de distribución de la población urbana.</i> .....	111
<i>Figura 32. Población nacional y población urbana bajo dos SSPs (SSP5 Y SSP3) de 2020 al 2060.</i> .....	112
<i>Figura 33. Población nacional urbana expuesta a un umbral de 35°C o superior para dos SSPs (SSP5 Y SSP3) de 2020 al 2060.</i> .....	113
<i>Figura 34. Población nacional urbana expuesta a un umbral de 38.9°C o superior para dos SSPs (SSP5 Y SSP3) de 2020 al 2060.</i> .....	114
<i>Figura 35. Superficie urbana nacional reportada y proyectada para el año 2015.</i> .....	122
<i>Figura 36. Superficie de suelo urbano.</i> .....	141
<i>Figura 37. Superficie nacional de suelo urbano expuesto a temperaturas máximas superiores a 35.0°C para dos SSPs (SSP5 Y SSP3) de 2020 al 2060.</i> .....	143
<i>Figura 38. Superficie nacional de suelo urbano expuesto a temperaturas máximas superiores a 38.9°C para dos SSPs (SSP5 Y SSP3) de 2020 al 2060.</i> .....	144
<i>Figura 39. Cambios en la exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C, durante el periodo de evaluación.</i> .....	168
<i>Figura 40. Cambios en la población expuesta a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2020.</i> .....	172
<i>Figura 41. Cambios en la superficie de exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2020.</i> .....	173
<i>Figura 42. Cambios en la población expuesta a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2030.</i> .....	174
<i>Figura 43. Cambios en la superficie de exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2030.</i> .....	175
<i>Figura 44. Cambios en la población expuesta a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2050.</i> .....	176
<i>Figura 45. Cambios en la superficie de exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2050.</i> .....	176

<i>Figura 46. Cambios en la población expuesta a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2060.....</i>	<i>177</i>
<i>Figura 47. Cambios en la superficie de exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2060.....</i>	<i>178</i>
<i>Figura 48. Cambios en la exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C, durante el periodo de evaluación.....</i>	<i>179</i>
<i>Figura 49. Cambios en la exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2020.....</i>	<i>183</i>
<i>Figura 50. Cambios en la exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2030.....</i>	<i>184</i>
<i>Figura 51. Cambios en la exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2050.....</i>	<i>185</i>
<i>Figura 52. Cambios en la exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2060.....</i>	<i>186</i>

## **Índice Cartográfico**

<i>Mapa 1. Distribución espacial de las temperaturas máximas por encima de los 35.0°C en el territorio nacional. ....</i>	<i>56</i>
<i>Mapa 2. Evolución de la temperatura máxima durante el periodo que va de mayo a agosto. a) mayo, b) junio, c) julio y d) agosto.....</i>	<i>58</i>
<i>Mapa 3. Distribución espacial de las temperaturas máximas por encima de los 35.0°C en el territorio nacional bajo un escenario HADGEM2ES en un horizonte corto (2015 a 2039). ....</i>	<i>63</i>
<i>Mapa 4. Evolución de la temperatura máxima durante el periodo que va de mayo a agosto, bajo un escenario de cambio climático (HADGEM2ES) de horizonte corto (2015-2039). a) mayo, b) junio, c) julio y d) agosto. ....</i>	<i>65</i>
<i>Mapa 5. Distribución espacial de las temperaturas máximas por encima de los 35.0°C en el territorio nacional bajo un escenario HADGEM2ES en un horizonte medio (2045 a 2069).....</i>	<i>68</i>
<i>Mapa 6. Evolución de la temperatura máxima durante el periodo que va de mayo a agosto, bajo un escenario HADGEM2ES de cambio climático con horizonte medio (2045-2069). a) mayo, b) junio, c) julio y d) agosto. ....</i>	<i>70</i>
<i>Mapa 7. Incremento de las temperaturas máximas de &gt;35°C durante el periodo de 2000 a 2069. ....</i>	<i>73</i>
<i>Mapa 8. Incremento de las temperaturas máximas de &gt;38.9°C durante el periodo de 2000 a 2069. ....</i>	<i>75</i>
<i>Mapa 9. Rango de población urbana por píxel para el año base (2000).....</i>	<i>94</i>
<i>Mapa 10. Distribución base de la exposición a temperaturas máximas &gt;35°C.....</i>	<i>96</i>
<i>Mapa 11. Distribución base de la exposición a temperaturas máximas superiores 38.9°C. ....</i>	<i>97</i>

<i>Mapa 12. Cambios en nivel y distribución de la población urbana entre los periodos evaluados, bajo dos trayectorias de urbanización; SSP3 (verde) y SSP5 (azul).....</i>	<i>101</i>
<i>Mapa 13. Cambio en la exposición a temperaturas superiores de 35°C para el periodo de 2020 a 2060 para la SSP3 (naranja) y la SSP5 (rojo). .....</i>	<i>106</i>
<i>Mapa 14. Cambio en la exposición a temperaturas superiores de 38.9°C para el periodo de 2020 a 2060 para la SSP3 (naranja) y la SSP5 (rojo). .....</i>	<i>108</i>
<i>Mapa 15. Superficie de suelo urbano para el año base (2015). .....</i>	<i>123</i>
<i>Mapa 16. Distribución de le exposición a temperaturas máximas superiores 35.0°C.....</i>	<i>125</i>
<i>Mapa 17. Distribución de le exposición a temperaturas máximas superiores 38.9°C.....</i>	<i>126</i>
<i>Mapa 18. Evolución en la superficie y distribución del suelo urbano entre los periodos evaluados, bajo dos trayectorias de urbanización; SSP3 (naranja) y SSP5 (rojo).....</i>	<i>132</i>
<i>Mapa 19. Cambio en la exposición a temperaturas superiores de 35.0°C para el periodo de 2020 a 2060 para la SSP3 (naranja) y la SSP5 (rojo). .....</i>	<i>136</i>
<i>Mapa 20. Cambio en la exposición a temperaturas superiores de 38.9°C para el periodo de 2020 a 2060 para la SSP3 (naranja) y la SSP5 (rojo). .....</i>	<i>139</i>
<i>Mapa 21. Distribución de le exposición a temperaturas máximas superiores 35.0°C, para los meses de mayo (a), junio (b), julio (c) y agosto (d). .....</i>	<i>169</i>
<i>Mapa 22. Distribución de le exposición a temperaturas máximas superiores 38.9°C, para los meses de mayo (a), junio (b), julio (c) y agosto (d). .....</i>	<i>170</i>
<i>Mapa 23. Distribución de le exposición a temperaturas máximas superiores 35.0°C, para los meses de mayo (a), junio (b), julio (c) y agosto (d). .....</i>	<i>180</i>
<i>Mapa 24. Distribución de le exposición a temperaturas máximas superiores 38.9°C, para los meses de mayo (a), junio (b), julio (c) y agosto (d). .....</i>	<i>181</i>

## Introducción general

La naturaleza y gravedad de los impactos debido a fenómenos climáticos extremos no dependen solo de los propios fenómenos sino también de la exposición y la vulnerabilidad de las poblaciones humanas. Tal exposición hace referencia a la presencia de personas, infraestructura, activos económicos, sociales, culturales, entre otros, en lugares que podrían verse afectados negativamente (IPCC, 2012) y puede medirse tanto a través de la determinación de personas impactadas como de la superficie que supone un posible impacto (Barnett, Tong, & Clements, 2010; K. Chen et al., 2016; Jones et al., 2015, 2018; Peng et al., 2011; Zimmerman, 2020). En este sentido, el creciente aumento poblacional, su heterogénea distribución y los cambios en la intensidad, frecuencia y duración de eventos climáticos extremos establecen un patrón determinado en la exposición a los impactos del cambio climático (Jones et al., 2015). Un elemento central en la construcción de dicha exposición son los patrones de urbanización, presentes y futuros, en tanto inciden sobre los cambios en la concentración de población y la superficie territorial en términos del tipo e intensidad de ocupación del suelo (Seto, Sánchez-Rodríguez, & Fragkias, 2010). Esta urbanización ha cambiado de manera acelerada en décadas pasadas y se espera continúe haciéndolo, influyendo potencialmente en la magnitud de la exposición a eventos extremos (Jones et al., 2015; Jones, Tebaldi, O'Neill, Oleson, & Gao, 2018; Chen et al., 2020), tan solo en 2008, la mitad de la población mundial, vivía en zonas urbanas, tendencia que continua en aumento y que suele ir acompañada, como se menciona, de un incremento en su exposición a fenómenos climáticos extremos y al riesgo de desastres, especialmente considerando el cambio en los patrones e intensidad de los fenómenos climáticos extremos producidos por el cambio climático (Banco Mundial, 2020; PNUD, 2010). La extensión y velocidad de tal urbanización, es decir, la conformación de los patrones de urbanización futura, dependerá de diversos factores económicos y sociales, desde el cambio demográfico, el desarrollo económico, la regulación del suelo hasta las tecnologías de construcción, entre otros (Seto, Sánchez-Rodríguez, et al., 2010).

Por ello, explorar las implicaciones del cambio climático para la población requiere de considerar la evolución de la urbanización, la conformación de patrones de urbanización futura, dando cuenta de las diferentes trayectorias de cambio social posibles. Las trayectorias

socioeconómicas compartidas (SSP por sus siglas en inglés) son una herramienta idónea para la comprensión del cambio climático y social (Escoto, Sánchez, & Gachuz, 2017), las SSP ilustran distintos mundos posibles, trazan trayectorias futuras de distintos factores, como los patrones o velocidad de urbanización, que influyen en el desarrollo socioeconómico bajo narrativas que son descritas en dos dimensiones; los desafíos que las condiciones socioeconómicas imponen a la adaptación y los retos que representan para la mitigación del cambio climático y que implican, cada una de estas SSP, distintos procesos de urbanización. Tales narrativas mantienen fuera de su formulación los efectos del cambio climático (Kriegler et al., 2010; citado en Escoto et al., 2017), por lo que la consideración de los efectos del cambio climático se da a través de la modelación de las condiciones climáticas a futuro, a través de los modelos globales de circulación y de escenarios de emisiones (PINCC, 2016). Estos modelos estiman como se modificará las condiciones físicas de los sistemas terrestres -temperatura, precipitación, acidificación de los océanos, etc.- conforme cambia la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera; que se asocian a distinto grado de calentamiento global (Seto, Sánchez-Rodríguez, et al., 2010). Asimismo, los cambios observados, como el aumento de temperatura y las variaciones regionales de la precipitación, se pueden ligar a eventos extremos, tales como olas de calor, sequías e inundaciones, que tienen un impacto directo sobre el bienestar de las personas. Al combinar escenarios de cambio climático a diferentes niveles de concentración de gases de efecto invernadero con diferentes escenarios de cambio social, se puede evaluar el riesgo que las poblaciones sufrirán en distintos periodos de tiempo, y si la exposición, medida tanto en superficie como en el número de personas, a estas amenazas climáticas crece o decrece según distintos escenarios o trayectorias socioeconómicas.

En el caso de México, algunos han sugerido una relación espacial entre la urbanización y la exposición a amenazas climáticas (Puente, 1999), sin embargo, faltan estudios que permitan observar la dirección y magnitud que sigue esta relación en el tiempo, especialmente bajo escenarios de cambio climático, ello hace preponderante la necesidad de evaluar la influencia de los patrones de urbanización y el crecimiento poblacional en la exposición a amenazas ambientales bajo escenarios de cambio climático. Una de estas amenazas, que resulta de suma importancia por el número de muertes que provoca, es el aumento de la temperatura y en

particular el aumento en la intensidad y frecuencia de los fenómenos extremos de alta temperatura (FEAT) u ‘olas de calor’ (Jones et al., 2018).

Por ello, la presente investigación pretende evaluar, para México, el cambio en la exposición a fenómenos extremos de alta temperatura (FEAT) impulsado por las trayectorias de urbanización, es decir, los patrones espaciales y velocidad de la urbanización, que subyacen dentro de la narrativa que conforma las SSPs, en un escenario de cambio climático de 2°C, dado por un modelo HADGEMES con un RCP 8.5, desarrollado por UNIATMOS (2015). De manera específica, se busca estimar la magnitud de la exposición de las áreas urbanas a fenómenos extremos de alta temperatura, generada bajo dos escenarios socioeconómicos con disimiles trayectorias de urbanización (SSP3 y SSP5) y bajo un escenario de cambio climático con RCP 8.5 en el corto y mediano plazo (2015 a 2039 y 2045 a 2069), así como, analizar el cambio en la distribución espacial de la población urbana expuesta bajo esos dos escenarios. Además, se busca analizar las diferencias que se producen, en tal exposición, al analizar la urbanización a través de dos miradas diferentes de la misma, una que considera el aspecto demográfico, es decir, la determinación de zonas urbanas por el nivel poblacional, y otro centrado en el uso de suelo, es decir, la concentración de la infraestructura y servicios que dan forma al espacio físico, a la mancha urbana que delimita a las urbes.

# **Capítulo 1. Bases teóricas para la evaluación de la exposición a los FEAT; los elementos fundamentales**

## **1.1 Introducción**

Cuando se habla de exposición a riesgos o a fenómenos extremos se hace referencia a la presencia de personas, infraestructura, activos económicos o sociales en lugares que podrían verse afectados negativamente (IPCC, 2012) por el impacto de tales eventos extremos. En ese sentido, las condiciones climáticas, por un lado, establecen patrones de distribución de los eventos extremos que impulsan la exposición de las poblaciones humanas, mientras que, por otro, el crecimiento de la población y su heterogénea distribución coadyuvan al establecimiento de los patrones de exposición a tales eventos extremos (Jones et al., 2015) y, con ello, al establecimiento de zonas de riesgo de desastre.

Por ende, un elemento central en la construcción de dicha exposición son los patrones de urbanización, tanto presentes como futuros, los cuales inciden sobre los cambios en la concentración de la población y la superficie de suelo urbano en el territorio (Seto, Sánchez-Rodríguez, et al., 2010). Ambos elementos, tanto las condiciones climáticas, especialmente si se considera la influencia del cambio climático antropogénico, como la urbanización, son dinámicos y reformulan constantemente los patrones de distribución de la exposición a eventos extremos. Hoy en día más de la mitad de la población habita en ciudades, tendencia que continua en aumento y que suele ir acompañada, como se menciona, de un incremento en su exposición a fenómenos climáticos extremos (Banco Mundial, 2020; G. Chen et al., 2020; PNUD, 2010). Por ello, explorar las implicaciones del cambio climático para la población requiere de considerar la evolución de la urbanización a través de un marco que facilite la comprensión de los posibles cambios sociales, marco que es provisto por las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP por sus siglas en inglés), las cuales son una herramienta idónea para la comprensión del cambio climático y social (Escoto et al., 2017), ya que, dentro de sus supuestos, trazan trayectorias futuras de factores como los patrones o velocidad de urbanización lo que permite, en conjunto con la consideración de los efectos del cambio climático a través de la modelación de las condiciones climáticas futuras, evaluar el riesgo que las poblaciones sufrirán en distintos periodos de tiempo, así como los posibles cambios que se presentaran bajo distintos escenarios o trayectorias socioeconómicas.

Debido a lo anterior, el presente capítulo revisa los aspectos teóricos que sientan las bases y ayudan a entender, en primer lugar, el cambio climático, sus causas, pero sobre todo las implicaciones que tiene como motor de la exposición al riesgo de desastre por fenómenos extremos de alta temperatura (FEAT) u olas de calor, así como las consecuencias que esto produce para el desarrollo socioeconómico y el bienestar de la población, particularmente de la que habita en ciudades. En segundo lugar, se busca resaltar los elementos que conforman la urbanización futura, urbanización que se analiza a través de dos visiones; la de su conformación demográfica y la estructural. Visiones establecen una diferenciación en el incremento de la exposición a fenómenos extremos de alta temperatura. Finalmente, se analizan las herramientas, modelos y el marco que permite el análisis de la exposición a FEAT impulsada tanto por el cambio climático como por las trayectorias de urbanización futura, con el fin de comprender, a través de la dimensión física y demográfica de la urbe, la configuración del riesgo urbano futuro.

## **1.2 Cambio climático y su papel en la exposición a fenómenos climáticos extremos**

El clima es un sistema complejo que sufre alteraciones a lo largo del tiempo, tanto a nivel local como a nivel global, en gran medida como consecuencia de variaciones naturales que experimentan los diversos factores y procesos que lo determinan (Molina, Sarukhán, & Carabias, 2017; IPCC, 2012). Generalmente, tales variaciones, se desarrollan durante periodos que van de los miles a los millones de años<sup>1</sup>, sin embargo, son aceleradas por procesos inherentes al desarrollo socioeconómico de la humanidad<sup>2</sup>, los cuales influyen en el nivel de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que se liberan a la atmósfera (Schleussner et al., 2016), impactando sobre diversos factores que determinan el clima y, por ende, juegan un papel fundamental en la configuración de los impactos que diversos fenómenos climáticos tienen en nuestra economía, infraestructura y sociedad en general.

Para entender tales impactos, es necesario resaltar que la atmósfera es heterogénea, tanto física como químicamente, los fenómenos que otorgan sus características al clima ocurren en la troposfera y, en menor medida, en la estratosfera. En ellas, las características químicas de

la atmosfera, además de la energía solar, juegan un papel fundamental al determinar y mantener la temperatura promedio de la superficie terrestre, fenómeno conocido como efecto invernadero natural. Tal efecto invernadero, que permite un balance térmico relativamente constante, es producido por la presencia de una mezcla específica de gases en la atmosfera, entre los cuales se encuentra el nitrógeno (78%), el oxígeno (21%), el argón (0.93), el vapor de agua (0.25%), el dióxido de carbono (0.03%), entre otros (IPCC, 2013; Molina et al., 2017).

La presencia de tales gases y la proporción que mantienen se da de forma natural, tanto por actividades biológicas como geológicas que liberan a la atmosfera algunos de ellos, además de aerosoles, los cuales interactúan entre sí en la determinación del balance térmico natural y, por ende, en la determinación de las grandes áreas climáticas en el planeta, los cuales pueden verse modificados de forma regional y local por la presencia de grandes elevaciones montañosas, la influencia de corrientes marinas, entre otros elementos (Molina et al., 2017).

Sin embargo, a escala global la actividad humana genera, por el uso de combustibles fósiles, actividad agrícola e industrial y las demandas de bienes y servicios de la población, varios gases de efecto invernadero y aerosoles, los cuales no pueden ser absorbidos por los mecanismos naturales que mantenían el equilibrio de la composición química original de la atmosfera, aumentando de forma constante la presencia de gases como el dióxido de carbono, metano y el óxido nitroso rompiendo el equilibrio químico de la atmosfera e impulsando un calentamiento global constante que, a su vez, influye en la reconfiguración de la variabilidad climática a nivel mundial (IPCC, 2012, 2013; Molina et al., 2017; UNAM & PINCC, 2016a, 2016b).

### *1.2.1 El cambio climático y sus impactos*

Las variaciones o alteraciones climáticas, caracterizadas por cambios en los valores medios de las propiedades del clima y por su variabilidad, producidas por forzamientos o cambios en la composición de la atmosfera impulsados por procesos inherentes al desarrollo humano y que resultan persistentes en el tiempo, son conocidas como cambio climático antropogénico (IPCC, 2012). Los impulsores del cambio climático antropogénico, es decir, las sustancias que alteran el balance energético de la tierra producto de los procesos antropógenos, generan un forzamiento radiativo<sup>3</sup> que, al ser positivo, produce un calentamiento en la superficie. Tal

forzamiento radiativo total de origen antropógeno da lugar a la absorción de energía por parte del sistema climático, siendo el aumento progresivo de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmosfera, que se produce desde 1750, el principal causante del aumento en dicho forzamiento radiativo y, por ende, del calentamiento global (IPCC, 2013).

El cambio climático antropogénico tiene la particularidad, a diferencia de los cambios naturales, de que las alteraciones climáticas se producen en un periodo de tiempo relativamente corto (Conde & Saldaña-Zorrilla, 2007), decenas de años, con diferencias importantes en el clima entre regiones, aunque pudiendo observar un aumento de temperatura media, del número de precipitaciones intensas, de los episodios de calor extremos y de la probabilidad de sequías en la mayoría de las regiones (IPCC, 2019)<sup>4</sup>. En este sentido, podemos distinguir efectos diferenciados en las distintas regiones del planeta; desde incrementos de temperatura disimiles hasta disminuciones importantes en algunas áreas diversas del territorio. El incremento de la temperatura media produce, a su vez, un derretimiento de los casquetes polares y de los glaciares de los sistemas montañosos, que impacta de forma diferenciada tanto en la elevación del nivel del mar como en la reducción del flujo de ríos que alimentan diversas poblaciones (IPCC, 2002, 2013).

Aunado a ello, otro efecto, derivado también del aumento de la temperatura media global, es el incremento en el número e intensidad de huracanes o ciclones tropicales que impacta de forma importante el bienestar de diversas poblaciones humanas (IPCC, 2013; Molina et al., 2017) y es que estos fenómenos hidrometeorológicos extremos, a los que se suman las sequías, olas de calor o frío, entre otros, que son parte del funcionamiento natural de la atmosfera y del ciclo hidrológico, han sufrido modificaciones importantes en sus características como consecuencia del cambio climático antropogénico, produciendo una intensificación en su magnitud, distribución espacial y el número de eventos en una temporalidad determinada, lo que recrudece los impactos, de índole diversa, que ya tenían sobre la sociedad.

Tales efectos sobre los fenómenos hidrometeorológicos o climáticos extremos, producidos por el cambio climático, impactan tanto en la economía como en la sociedad; se prevé que los riesgos relacionados con el cambio climático aumenten en lo referente a la salud, los medios de subsistencia, la seguridad alimentaria, el suministro de agua, la seguridad humana

y el crecimiento económico (IPCC, 2019). Si bien la exposición a fenómenos climáticos extremos (olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones, incendios forestales, etc.) no se debe solamente a factores climáticos sino también a desigualdades multidimensionales, los impactos de los recientes eventos climáticos extremos ponen de relieve el importante papel de la exposición y la vulnerabilidad de muchos sistemas humanos a la variabilidad climática impulsada por el cambio climático antropogénico (IPCC, 2019; Molina et al., 2017).

### 1.2.2 *Fenómenos climáticos extremos en un contexto de cambio climático*

Los fenómenos climáticos extremos o fenómenos meteorológicos extremos se entienden como la ocurrencia del valor de una variable climática que tiende a concentrarse en los extremos, superior o inferior, de los umbrales observados de dicha variable (IPCC, 2012, 2014), en otras palabras, son episodios, sucesos o eventos que suelen ser raros o infrecuentes, de acuerdo con su distribución estadística, en un lugar determinado (Organización Meteorológica Mundial, citado en Méndez, 2018). Las variables climáticas referidas son la precipitación, la temperatura, la velocidad del viento, entre otros, cuyos incrementos o picos pueden manifestarse como sequías, heladas, olas de calor, inundaciones, huracanes, ciclones, entre otros (Ríos, Ceppi, Meléndez, & Molero, 2014), eventos que juegan un papel fundamental, tanto por su intensidad como por su distribución, en la conformación del tablero de riesgo de desastre para diferentes poblaciones humanas.

---

<sup>1</sup> Para ahondar en tales factores y procesos revisar en Molina, Sarukhán y Carabias '*El cambio climático; causas, efectos y soluciones*', 2017.

<sup>2</sup> Los procesos socioeconómicos que impactan el clima, en su mayoría, están relacionados a la emisión de gases de efecto invernadero, ya sea a través de procesos de cambio de uso de suelo, explotación de recursos, energía, entre otros (IPCC, 2012).

<sup>3</sup> El forzamiento radiativo hace referencia a la modificación de los flujos de energía provocados por los cambios en los impulsores y son medidos en unidades de vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). Para una explicación más profunda revisar IPCC, '*Cambio climático; Bases físicas*', 2013.

<sup>4</sup> Existe un grado de incertidumbre en los modelos de cambio climático que proyectan los mencionados cambios, sin embargo hay un alto nivel de confianza en que los impactos descritos mantendrá una tendencia a la alza en la mayoría de las regiones del planeta (IPCC, 2012, 2013, 2014, 2015, 2019).

Dentro de los diversos impactos del cambio climático, posiblemente uno de los que mayor interés despierta es la reconfiguración de la variabilidad climática y su efecto sobre la intensificación en magnitud y número de los fenómenos climáticos extremos, especialmente dada la gran vulnerabilidad inherente a los procesos, físicos y sociales, del desarrollo socioeconómico, que incluso resultan impulsores de la exposición al riesgo de desastre por tales fenómenos, lo que ha decantado en un dramático cobro de vidas humanas y enormes costos sociales, económicos, ecológicos y políticos producidos por tales fenómenos climáticos extremos en los últimos años (Molina et al., 2017).

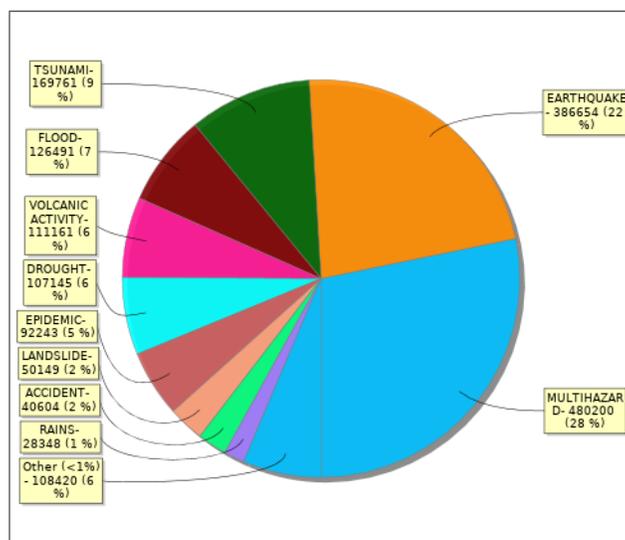
Los impactos económicos de los fenómenos climáticos extremos se han incrementado, aunque con algunas variaciones importantes dependiendo de la fuente y el número de eventos considerados, pasando de costos que van de los 83 mil millones de dólares en la década de los setenta a los 440 mil millones de dólares en la década de 1990 (Stern, 2007, citado en Molina et al., 2017). Por su parte el IPCC (2012), estima pérdidas anuales que van de unos pocos miles de millones de dólares en 1980 a 200 mil millones de dólares en 2010. Estas cifras, incluidas las cifras de muertes producidas por la misma causa, mantienen importantes variaciones que van ligadas a la magnitud de los eventos extremos que se presentan cada año y que, a su vez, tienen una importante dependencia de la variabilidad climática presente y futura.

Pese a que la ocurrencia de dichos fenómenos es infrecuente, por definición, es posible observar una tendencia de aumento en los últimos años, tanto en su ocurrencia como en los impactos socio económicos que producen, aunque con gran variabilidad espacial e interanual, pudiendo deberse, en el caso de algunos eventos, al cambio climático influenciado por el aumento de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero de origen antropogénico (IPCC, 2012), el cual se proyecta como el impulsor más importante de los desastres por fenómenos climáticos extremos (Bouwer, 2019; Vogel, Zscheischler, Wartenburger, Dee, & Seneviratne, 2019).

En el mundo, entre 1994 y 2003, 255 millones de personas por año fueron afectadas por desastres impulsados por fenómenos hidrometeorológicos, de ellas, 58, 000 perdieron la vida, tan solo en la década de los 90's los peligros naturales relacionados con el clima causaron 90% de los desastres, 60% de las muertes y el 98% de los impactos, la mayoría han tenido

lugar en los países en desarrollo (Aragón-Durand, 2011). A nivel mundial la principal causa de muerte por desastre son los terremotos (Figura 1.), aunque los desastres de origen meteorológico, sumados, son los que continúan causando más daños en el mundo, siendo las inundaciones la que tienen mayor peso entre los desastres de este tipo (Aragón-Durand, 2011; UNDRR, 2020).

Figura 1. Muertes según tipo de desastre.

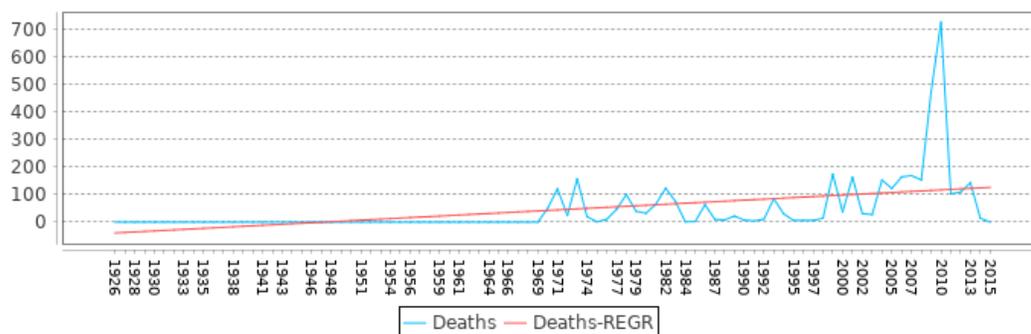


Fuente: DESINVENTAR, 2020.

En términos generales, la relación causal entre cambio climático e incremento en intensidad, ocurrencia y variabilidad de los fenómenos climáticos extremos mantiene un nivel de confianza medio, aunque la mayoría de los estudios muestra que la relación existe (Aragón-Durand, 2011; IPCC, 2012). Tal es el caso de los fenómenos extremos de alta temperatura (FEAT), para los que es posible observar una tendencia de aumento en las temperaturas diarias extremas, así como un incremento en el número de periodos cálidos u olas de calor<sup>5</sup> (Coumou & Rahmstorf, 2012; Coumou & Robinson, 2013; IPCC, 2012) y cuyos impactos suelen ser subestimados, presentando los mayores daños en los países en vías de desarrollo, tanto por la ubicación geográfica como por la vulnerabilidad de la población que en ellos habita (Bouwer, 2019; IPCC, 2012; Molina et al., 2017).

<sup>5</sup> Se tiene un nivel de confianza medio para tales afirmaciones, para un mayor detalle en la información consultar IPCC, “Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático”, 2012.

Figura 2. Muertes anuales por 'olas de calor'.



Fuente: DESINVENTAR, 2020.

Si bien, en relación con los otros tipos de los peligros naturales, mantiene cifras bajas de mortalidad (Figura 2.) y de impactos relacionados, tan solo durante 2010, la onda de calor del verano en Europa causó la muerte de más de 55,000 personas, la misma cantidad que el promedio anual de muertes por desastre a nivel mundial por año (Aragón-Durand, 2011; CENAPRED, 2019). Los efectos de tales fenómenos se presentan principalmente en la salud; golpe de calor, agotamiento por calor, síncope por calor e incluso la muerte (Kovats & Hajat, 2008). Sin embargo también tiene consecuencias directas e indirectas sobre la realización de diversas actividades económicas; como la agricultura o la construcción (Hondula, Georgescu, & Balling, 2014; Zhao et al., 2016), o sobre la realización de actividades recreativas e incluso afectaciones a la infraestructura de índole diversa (Zimmerman, 2020). Además, estos fenómenos extremos, los FEAT, coadyuvan al cambio de la ecología y la geografía de las enfermedades (Aragón-Durand, 2011), ampliando el área de distribución tanto de vectores como enfermedades relacionadas directamente con el aumento de temperatura.

### 1.2.3 El cambio climático como catalizador de los fenómenos extremos de alta temperatura

Un clima cambiante produce cambios en la frecuencia, la intensidad, la extensión espacial, la duración y las circunstancias temporales de los FEAT (IPCC, 2000), por ello, el cambio climático juega un papel preponderante en la conformación futura de la exposición de las poblaciones a fenómenos climáticos extremos, al impulsar nuevos patrones climáticos que incrementan, o reducen, la superficie de distribución de las zonas con mayor o menor exposición, conformando con ello nuevas áreas del riesgos de desastre. Así, el cambio

climático establece patrones determinados de distribución y extensión del riesgo en las que los fenómenos extremos de alta temperatura, los FEAT, especialmente en cuanto a la exposición futura a tales eventos, tienen un importante impacto social, económico, de salud e incluso ecológico.

Sin embargo, es necesario entender las variaciones en la definición de un fenómeno extremo de alta temperatura, que para esta investigación también pueden entenderse como un evento de ‘ola de calor’. Para empezar, no existe una definición universalmente aceptada (Peng et al., 2011), por lo que es posible observar una serie de distintas aproximaciones por parte de diversos autores (Chen et al., 2015), pudiendo establecerse como un límite superior de temperatura promedio, es decir, tomando en consideración las temperaturas máximas promedio de un periodo de tiempo evaluado (Chen et al., 2015; Bryan Jones et al., 2015; Zhang et al., 2020), así como entenderse como un límite superior de temperatura que se sostenga durante un periodo de tiempo determinado, considerando un pico en la temperatura sostenido durante un número de días específicos (Chen et al., 2015) e incluso se pueden tomar en cuenta los valores del percentil superior de los datos analizados, es decir, los valores de temperatura que se encuentran en o por encima del percentil 81 o del percentil 97.5 (Chen et al., 2015; Peng et al., 2011; Zhang et al., 2020). Sin embargo, ninguna medida empleada es la mejor para la predicción de mortalidad o morbilidad en todos los grupos de población (Barnett et al., 2010).

Pese a estas variaciones, que generan discrepancias en los resultados según la definición que se tome, así como según el grupo de población (con características sociodemográficas disímiles) que se analiza, es posible, e incluso necesario, considerar un límite o umbral de temperatura diferenciado que tome en cuenta las características de la población, el crecimiento urbano e incluso las variaciones impulsadas por el cambio climático (Barnett et al., 2010; Hondula et al., 2014), encontrando efectos adversos a partir de los 30.6°C (Chen et al., 2015; Hondula et al., 2014), tales como enfermedades respiratorias y cardio vasculares asociadas, e incluso la muerte (Barnett et al., 2010; Gencer et al., 2018; Romero, Salgado, & Smith, 2010) en distintos grupos a distintos niveles de vulnerabilidad y exposición a temperaturas extremas. Sin embargo, el criterio de temperatura más aceptado es el de 35°C (Jones et al., 2015; Song et al., 2018; Yang et al., 2019) cuyo umbral puede ser establecido

como un valor continuo durante un periodo determinado de tiempo o como un promedio durante un periodo delimitado para su evaluación, aunque según la definición que se establezca será el nivel de detalle y desagregación de la población afectada<sup>6</sup>.

Por ello, la posibilidad de establecer una estimación del valor extremo de alta temperatura de acuerdo con el número de días por encima de los umbrales de temperatura absoluta específicos o a través de definiciones más complejas relacionadas con la duración, persistencia o intensidad de los extremos climáticos de temperatura, permiten adecuar la definición de acuerdo con las características de la población de interés, teniendo, los primeros, la ventaja de obtener cierta comparabilidad entre modelos, estudios de observación y entre regiones, además de que los datos pueden ser más accesibles que en el caso de los datos diarios de temperatura, que no siempre son reportados (IPCC, 2012). Considerando lo anterior, bajo un clima cambiante, se presenta un incremento del riesgo de mortalidad por ‘olas de calor’, ya que se espera que la intensidad, frecuencia y duración de este tipo de fenómenos extremos se incremente en el futuro (Chen et al., 2015; IPCC, 2012, 2013). Estos incrementos, tanto en intensidad como en frecuencia, impulsan el riesgo de desastre por fenómenos extremos de alta temperatura, especialmente por la distribución espacial de los mismos, lo que contribuye al aumento de la exposición de la población a dichos fenómenos.

#### *1.2.4 La constitución fundamental del riesgo; la exposición a fenómenos climáticos extremos*

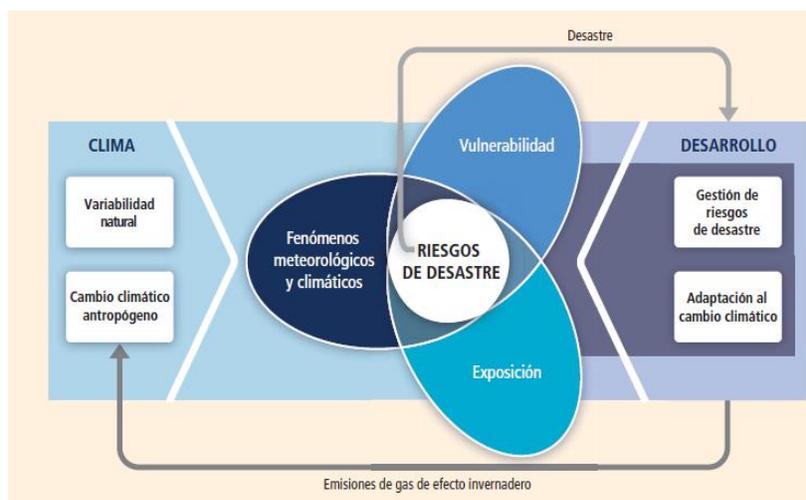
Debido a ello, es posible identificar algunos patrones de ocurrencia delimitados por áreas climáticas específicas, tanto en el presente como en el futuro. Estos patrones espaciales distributivos establecen zonas de riesgo que configuran, en parte, la exposición de la población a los fenómenos extremos de alta temperatura. En ese sentido, la exposición se define como la presencia de personas, medios de subsistencia, recursos ambientales, infraestructura o activos socioeconómicos o culturales en lugares que podrían verse afectados negativamente por una amenaza o peligro, en este caso, por la ocurrencia de un fenómeno climático extremo o un fenómeno extremo de alta temperatura (IPCC, 2012).

---

<sup>6</sup> Para un análisis más profundo en cuanto a las definiciones de ‘ola de calor’ véase; Barnett et al (2010), “*What measure of temperatura is the best predictor of mortality?*” y Chen et al (2014), “*Influence of heat wave definition to the added affect of heat wave son daily mortality in Nanjing, China*”.

Sin embargo, para comprender como se configura el riesgo de desastre por los FEAT y el papel que juega la exposición en tal riesgo de desastre es necesario comprender los diferentes elementos que forman parte o lo estructuran. Como se observa en la Figura 3. las diferencias en el riesgo de desastre por fenómenos climáticos extremos se derivan, en gran medida, de la interacción de los peligros o amenazas conexos al clima con la vulnerabilidad y la exposición de los sistemas humanos (IPCC, 2014).

*Figura 3. Gestión de riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para la adaptación al cambio climático.*



Fuente: (IPCC, 2014)

Tales interacciones establecen una dinámica de riesgo que determina el impacto final de los fenómenos extremos de alta temperatura, o de cualquier otro tipo, sobre los sistemas sociales, por lo que la determinación de la exposición, en específico la parte correspondiente al peligro o amenaza, solo establece una posibilidad de ocurrencia, sin que sea posible determinar el efecto adverso en su totalidad, solo es una parte del rompecabezas del riesgo de desastre, lo que hace necesaria la consideración de otros elementos como la vulnerabilidad de las poblaciones, su resiliencia y su capacidad de adaptación a los eventos extremos.

Sin embargo, la ocurrencia de un evento o fenómeno climático extremo juega un papel importante en cuanto a la consideración de la magnitud del impacto que podría sufrir una población expuesta, magnitud derivada de la variabilidad climática presente o futura, aunque siempre teniendo que tomar en cuenta el resto de los factores involucrados en el riesgo de desastre. Por su parte, las poblaciones expuestas a un determinado fenómeno climático

extremo no necesariamente sufrirán el mismo impacto negativo, hay una gran cantidad de factores o características socioeconómicas y culturales, concretas e intrínsecas, que podemos encontrar en ellas que les facultan o les permiten resistir el impacto de un evento negativo y que determinan la vulnerabilidad al riesgo de desastre de determinadas poblaciones, vulnerabilidad que es definida como la propensión o predisposición de una población a verse afectada negativamente (IPCC, 2012; Sotelo Pérez & Sotelo Pérez, 2017).

Los mencionados factores establecen el nivel de riesgo de desastre, el cual hace referencia a la probabilidad de que se produzcan alteraciones graves en el funcionamiento normal de un sistema o sociedad debido al impacto de un fenómeno físico o peligro al que se encuentre expuesto, elementos que interactúan con condiciones sociales de vulnerabilidad (IPCC, 2012). Sin embargo, el nivel de exposición, vulnerabilidad y la magnitud del fenómeno climático extremo o amenaza no son elementos estáticos, se encuentran en constante evolución. En el caso tanto del factor de magnitud de un fenómeno climático extremo como de la exposición, se ven influenciados por la variabilidad climática presente y futura la cual, a su vez, sufre cambios importantes atribuibles al cambio climático influenciado por las actividades humanas (IPCC, 2012, 2013, 2014).

Tal evolución, impulsada por el cambio climático antropogénico, influye sobre la vulnerabilidad de las poblaciones humanas, modificando la capacidad para enfrentar el impacto producido y la magnitud de los fenómenos climáticos extremos que pueden no tener precedentes (IPCC, 2012) y establecen, a su vez, nuevos patrones de distribución de tales fenómenos que pueden impactar poblaciones que no se encuentren preparadas para hacer frente a tales afectaciones, es decir, que sean especialmente vulnerables a ellos. Por lo tanto, si la población, la infraestructura, los recursos naturales y económicos no estuvieran ubicados (expuestos a) entornos potencialmente peligrosos, no existiría ningún problema de riesgo de desastres, lo que hace de la exposición un determinante del riesgo, necesario, aunque no suficiente para la materialización del desastre, ya que es posible estar expuesto pero no vulnerable y, a su vez, para ser vulnerable a un evento extremo, también es necesario estar expuesto (IPCC, 2012).

### *1.2.5 La configuración de la exposición a fenómenos extremos de alta temperatura bajo escenarios de cambio climático*

Como se ha mencionado, la exposición a los fenómenos extremos de alta temperatura se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, recursos ambientales, infraestructura o activos económicos, sociales o culturales en lugares que podrían verse afectados negativamente (IPCC, 2012) y puede medirse tanto a través de la determinación de personas impactadas como de la superficie que supone un posible impacto (Chen et al., 2016; Bryan Jones et al., 2018). Por ello, las dinámicas poblacionales juegan un papel importante en la determinación de la exposición a estos fenómenos extremos de alta temperatura u olas de calor, su relevancia reside tanto en las características socioeconómicas, culturales y geográficas que tienen las poblaciones y que se traducen en un cierto nivel de exposición y vulnerabilidad ante la ocurrencia de un evento extremo de alta temperatura.

El mismo patrón de evolución o cambio que se da en los fenómenos climáticos extremos se replica en el caso de los fenómenos extremos de alta temperatura, ya que la variabilidad climática, impulsada por el cambio climático antropogénico, configura un nuevo patrón de distribución, intensidad, frecuencia y duración para tales fenómenos (IPCC, 2012; Jones et al., 2015, 2018; Molina et al., 2017) y establece un nuevo escenario de exposición, así como nuevos retos para las poblaciones expuestas.

Considerando el aumento en la duración, la severidad, la frecuencia y la distribución de los fenómenos extremos de alta temperatura (CDC, 2012; IPCC, 2012), es necesario comprender que estos elementos no son los únicos factores que determinan la exposición a este tipo de eventos. Tanto la distribución de los FEAT como el desarrollo socioeconómico y los elementos que lo impulsan coadyuvan al establecimiento de zonas de riesgo y de exposición.

Esta exposición resulta de gran interés dada su diferenciación debido a factores que se derivan de desigualdades producidos por procesos de desarrollo dispares, tales como la urbanización, el aumento poblacional e incluso procesos socioeconómicos que impulsan una diferenciación espacial en tales elementos y, por ende, en los impactos resultantes de los fenómenos extremos de alta temperatura. Por ello, resulta de gran interés e importancia el análisis de dicha exposición y su manifestación en el espacio (LeRoy, Garfin, & Black, 2016).

Explorar las implicaciones del impacto de los FEAT en la población, especialmente considerando los efectos del cambio climático, requiere de considerar la evolución de la urbanización y los procesos de desarrollo que la acompañan, tanto en el presente como en el futuro, dando cuenta de nuevos patrones de urbanización y de distribución poblacional, los cuales juegan un papel de gran importancia en la configuración de la exposición a los FEAT.

### **1.3 La urbanización como elemento fundamental de la exposición**

En este sentido, la urbanización juega un papel preponderante en la construcción de la exposición a los FEAT, especialmente en cuanto a los patrones que sigue tal urbanización, tanto presentes como futuros, en tanto que estos procesos inciden sobre los cambios en la concentración de población y la superficie territorial en términos del tipo e intensidad de ocupación del suelo (Seto, Sánchez-Rodríguez, et al., 2010), lo que se traduce en una ocupación del territorio a través de asentamientos informales o no planificados, impulsando la expansión urbana, en especial la de los países en desarrollo, a áreas próximas a zonas de riesgo, incrementando la ocurrencia de enfermedades y muertes relacionadas a los FEAT (PNUD, 2010; Zhang et al., 2020).

Este crecimiento, inherente al modelo de desarrollo dominante, impulsa a la población a concentrarse en las urbes que ofrecen un mayor nivel de bienestar al posibilitar el acceso a servicios, infraestructura, trabajo, educación, entre otras actividades necesarias para el desarrollo humano y social (González, 2017). Tales condiciones, establecen un importante impulso para el incremento de la población urbana, tan solo en 2008, la mitad de la población mundial vivía en zonas urbanas, las cuales aportan cerca del 85% del PIB mundial y son responsables de más del 67% de la producción de energía relacionada a la emisión de gases de efecto invernadero, lo que las convierte tanto en zonas de alta exposición poblacional a los FEAT como en zonas clave para la implementación de medidas de mitigación (Banco Mundial, 2019; Milner et al., 2017; PNUD, 2010).

#### *1.3.1 La urbanización desde dos miradas; estructural y demográfica*

Es necesario considerar que dicha urbanización es un proceso complejo, que se manifiesta a través de dos grandes fenómenos; por un lado, la creciente concentración de la población

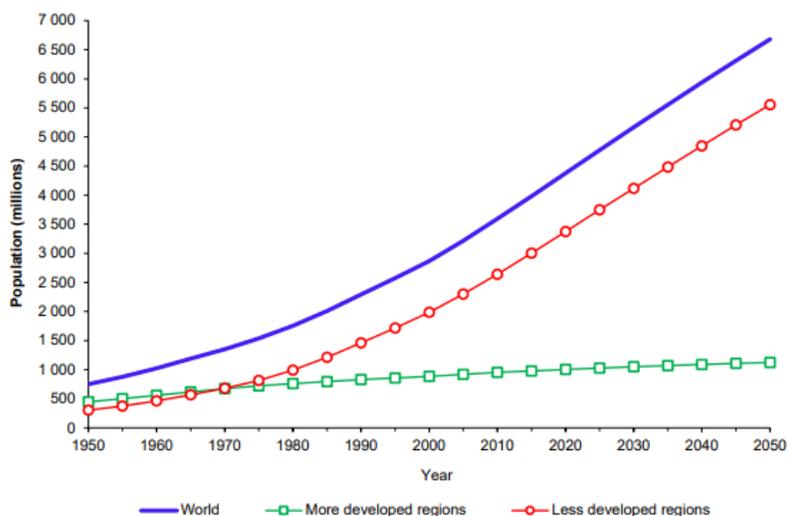
urbana y, por el otro, la evolución de la forma de vida de la población (Sobrino, 2019; Unikel, 1968), lo cual implica la provisión de servicios y la existencia de una infraestructura que de acceso a los mismos, lo que se materializa en un incremento de la superficie de suelo urbano. Tales manifestaciones impulsan un proceso que concentra en pocos puntos del territorio las actividades humanas, económicas, la infraestructura y la población misma y que, a su vez, replica este modelo a lo largo del territorio nacional (Sobrino, 2019), llegando, incluso, a especializar cada unidad urbana según diferentes actividades económicas, lo que da una forma particular al crecimiento de tales ciudades.

Además, la importancia del desarrollo urbano ya no se encuentra acotado a unos cuantos centros metropolitanos conectados globalmente, ahora todo el espectro de asentamientos humanos, desde megaciudades hasta ciudades secundarias y pueblos más pequeños, constituyen la mayoría de la población del mundo, además de mantener una interconexión que establece patrones de intercambio comercial y, por ende, de impactos ambientales específicos. El continuo aumento de la urbanización, especialmente el ritmo acelerado en los países en desarrollo ha colocado el espacio urbano en la vanguardia del debate de políticas globales debido, en parte, al crecimiento demográfico sin precedentes, los impactos del cambio climático, la mayor exposición humana a los peligros naturales y otros riesgos urbanos. Por ello, la centralidad de los procesos urbanos para asegurar futuros sostenibles en una variedad de campos diversos, como el del cambio climático, el crecimiento económico, la erradicación de la pobreza, la vivienda, la infraestructura, los servicios básicos (ONU HABITAT, 2020) aumenta a la par de la población que los habita. Durante los primeros años del siglo XXI las ciudades de más de un millón de habitantes alcanzaron la cantidad de 438, de las cuales, la mayoría se encuentra en países subdesarrollados o en desarrollo, 122 en América (Graizbord, 2007).

Existen diferencias notables en los patrones de urbanización entre las regiones más desarrolladas y las regiones menos desarrolladas. Poco menos de la mitad de la población de las regiones menos desarrolladas vive actualmente en áreas rurales, mientras que la gran mayoría en las regiones más desarrolladas reside en áreas urbanas. Sin embargo, como podemos observar en la Figura 4., la población urbana de las regiones menos desarrolladas ha crecido considerablemente más rápido que la de las regiones más desarrolladas y, como

resultado, su participación en la población urbana mundial ha ido en aumento (UNDESA, 2018), tendencia que se espera se sostenga en el tiempo.

*Figura 4. Población urbana estimada y proyectada en el mundo, para las regiones más desarrolladas y para las menos desarrolladas en el periodo de 1950 a 2050.*



Fuente: tomada de UNDESA, 2018

En ese sentido, la estructura del sistema de ciudades de América Latina efectivamente tiene un sesgo metropolitano, dado el enorme porcentaje de la población que reside en ciudades de 1 millón o más habitantes, 36% de la población total y al 45% de la población urbana, ubicándose por encima de los porcentajes observados en África, Asia y Europa, aunque por debajo de América del Norte y Oceanía, en particular en lo atinente al indicador de distribución dentro de la población urbana (Jordán, Riffo, & Prado, 2017).

El proceso de urbanización de América Latina ha manifestado una reducción en el ritmo de crecimiento, respecto del período de industrialización sustitutiva, aunque adquiriendo nuevas formas espaciales, que se caracterizan por sus enormes contrastes, asimetrías y desigualdades, cuyas manifestaciones se agudizan debido a la disparidad espacial observada en los diferentes países, donde se registran acentuados procesos de desigualdad en las condiciones generales de vida de la población entre los diversos territorios, pudiendo constatar que la urbanización ha conllevado mejoras sustanciales en las condiciones de vida de la población latinoamericana, observando una relación positiva entre el desarrollo socioeconómico de la población y en general al aumento en el grado de urbanización, aunque con diferencias importantes al interior de las ciudades debido al estilo de desarrollo periférico

que plantea limitaciones graves para el logro de una urbanización más inclusiva y más balanceada espacialmente, además las ciudades latinoamericanas se caracterizan por nuevas articulaciones entre ciudades de diferentes tamaños y funciones, lo que añade mayor complejidad a las dinámicas de las tendencias de la urbanización y desarrollo socioeconómico en la región (Jordán et al., 2017).

El caso mexicano mantiene la misma tendencia de desarrollo urbano. Ya en los primeros años del siglo XXI, el país mostraba diez ciudades con, al menos, un millón de habitantes; La ciudad de México, con 20 millones, Guadalajara y Monterrey, con 4 millones, Puebla, con 2.5 millones, Tijuana, Ciudad Juárez, León, Toluca, Torreón y San Luis Potosí, con poblaciones de entre uno y dos millones (Graizbord, 2007). Este desarrollo se ha dado bajo una relación positiva en el desarrollo socioeconómico de la población con respecto al grado de urbanización, aunque con procesos disimiles al interior de las urbes. La dinámica expansiva del crecimiento urbano, asociada a la industrialización y a los flujos migratorios, tuvo como resultado la conformación de formas físicas de organización espacial, periféricas a los núcleos urbanos, discontinuas y con una forma híbrida entre lo urbano y lo rural (Hernández, 2019), forma que replican la mayoría de las ciudades latinoamericanas.

Este crecimiento y desarrollo de las ciudades, hace de las áreas urbanas un gran impulsor del cambio ambiental en múltiples escalas. Pese a que este crecimiento urbano se ha dado apenas en menos del 3% de la superficie terrestres, ha implicado impactos globales, concentrando el 78% de las emisiones de carbono, el 60% del uso de agua residencial y el 76% del uso de madera con fines industriales (Chen et al., 2020; Grimm et al., 2008). Las problemáticas ambientales ligadas a las urbes, se pueden clasificar en tres tipos; las relacionadas al uso de suelo, a la demanda de recursos (agua y energía) y a la contaminación (Graizbord & Montero, 2011) y que están relacionados al desarrollo socioeconómico y al aspecto demográfico, en especial a la demanda de recursos por parte de la población que las habita.

En el caso del uso de suelo, uno de los problemas más serios que enfrentan las urbes, incluidas las ciudades latinoamericanas y mexicanas, está relacionado con la expansión de la infraestructura urbana, que impacta directamente al medio ambiente, afectando el clima local (islas de calor), fragmentando hábitats y amenazando a la biodiversidad dado que su expansión impulsa la pérdida de zonas de cultivo, bosques y áreas de interés ambiental que

rodean las ciudades , ya sea por medio del deterioro o de la desaparición de estos usos de suelo fundamentales para el desarrollo urbano, el control de la contaminación y el equilibrio ambiental, y en general reduciendo su capacidad de proveer de servicios ecosistémicos (Schteingart & Salazar, 2005; Seto, Fragkias, Guneralp, & Reilly, 2011; Seto, Güneralp, & Hutyra, 2012).

Además de ello, la forma espacial que adoptan las ciudades juega un papel importante en la configuración del uso de suelo, lo que impulsa a su vez la pérdida de hábitat de flora y fauna, y que condiciona la movilidad de la población, que utilizará los servicios disponibles de transporte y, por tanto, producirá contaminación, emisiones de CO<sub>2</sub> principalmente (Graizbord & Monteriro, 2011). De igual forma, en términos demográficos, el crecimiento de las urbes, tendrá repercusiones importantes sobre las emisiones de GEI (Sánchez, 2014) impulsando su incremento a medida que la población que habita las urbes aumenta.

A su vez, el proceso dual de la urbanización, resulta de gran interés para la determinación de la exposición a fenómenos extremos de altas temperaturas y las diferencias expresadas al momento de considerar el crecimiento poblacional o el crecimiento de suelo urbano como factor de exposición, especialmente dado que este último permite entender tanto las posibles afectaciones sobre la infraestructura como la diferenciación en los perfiles de calor que se asocian a las urbes, los cuales son disimiles según el grado de infraestructura que se tenga (Chen, Wang, & Zhu, 2017), mientras que el primero, el crecimiento poblacional, nos da acceso a la visualización de la magnitud del potencial daño sobre la población, al localizar las zonas en las que la población se concentra, es decir, la distribución espacial de su concentración.

La mayoría de los estudios que analiza la exposición a fenómenos extremos de alta temperatura hace énfasis en el papel del ritmo de crecimiento acelerado de la población urbana mundial, población que en 2008 superó a la población no rural por primera vez en la historia y cuya estimación de crecimiento para 2050 alcanza el 70% de la población mundial habitando en áreas urbanas, el crecimiento de la superficie urbana, que resulta de igual importancia en la determinación de tal exposición, suele ser subestimado, careciendo de claridad en los datos, especialmente de como dichos incrementos o expansión del suelo urbano se corresponde con los cambios en la demografía (Seto & Shepherd, 2009), lo que es

importante debido a que la población que habita en las ciudades no es estática, si bien las evaluaciones de su crecimiento se centran o se refieren al lugar donde habitan, las dinámicas laborales de la población, ligadas, en parte, a la infraestructura urbana, los movilizan de tal forma que su distribución, y por ende su exposición a los FEAT, cambia a lo largo del día y, a su vez, a lo largo de la semana laboral.

En este sentido, Chen et al. (2020) resalta que, pese a la pequeña proporción de superficie terrestre que ocupan las ciudades, la expansión de suelo urbano se da incluso más rápido que el crecimiento de la población que habita en ellas. Tal evolución juega un papel importante, como se ha mencionado, en la configuración de la exposición a los FEAT, tanto el crecimiento poblacional como la expansión del suelo urbano impulsan una exposición diferenciada por vulnerabilidades territoriales y sociales, que acrecientan el riesgo de desastre por los FEAT. Además de ello, la infraestructura urbana juega un papel importante en los primeros impactos de los FEAT en los sistemas sociales, particularmente en áreas urbanas, los eventos de calor extremo son exacerbados debido a las características intrínsecas de la infraestructura que pueden reforzar negativamente el impacto sobre los mencionados sistemas (Zimmerman, 2020).

Por consiguiente, la evolución urbana, visto desde la dualidad que implica, puede impulsar procesos disímiles de exposición, nutridos por vulnerabilidades multifactoriales que complejizan la determinación de tal exposición y por consiguiente la delimitación de los factores que la impulsan y sobre los que se debe actuar para su reducción.

### *1.3.2 El papel de la urbanización futura en la exposición a fenómenos extremos de alta temperatura*

Pensando en tales factores, Jones et al. (2015) resalta que el creciente aumento poblacional, su heterogénea distribución y los cambios en la intensidad, frecuencia y duración de eventos climáticos extremos establecen un patrón determinado en la exposición a los impactos del cambio climático. Mientras que Chen et al. (2020) hace hincapié en el acelerado crecimiento del suelo urbano que, como se mencionó anteriormente, es incluso mayor al de la población urbana, por lo que su análisis influye en la consideración de la exposición a los impactos de

fenómenos extremos y, en especial, del cambio climático, tanto por las posibles afectaciones que pueden generar en la población como en la infraestructura de las urbes.

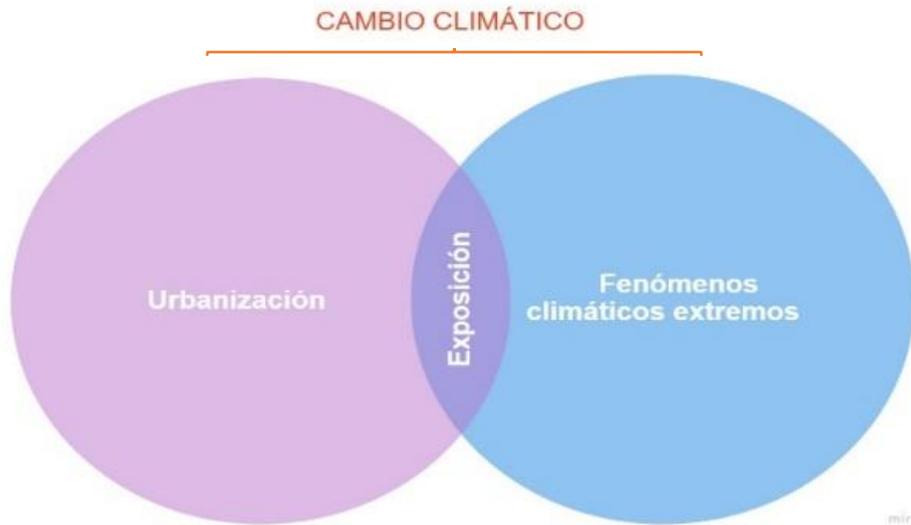
La extensión y velocidad de tal urbanización, es decir, la conformación de los patrones de urbanización futura, dependerá de diversos factores económicos y sociales, desde el cambio demográfico, el desarrollo económico, la regulación del suelo o las tecnologías de construcción, etc. (Seto, Sánchez-Rodríguez, et al., 2010), estos elementos en constante evolución corresponden tanto al modelo de desarrollo socioeconómico predominante como a las políticas de desarrollo urbano existentes, cuya visión presente y futura configuran y reconfiguran la exposición a fenómenos extremos de alta temperatura.

Considerando que los FEAT responden a la variabilidad climática presente, la configuración de los patrones urbanos delimita un escenario de exposición determinado en correspondencia con tal variabilidad y los sistemas climáticos. Sin embargo, tanto el clima como la urbanización son factores en constante evolución, lo que produce una reconfiguración de la exposición a los FEAT que, aunque lenta, es constante. Tal reconfiguración de la exposición se acelera cada día más, tanto por la velocidad del crecimiento de la población urbana y de la expansión del suelo urbano como por la intensificación en la magnitud, frecuencia y distribución de los FEAT impulsada por el cambio climático (Chen et al., 2015; IPCC, 2012; Bryan Jones et al., 2015).

### *1.3.3 La urbanización y el cambio climático en rumbo de colisión*

Explorar las implicaciones de la exposición futura para la población urbana, especialmente su ritmo acelerado de cambio, requiere de considerar cómo evolucionará la urbanización, tanto en aspectos demográficos como de expansión territorial, dando cuenta de las diferentes trayectorias de cambio social posibles, así como las implicaciones que el cambio climático tiene sobre la variabilidad y características de los fenómenos climáticos extremos (Figura 5).

Figura 5. Conformación de la exposición de las poblaciones por procesos de urbanización cambiante y fenómenos climáticos extremos en un contexto de cambio climático.



Fuente: elaboración propia con base en información del IPCC, 2012.

La evolución de los mismos establece una ruta de colisión que configura un tablero de riesgos, implicando afectaciones importantes tanto a la infraestructura urbana, e incluso exacerbadas por la misma, como a la población que en ellas habita. El tipo de expansión y distribución poblacional ligado a procesos de ocupación irregular incrementa el riesgo que implica la exposición a FEAT, ya que la población más vulnerable, tanto por procesos económicos como de ocupación territorial, es la que suele ocupar dichas áreas (PNUD, 2010; Seto, Sánchez, & Fragkias, 2010).

Por otro lado, las ciudades suelen crecer con poca o nula planeación, lo que implica que no estén capacitadas para hacerle frente a los impactos impulsados por los FEAT, mucho menos para las variaciones generadas en tales fenómenos extremos producto del cambio climático. Aunado a ello, las urbes son lugares en las que los efectos de los FEAT se recrudecen, ya que la afectación del clima local que generan suele implicar una sensación de calor superior al resto de la superficie en la que se distribuye el fenómeno, aumentando el riesgo de enfermedades o muerte en la población (Chen et al., 2015; Seto et al., 2011; Zimmerman, 2020).

Tales efectos de los FEAT en las urbes, ligados a la mencionada planeación deficiente, se deben a que los componentes biofísicos, a nivel local, se encuentran ligados al uso de suelo,

por lo que la modificación de las características puede repercutir en el clima local e incluso tener repercusiones a nivel regional (Zavaleta, Díaz, Vázquez, Morales, & Narcizo de Lima, 2020), esta relación puede verse magnificada en el caso de las ciudades latinoamericanas, tanto por los efectos del cambio climático como por la forma de la expansión futura de sus urbes.

Si bien la mayoría de los desastres son eventos repentinos y únicos de corta duración (unos minutos, horas o días), lo que dificulta la predicción de sus efectos, el cambio climático implica alteraciones variadas y que se sostienen a largo plazo contribuyendo sustancialmente al aumento de la frecuencia y gravedad de los eventos extremos y desastres, incluidos los FEAT, cambios que pueden clasificarse como de inicio lento, pero una vez que ocurren tienen duraciones e impactos prolongados, por ejemplo; el aumento del nivel del mar o aumento de las temperaturas atmosféricas predominantes (Simon & Holloway, 2014).

Aunado a tal incremento, la evolución de las ciudades, tanto en América latina como en México, cuyo desarrollo periférico y carente de planeación impulsa la exposición de la población y perpetua el ciclo retroalimentativo de emisiones de GEI, ya sea a través del cambio de uso de suelo o la necesidad de transporte a base de combustibles fósiles, establece una dinámica de riesgo en aumento, tanto por los efectos del avance del suelo urbano sobre zonas de interés ambiental como por la ocupación de zonas de mayor exposición a los FEAT, entre otros fenómenos extremos (Samaniego, Montero, & Ruiz-tagle, 2015; Schteingart & Salazar, 2005; Seto et al., 2012).

Considerando la evolución de tales elementos y las consideraciones implícitas en la evolución de la urbanización y de los impactos del cambio climático, existe una incertidumbre importante en la consideración de la exposición futura a los FEAT, lo que implica el uso de herramientas de modelado avanzadas y complejas, que intentan considerar la mayor cantidad de interrelaciones con el fin de aproximarse a un escenario futuro plausible, tanto de las condiciones de la urbanización como de los factores climáticos configurados por el cambio climático antropogénico.

## **1.4 Proyección de las condiciones climáticas y de urbanización; los SSP y los MCG**

Para entender cuáles serán las condiciones futuras tanto de la urbanización como de la variabilidad climática, especialmente en lo referente a los fenómenos extremos de alta temperatura impulsados por el cambio climático, es necesario recurrir a la modelación de tales factores. Dicha modelación nos da un vistazo a las condiciones futuras de ambos elementos y nos permite establecer o vislumbrar zonas de posible riesgo o exposición a los FEAT permitiendo la implementación y el diseño de medidas para su mitigación a través de políticas y acciones enfocadas a la reducción de riesgos. En el caso de México, si bien algunos autores han sugerido esta relación espacial entre la urbanización y la exposición a amenazas climáticas (Puente, 1999), faltan estudios que permitan observar la dirección y magnitud que sigue esta relación en el tiempo, especialmente bajo escenarios de cambio climático; esto hace preponderante la necesidad de evaluar la influencia de los patrones de urbanización y el crecimiento poblacional en la exposición a amenazas ambientales bajo escenarios de cambio climático, así como establecer proyecciones de crecimiento urbano acordes a tales escenarios de cambio climático.

En consecuencia, la consideración de las condiciones futuras resulta de gran relevancia para reducir el riesgo de ocurrencia de desastre, en este caso, reducir la vulnerabilidad de las poblaciones humanas expuestas a los FEAT. En ese contexto, las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP por sus siglas en inglés) son una herramienta para la comprensión del cambio climático y social (Escoto et al., 2017), así como las implicaciones que dicho elemento tiene en la exposición a amenazas climáticas. Por su parte, las condiciones futuras del cambio climático antropogénico, evaluadas a través de modelos climáticos, establece una predicción plausible de los cambios en frecuencia, intensidad y distribución de los FEAT.

Al combinar dichos escenarios de cambio climático a diferentes niveles de concentración de gases de efecto invernadero con diferentes escenarios de cambio social, se puede evaluar el riesgo que las poblaciones sufrirán en distintos periodos de tiempo, y si la exposición, medida tanto en superficie como en el número de personas, a estas amenazas climáticas futuras crece o decrece bajo distintos escenarios o trayectorias socioeconómicas. Esto permite enfocar los

planes, programas y políticas públicas urbanas hacia un modelo de desarrollo que prime la reducción del riesgo y un crecimiento económico y demográfico sostenible.

#### 1.4.1 Los patrones de urbanización futura; las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP)

En ese sentido, las SSP ilustran, a futuro, distintos mundos posibles, sus características principales y los procesos que le subyacen, trazan trayectorias futuras de distintos factores que influyen el desarrollo socioeconómico, son una herramienta idónea para la comprensión del cambio climático y social (Escoto et al., 2017), las SSP ilustran distintos mundos posibles (Cuadro 1), trazan trayectorias futuras de distintos factores, como los patrones o velocidad de urbanización, que influyen el desarrollo socioeconómico bajo narrativas que son descritas en dos dimensiones; los desafíos que las condiciones socioeconómicas imponen a la adaptación y los retos que representan para la mitigación del cambio climático y que implican, cada una de estas SSP, distintos procesos de urbanización.

Cuadro 1. Resumen de supuesto demográficos para cinco SSPs.

	SSP1- <i>Sustentabilidad</i>	SSP2 <i>Mitad del camino</i>	SSP3 <i>Rivalidad regional</i>	SSP4 <i>Desigualdad</i>	SSP5 <i>Desarrollo basado en combustibles fósiles</i>
<b>Crecimiento poblacional</b>					
Alta fertilidad	Bajo	Medio	Alto	Alto	Bajo
Otros de fertilidad baja	Bajo	Medio	Alto	Medio bajo	Bajo
Ricos de baja fertilidad	Medio	Medio	Bajo	Medio bajo	Alto
<b>Nivel de urbanización</b>					
Altos ingresos	Rápido	Moderado	Lento	Moderado	Rápido
Ingreso medio	Rápido	Moderado	Lento	Rápido	Rápido
Bajos ingresos	Rápido	Moderado	Lento	Rápido	Rápido
Patrón espacial	Concentrado	Patrones históricos	Mixto	Mixto	Disperso

**Nota:** Agrupaciones de países por factores que afectan el crecimiento de la población los resultados (fecundidad, mortalidad, migración) se realizan de acuerdo con las condiciones actuales de fecundidad e ingresos, mientras que las agrupaciones para la urbanización los supuestos se basan únicamente en los ingresos corrientes.

Fuente: Jones & O'Neill., 2016

El desarrollo de las SSP y sus narrativas se da bajo una lógica determinada que guía la construcción de los supuestos que les dan forma. Mediante la consideración de componentes cuantitativos como la evolución del crecimiento económico, los niveles de desigualdad futuros, el cambio demográfico y el cambio tecnológico, entre otros elementos, que sirven para la modelación del uso de energía, el cambio en los usos de suelo y las emisiones de GEI

futuros, que permiten, a su vez, la descripción de futuros alternativos de desarrollo socioeconómico y los desafíos que tal desarrollo plantea tanto para la mitigación como para la adaptación de los efectos del cambio climático (Escoto et al., 2017; O'Neill et al., 2015; van Vuuren & Carter, 2013). De igual forma, la descripción de tales futuros sociales pueden combinarse con proyecciones de cambio climático y supuestos de política climática para producir escenarios integrados con el objetivo de explorar la mitigación, adaptación y los impactos residuales del cambio climático en un marco consistente (O'Neill et al., 2015).

Además, los SSP incluyen componentes cualitativos, o narrativas, que describen la evolución de aspectos sociales que son difíciles de cuantificar a futuro, tales como; las instituciones, la estabilidad política, advertencias ambientales, entre otros. Tales elementos, proveen una guía lógica o tendencia para los elementos cuantificables, sus interacciones y los escenarios futuros que se producen<sup>7</sup> (O'Neill et al., 2015; van Vuuren et al., 2017). Considerando lo anterior, es posible destacar, de las SSP, el enfoque descriptivo de las tendencias socioeconómicas a nivel global, la dualidad cuantitativa y cualitativa que subyace a los supuestos desafíos para la mitigación y adaptación, la incorporación de los modelos integrativos globales sobre energía, economía y uso de suelo, la posibilidad de incorporar las políticas y variables climáticas inherentes al cambio climático, que se manejan como un elemento externo, y la amplitud de la información sobre supuestos globales para la elaboración y diseño de escenarios regionales (Escoto et al., 2017; Frame, Lawrence, Ausseil, Reisinger, & Daigneault, 2018; O'Neill et al., 2015; van Vuuren et al., 2017).

---

<sup>7</sup> Es posible observar a detalle los supuestos cuantitativos y cualitativos de cada SSP en O'Neill et al, *"The roads a head: Narratives for shared socioeconomic pathways describing worlds futures in the 21st century"*, 2015.

Figura 6. Panorama de las SSP: espacio de desafíos que identifica cinco escenarios con disimiles retos socioeconómicos de mitigación y adaptación.



Fuente: Tomada de Escoto, Sánchez & Gachuz (2017).

De tal manera, como se puede observar en la Figura 6., los SSP desarrollan cinco niveles o tipos de desarrollo que ilustran combinaciones disimiles de desafíos para la mitigación y adaptación del cambio climático, los cuales son impulsados por un desarrollo diferenciado de los elementos que las conforman, tales como; población, mortalidad, fertilidad, migración, urbanización, educación, inversión en salud, acceso a salud, equidad, crecimiento económico, políticas e instituciones, entre otros (Escoto et al., 2017; O’Neill et al., 2015; van Vuuren et al., 2017). La trayectoria del SSP1 sostiene una narrativa de ‘sustentabilidad’, asumiendo un bajo crecimiento poblacional, alto crecimiento económico, altos niveles de educación, de gobernabilidad, una sociedad globalizada con alta cooperación internacional, un alto desarrollo tecnológico y conciencia una ambiental alta, lo que implica bajos desafíos tanto para la adaptación como para la mitigación del cambio climático. La SSP3 describe un escenario con desafíos altos para la mitigación y para la adaptación del cambio climático, describen una narrativa de ‘fragmentación’, en el que se da un crecimiento poblacional alto, un desarrollo económico bajo, niveles de educación inferiores y una sociedad regionalizada con poca conciencia ambiental. Por su parte, las narrativas de la SSP4 ilustran una clara ‘desigualdad’, la tecnología avanza en los países desarrollados, pero no toda la población se beneficia de ello, lo que implica bajos desafíos para la mitigación y altos desafíos para la adaptación al cambio climático. Por su parte, la SSP5 mantiene una narrativa de bajo crecimiento poblacional, un elevado crecimiento económico y un alto desarrollo humano y

conciencia ambiental, aunque la dependencia en los combustibles fósiles es todavía muy alta, con altos desafíos para la mitigación y bajos desafíos para la adaptación al cambio climático. Por último la SSP2, establece una narrativa intermedia entre la SSP1 y la SSP3 (Escoto et al., 2017), en la cual el crecimiento de la población se estabiliza hacia finales de siglo, continúan las actuales tendencias sociales, económicas y tecnológicas, y las instituciones mundiales y nacionales avanzan lentamente hacia el logro de los objetivos de desarrollo sostenible (ERA4CS, 2020), implicando desafíos moderados tanto para la mitigación como para la adaptación (O'Neill et al., 2015). Cada una de estas SSP supondría, entonces, distintos procesos de urbanización, sin embargo, no contemplan las condiciones climáticas futuras, elemento indispensable para entender la exposición a fenómenos climáticos extremos de los procesos de urbanización modelados. Por ello, es necesario entender a las SSP como un componente de un marco amplio de escenarios de cambio climático, que nos permite visualizar un futuro dentro de una narrativa y como la misma puede modificarse para llegar a distintas condiciones o niveles de emisiones y, por ende, decantar en distintos niveles futuros de temperatura (Escoto et al., 2017).

Como se mencionó, tales narrativas mantienen fuera de su formulación los efectos del cambio climático (Kriegler et al., 2010; citado en Escoto et al., 2017), por lo que la consideración de tales efectos se da a través de la modelación de las condiciones climáticas a futuro, a través de los modelos globales de circulación y de escenarios de emisiones, aunque es posible lograr vincular las narrativas descritas con los escenarios climáticos modelados a través de distintos niveles de trayectorias de emisiones representativas (RCP) que les subyacen<sup>8</sup> (Escoto et al., 2017; Riahi et al., 2016; van Vuuren & Carter, 2013). En este sentido, van Vuuren & Carter (2013) establecen una propuesta de vínculos entre las SSPs y los RCPs (Cuadro 2.), los cuales permiten mantener una correspondencia con los escenarios de cambio climático, específicamente con los escenarios SRES del IPCC, que se ven influenciados por el nivel de forzamiento radiativo, reflejado a través de los RCPs considerados. Tal propuesta sienta las bases para comparaciones con escenarios de cambio climático, tanto a nivel global como a nivel regional.

Por ello, el nivel de forzamiento radiativo es un eje que permite la interfaz entre el motor de las emisiones, representado por las SSP, y los impulsores del cambio climático, al permitir

el desarrollo de una matriz que combina los escenarios climáticos y las SSP a través de la consideración de los RCPs (Escoto et al., 2017; O'Neill et al., 2015, 2014; van Vuuren & Carter, 2013). Si bien los RCP y los SSP son independientes entre sí en términos de sus supuestos, la evaluación de los impactos e implicaciones del cambio climático se logra de su valoración conjunta, dentro de un proceso de arquitectura de matriz de escenarios para lograr la integración de ambos, se logra combinando los RCP con los SSP (conciliando así las proyecciones socioeconómicas y climáticas) logrando, en el siguiente paso del proceso, elaborar caracterizaciones coherentes e integradas del futuro.

Cuadro 2. Arquitectura de matriz de escenarios que muestra las asignaciones SRES sugeridas en SSP (en azul) y en RCP (rojo).

Desafíos para la adaptación:		Bajo	Medio	Alto		
		SSP1	SSP5	SSP2	SSP3	SSP4
Referencia	SRES	B1/A1T	A1FI	B2	A2	[A2]
8.5Wm <sup>-2</sup>	A2/A1FI		A1FI		A2	[A2]
6.0Wm <sup>-2</sup>	B2/A1B			B2		
4.5Wm <sup>-2</sup>	B1	B1		SRES mitigado		
2.6Wm <sup>-2</sup>	[E1]			SRES mitigado		

**Nota:** Las celdas de la matriz tienen entradas (fuente negra) donde el mismo escenario SRES se aproxima a una combinación de un RCP y un SSP. Aquí, no solo se mencionan los escenarios SRES de referencia, sino también el posible posicionamiento de escenarios SRES mitigados. Los corchetes indican asignaciones que son menos robustas. El escenario E1 es un escenario de mitigación derivado de la historia de A1B y conduce a un forzamiento cercano a RCP2.6.

Fuente: Van vuuren & Carter (2017).

El Cuadro 2. presenta una forma de la arquitectura de la matriz de escenarios, las entradas a lo largo de los ejes son sugerencias de cómo los escenarios de SRES podrían mapearse, las entradas en la matriz, en color negro, muestran dónde los escenarios SRES se aproximan a una combinación SSP-RCP (van Vuuren & Carter, 2013). Actualmente los CMIP-6, ya relacionan, dentro de las consideraciones de su estructura interna, los supuestos bajo los que los SSP son desarrollados, permitiendo tanto el entendimiento del sistema climático como del impacto que tiene en las sociedad (O'Neill et al., 2016) sin que se requiera una evaluación a través de una matriz externa.

<sup>8</sup> Un desarrollo más profundo de las concordancias entre los SSP y los modelos de clima futuro se puede encontrar en van Vuuren & Carter, "Climate socioeconomic scenarios for climate change research and assesment: reconciling the new with the old", 2013.

#### *1.4.2 Los cambios futuros en los fenómenos extremos de alta temperatura; la modelación del cambio climático*

Por otro lado, las condiciones de clima extremo son influenciadas por los cambios medios en el clima, especialmente por los impulsados por el cambio climático antropogénico. Por ello, evaluar dichos cambios implica una modelación de las condiciones futuras del clima y de la variabilidad climática. Esta modelación, se corresponde, como se mencionó anteriormente, con los niveles de forzamiento radiativo, representados por los RCP. Tales modelos estiman como se modificará las condiciones físicas de los sistemas terrestres -temperatura, precipitación, acidificación de los océanos, etc.- conforme cambia la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera; que se asocian a un distinto grado de calentamiento global (Seto, Sánchez-Rodríguez, et al., 2010). Asimismo, dichos cambios observados, como el aumento de temperatura y las variaciones regionales de la precipitación, se pueden ligar a eventos extremos, tales como olas de calor, sequías e inundaciones, que tienen un impacto directo sobre el bienestar de las personas. Las tendencias de cambio climático, especialmente las referentes a temperaturas, se han modelado desde hace varias décadas con modelos de cambio climático de los que Syukuro Manabe fue pionero en las décadas de 1970 y 1980 (Molina et al., 2017). Los modelos globales de simulación de cambio climático varían desde simples prototipos de circulación atmosférica hasta otros mucho más elaborados; basados principalmente en modelos atmosféricos u oceánicos que han ido evolucionando a través de la obtención de datos más precisos sobre variables climáticas y el desarrollo de equipos de cómputo mucho más potentes. Los escenarios de cambio climático permiten obtener una aproximación a las condiciones futuras del clima y comprender el posible impacto que tendrán los fenómenos climáticos extremos sobre las trayectorias de urbanización y demás elementos que implica la modelación de las SSP (INECC, 2017; Molina et al., 2017).

Tales escenarios de cambio climático son una representación plausible y simplificada del clima futuro, basados en un conjunto coherente de relaciones climatológicas, construidas para emplearse en el análisis de las potenciales consecuencias del cambio climático, incorporando distintos niveles de trayectorias de concentración representativas o RCP (por sus siglas en inglés) y que sirven de insumo para el análisis de los impactos de tal cambio. (INECC, 2017; Mearns & Hulme, 2001). Los potenciales impactos pueden ser evaluados a

través de la simple comparación del sistema o sector bajo estudio en ausencia y bajo condiciones de cambio climático (Conde, Estrada, Martínez, Sánchez, & Gay, 2010), además es posible analizar tales impactos desde dos escalas; a través de los modelos de circulación general acoplados océano-atmósfera, los cuales son la herramienta básica para hacer estimaciones de proyecciones climáticas, y los modelos climáticos regionales, que proporcionan información más detallada y con mayor resolución espacial del clima regional (PINCC, 2016).

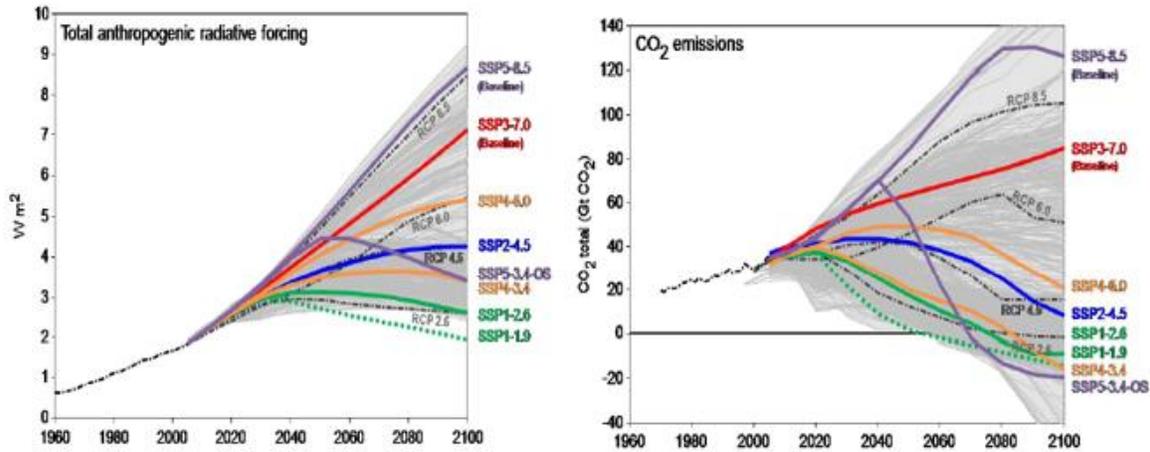
La evolución de los modelos a lo largo de los años ha permitido una mejora importante en cuanto a la precisión de las simulaciones de la temperatura en superficie a escala regional, sin embargo, aún existe un nivel de incertidumbre inherente a la modelación de las condiciones futuras, la cual se debe manejar y considerar dentro de los escenarios modelados. Para la reducción de tal incertidumbre es posible emplear más de un modelo para obtener una comparación o promedio que permita mejorar la predictibilidad de las proyecciones en cuanto a las condiciones climáticas, lo que no es garantía absoluta de que realmente se mejore dicha predictibilidad y se reduzca la incertidumbre (Conde et al., 2010; IPCC, 2013), e incluso, para algunas regiones de menor tamaño, resulta poco confiable la predictibilidad de los modelos climáticos y su incertidumbre aumenta, debido a limitaciones en la resolución del modelo, retroalimentaciones y forzamientos locales, que se producen, posiblemente, por otros factores relevantes para los impactos locales (Knutti et al., 2010).

Por otro lado, la consideración de las trayectorias de concentración representativas o RCP, dentro de los modelos climáticos, permite ligar el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, producto de las actividades humanas, al cambio en los niveles de concentración de GEI en la atmósfera, lo que se traduce en un aumento de la temperatura. Estos escenarios de trayectorias de concentración representativa (RCP), que especifican concentraciones y las emisiones correspondientes, abarcan la gama completa de forzamientos radiativos asociados con los escenarios de emisión<sup>9</sup>, los cuales deben entenderse como etiquetas comparativas representativas del forzamiento asociado con cada escenario, que variarán algo de un modelo a otro (IPCC, 2013; Moss et al., 2010).

---

<sup>9</sup> Para un mayor detalle en cuanto a las diferencias entre los modelos, es recomendable revisar en IPCC, “*Climate change: The Physical Science Basis*”, 2013

Figura 7. Emisiones de CO<sub>2</sub> y forzamiento radiativo antropogénico para el siglo 21, consistentes con el enfoque de CMIP5, ligadas a las narrativas de las SSP.



Fuente: tomado de O'Neill et al., 2016.

Ha habido progresos notables en la evaluación de los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, incluso a nivel regional, lo que establece la posibilidad de evaluar las condiciones de riesgo futuro para la sociedad, incluso, relacionando las retroalimentaciones surgidas de los elementos que permiten el desarrollo socioeconómico de tales sociedades, a través de las trayectorias de concentración representativas (RCP)(IPCC, 2013).

## 1.5 Conclusiones

Derivado de lo anterior, queda claro que la exposición urbana a los FEAT es producto de la interacción de dos elementos fundamentales; la variabilidad climática y los cambios en la distribución de la urbanización. Ambos elementos se encuentran en constante evolución y reconfiguración, la variabilidad climática se encuentra influenciada por los efectos del incremento de la temperatura media del planeta impulsada por el cambio climático antropogénico, el cual es producto de la creciente emisión de gases de efecto invernadero que el modelo de desarrollo económico produce, modelo de desarrollo que configura, de igual manera, la morfología, los patrones distributivos y el nivel de concentración poblacional de la urbanización.

Por ello, la capacidad de evaluar la evolución de la exposición a los fenómenos climáticos extremos, como los FEAT, pasa por el entendimiento de la evolución en la magnitud del cambio en los factores climáticos, tales como las temperaturas máximas, y la intensidad del

cambio demográfico y estructural de la urbanización. La evaluación de tales cambios se logra, por un lado, a través del análisis del incremento futuro en la intensidad, frecuencia y distribución de las temperaturas máximas mediante escenarios de cambio climático que modelan el posible comportamiento futuro de los factores climáticos y, por el otro, del análisis del crecimiento de la población y suelo urbanos, a través del entendimiento del incremento y los patrones de distribución futuros que se moldean, para esta investigación, a través de los supuestos que subyacen en las trayectorias socioeconómicas compartidas. Ambas trayectorias evolutivas, la de la urbanización y la del clima, tienen un punto de encuentro en las emisiones de gases de efecto invernadero, las cuales se suponen en los modelos climáticos como detonantes de las condiciones futuras del factor evaluado y en las SSPs como producto de un modelo de desarrollo posible que conlleva una serie de características socioeconómicas, es decir, que vislumbra un mundo determinado.

Aunado a lo anterior, además de los impactos presentes que las olas de calor producen sobre la población, la necesidad de analizar los cambios en la exposición a los eventos de calor extremo proviene tanto del incremento en las temperaturas como del incremento de los patrones e intensidad de la urbanización que se esperan en las próximas décadas. Se prevé un futuro donde las olas de calor en las ciudades aumenten en intensidad, frecuencia y distribución, tendencia en la que algunas de las ciudades mexicanas podrían encontrarse, conformando un tablero de exposición a los FEAT en el que se recrudezcan las afectaciones a la población más vulnerable.

## ***Capítulo 2. La distribución de las temperaturas máximas como elemento determinante de la exposición potencial a los FEAT***

### **2.1 Introducción**

La exposición a los fenómenos extremos de alta temperatura (FEAT) se refiere a la presencia de personas, infraestructura o activos, de índole diversa, en lugares que podrían verse afectados negativamente por temperaturas atípicas ubicadas en el umbral cercano al extremo superior de los valores de temperatura (IPCC, 2012), exposición en la que confluyen factores y elementos tanto naturales como socioeconómicos, lo que permite observar cómo se combinan las incertidumbres socioeconómicas y climáticas para dar forma a los patrones, presentes y futuros, de tal exposición a los FEAT (Jones et al., 2015, 2018). En este sentido, tanto los patrones climáticos, impulsados por el cambio climático, como la evolución de las ciudades, y su estructura demográfica, interactúan para conformar un tablero de exposición a los FEAT (Jones et al., 2015) . Sin embargo, también es posible observar un efecto independiente de la distribución, frecuencia e intensidad que presentan los FEAT y las temperaturas máximas, que son el indicador empleado en la presente investigación para observar la posible ocurrencia de los fenómenos extremos de alta temperatura, que establece una exposición potencial a través de sus variaciones espaciales.

Tales cambios son impulsados por el incremento de la temperatura media global, por causa del cambio climático, y las características regionales del territorio. Por lo cual es necesario entender la dinámica que da forma e impulsa el cambio climático antropogénico, la razón por la cual se dan tales modificaciones en la variabilidad climática y, por ende, en la estructura de los FEAT. Tal estructura, para la presente investigación, es vista a través de los cambios en la distribución, intensidad y frecuencia de dos grupos de temperaturas máximas (Cuadro 4) que pueden ser consideradas como una amenaza potencial (CENAPRED, 2015) tanto por presencia sostenida en el tiempo como por las afectaciones que un único evento puede desencadenar (Anderson & Bell, 2009; Barnett et al., 2010; Chen et al., 2015; Bryan Jones et al., 2015, 2018).

Por ello, el presente capítulo aborda los mecanismos que establecen o impulsan el incremento en las temperaturas globales y, a su vez, el incremento en la intensidad, frecuencia, duración

y distribución de los FEAT para México, a través del análisis del cambio que se da en el patrón histórico, de 1950 a 2000, en la distribución e intensidad de las temperaturas máximas mensuales en México, para el periodo que va de mayo a agosto, tomando en consideración un escenario de cambio climático HADGEM2ES, desarrollado por UNIATMOS, con RCP8.5, que marca un cambio en la temperatura media de 2°C y es congruente con las emisiones de GEI que se dan actualmente, para dos horizontes que van de 2015 a 2035 y de 2045 a 2069.

## **2.2 El factor climático como impulsor de la exposición a fenómenos extremos de alta temperatura**

Como se ha mencionado, el cambio climático antropogénico es un proceso que impulsa la exposición a fenómenos extremos de alta temperatura al modificar los patrones climáticos presentes debido al aumento de temperatura que lo acompaña y su influencia sobre diversos procesos que determinan el clima. Dicho proceso, el del cambio climático, se encuentra influenciado por la modificación en la concentración de los gases de efecto invernadero (GEI) que se da de forma natural, modificación que se manifiesta debido, principalmente, a la emisión de GEI provenientes de fuentes antropogénicas, ligadas a diversos procesos de desarrollo socioeconómicos, siendo el más importante el consumo de combustibles (Molina, IPCC).

Las emisiones de GEI aumentan la retención de calor por parte de la atmósfera conforme su concentración se incrementa. Las concentraciones atmosféricas de estos gases de efecto invernadero, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), han aumentado desde 1750 debido a la actividad humana, alcanzando, en 2011, las 391 ppm, 1 803 ppm y 324 ppm, respectivamente para cada tipo de GEI, valores que exceden los niveles preindustriales en, aproximadamente, un 40%, un 150% y un 20% de forma respectiva. Este incremento en la concentración de los GEI en la atmósfera impulsa un forzamiento radiativo, medida que constituye una aproximación de cómo el equilibrio del sistema atmosférico de la Tierra se comporta cuando se alteran los factores que afectan el clima (IPCC, 2013) y, con él, se presenta un incremento en la temperatura de la tierra, al ser dicho forzamiento positivo (IPCC, 2013,2015,2019; Molina et al., 2017). Ese incremento en la temperatura repercute en

la distribución, intensidad y frecuencia de los fenómenos climáticos extremos de alta temperatura, coadyuvando a establecer nuevos patrones de exposición que impactan a los sistemas socioeconómicos en forma diferenciada, dependiendo tanto de su vulnerabilidad como de su capacidad adaptativa, elementos que también se encuentran en constante cambio.

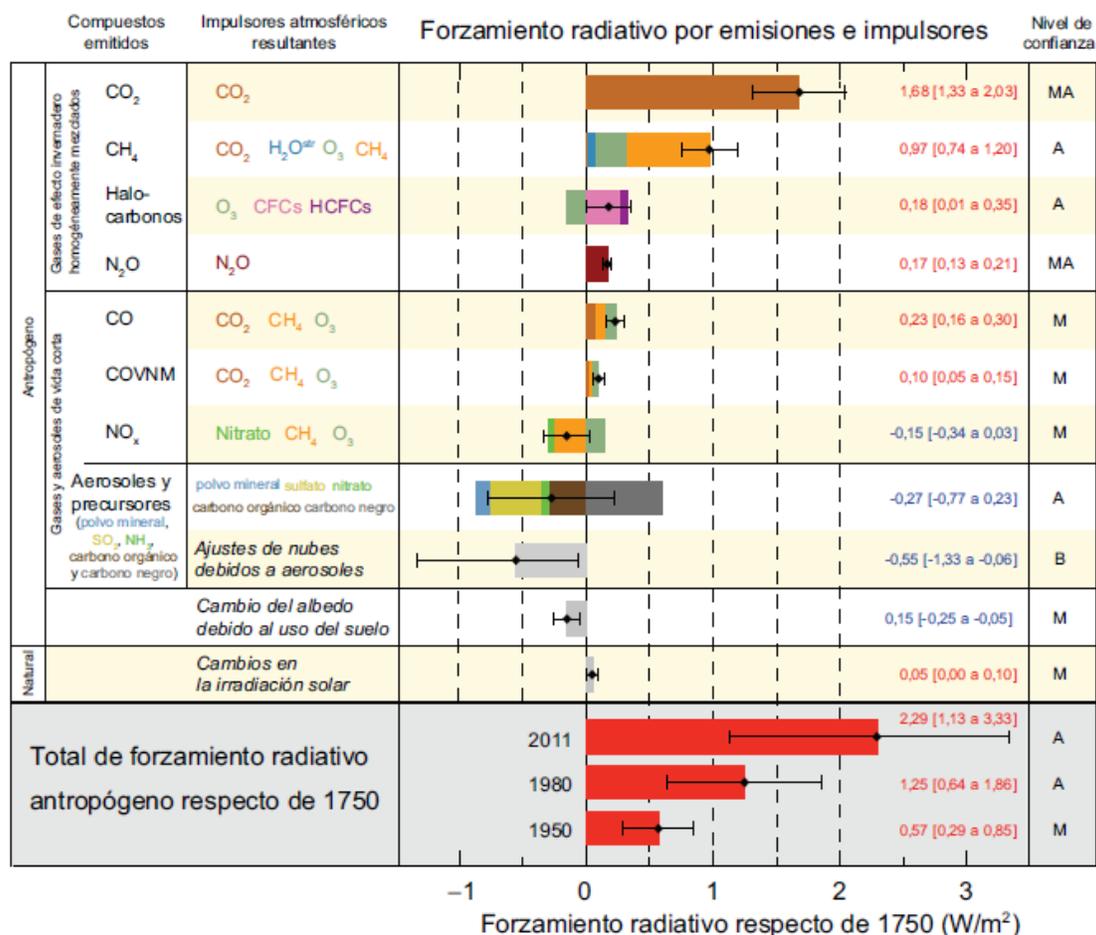
### *2.2.1 El incremento de los gases de efecto invernadero y su relación con los fenómenos extremos de alta temperatura*

Retomando la relación del incremento de origen antropogénico de los GEI y su papel en el aumento en los fenómenos extremos de alta temperatura, es necesario esclarecer el papel de los primeros en la dinámica del clima del planeta y como las actividades humanas contribuyen a la modificación de tal dinámica. En este sentido, las actividades humanas impulsan cambios en la atmósfera terrestre al contribuir al aumento en la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero y aerosoles, principalmente, teniendo como mayor contribución la proveniente de la combustión de combustibles fósiles, los cuales liberan dióxido de carbono en la atmósfera. En general, los gases de efecto invernadero y los aerosoles alteran la radiación solar entrante y la radiación (térmica) infrarroja saliente, que forman parte del equilibrio energético de la Tierra, alteración que modifica las condiciones climáticas, por ello, la variación de la abundancia de estos gases y partículas en la atmósfera conduce, dependiendo si se da un aumento o una disminución de los mismos, a un calentamiento o enfriamiento del sistema climático. Desde el comienzo de la era industrial (alrededor de 1750), el efecto general de las actividades humanas sobre el clima ha decantado en un calentamiento o incremento de la temperatura global media, debido, precisamente, a que las emisiones de GEI siguen una tendencia de crecimiento, cuyo impacto supera con creces las contribuciones de los procesos naturales, tales como cambios solares y erupciones volcánicas, al menos en esta era (Molina, 2015; IPCC, 2007, 2013, 2018, 2019).

Las actividades humanas tienen como consecuencia la emisión, principalmente, de cuatro gases de efecto invernadero; el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y los halocarbonos (grupo de gases que contienen flúor, cloro y bromo). Su constante emisión provoca una acumulación en la atmósfera, lo que conlleva un incremento de sus concentraciones con el paso del tiempo, además de una permanencia disímil en la atmósfera,

lo que refuerza el efecto acumulativo. Desde la era industrial se han producido incrementos significativos de los GEI mencionados, incrementos que se atribuyen a las actividades humanas (IPCC, 2007, 2013, 208, 2019), como se observa en la Figura 8.

Figura 8. Estimaciones de forzamiento radiativo en 2011 respecto de 1750, e incertidumbres agregadas de los principales impulsores del cambio climático.



**Nota:** Los valores son el forzamiento radiativo medio global<sup>14</sup>, dividido de acuerdo con los compuestos emitidos o procesos que resultan en una combinación de impulsores. Las mejores estimaciones del forzamiento radiativo neto se indican mediante rombos negros con los correspondientes intervalos de incertidumbre; los valores numéricos se indican a la derecha de la figura, junto con el nivel de confianza en el forzamiento neto (MA: muy alto, A: alto, M: medio, B: bajo, MB: muy bajo).

Fuente: Tomado de Cambio climático; Bases físicas, IPCC, 2013.

La influencia de un factor, como la liberación prologada de los GEI, que puede producir una modificación en las características normales del clima, se evalúa en términos de su forzamiento radiativo. En este sentido, el incremento de la concentración de los GEI produce un forzamiento radiativo positivo, rompiendo el balance energético de la atmosfera terrestre,

lo que decanta en una mayor retención de calor y un aumento de la temperatura media sostenido.

El término radiativo proviene del hecho de que estos factores cambian el equilibrio entre la radiación solar entrante y la radiación infrarroja saliente dentro de la atmósfera terrestre (IPCC, 2013). El equilibrio radiativo hace referencia a un nivel o rango normal, sostenido en el tiempo, de la temperatura de la superficie terrestre, el término forzamiento indica que el equilibrio radiativo de la Tierra está siendo separado de su estado normal (IPCC, 2007, 2013, 2018, 2019).

Cuando el forzamiento radiativo es positivo, se produce un calentamiento en superficie, y cuando es negativo, un enfriamiento. Las sustancias y los procesos naturales y antropógenos que alteran el balance energético de la Tierra son impulsores del cambio climático, el forzamiento radiativo permite cuantificar las modificaciones en los flujos de energía provocados por los cambios producidos en estos impulsores y, por ende, evaluar los posibles cambios en temperatura atribuibles a tales actividades (IPCC, 2007, 2013).

Además, algunos de los compuestos emitidos afectan a la concentración atmosférica de otras sustancias, por lo que el forzamiento radiativo puede señalarse mediante cambios en la concentración de cada sustancia o por la emisión de un componente, lo que permite observar una relación más directa con la actividad humana, incluyendo las contribuciones de todas las sustancias afectadas por esa emisión, es decir, su retroalimentación en la concentración de cada sustancia o GEI (IPCC, 2013, 2019).

Todos estos forzamientos radiativos ocurren debido a uno o más factores que afectan el clima y se asocian a actividades humanas o procesos naturales. Desde 1750 las actividades humanas han impulsado cambios significativos en la concentración de los gases de larga vida, como el ozono, el vapor de agua, el albedo de la superficie, los aerosoles y las estelas de condensación. El único incremento atribuible a fuentes o impulsores naturales de importancia ocurrió en el caso de la irradiancia solar (IPCC, 2007).

Con la intención de analizar a futuro el aumento o disminución de la concentración de los GEI en la atmósfera, tanto las de origen natural como las de origen antropogénico, considerando además las posibles acciones de mitigación implementadas, se emplean las

trayectorias de concentración representativas o RCP (*Representative Concentration Pathways*), por sus siglas en inglés. Estas son, según el IPCC (2013, 2018, 2019) escenarios que incorporan series de emisiones y concentraciones, en el tiempo, de la gama completa de gases de efecto invernadero (GEI), aerosoles y gases químicamente activos, además del uso de la tierra y la cubierta terrestre. Cada RCP ofrece uno de los numerosos escenarios posibles que conducirían a un forzamiento radiativo específico y a un aumento de temperatura determinado por el mismo (Cuadro 3).

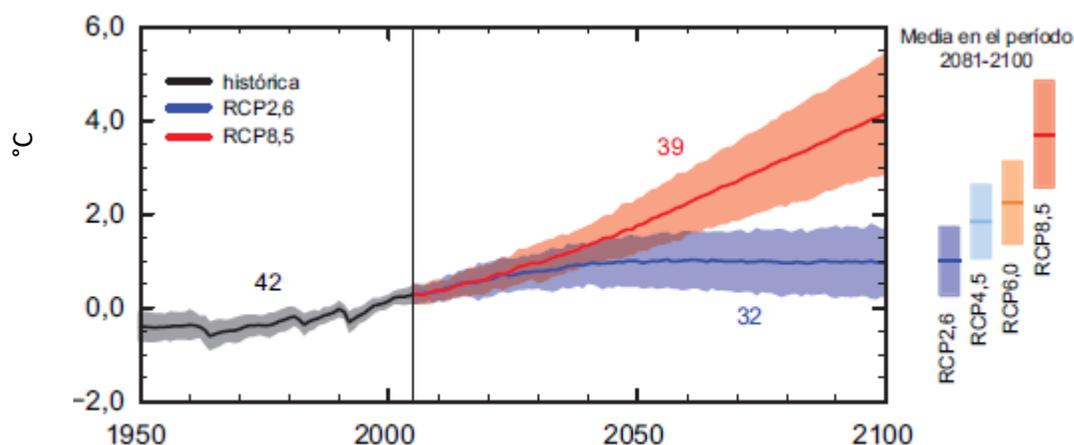
*Cuadro 3. Proyección del cambio en la temperatura media global del aire en la superficie y de la elevación media mundial del nivel del mar para mediados y finales del siglo XXI, en relación con el período de referencia 1986-2005.*

	Escenario	2046 - 2065		2081 - 2100	
		Media	Rango probable	Media	Rango Probable
Cambio en la temperatura media global del aire en superficie (en °C)	RCP 2.6	1.0	0.4 a 1.6	1.0	0.3 a 1.7
	RCP 4.5	1.4	0.9 a 2.0	1.8	1.1 a 2.6
	RCP 6.0	1.3	0.8 a 1.8	2.2	1.4 a 3.1
	RCP 8.5	2.0	1.4 a 2.6	3.7	2.6 a 4.8

Fuente: IPCC, 2013

Según el IPCC (2013, 2019), tales escenarios dilucidan una evolución de las emisiones que produce un forzamiento radiativo específico y, por ende, un aumento de la temperatura media determinado. En cuanto al RCP 2.6, es una trayectoria en la que el forzamiento radiativo alcanza el valor máximo en aproximadamente  $3 \text{ Wm}^{-2}$  y posteriormente disminuye, limitándose en  $2.6 \text{ Wm}^{-2}$  en 2100. Los RCP 4.5 y RCP 6.0, son trayectorias de estabilización intermedias en las cuales el forzamiento radiativo se limita a aproximadamente  $4.5 \text{ Wm}^{-2}$ . En cuanto al RCP 8.5, se vislumbra una trayectoria alta que alcanza valores superiores a  $8.5 \text{ Wm}^{-2}$  en 2100.

Figura 9. Cambio en la temperatura media global en superficie.



Fuente: IPCC, 2013.

Tales trayectorias implican, de manera general, un probable aumento de la temperatura media global en superficie para el periodo que va de 2081 a 2100, en relación con la temperatura histórica registrada de 1986 a 2005, situando los rangos de incremento, para cada RCP, de la siguiente manera; para el RCP 2.6 el incremento en la temperatura media es de 0,3 °C a 1,7 °C; de 1,1 °C a 2,6 °C para el RCP 4.5; para el RCP 6.0 es de 1,4 °C a 3,1 °C; y para el RCP 8.5 es de 2,6 °C a 4,8 °C (IPCC, 2013). Sin embargo, los modelos climáticos prevén diferencias importantes en las características regionales del clima y el incremento de las temperaturas previsto en cada una de ellas, además de una diferencia robusta entre el momento actual, un calentamiento global de 1,5 °C, y uno de 2°C. Pese a ello, tales diferencias comprenden un aumento de la temperatura media en la mayoría de las regiones terrestres y oceánicas, además de que es prácticamente seguro que se produzcan temperaturas extremas calientes más frecuentes y de mayor intensidad, en escalas temporales diarias y estacionales, conforme vaya aumentando la temperatura media global. Ello decanta en que la presencia de las olas de calor se dé con mayor frecuencia, sean más duraderas y que su distribución en el territorio se incremente (IPCC, 2013, 2019).

### 2.2.2 El incremento de los fenómenos extremos de altas temperatura; las olas de calor

El mencionado incremento en la temperatura media impulsa un aumento en la intensidad, frecuencia, duración y distribución de los FEAT, tanto olas de calor como sequias e incendios forestales. Es altamente probable que las olas de calor serán más frecuentes e intensas en el futuro. La mayoría de los modelos climáticos y la mayoría de los escenarios de emisiones

establecen, para Europa, condiciones similares a las que se presentaron durante el verano de 2003, donde las olas de calor que provocaron más de 70,000 muertes (Hallegatte, 2014).

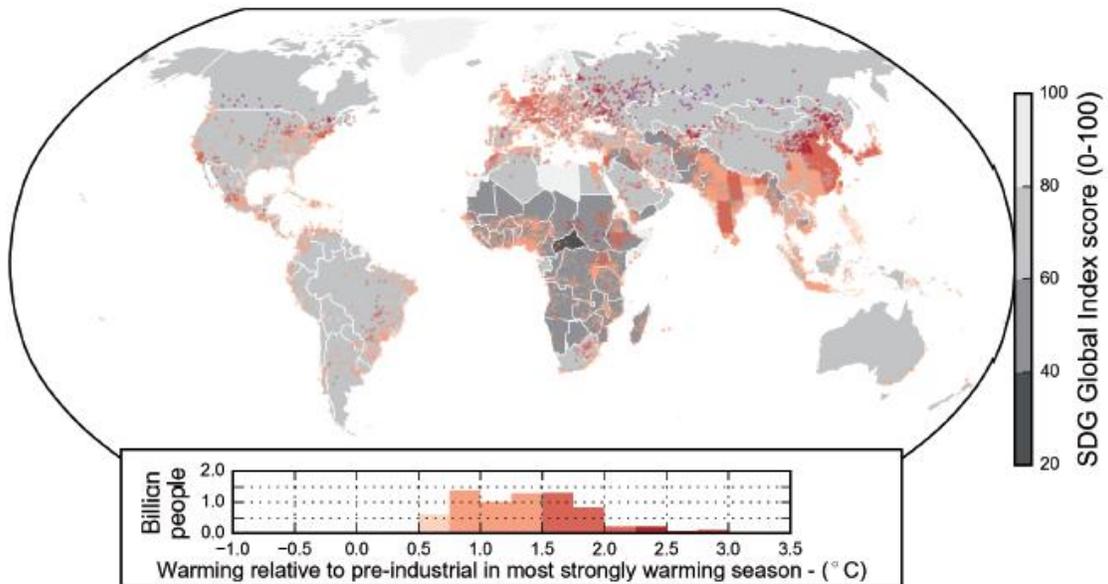
La mencionada variabilidad impulsada por el cambio climático provoca fluctuaciones extremas en la temperatura, tanto en los límites superiores como en los inferiores, que agravan una variedad de condiciones en los contaminantes y en la salud, provocando cambios nocivos para las poblaciones humanas, adicionales a las ya existentes. En el caso de las olas de calor, tal aumento en su frecuencia e intensidad coadyuva al incremento de las muertes relacionadas con las altas temperaturas, especialmente en las poblaciones de áreas urbanas de alta densidad con viviendas deficientes, en el caso de la ola de calor en Francia, en 2003, la mayoría de las víctimas eran ancianos, mujeres y personas pobres que vivían en las zonas urbanas de París. Además de ello, los FEAT también contribuyen a un aumento de la frecuencia de los incendios, incluidas las áreas forestales contiguas a los centros urbanos, lo que implica un riesgo adicional impulsado por el aumento en las temperaturas extremas (Baker, 2012).

No se observa, ni se espera, que el aumento en la temperatura media del planeta y la presencia de temperaturas altas extremas sea espacial o estacionalmente uniforme, lo que se da es una variación en la magnitud de las temperaturas, tanto medias como extremas, según las diferencias espaciales y estacionales, con muchas y variadas ubicaciones, además de que las estaciones individuales pueden ser sustancialmente más cálidas que los cambios esperados en el promedio a largo plazo (IPCC, 2019). La Figura 10., tomada del reporte de '*Calentamiento global de 1.5°C*' del IPCC (2019), muestra el calentamiento estimado para la temporada más cálida en una ubicación determinada entre los períodos 1850-1900 y 2006-2015, durante los cuales las temperaturas promedio globales aumentaron 0.91 °C en este conjunto de datos y 0.87 °C en el promedio de conjuntos de datos múltiples<sup>10</sup>, la densidad de puntos indica la población (en 2010), la capa subyacente muestra las puntuaciones del índice global de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) nacionales que indican el desempeño en los 17 ODS. El histograma muestra la población (en 2010) que vive en regiones que experimentan diferentes niveles de calentamiento (en incrementos de 0.25 °C).

---

<sup>10</sup> Los datos a los que se refiere son los históricos observados en diferentes fuentes de información y bases de datos. Para mayor detalle consultar el reporte de '*Calentamiento global de 1.5°C*' del IPCC de 2019.

Figura 10. Experiencia humana del calentamiento actual; calentamiento relativo a la era preindustrial en la temporada de calor de mayor intensidad.

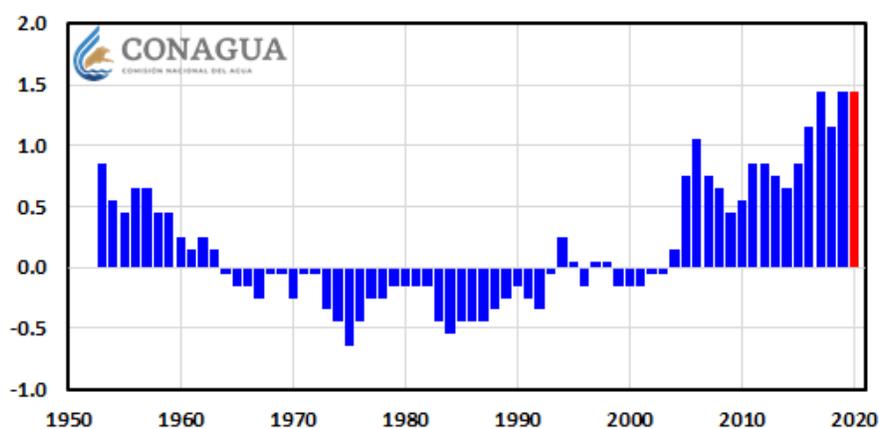


Fuente: IPCC, 2019.

Los días calurosos, las noches calurosas y las olas de calor se han vuelto más frecuentes debido al calentamiento global, y con ello el riesgo de morbilidad y mortalidad inducidas por el calor aumentará. Tal incremento en las muertes provocadas por el aumento, tanto de intensidad como frecuencia y duración, de las olas de calor crece a un ritmo alarmante. Las ciudades experimentan olas de calor más intensas debido a poblaciones más densas, mayor concentración de edificaciones, mayor tráfico, vegetación escasa y la variabilidad climática impulsada por el cambio climático, lo que a su vez, en el caso de las ciudades, aumenta la ocurrencia del efecto catalizador de las ondas de calor, conocido como efecto de “isla de calor urbano”, lo que resultará en un daño localmente agudo para la salud humana (Corburn 2009 citado en Hallegatte, 2014). Aunado a lo anterior, la población de menores recursos en las zonas urbanas se ven particularmente afectados, ya que no pueden evitar la exposición permaneciendo en el interior en un entorno fresco o con aire acondicionado, de igual forma, el calor es un riesgo ocupacional para los residentes de bajos ingresos que dependen de las actividades laborales al aire libre, como la construcción, la venta y el transporte, ya que una mayor exposición puede provocar deshidratación, insolación y, en los casos más graves, la muerte (Hallegatte, 2014).

Como se mencionó, los fenómenos extremos de alta temperatura, entendidos como olas de calor, toman gran relevancia en las urbes debido tanto a la alta exposición que potencialmente se puede dar como al efecto catalizador de las olas de calor, conocido como ‘isla de calor’, que incrementa el riesgo a la salud de la población humana que en ellas habita e incluso impulsa la mortalidad de la población vulnerable. En este sentido, la dinámica de las ciudades mexicanas ha mostrado procesos de expansión física, concentración de equipamiento urbano y de población que dan cuenta de la conformación de un país eminentemente urbano (SUN, 2018), aunque este crecimiento se da, principalmente, a través de mecanismos que impulsan la consolidación de asentamientos informales y carentes de planeación, que se expanden en zonas de riesgo exponiendo a las poblaciones más vulnerables al desastre.

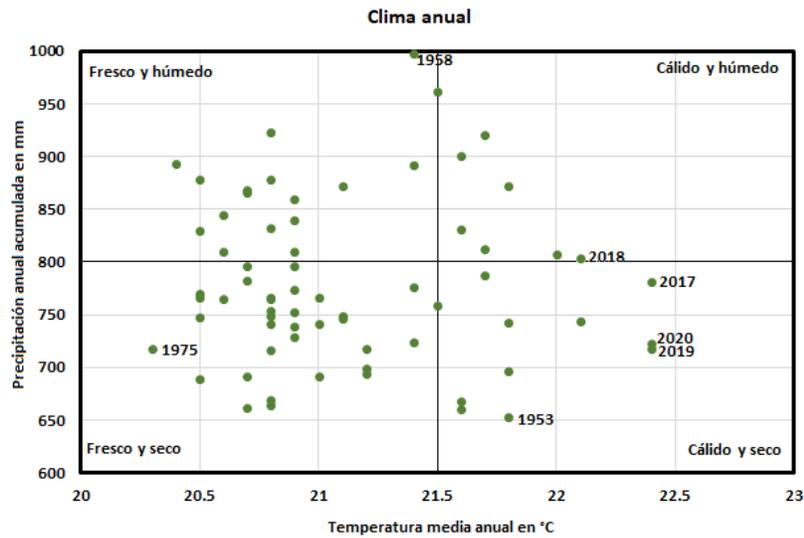
*Figura 11. Anomalía de la temperatura media anual en grados Celsius (°C), la barra en color rojo corresponde a la anomalía nacional estimada en 2020.*



Fuente: CONAGUA, 2020

Aunado a ello, en México, el año 2020 continúa con la tendencia en el aumento de temperatura que se observa desde 2004, contabilizando, a partir de ese año, diecisiete años con anomalías en las que la temperatura media nacional se ubica por arriba del promedio climatológico que va de 1981 a 2010 (Figura 11 y Figura 12), situando al 2020 dentro de la categoría de los años más cálidos y secos, como se muestra en la Figura 5, en la que también se observan los años extremos a partir de 1953 (CONAGUA, 2021). Tal tendencia en el incremento de la temperatura media anual va acompañada de un aumento en la frecuencia, intensidad y área de distribución de los FEAT, aumento que resulta de interés para el desarrollo de la presente investigación.

Figura 12. Clasificación del clima respecto a la precipitación y temperatura media anual a nivel nacional.



Fuente: CONAGUA, 2021

### 2.3 Los fenómenos extremos de alta temperatura en México; ¿Cómo evaluar el aumento de las temperaturas máximas?

Si bien México contribuye tan solo con el 1.4% de las emisiones globales de GEI, es un país altamente vulnerable a los efectos del cambio climático (INECC, 2018), para 2013, cerca del 10.2% de la población presentaba una alta o muy alta exposición a algún riesgo climático (Monterroso & Conde, 2015), y de acuerdo con Delgado Ramos, De Luca, & Vazquez (2016), el 15% del territorio mexicano, el 68% de la población y el 71% del PIB están expuestos a efectos adversos del cambio climático. De un total de 2,457 municipalidades, 824 municipios están expuestos a inundaciones; 283 municipios a deslizamientos de tierra; 1,202 a sequías agrícolas; 584 municipios se encuentran expuestos a una disminución de las precipitaciones; 545 municipios a una disminución de la productividad alimentaria asociada a cambios de temperatura; 1,020 municipios se encuentran expuestos a olas de calor; y 475 municipios tienen un grado de exposición a la transmisión de enfermedades como las tropicales, como la malaria, el cólera, el zika y la fiebre chikungunya.

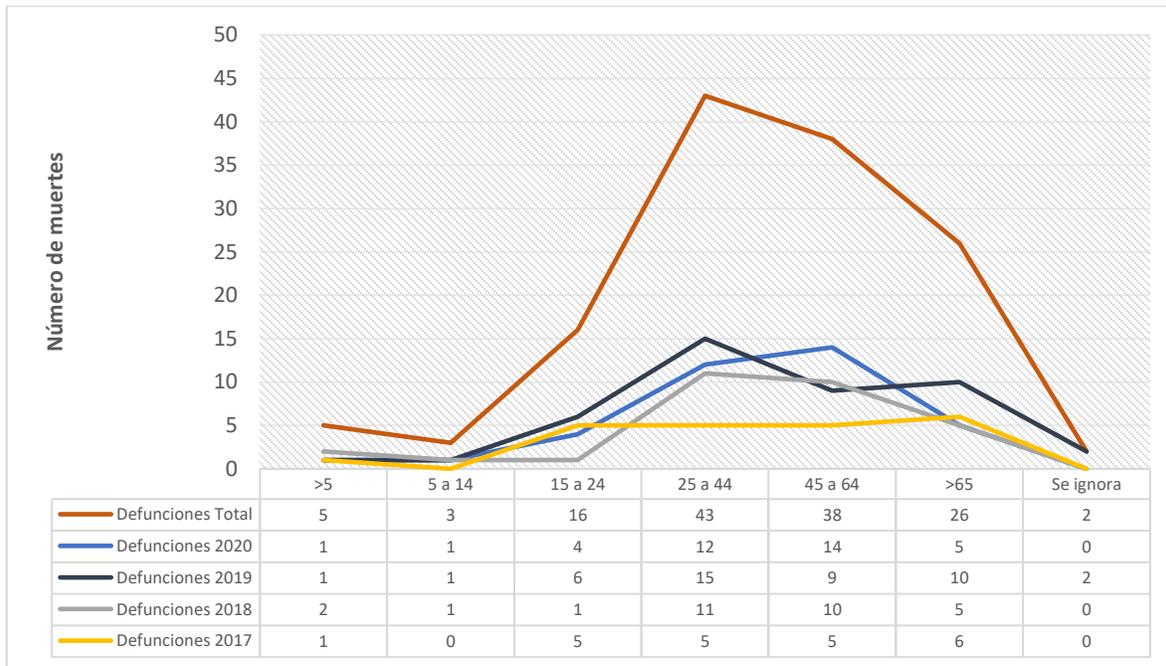
Estos dos últimos, la exposición a olas de calor y a enfermedades tropicales, se verán impulsadas por el aumento en la temperatura media que se dará en un contexto de cambio

climático. En este sentido, las temperaturas máximas en el país establecen un patrón de riesgo para la población más vulnerable. La edad, la condición socioeconómica y la existencia previa de enfermedades cardiovasculares son algunos de los elementos que incrementan el grado de vulnerabilidad a los eventos extremos de alta temperatura (Chen et al., 2015; Hondula et al., 2014), aunado a ello, la carencia de planeación e infraestructura en los centros de población y el creciente aumento de la distribución de temperaturas extremas incrementa la exposición potencial a los FEAT en el país.

### *2.3.1 Los Fenómenos climáticos extremos de alta temperatura y su importancia en el país*

Como se ha mencionado, los FEAT pueden agrupar distintos fenómenos, como olas de calor, incendios forestales o sequías, sin embargo, la presente investigación se centra en las olas de calor debido a la importancia que tiene para la población de las urbes mexicanas, haciendo uso del término FEAT como un equivalente a tal fenómeno. Partiendo de ello, la temporada de calor en México comienza en la semana 12 del año y culmina en la semana 40 (DGE, 2021), sin embargo, la distribución de los fenómenos extremos de alta temperatura y su intensidad varían según los meses del año, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) identifica como los meses de mayor ocurrencia de días por encima de los 40°C a los periodos que van de abril a junio y de julio a septiembre, encontrando los picos de temperatura más elevados entre los meses de junio a agosto (CONAGUA, 2018, 2019, 2021).

Figura 13. Defunciones por temperaturas extremas de 2017 a 2020.



Fuente: Elaboración propia con datos de la DGE (2021)

De igual forma, las afectaciones que produce dicha exposición a altas temperaturas varían según la vulnerabilidad de la población y el rango de temperatura alcanzado. Según Jones et al. (2015:2016) los eventos de alta temperatura requieren de establecer un límite o umbral que, de manera general, permita analizar las posibles afectaciones a un grupo amplio de la población. Como muestra la Figura 13., el mayor número de decesos totales por temperaturas extremas, entre los años 2017 y 2020, se observa para los grupos de población que superan los 25 años de edad, teniendo variaciones en los cuatro años considerados; para 2017 el grupo que mayores defunciones presenta es el de más de '65' años, para 2018 es el de '25 a 44' años, para 2019 es el grupo de '45 a 64' años, mientras que para 2020 el grupo que va de los 25 a los 44 años vuelve a ser el que muestra mayor mortalidad relacionada a las temperaturas extremas. Aunado a ello, los meses en los que se presentan mayores afectaciones a la población, desde golpes de calor, agotamiento por calor, entre otros, van de mayo a septiembre mientras que el periodo en el que se registran un mayor número de decesos son los meses van de mayo a agosto (DGE, 2018, 2019, 2020), aunque con variaciones importantes según el año que se tome en cuenta (Figura 13.).

En este sentido, la consideración de los límites de temperatura que se relacionan con el aumento de muertes por olas de calor establecen una variación importante en los efectos según la vulnerabilidad de la población que se considere (Anderson & Bell, 2009; Barnett et al., 2010; Chen et al., 2015), sin que se dé una definición o medida adecuada que sea capaz de englobar todos los casos y características, tanto de la población como del evento de temperatura extrema que se presenta (Barnett et al., 2010), aunque una de las medias más empleadas en las que es posible encontrar afectaciones sobre la población expuesta, aunque puede subestimar el número de muertes relacionadas a este umbral (Chen et al., 2015), se da en la consideración de un límite de temperatura de 35°C o superior, sostenido por tres días consecutivos o más (Chen et al., 2015; Bryan Jones et al., 2015, 2018), aunque ese mismo límite, el de 35°C, también puede generar efectos adversos a través de la ocurrencia de un evento único, es decir, si consideramos su ocurrencia en un solo día (Anderson & Bell, 2011; Jones et al., 2015).

Ante la carencia de datos diarios de temperaturas máximas que permitan observar a detalle la duración de las temperaturas por encima de un umbral o límite específico, y con el objetivo de vislumbrar las oscilaciones climáticas y los modos de variabilidad climática que podrían propiciarlas las olas de calor (UNAM, 2020), la presente investigación emplea el aumento de las temperaturas máximas promedio mensuales, en cuanto a intensidad y distribución, como indicador de la ocurrencia de los FEAT; en específico de las olas de calor que impactan al país y a sus centros urbanos. En México, el CENAPRED (2015) establece 5 grupos de temperatura que implican un nivel de peligro en cuanto a las afectaciones que las olas de calor producen; peligro bajo, que va de los 26 a los 29.9°C, peligro medio, de los 30 a 33.9°C, peligro alto, que va de los 34 a los 39.9°C, y peligro muy alto, que agrupa a las temperaturas mayores a los 40°C.

Para esta investigación se plantearon dos grupos de temperaturas de interés, que si bien no coinciden con los grupos planteados por CENAPRED (2015), si mantienen cierto nivel de concordancia con los grupos de alta peligrosidad (alto y muy alto), además de que, se busca incluir los criterios derivados de otras investigaciones para delimitar las temperaturas que representan un riesgo para a los distintos grupos que componen la población, considerando un nivel mínimo para la comprensión de los FEAT, con lo que se establecen dos niveles de

peligro a partir de la media de las temperaturas máximas obtenidas de la base de datos de IPUMS TERRA (2021). Como es posible observar en el Cuadro 4, se analizan dos grupos de temperaturas máximas; el grupo uno establece un umbral de temperaturas superiores a los 35.0°C y el grupo dos, que refiere a las temperaturas que están dos desviaciones estándar por encima de la media histórica de temperaturas máximas nacional, engloba las temperaturas máximas que se encuentran por encima de los 38.9°C.

*Cuadro 4. Grupos de temperaturas de interés.*

<b>Grupo</b>	<b>Rango</b>
1	>35.0°C
2	>38.9°C

Fuente: elaboración propia

Considerando los datos de la DGE (2021), CONAGUA (2018,2019,2021) y los datos de IPUMS TERRA (2021), que muestran la distribución espacial de las temperaturas máximas durante el periodo de 1950 al 2000, se tomaron los meses de mayo, junio, julio y agosto para el análisis de la exposición a temperaturas extremas. Además, es necesario resaltar que para la determinación de los rangos de los grupos de temperaturas máximas de interés, así como su distribución histórica, además de los criterios mencionados anteriormente, se empleó el análisis de los datos espaciales proporcionados por IPUMS TERRA (2021), los cuales desarrollan un promedio mensual para las temperaturas máximas que van de 1950 a 2000, es decir, provee un archivo ráster en el que se promedian las temperaturas de cada mes del año para el periodo de 1950 a 2000. De tales promedios, se seleccionaron, por el criterio antes descrito, los meses de mayo, junio, julio y agosto, con la intención de delimitar las temperaturas máximas en nuestro periodo base, que sirven para comprender la situación presente de las temperaturas máximas, y por ende de los FEAT, y el cambio proyectado por el escenario de cambio climático.

Si bien, derivado de tal análisis, es posible estimar zonas de distribución de los grupos de temperatura considerados como indicadores de la ocurrencia de los FEAT, dichas zonas tan solo son áreas de exposición potencial, debido a que, en un primer momento, no se está considerando una localización específica de la población, tan solo se determinan las áreas geográfico-administrativas en las que los grupos de temperaturas máximas incrementan su distribución espacial y su intensidad.

### 2.3.2 *Tendencias del cambio climático para México: la proyección de las temperaturas máximas en a través de un modelo HADGEM con RCP 8.5*

El incremento sostenido de la temperatura en México, debido al cambio climático antrópico, aumenta la frecuencia, intensidad y distribución de los FEAT, incrementando la exposición potencial y el riesgo de que se presenten afectaciones en la población vulnerable. Los escenarios de cambio climático permiten predecir dichos incrementos al evaluar los cambios de las condiciones futuras del clima y de su variabilidad climática. Los modelos estiman como se modificarán las condiciones de temperatura, entre otros aspectos, cambios que se pueden ligar a eventos extremos; como las olas de calor.

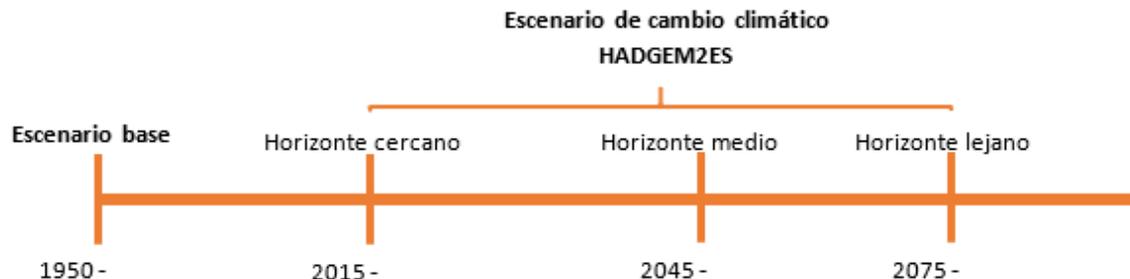
Para el caso de México, UNIATMOS (2015) desarrolló una actualización para diversas proyecciones de temperaturas máximas bajo cuatro tipos distintos de escenarios (MPI-ESM-LR, GFDL-CM3, HADGEM2-ES y CNRM) y tres horizontes (2015-2039, 2045-2069 Y 2075-2099), estructurados para una resolución espacial de 30'' x 30'' (926 m x 926 m aproximadamente) para los cuales se incorporó el efecto de la topografía nacional.

La climatología de referencia empleada para el desarrollo de los cuatro MCG estructurados con una resolución de 30'' x 30'' se generó a partir de los datos climáticos observados en el periodo que va de 1961 a 2000, a través de la consideración de más de 5,000 estaciones de la base climática diaria del Servicio Meteorológico Nacional, a los que se les aplicó un control de calidad y a cuya climatología de referencia se incorporó el efecto de la topografía. Los datos diarios de las estaciones se procesaron para la obtención de promedios mensuales de temperatura máxima, entre otras variables climáticas y, con los datos que pasaron una evaluación de calidad <sup>11</sup>, se interpolaron matrices de 5,520 columnas por 3,600 renglones para obtener las celdas de 30''x30'', a partir de lo cual la información fue estructurada en formato GeoTIFF y txt georreferenciados, y las unidades climáticas consideradas, para el caso de la temperatura máxima, es de °C.

---

<sup>11</sup>. El proceso llevado a cabo para cada modelo es descrito en UNIATMOS, “*Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación*”, 2015.

Figura 14. Horizontes del escenario de cambio climático HADGEM2ES desarrollado por UNIATMOS.



Fuente: Elaboración propia

Los incrementos correspondientes a los MGC se obtuvieron restando a cada uno su correspondiente climatología de referencia. La presente investigación se enfoca en los dos primeros horizontes, 2015-2039 y 2045-2069, del escenario de cambio climático HADGME2ES, actualizado por UNIATMOS (2015), con un RCP 8.5, que es congruente con el nivel de emisiones actual, lo que proyecta un aumento de la temperatura media de 2°C o superior (Figura 14). De igual forma que para el escenario base, se analiza la distribución de las temperaturas máximas para el periodo de mayo a agosto, para cada horizonte, temperaturas que se encuentran agrupadas en dos grupos de umbrales; de 35.0°C o superior y el de más de 38.9°C. Ello permite la evaluación de los cambios que se pueden dar en la distribución de las temperaturas máximas en el país y, por ende, los cambios que se pueden dar en la exposición potencial a los FEAT.

Para ello, se consideró el uso de un solo escenario debido al tiempo que lleva la incorporación y posterior comparación de un escenario de cambio climático adicional, además de que el principal objetivo de la presente investigación es la comparación entre dos SSP con disímiles trayectorias de urbanización, entendiéndose con ello, que las proyecciones de exposición finales pueden mantener un sesgo debido a que no se considera un escenario que permita la comparación de los cambios en la distribución e intensidad de las temperaturas máximas. Considerando lo anterior, el análisis de la distribución de las temperaturas máximas para cada grupo permite realizar una comparación de cada horizonte con el escenario base, lo que facilita la observación de los cambios en la superficie que ocupa cada rango de temperaturas máximas, es decir, la exposición potencial por grupo.

## **2.4 Fenómenos extremos de alta temperatura; una definición para el país**

Los datos disponibles, como ya se ha mencionado, limitan la presente investigación a la observación de la intensidad y distribución del promedio de las temperaturas máximas mensuales, para el periodo base que va de 1950 al 2000, como indicador de una posible ocurrencia de los FEAT. El análisis de tal indicador nos permite encontrar las áreas en las que las temperaturas máximas rebasan la media mensual para el periodo mencionado por encima de dos desviaciones estándar, medida que permite visualizar los eventos de mayor intensidad en el territorio nacional.

Si bien, los fenómenos extremos de alta temperatura, en específico las olas de calor, pueden definirse según su duración y la selección de los datos de temperatura que se encuentren en los percentiles superiores (Barnett et al., 2010; Chen et al., 2015), la aproximación a tales fenómenos a través de las temperaturas máximas promedio mensuales facilita la ubicación espacial de las poblaciones con mayor probabilidad de exposición a los mismos, especialmente cuando se evalúan los extremos superiores de las temperaturas máximas. Por lo tanto, en esta primera aproximación, la ubicación de la distribución, tanto presente como futura, de las temperaturas máximas mensuales nos permite determinar un área de exposición potencial a los FEAT.

### *2.4.1 La definición de los FEAT; La ocurrencia de las temperaturas altas extremas como impulsor del riesgo a desastre*

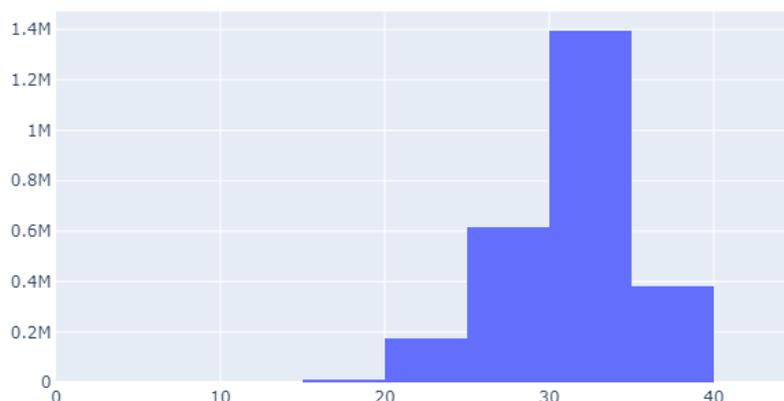
Según la Dirección General de Epidemiología (DGE) (2020), la temporada de calor en México inicia en la semana 12 del año, a finales de marzo y principios de abril, y concluye en la semana 40, a finales de septiembre. Por otro lado, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (CONAGUA, 2018,2019,2021) identifica como los meses de mayor ocurrencia de días por encima de los 40°C a los periodos que van de abril a junio y de julio a septiembre. Aunado a ello, los meses en los que se presentan mayores afectaciones a la población, desde golpes de calor, agotamiento por calor, entre otros, van de mayo a septiembre mientras que el periodo en el que se registran un mayor número de decesos son los meses van de mayo a agosto (DGE, 2018,2019,2020), aunque con variaciones importantes según el año que se tome en cuenta.

Considerando lo anterior y los datos de temperatura máxima más elevados, provistos por IPUMS TERRA (2021), para el periodo de 1950 al 2000, se tomaron los meses de mayo, junio, julio y agosto para el análisis de la exposición a temperaturas extremas. No todas las temperaturas máximas producen afectaciones a la población, por lo que se analizan las temperaturas que superan los 35.0°C y los datos iguales o mayores a 38.9 °C, que son valores por encima de dos desviaciones estándar.

Además, a diferencia de Jones et al. (2015), que considera a los FEAT, en específico las olas de calor, como las temperaturas por encima de 35.0°C que se presentan en un periodo de tres días, dadas las limitaciones en la información disponible, se considera, como ya se mencionó, el criterio de los 35.0°C para las temperaturas máximas promedio mensuales, además de las temperaturas que sobrepasan las dos desviaciones estándar, ambas como un indicador fiable de la posible ocurrencia de los FEAT, dado que mientras mayor sea el promedio de la temperatura máxima considerada en un área determinada del territorio, mayor será la probabilidad de ocurrencia diaria de valores por encima de los 35.0°C.

En este sentido, para el análisis del histórico de las temperaturas máxima empleado como escenario base, el promedio de los datos, para el periodo de mayo a agosto, muestra una media de 31.3 °C, debido a que cada uno de los meses considerados supera los 30.0 °C promedio. El rango de los datos de temperaturas que se encuentra a lo largo del territorio nacional es de 37.2 °C, con una temperatura mínima de 3.0°C y una máxima de 40.3 °C, y mantiene una desviación estándar de 3.7 °C. Como es posible observar en la Figura 15., los datos de las temperaturas máximas se concentran por encima de la media, para el periodo de análisis, de los 31.4°C a los 40.3°C.

Figura 15. Distribución de valores promedio de las temperaturas máximas para el periodo de mayo a agosto de 1950 a 2000.



Fuente: elaboración propia con datos de IPUMS TERRA (2021).

En este caso, el análisis se centra tanto en las temperaturas máximas que se encuentran por encima de los 35.0°C como en las que se encuentran dos desviaciones estándar por encima de la media, de más de 38.9°C, como indicador de la posible ocurrencia de los FEAT, debido principalmente a que las temperaturas que generan afectaciones a la población depende tanto de su intensidad como de la vulnerabilidad de la población, por lo que el analizar tales rangos nos permite observar la distribución de temperaturas que pudieran afectar a la población de mayor vulnerabilidad en distinto grado. De manera general, las temperaturas que superan los 38.9°C abarcan una superficie de exposición potencial de 3, 406.7 km<sup>2</sup>, mientras que el territorio que se encuentran por encima de los 35.0°C, alcanzan una superficie de exposición potencial de 265, 455 km<sup>2</sup>. (Cuadro 5), cabe resaltar que la superficie de las temperaturas máximas superiores a los 35.0°C incluye la que se considera por encima de los 38.9°C.

Cuadro 5. Superficie de distribución por grupo de temperaturas máximas y porcentaje que representa en relación al país.

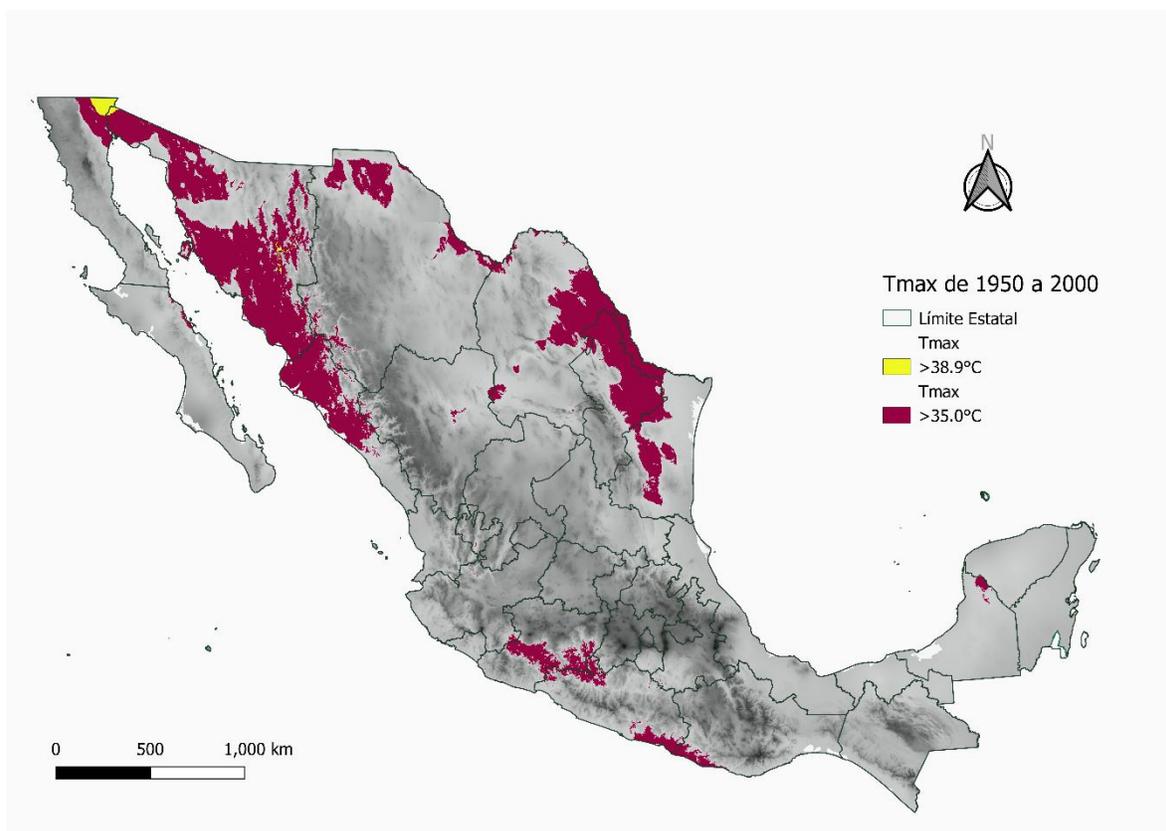
Superficie >35 °C (km <sup>2</sup> )	% de la superficie nacional	Superficie >38.9 °C (km <sup>2</sup> )	% de la superficie nacional
266,440.9	13.3	3,406.7	0.2

Fuente: Elaboración propia con datos de IPUMS TERRA (2021).

El rango de temperatura que supera los 35.0°C, se encuentra distribuida principalmente en los estados de Sonora, Sinaloa y Nuevo León, ocupando una superficie de exposición potencial por encima del 50.0% del territorio para los primeros dos y de 44.9% para el estado de Nuevo León. Además, la distribución de tal rango de temperatura se da también en los

estados de Baja California, Baja California Sur, Campeche, Coahuila, Chihuahua, Durango, Guerrero, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Tamaulipas y Yucatán, aunque ocupando una menor proporción del territorio estatal (Mapa 1).

*Mapa 1. Distribución espacial de las temperaturas máximas por encima de los 35.0°C en el territorio nacional.*

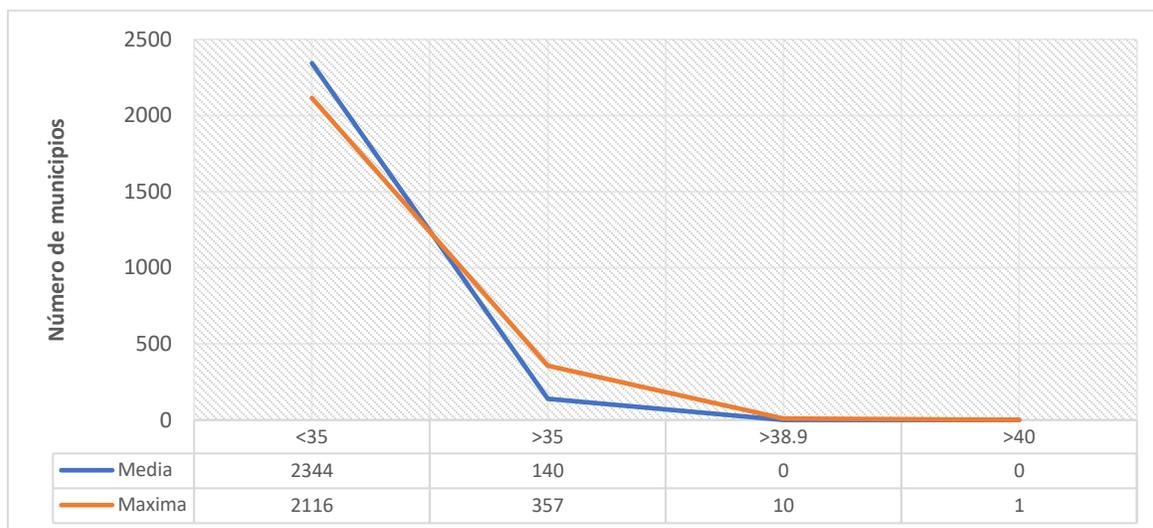


Fuente: Elaboración propia con datos de IPUMS TERRA (2021)

Mientras que la temperatura que supera los 38.9 °C, es decir, que se encuentra dos desviaciones estándar por encima de la media, se distribuye en los estados de Sonora y Baja California. Específicamente en los municipios de Alamos, Onavas, Soyopa, Bacanera, San Pedro de la cueva, Schuaripa, Divisaderos y Bacanuchi, para el estado de Sonora, y en el municipio de Mexicali, para el estado de Baja California, manteniendo la mayor superficie de exposición potencial en este último, con 2,486.9 km<sup>2</sup>, lo que representa el 3.3% de la superficie del estado. Por último, es necesario resaltar las temperaturas por encima de los 40°C se concentran en el estado de Baja California, específicamente en el municipio de

Mexicali, distribuyéndose en una superficie de 1,065.5 km<sup>2</sup>, lo que representa el 1.4% de la superficie estatal y el 6.7% de la superficie municipal.

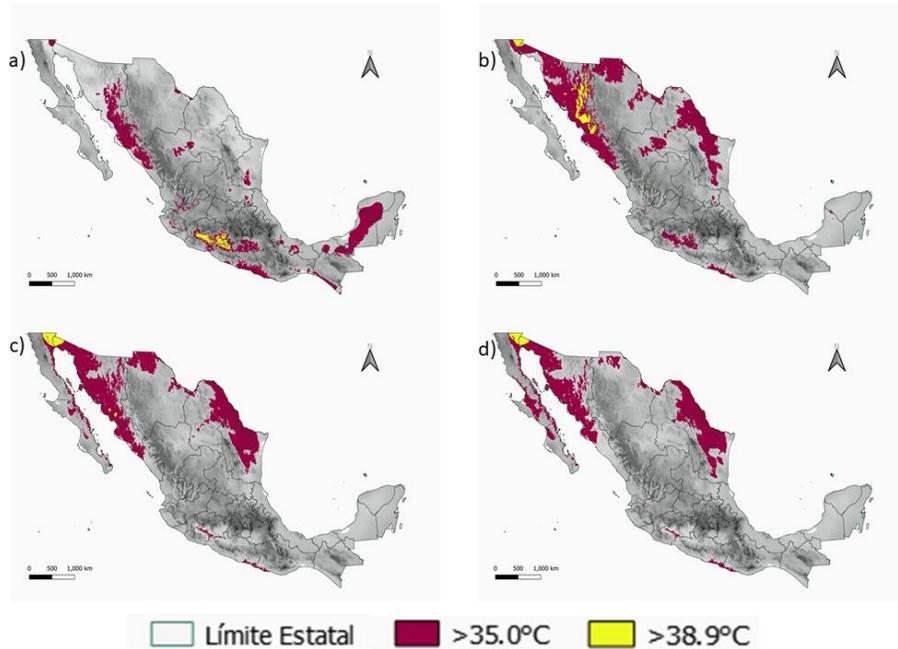
*Figura 16. Frecuencia de municipalidades por grupo de temperaturas máximas; promedios y máximas durante los meses de mayo a agosto del promedio histórico de 1950 a 2000.*



Fuente: Elaboración propia con datos de IPUMS TERRA (2021).

Así como las temperaturas máximas varían a lo largo del territorio nacional, dentro de los municipios también es posible registrar una variación importante. En ese sentido, las medias de las temperaturas máximas municipales se concentran, en cuanto a los grupos de interés, en el rango de >35.0°C, con 119 municipios, mientras que el grupo que engloba las temperaturas máximas más elevadas, es decir, las superiores a los 38.9°C, no registra ninguna municipalidad. En cuanto a los máximos registrados en cada municipio, es posible encontrar, dentro de los grupos de temperatura de interés planteados, un mayor número de municipalidades, con 325, para los grupos de temperatura máxima superior a los 35.0°C, mientras que las municipalidades que muestran máximos de 38.9 °C o superior son apenas 11 (Figura 16).

Mapa 2. Evolución de la temperatura máxima durante el periodo que va de mayo a agosto. a) mayo, b) junio, c) julio y d) agosto



Fuente: Elaboración propia con datos de IPUMS TERRA (2021)

Como es posible observar en el Mapa 2, las temperaturas máximas promedio presentan variaciones intermensuales importantes dentro del periodo de interés. Para el umbral de 35.0°C, la principal distribución para el mes de mayo se da en los estados de Sinaloa, en el que abarca cerca del 53.3% de la superficie estatal, Campeche, con el 50.3% del territorio del estado, y Morelos, abarcando el 46.7%. Para el mes de junio, los estados que cuya superficie de exposición sobresale son Sonora, Sinaloa y Nuevo León con porcentajes de 65.9%, 60.8% y 43.3% de la superficie estatal, distribución que se mantiene prácticamente sin cambios para el mes de julio y que para el mes de agosto se modifica resaltando la exposición de los estados de Sonora, Nuevo León y Tamaulipas con el 56.0%, 51.4% y el 39.3% de su superficie estatal.

Las temperaturas máximas que se encuentran por encima de las dos desviaciones estándar, es decir que se encuentran por encima de los 38.9°C, para el mes de mayo se encuentran concentradas en los estados de Michoacán, con el 7.1% de la superficie estatal, Guerrero, con el 2.0% de la superficie estatal, y México, con apenas el 0.04% de la superficie del estado. Sin embargo, para el mes de junio las temperaturas de este grupo cambian, concentrándose en Sonora, con el 2.6% de la superficie estatal, Baja California, con el 1.9%, y Sinaloa, este

último concentra apenas una superficie de 1.6 km<sup>2</sup> dentro del rango. Para el mes de julio y agosto se reducen los estados que concentran estas temperaturas, tan solo Baja California con el 5.8% y 3.9% de la superficie estatal respectivamente, y Sonora, con el 1.3% y 0.8% para los meses respectivos. Siendo Baja California la que mayor superficie por encima de tales temperaturas máximas concentra, aunque para el mes de agosto la superficie en ambos estados disminuye pasando de 6,691.1 km<sup>2</sup> a 4,491.7 km<sup>2</sup>.

## **2.5 Impulsores de la exposición; la distribución de los FEAT bajo escenarios de cambio climático en México**

Queda claro que el cambio climático es un importante impulsor de la exposición a los FEAT, el incremento de la temperatura media de la tierra establece un nuevo panorama para la distribución de las temperaturas máximas, tanto a nivel mundial como a nivel local. En el caso de México, como ya se ha señalado, es potencialmente vulnerable a los cambios económicos y sociales causados por el cambio climático global, al estar localizado en una región que es muy susceptible a variaciones significativas en los patrones climáticos y temperaturas (UNAM, 2013).

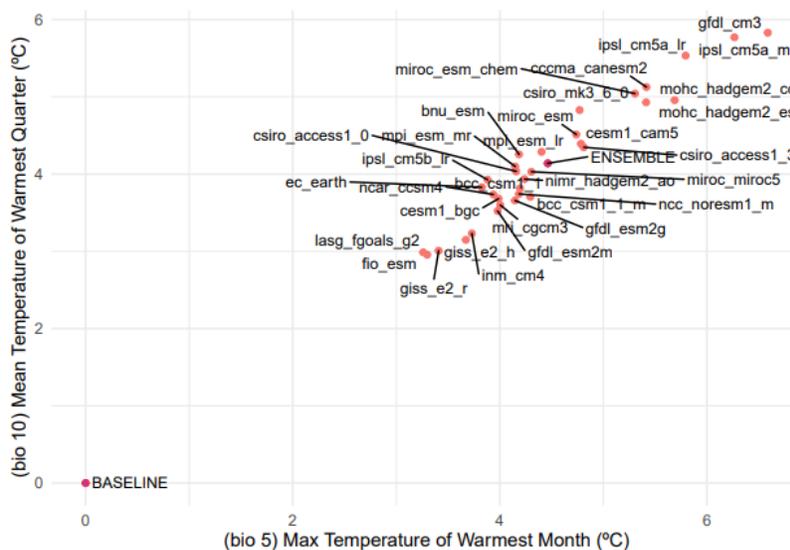
Estas variaciones en los patrones climáticos y en las temperaturas del país contribuyen a establecer un escenario de la exposición potencial a los fenómenos extremos de alta temperatura, aunque no la definen en su totalidad. Con la intención de observar este cambio en la exposición a los FEAT, a través del cambio en la distribución e intensidad de las temperaturas máximas mensuales en el país bajo un contexto de cambio climático, se emplearon las proyecciones de las temperaturas máximas, desarrolladas por UNIATMOS (2015) a nivel nacional, de un escenario HADGEM2ES con una resolución espacial de casi 1km<sup>2</sup>, para dos horizontes; uno de corto plazo, 2015 a 2039, y uno de mediano plazo, de 2045 a 2069.

### 2.5.1 El papel del cambio climático en la distribución de los FEAT

Como se ha mencionado anteriormente, el incremento de la temperatura media impulsa cambios en los patrones climáticos, incluida la tendencia de la frecuencia de los eventos extremos de altas temperaturas, su distribución e intensidad. Sin embargo, tales variaciones dependen, al menos al momento de visualizarlas a través de las proyecciones, del modelo empleado para suponer un cambio dentro de un futuro incierto.

En el caso de la presente investigación, el uso de un escenario HADGEM2ES, el cual es un escenario de cambio climático que proyecta un incremento de la temperatura elevado, en comparación tanto con la climatología base como con el resto de los escenarios de cambio climático (Figura 17), los cambios en los patrones de distribución, frecuencia e intensidad de las temperaturas máximas que se proyectan son elevados, numéricamente hablando. Sin embargo, al ser el único modelo que se emplea en la presente investigación, se seleccionó precisamente porque proyecta un aumento de temperatura elevado, pero se mantienen dentro de un rango coherente de cambio respecto al sistema climático de referencia, dentro de las dos desviaciones estándar de la media de los datos que se proyectan con los otros escenarios de cambio climático (Figura 18), lo que permite visualizar un escenario de incrementos importantes en la temperatura máxima y variaciones en su posible distribución.

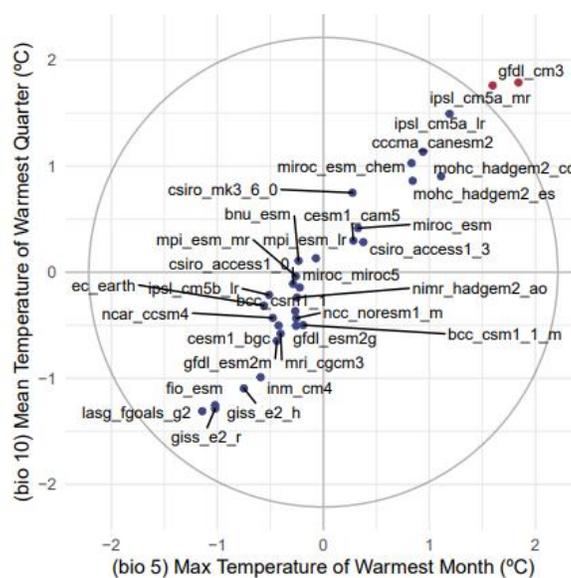
Figura 17. Variación de los valores con respecto a la línea de base del valor promedio para cada variable bioclimática.



Fuente: Comparador de modelos, Ecoinformatica (2021)

Además, se determinó el uso del escenario HADGEM2ES con un RCP de 8.5, suponiendo una nula intervención del sistema social para mitigar los efectos del cambio climático, es decir, un crecimiento en las emisiones sostenido y congruente con el nivel de emisiones que se presenta en la actualidad y, como consecuencia, un incremento en la temperatura media de 2°C, o superior, para los horizontes que se evalúan, lo que no necesariamente se traduce en un incremento homogéneo en las temperaturas máximas promedio que se emplean como indicador de los FEAT. En resumen, se proyecta un escenario que muestra un panorama poco alentador en las condiciones climáticas futuras, con la intención de observar el escenario climático más extremo, o uno de ellos, para las temperaturas máximas mensuales y con ello, un reto para la población expuesta a tales condiciones.

Figura 18. Variación de los valores escalados de diferencias entre modelos, el círculo indica 2 desviaciones estándar de la media del conjunto.



Fuente: Comparador de modelos, Ecoinformatica (2021)

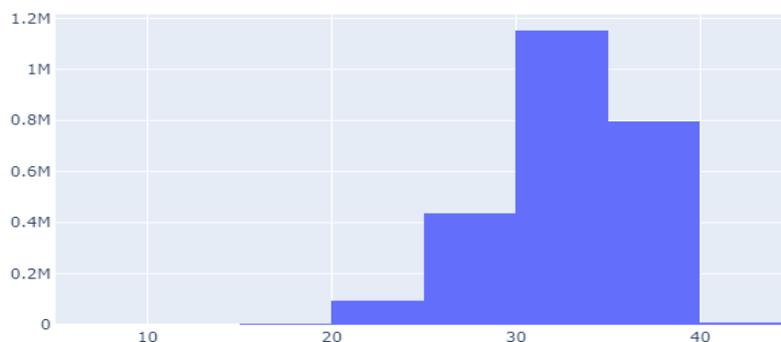
### 2.5.2 El aumento frecuencia e intensidad de los FEAT en dos horizontes temporales; 2015 – 2039 y 2045 - 2069

Con la idea de observar el cambio que se proyecta para las temperaturas máximas en el país, se mantienen los grupos obtenidos de los datos históricos y que delimitan la peligrosidad de las altas temperaturas; el grupo uno se refiere al umbral de los 35.0°C, el grupo dos que abarca las temperaturas máximas superiores a los 38.9°C. En este sentido, al igual que para

el periodo base, las proyecciones del escenario HADGEM2ES, tanto para el horizonte corto, que va del 2015 al 2039, como para el horizonte medio, que va del 2045 al 2069, se promediaron los datos de las temperaturas máximas para el periodo de mayo a agosto, con el fin de comparar los datos obtenidos en el escenario base con los datos de las temperaturas máximas para ambos horizontes del escenario HADGEM2ES.

En el caso del horizonte corto (2015 – 2039), se observa una media de 32.9 °C, con medias mensuales, en cada uno de los meses considerados, que superan los 32.0 °C. Para este horizonte, el rango de los datos de temperaturas máximas que se encuentra a lo largo del territorio es de 37.0°C, ligeramente menos en comparación con el escenario base, con una temperatura mínima de 5.0°C y una máxima de 42.7 °C, mantiene una desviación estándar de 3.8 °C, lo que implica una dispersión de los datos de relativamente importante, especialmente hacia los extremos superiores. La Figura 19. muestra como los datos de las temperaturas máximas tienden a concentrarse en valores por encima de los 30.0°C.

*Figura 19. Distribución de valores promedio de las temperaturas máximas para el periodo de mayo a agosto de 2015 a 2039.*

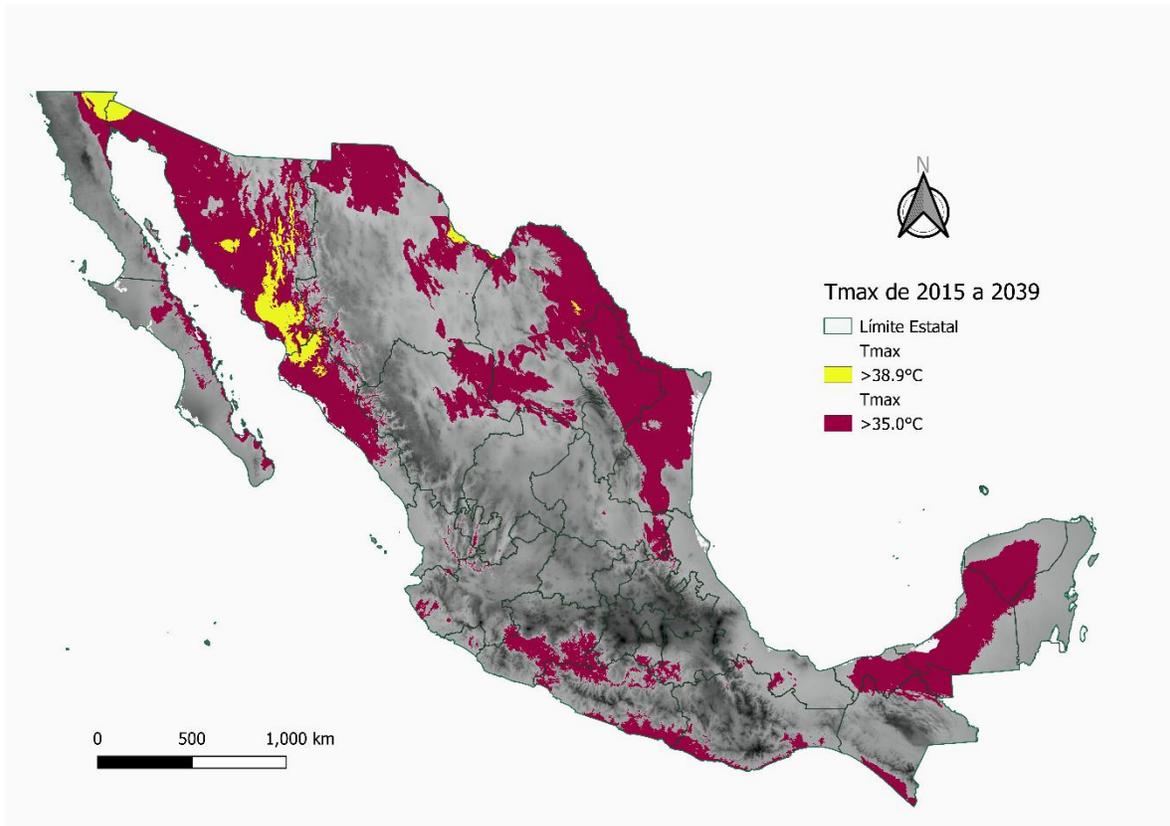


Fuente: elaboración propia con datos de UNIATMOS (2015).

Como se mencionó con anterioridad, el análisis se centra en los grupos establecidos para el escenario base, en las temperaturas máximas que se encuentra por encima de los 35.0°C y las que se encuentran dos desviaciones estándar por encima de la media, es decir, por encima de los 38.9°C, como un indicador de la ocurrencia de los FEAT. Como podemos observar en el Mapa 3, la temperatura que se encuentra por encima de los 35.0°C, se encuentra distribuida en casi todo el país, aunque su principal presencia se da en los estados de Tabasco, Sonora, Campeche, Tamaulipas y Sinaloa, en los que ocupa una superficie por encima del 60% del área estatal, así como Nuevo León, Yucatán y Coahuila estados en los que abarca alrededor

del 50% de la superficie estatal. Tan solo la Ciudad de México, Tlaxcala, Guanajuato y Aguascalientes se encuentran fuera de este rango de temperaturas.

*Mapa 3. Distribución espacial de las temperaturas máximas por encima de los 35.0°C en el territorio nacional bajo un escenario HADGEM2ES en un horizonte corto (2015 a 2039).*



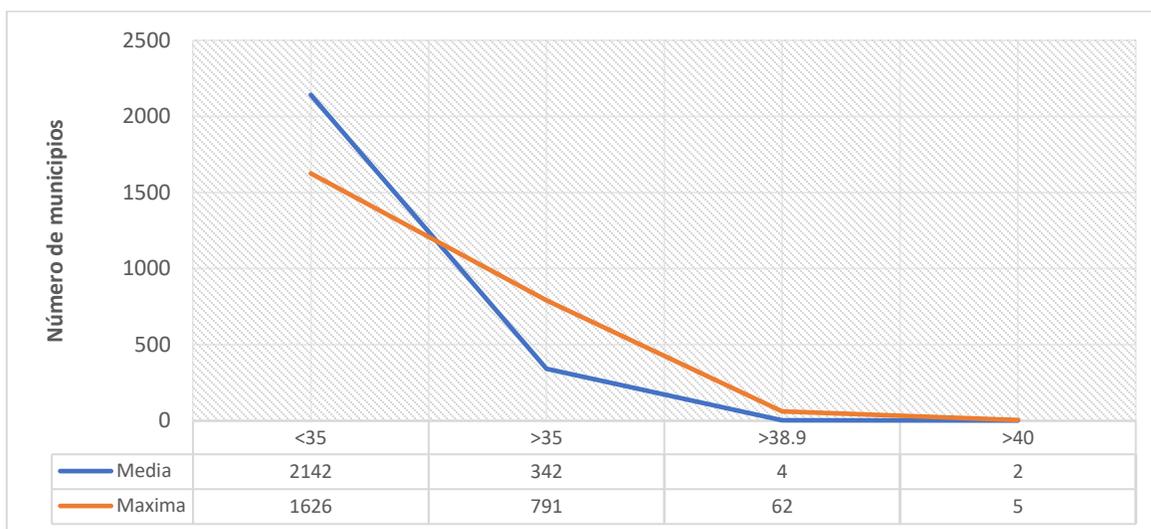
Fuente: Elaboración propia con datos de UNIATMOS (2015)

Mientras que la temperatura que supera los 38.9 °C, se distribuye en los estados de Sonora, Sinaloa, Baja California, Chihuahua, Coahuila, Michoacán, Nuevo León y Guerrero, con una superficie que va de los 23,422.1 km<sup>2</sup>, en el estado de Sonora, a menos de 1km<sup>2</sup>, en Guerrero. Los municipios donde se presenta una mayor concentración de tales temperaturas son Mexicali, con 4,140.2 km<sup>2</sup>, Cajeme, con 3,734.8km<sup>2</sup>, Álamos, Navojoa, El Fuerte y Quiriego con una superficie mayor a 2 mil kilómetros cuadrados.

Resaltar el hecho de que las temperaturas máximas por encima de los 40.0°C, a diferencia del escenario base en el que solo se concentraba en el municipio de Mexicali, se distribuyen

en los estados de Sonora, Baja California, Chihuahua y Sinaloa, siendo el municipio que mayor superficie concentra el municipio de Mexicali, distribuyéndose en una superficie de 2,776.9 km<sup>2</sup>, seguido de los municipios de Navojoa, con 1,236.7km<sup>2</sup>, y Onavas, con 514.4km<sup>2</sup>, ambos en el estado de Sonora.

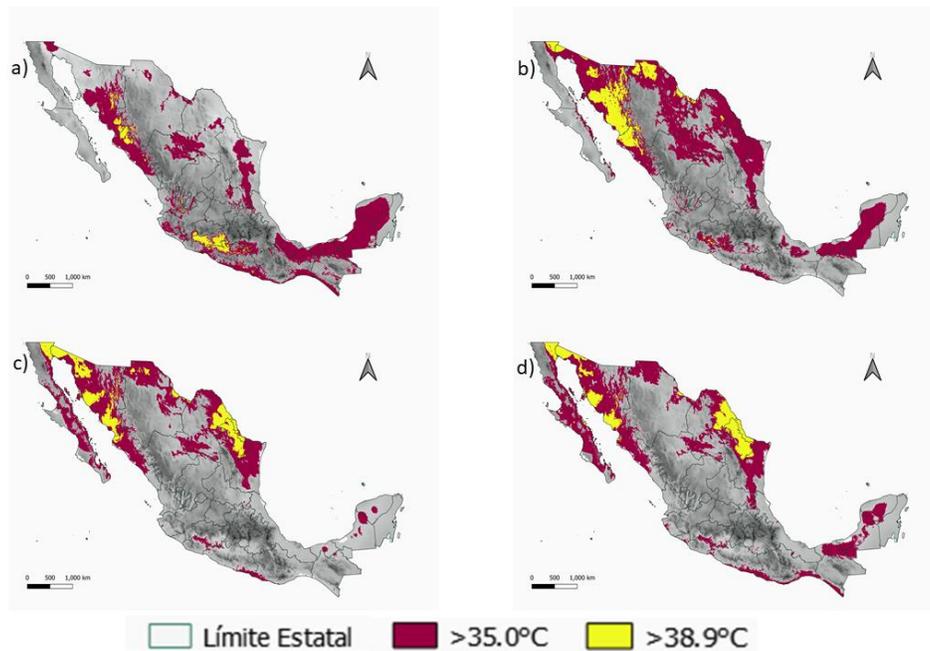
Figura 20. Frecuencia de municipalidades por grupo de temperaturas máximas; medias y máximas para el periodo de mayo a agosto para el periodo de 2015 a 2039.



Fuente: Elaboración propia con datos de UNIATMOS (2015).

Las variaciones que se dan dentro de los municipios (Figura 20) muestran que las medias de las temperaturas máximas municipales se encuentran, principalmente, por encima de los 35.0°C, aunque la cantidad de municipalidades es de tan solo 342, mientras que el grupo que engloba las temperaturas máximas que se encuentran por encima de los 38.9°C, registra dos municipios, la mitad de los cuales muestran temperaturas por encima de los 40°C. En cuanto a los máximos registrados para cada municipalidad, podemos observar que; el grupo de temperaturas máximas que está por encima de los 35.0°C alcanza las 672 municipalidades, mientras que el umbral de 38.9°C tan solo agrupa 62 municipios.

Mapa 4. Evolución de la temperatura máxima durante el periodo que va de mayo a agosto, bajo un escenario de cambio climático (HADGEM2ES) de horizonte corto (2015-2039). a) mayo, b) junio, c) julio y d) agosto.



Fuente: Elaboración propia con datos de UNIATMOS (2015).

En el Mapa 4. se puede observar el cambio en la superficie ocupada tanto por las temperaturas máximas que se encuentran por encima de los 35.0°C (rojo) como las que se encuentran por encima de las dos desviaciones estándar (amarillo). En cuanto a las temperaturas máximas por encima del umbral de los 35.0°C, para el mes de mayo los estados de Tabasco, Campeche y Sinaloa muestran la mayor superficie de distribución con proporciones superiores al 70.0% de la superficie estatal. La distribución se modifica para el mes de junio, Sonora, Tabasco y Sinaloa son los estados que muestran la mayor superficie de exposición, arriba del 70% de la superficie de cada estado. Para el mes de julio, Sonora Tamaulipas y Nuevo León con el 84.2%, 65.1% y el 61.6% de su superficie estatal concentran la mayor parte de la exposición al umbral de 35.0°C y, para el mes de agosto Tabasco y Baja California Sur, además de Sonora, son los que presentan la superficie de exposición de mayor relevancia, todos arriba del 70% de la superficie total de cada estado.

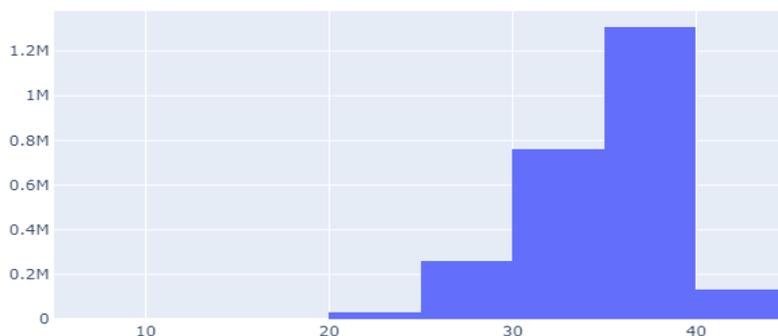
En cuanto al umbral de 38.9°C, para el mes de mayo tales temperaturas se encuentran distribuidas en los estados de Guerrero, Sinaloa, Sonora, Jalisco, Chihuahua, Nayarit y Puebla, destacando el estado de Guerrero por la superficie que ocupa este grupo de

temperaturas máximas que es de 4,577.6 km<sup>2</sup>, el 7.2% de la superficie estatal. Sin embargo, para el mes de junio las temperaturas de este grupo se redistribuyen, concentrándose en Sonora, en el que cubren 37,373.3km<sup>2</sup>, además de Sinaloa, Chihuahua y Baja California. Para el mes de julio y agosto los estados que concentran estas temperaturas son tan solo Sonora, Baja California, Coahuila, Tamaulipas y Chihuahua. La distribución de la temperatura máxima por encima de los 38.9°C cambia entre ambos meses, siendo Sonora la que mayor superficie concentra para el mes de julio, con 11,443.8 km<sup>2</sup>, mientras que para el mes de agosto el estado con la mayor superficie es Coahuila con 10,509 km<sup>2</sup>.

Si bien es posible observar un incremento tanto en los dos grupos de temperaturas máximas establecidos como en la distribución de las mismas para un horizonte corto, el cambio proyectado para las temperaturas máximas en el país en el horizonte medio, de 2045 a 2069, del escenario HADGEM2ES implica un incremento aun mayor, con un claro aumento en la superficie que ocupan las temperaturas superiores a los 38.9°C. Al igual que el periodo base y el horizonte de corto plazo evaluado, se promediaron los datos de las temperaturas máximas para el periodo de mayo a agosto, lo que facilita el análisis del incremento mencionado.

El horizonte medio (2045 – 2069) del escenario HADGEM2ES, muestra una media de 34.8°C para las temperaturas máximas en el país, registrando las medias mensuales más elevadas de los periodos analizados, con 35.1°C, 35.4°C, 34.6°C y 34.1°C, para los meses de mayo, junio, julio y agosto respectivamente. Se observa un rango de temperaturas máximas de 37.6°C, con un mínimo de 6.4°C y una máxima de 44.0 °C, además de una desviación estándar de 3.7 °C. La Figura 21. muestra como los datos de las temperaturas máximas tienden a concentrarse, de forma aún más marcada que los otros dos periodos evaluados, en valores por encima de los 30°C.

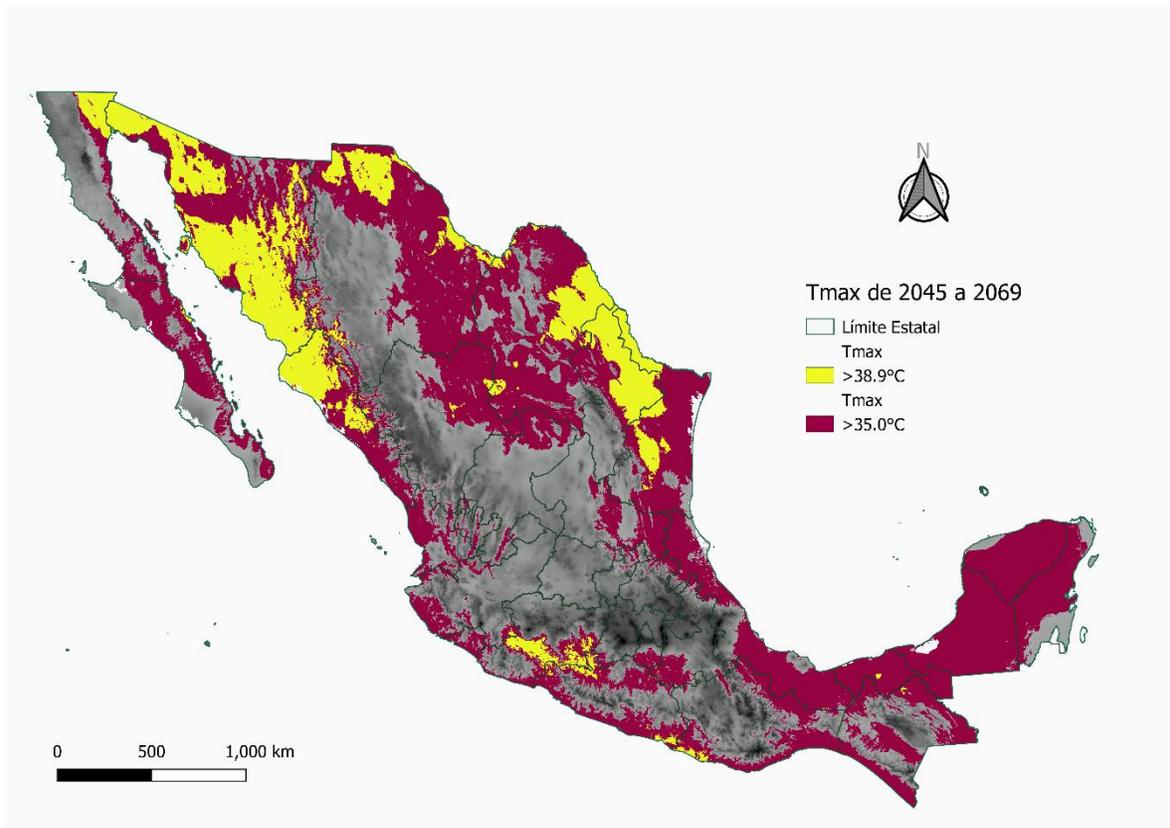
Figura 21. Distribución de valores promedio de las temperaturas máximas para el periodo de mayo a agosto de 2045 a 2069.



Fuente: elaboración propia con datos de UNIATMOS (2015).

Se analizaron las temperaturas máximas del escenario HADGEM2ES de horizonte medio para los grupos establecidos para el escenario base. Como podemos observar en el Mapa 5., las temperaturas máximas que se encuentran por encima de los 35.0°C, se encuentra distribuida en casi todo el país, aunque su principal presencia se da en los estados de Chihuahua, estado en el que ocupa una superficie de 118,122 km<sup>2</sup>, Coahuila, en el que ocupa alrededor de 92,440.6 km<sup>2</sup>, Sonora, Campeche y Veracruz con una superficie por encima de los 50 mil kilómetros cuadrados. Además, destacan los estados de Tabasco, Campeche y Yucatán, cuya superficie de distribución de estas temperaturas máximas abarca más del 90% de la superficie estatal.

Mapa 5. Distribución espacial de las temperaturas máximas por encima de los 35.0°C en el territorio nacional bajo un escenario HADGEM2ES en un horizonte medio (2045 a 2069).

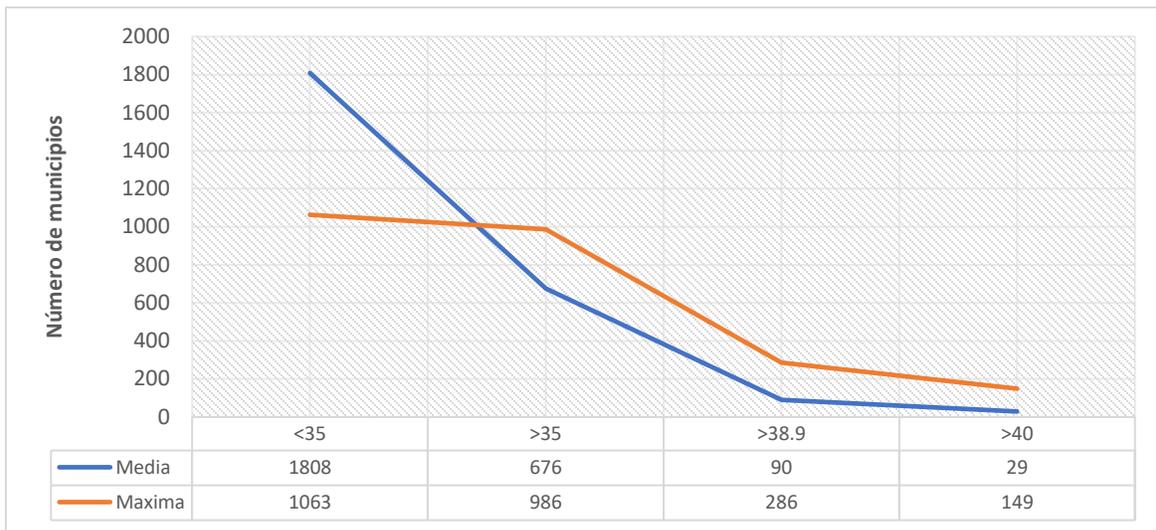


Fuente: Elaboración propia con datos de UNIATMOS (2015)

Por otro lado, el grupo de temperaturas máximas que superan los 38.9 °C, se distribuye en los estados de Baja California, Baja California Sur, Campeche, Coahuila, Chiapas, Chihuahua, Durango, Guerrero, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Sinaloa, Sonora, Tabasco y Tamaulipas. Destacando la distribución que se da en Sonora, estado en el que tal grupo de temperaturas ocupa 100,981.4km<sup>2</sup>, además de Sinaloa y Nuevo León, en los que la superficie de distribución se encuentra por encima del 40% de la superficie del territorio estatal, con 27,892.7 km<sup>2</sup> y 23,760.1km<sup>2</sup> respectivamente.

Además, las temperaturas máximas por encima de los 40.0°C, se distribuyen en los estados de Sonora, en el que alcanzan los 54,735.7km y ocupan el 30.2% de la superficie estatal, Sinaloa, Coahuila, Baja California, Chihuahua, Tamaulipas, Guerrero, Jalisco, Tabasco y Baja California Sur. El caso de Baja California resulta de especial interés debido a que la superficie en la que se distribuyen las temperaturas máximas se concentra casi en su totalidad en el municipio de Mexicali, con 5,879.1 km<sup>2</sup>.

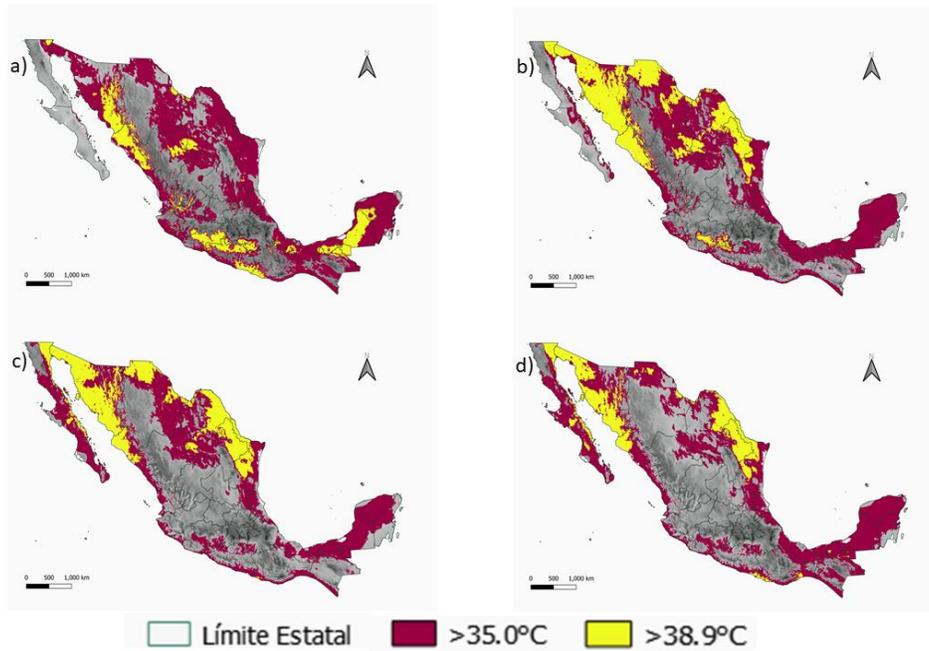
Figura 22. Frecuencia de municipalidades por grupo de temperaturas máxima en un horizonte medio; medias y máximas para el promedio de los meses de mayo a agosto.



Fuente: Elaboración propia con datos de UNIATMOS (2015).

Los municipios muestran variaciones en las medias de las temperaturas máximas que se presentan en su territorio (Figura 22), hay un incremento en los municipios que presentan temperaturas superiores a los 35.0°C, con 676 municipalidades, mientras que el grupo que engloba las temperaturas máximas que se encuentran por encima de los 38.9°C registra un incremento importante en cuanto al número de municipios que se agrupan en este rango, alcanzando las 90 municipalidades, de las cuales 29 presentan temperaturas máximas promedio por encima de los 40.0°C. En cuanto a los máximos registrados para cada municipalidad, se observa como el grupo que se encuentra por encima de los 35.0°C concentra la mayoría de las municipalidades, con 986. En cuanto a los municipios que registran temperaturas máximas por encima de los 38.9°C alcanza la cantidad de 286 de los cuales 149, más de la mitad, registran temperaturas por encima de los 40.0°C.

Mapa 6. Evolución de la temperatura máxima durante el periodo que va de mayo a agosto, bajo un escenario HADGEM2ES de cambio climático con horizonte medio (2045-2069). a) mayo, b) junio, c) julio y d) agosto.



Fuente: Elaboración propia con datos de UNIATMOS (2015).

El incremento de la temperatura máxima se ve con mayor claridad en este horizonte, en el Mapa 6. se observa cómo se incrementa la presencia de las temperaturas máximas que se encuentran por encima de los 35.0°C (rojo) y las del umbral de 38.9°C (amarillo). En el caso del umbral de los 35.0°C la distribución de la superficie de exposición potencial se mantiene de forma casi constante, los estados de Tabasco, Sonora, Campeche y Yucatán resaltan por que la superficie de exposición potencial abarca arriba del 90.0% de la superficie total de esos estados.

En cuanto al umbral de los 38.9°C, para el mes de mayo, tales temperaturas máximas muestran una distribución amplia, aunque su concentración principal se da en los estados de Sonora, Sinaloa y Guerrero, cuya superficie de distribución rebasa los 10 mil kilómetros cuadrados. Para el mes de junio este grupo de temperaturas máximas se distribuye principalmente en los estados de Sonora, donde alcanza los 112,970.2 km<sup>2</sup>, Chihuahua y Sinaloa, ocupando una superficie de 45,313.5km<sup>2</sup> y 23,976.2 km<sup>2</sup> respectivamente. Durante el mes de agosto la superficie de distribución más importante se da en los estados de Sonora,

Coahuila, Chihuahua, Tamaulipas y Baja California, siendo el estado de Sonora el que más resalta al concentrar una superficie de distribución de temperaturas máximas por encima de los 38.9°C de 94,493.3km<sup>2</sup>. Para el mes de agosto Sonora continúa siendo el estado en el que se distribuye la mayor superficie de este grupo de temperaturas con 49, 267.6km<sup>2</sup>, aunque ahora toman relevancia los estados de Coahuila, Baja California y Tamaulipas, con superficies de distribución de 16,410 km<sup>2</sup>, 8723.2km<sup>2</sup> y 8302.8km<sup>2</sup> respectivamente. De nueva cuenta, el caso del municipio de Mexicali resulta de gran interés al concentrar la mayor parte de la superficie de distribución de estas temperaturas máximas en su estado, con 10,258.3km<sup>2</sup>, para el mes de julio, y 8,894.1km<sup>2</sup>, para el mes de agosto.

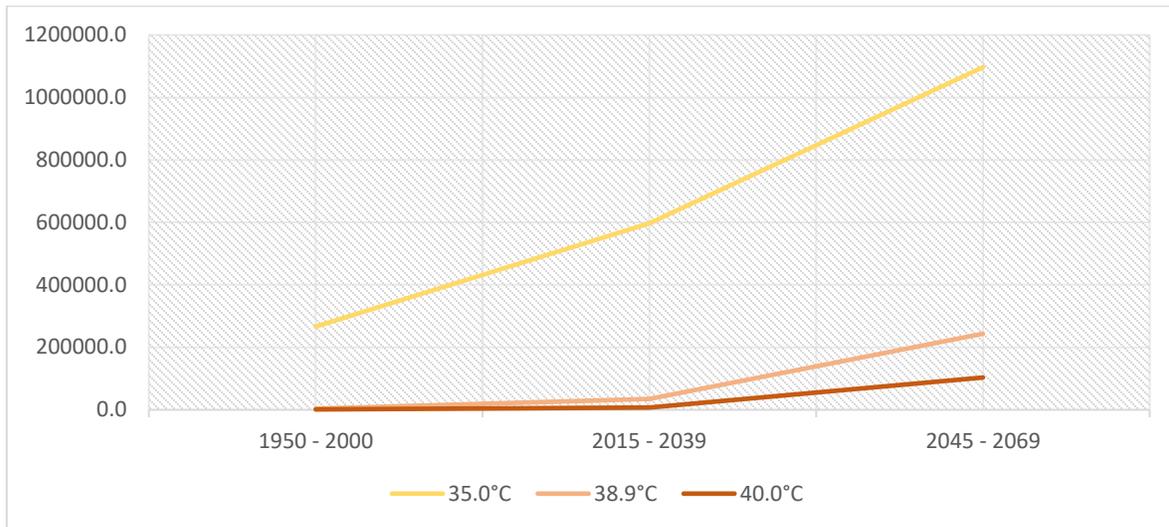
## **2.6 El cambio en la distribución de la exposición potencial a los FEAT**

Si bien los datos de la evolución en intensidad y distribución espacial de las temperaturas máximas ya aportan una visión clara de un aumento en la exposición que parece generalizado, evaluar el efecto independiente en la exposición a los FEAT a través de la consideración de las temperaturas máximas requiere de la comparación del escenario base con cada uno de los horizontes que se consideran para el escenario de cambio climático (HADGEM2ES). Esta tarea, se desarrolla a lo largo de esta última sección del capítulo, buscando establecer, con claridad, los cambios para cada horizonte usando como referencia las unidades político-administrativas a nivel estado.

### *2.6.1 Los principales cambios en las temperaturas máximas en el país*

De manera general, la exposición potencial, es decir, la superficie que ocupan las temperaturas máximas mensuales, para el promedio de mayo a agosto, crecen de manera diferenciada según el grupo de temperaturas considerado y el horizonte que se evalúe (Figura 23.).

Figura 23. Crecimiento de la superficie de distribución de las temperaturas máximas por grupo.



Fuente: Elaboración propia.

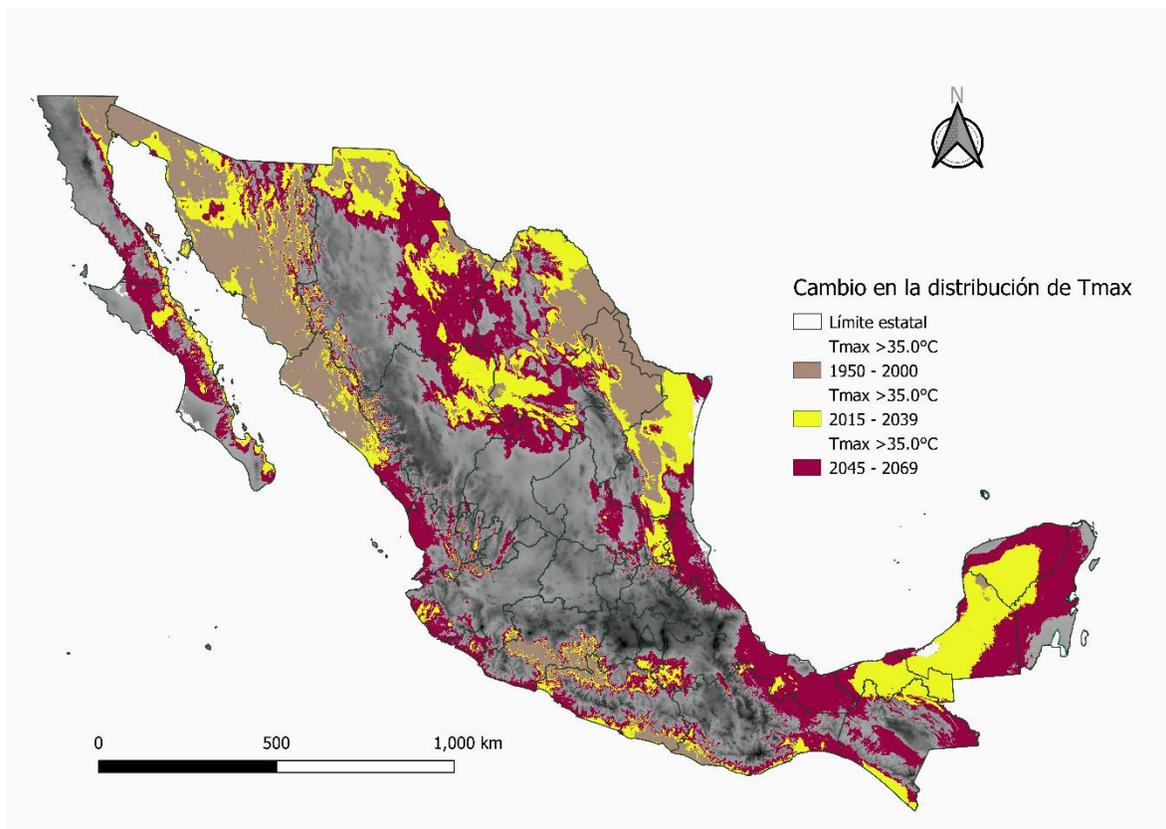
En este sentido, el grupo de temperaturas máximas que supera el umbral de los 35.0°C, aumenta su superficie de exposición potencial de manera constante, pasando de los 261,502km<sup>2</sup> que ocupaba en el escenario base, a los 565,765.7 km<sup>2</sup> en el horizonte cercano y alcanzando los 852,361.6km<sup>2</sup> en el horizonte medio.

En cuanto al grupo que comprende las temperaturas superiores a los 38.9°C, mantiene un incremento sostenido de su superficie de exposición potencial, pasando de los 3,468.9km<sup>2</sup> que muestra en el escenario base, a los 34,432.7km<sup>2</sup> en el horizonte de corto plazo, y alcanzando su mayor superficie en el horizonte medio con 242,953.8 km<sup>2</sup>. Dentro de este grupo, resaltan las temperaturas máximas superiores a los 40.0°C, las cuales en el escenario base se concentran en el municipio de Mexicali, ocupando una superficie de 1,065.5 km<sup>2</sup>, y que sufren un cambio tanto en su distribución, aumentando su presencia en otras entidades y municipalidades, como en la superficie absoluta que ocupan, al alcanzar los 7,079.3km<sup>2</sup> en el horizonte cercano y los 88,028.5km<sup>2</sup> para el horizonte medio.

Sin embargo, tales cambios también se dan de forma muy particular dentro del límite político-administrativo de los estados, la superficie de exposición potencial a los diferentes grupos de temperatura máximas varía según el horizonte y el límite estatal que se considere.

En el grupo de temperaturas máximas superiores a los 35.0°C, la tendencia general es la del aumento en la superficie de exposición ocupada, es decir, se da un incremento continuo de los dos horizontes considerados en relación con el escenario base (Mapa 7.).

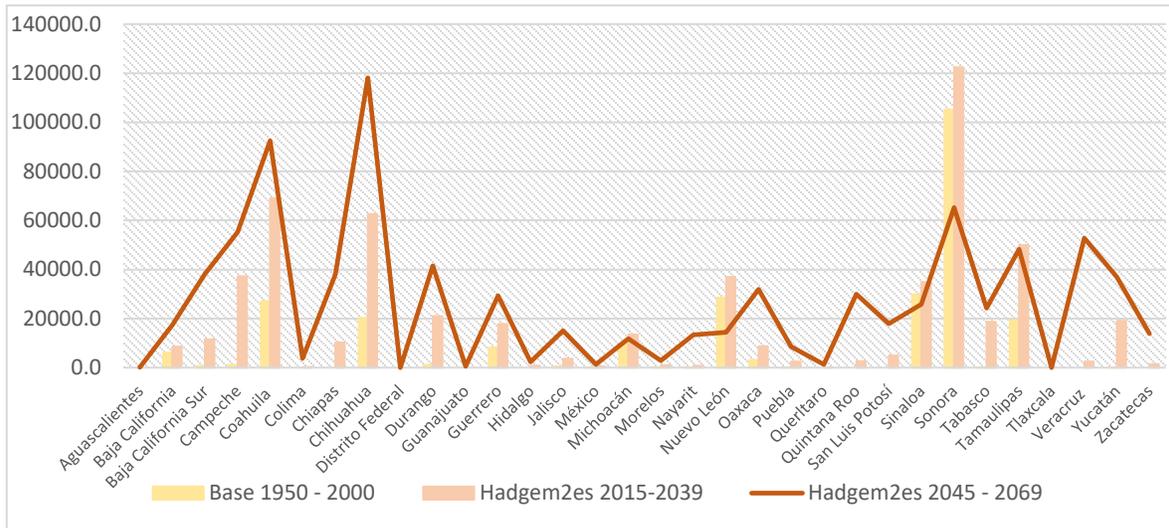
*Mapa 7. Incremento de las temperaturas máximas de >35°C durante el periodo de 2000 a 2069.*



Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, es posible destacar dos tipos de estados; i) aquellos cuya superficie de exposición se incrementa sustancialmente en los horizontes proyectados en relación con el escenario base y ii) aquellos en los que no se tenía presencia de este grupo de temperaturas en el escenario base y en las proyecciones de los horizontes se encuentra una superficie de exposición potencial de gran relevancia.

Figura 24. Cambios en la superficie de exposición potencial para el grupo 2 de temperaturas máximas, para los tres horizontes (35.1-38.8°C).



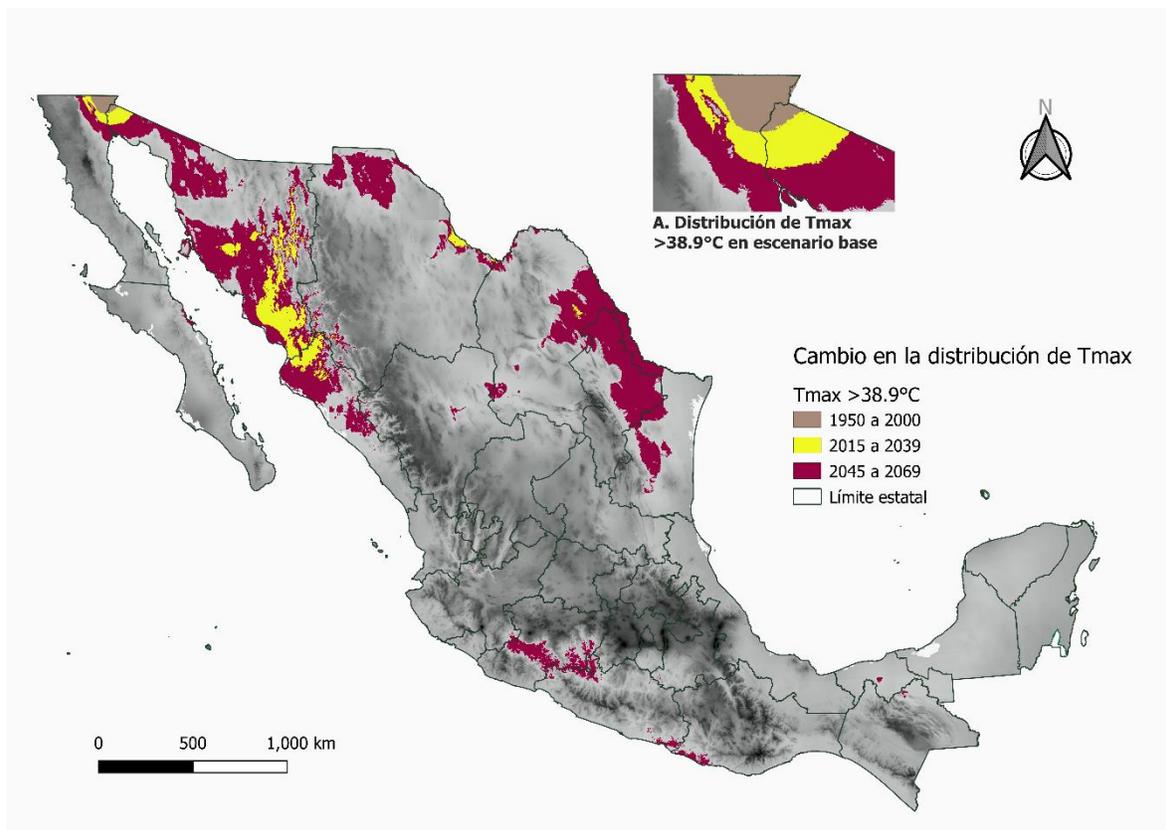
Fuente: Elaboración propia.

Como ejemplo de la primera referencia, se tiene al estado de Tabasco, el cual pasa de una superficie de exposición potencial de 1.5km<sup>2</sup> a los 18,688.3km<sup>2</sup>, para el horizonte corto, y 24,223km<sup>2</sup> para el horizonte medio. Otros estados que entran en este ejemplo son Yucatán, que pasa de los 78.4km<sup>2</sup> en el escenario base a los 19,026.3km<sup>2</sup> en el escenario de corto plazo y termina presentando una superficie de exposición potencial de 36,973.3km<sup>2</sup> para el horizonte medio. De igual forma, el estado de Campeche muestra un incremento importante pasando de 1,139.4km<sup>2</sup>, en el escenario base, a los 37,200 km<sup>2</sup> en el horizonte corto y alcanzando los 55,215.6km<sup>2</sup> en el horizonte medio del escenario HADGEM2ES. Los ejemplos más relevantes de la segunda referencia son los estados de Veracruz y Quintana Roo, los cuales pasan de no mantener una superficie de exposición potencial para este grupo de temperaturas en el escenario base, a presentar una superficie de 52,773.8km<sup>2</sup> y 29,968.8km<sup>2</sup> en el horizonte lejano del escenario HADGEM2ES respectivamente.

Para el grupo de temperaturas máximas superiores a los 38.9°C, también hay una tendencia al crecimiento de la superficie de exposición potencial y, aunque sigue concentrándose en puntos específicos del país, hay presencia de este grupo de temperaturas en estados donde antes no se daba (Mapa 8.). Los casos donde se da un crecimiento de la superficie de exposición potencial para este grupo de temperaturas son los estados de Baja California y

Sonora, en los que la superficie base se incrementa de los 2,486.9km<sup>2</sup> y 982km<sup>2</sup> a los 8,127.8km<sup>2</sup> y 100,981.4km<sup>2</sup> para el horizonte medio respectivamente.

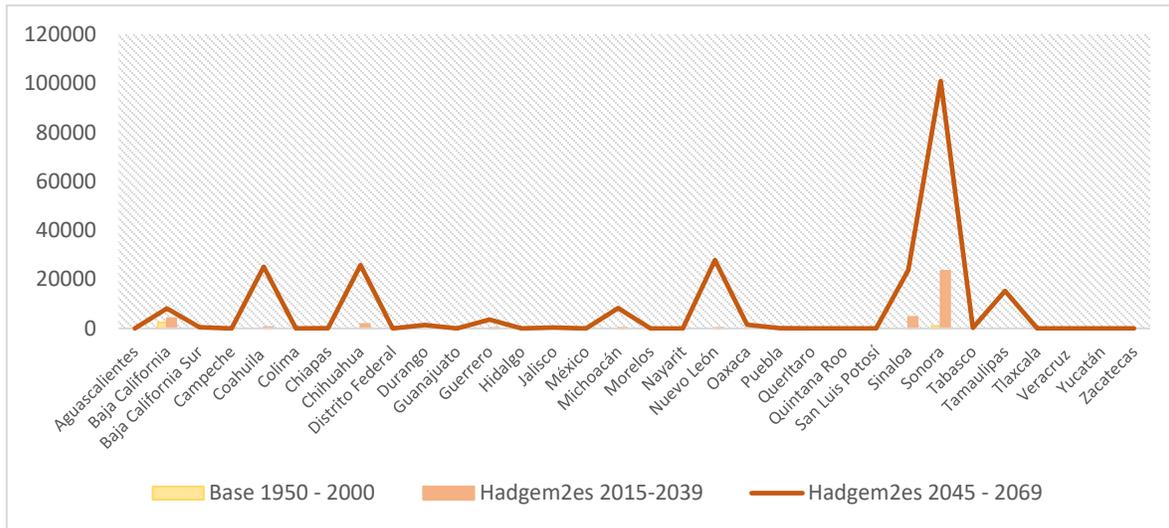
Mapa 8. Incremento de las temperaturas máximas de >38.9°C durante el periodo de 2000 a 2069.



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, estados como Sinaloa y Chihuahua presentan superficies de exposición potencial a partir del horizonte de corto plazo pasando de los 4,624km<sup>2</sup> y 1,804.4 km<sup>2</sup> a los 23,760.1km<sup>2</sup> y 25,773.6 km<sup>2</sup> respectivamente para el horizonte de mediano plazo. Casos aún más drásticos, en cuanto al aumento de la superficie de exposición de las temperaturas máximas de este grupo, son los de los estados de Nuevo León y Tamaulipas, que pasan, en el caso de Nuevo León, de 1.6 km<sup>2</sup> en el horizonte corto a los 27,892.7km<sup>2</sup> para el horizonte medio, y en el caso de Tamaulipas pasa de no mostrar superficie exposición, tanto para el escenario base como para el horizonte corto del escenario HADGEM2ES, a mantener una superficie de exposición potencial de 15,281.2km<sup>2</sup> (Figura 25).

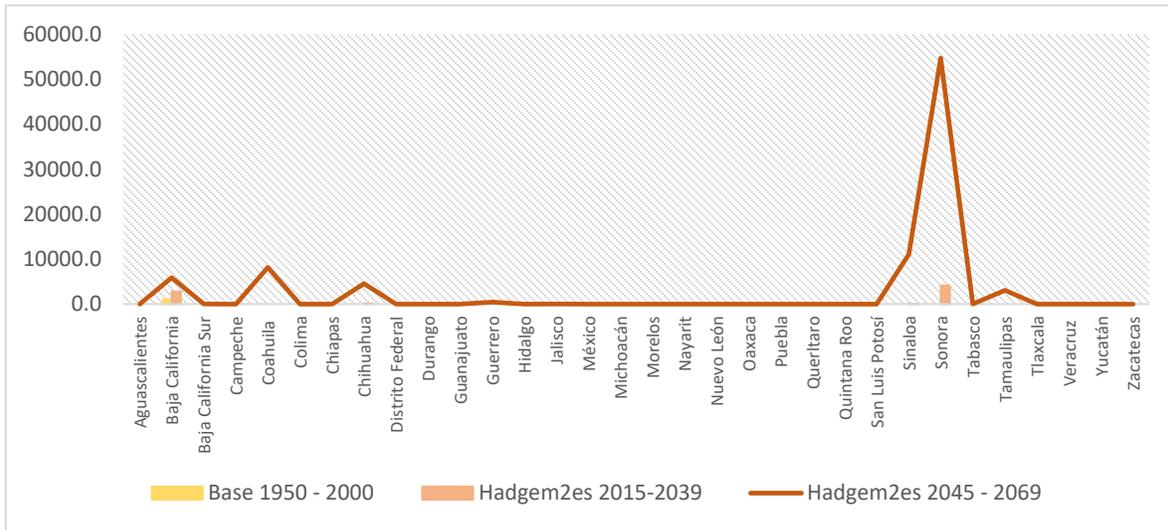
Figura 25. Cambios en la superficie de exposición potencial para el grupo 3 de temperaturas máximas, para los tres horizontes (>38.9°C).



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las temperaturas superiores de los 40.0°C, que se encuentran dentro del grupo de temperaturas máximas superiores a los 38.9°C, pasan de tener presencia solamente en el estado de Baja California, en el escenario base, con 1,065.5km<sup>2</sup> de superficie de exposición potencial, a presentarse en cuatro estados para el horizonte de corto plazo, los cuales son; Baja California, que alcanza los 2,777km<sup>2</sup>, Sonora, que llega a los 4,148.7km<sup>2</sup>, Chihuahua, con 152.8km<sup>2</sup>, y Sinaloa, con 1.5km<sup>2</sup>. Mientras que, para el horizonte de mediano plazo, este grupo de temperaturas alcanza presencia en diez estados, los cuales son; Baja California, que alcanza los 5,885.5km<sup>2</sup>, Sonora, con 54,737.7km<sup>2</sup>, Sinaloa, con 11,058.6km<sup>2</sup>, Coahuila, con 8,176.8km<sup>2</sup>, Chihuahua, con 4,558.2km<sup>2</sup>, Tamaulipas, con 3,105.4km<sup>2</sup>, Guerrero, con 486.9km<sup>2</sup>, Jalisco, con 19.9km<sup>2</sup>, y Baja California Sur y Tabasco, con una superficie de 0.8km<sup>2</sup> (Figura 26).

Figura 26. Cambios en la superficie de exposición potencial para las temperaturas máximas mayores de 40°C, que forman parte del grupo 3, para los tres horizontes (>40°C).



Fuente: Elaboración propia.

### 2.6.2 Conclusiones

De manera general, el crecimiento de la superficie que ocupan los distintos grupos de temperaturas máximas evaluados (g1; >35.0°C, y g2; >38.9°C) se da de forma continua conforme se evalúa el escenario de cambio climático HADGEM2ES en los dos horizontes.

En el caso de las temperaturas máximas superiores a los 35.0°C, muestran un crecimiento constante en superficie y un aumento de intensidad entre horizontes, una gran superficie muestra un cambio importante hacia las temperaturas máximas superiores a los 38.9°C, aunque en este caso siempre hay una nueva incorporación de zonas de los estados, lo que permite que mantengan un crecimiento sostenido en cuanto a la superficie de exposición potencial ocupada por este grupo de temperaturas máximas. El caso del grupo de temperaturas máximas superiores a los 38.9°C, se observa un crecimiento tanto en superficie como en intensidad de las mismas en relación con el escenario base y entre horizontes, el horizonte medio muestra los mayores valores y una tendencia clara a la concentración en los extremos superiores de tales valores. El ejemplo claro de ello es el incremento en la superficie de las temperaturas superiores a los 40.0°C, que se encuentran dentro del mismo grupo, pero cuyo incremento en superficie alcanza a representar el 36% del total de las temperaturas máximas de este grupo.

Esto deja claro, que se prevé un calentamiento sostenido para el país, lo que influye en la distribución de las temperaturas máximas y, por ende, de los fenómenos extremos de altas temperaturas. Aunado a ello, es evidente que nuevas áreas de los distintos estados evaluados, es decir, nuevas municipalidades, se verán enfrentadas a retos importantes derivados de la expansión territorial de las temperaturas máximas y los FEAT que se proyecta, además de que las zonas donde las temperaturas máximas ya eran altas sufrirán incrementos en la intensidad y distribución de las mismas, lo que implica un aumento importante de la exposición potencial de grupos vulnerables.

Queda claro, también, que los estados que concentran la mayor superficie de las temperaturas máximas más elevadas, las que se encuentran dos desviaciones estándar por encima de la media, son los estados del norte del país, aunque con algunas excepciones como Guerrero y Tabasco. El gran ausente es la Ciudad de México, pese a que debido a la gran población que concentra y al efecto de las islas de calor, que ponen en riesgo a su población, las temperaturas máximas evaluadas no permiten enfocar la problemática particular de la ciudad, ya que sus temperaturas máximas no alcanzan los 35.0°C del umbral mínimo considerado para evaluar los FEAT.

## ***Capítulo 3. La exposición urbana a los FEAT: el incremento y distribución de la población***

### **3.1 Introducción**

El crecimiento poblacional, como constitutivo del medio urbano, conlleva una serie de consideraciones que moldean el análisis y tratamiento a las problemáticas que surgen en las urbes. A su vez, la consideración de su constante evolución, de su naturaleza cambiante y de su interacción con otros elementos del entorno en el que se inserta permite vislumbrar el crecimiento de tales problemáticas y la urgencia de atención que puedan tener.

En el caso de los FEAT, la interacción entre las dinámicas demográficas de las urbes y el incremento de la temperatura media global impulsa una reconfiguración de la exposición a eventos de calor extremo que conllevan una serie de afectaciones que, por los modelos de desarrollo que impulsan a las ciudades, suelen impactar a la población más vulnerable (Jones et al., 2018; Raymond et al., 2020; Schteingart & Salazar, 2005). Entender que el tamaño y la distribución espacial de la población futura son impulsores importantes del cambio global y determinantes clave de la exposición y vulnerabilidad a los FEAT (Jones & O'Neill, 2016) permite la planeación y determinación de medidas que impulsen las acciones de mitigación y fortalezcan la capacidad adaptativa de las localidades y sus pobladores.

Con eso en consideración, el presente capítulo pretende analizar la tendencia futura de urbanización nacional, su crecimiento y distribución, a través de las proyecciones de población desarrolladas por Jones & O'Neill (2016) bajo dos trayectorias socioeconómicas compartidas, SSP3 y SSP5, que ilustran dos mundos posibles con trayectorias de urbanización disímiles y que, a su vez, tomando en consideración la evolución de las temperaturas máximas nacionales a través del modelo HADGEM-ES2 de cambio climático, permite evaluar el grado de exposición a eventos de calor extremo para dos horizontes temporales; 2015-2039 y 2035-2069.

### **3.2 Las ciudades mexicanas ¿impulsoras de la exposición a FEAT?**

La urbanización es un proceso complejo, que tiene dos manifestaciones principales; una de naturaleza demográfica, que opera a través del crecimiento y concentración de la población, y la otra consistente en la evolución de la forma de vida de la población (Unikel, 1968), que se da a través de la modernización de las actividades diarias de dicha población, la provisión de servicios, la infraestructura y la naturaleza de las actividades económicas que se desarrollan en las urbes.

En México, el proceso de urbanización se ha caracterizado por el aumento en el número de urbes y la concentración de la población, lo que es evidente al comparar el paso de 51 ciudades de más de 15 mil habitantes en 1878, a 178 ciudades en 1970, y a 401 ciudades, identificadas en el Sistema Urbano Nacional, en 2018. Además, se observa un aumento de las grandes ciudades, aquellas que superan el millón de habitantes, pasando de tres, en 1970, a 15, en 2018. Tales cambios, de la concentración de la población en las ciudades, su multiplicación en número, su expansión física y el incremento de la población ocupada en actividades industriales y de servicios forman parte del proceso de urbanización contemporáneo en el país (SEDATU, 2018; Sobrino, 2019; Unikel, 1968).

Tal proceso de urbanización, desde una visión demográfica, se consolida a través del crecimiento natural de la población que allí habita y de la migración hacia los nodos de desarrollo, en los que las ciudades se han convertido. Esos cambios establecen un escenario de crecimiento específico para las ciudades mexicanas, decantando en un patrón de desarrollo tanto económico como social, además de producir un nivel determinado de presión sobre los recursos naturales y el entorno en el que las ciudades están insertas (Jordán et al., 2017). Aunado a ello, el crecimiento y distribución de la población, que caracteriza a las urbes, impulsa un patrón determinado de riesgo ante eventos extremos e incluso, en el caso de los fenómenos extremos de alta temperatura, cataliza los efectos negativos debido a las características físicas de las urbes (Zavaleta et al., 2020).

### *3.2.1 La urbanización en México; tendencias de crecimiento*

En la actualidad, el 72.3% de la población, casi tres de cada cuatro personas, habitan en alguna de las ciudades mexicanas, el incremento de asentamientos urbanos y la concentración de población en ellos se da por la concreción de ventajas económicas y sociales que propician el intercambio de información, la accesibilidad, la conectividad y la atracción de talento y de inversiones (Almejo, García, & Benítez, 2014). En el caso mexicano, a partir de 1970, tal crecimiento toma una forma específica, se conforma a través de centros de atracción que establecen un crecimiento continuo a través de otros municipios, es decir, a través de la conformación de diferentes zonas metropolitanas (Garza, 2003), las cuales, para ese año, albergaban al 23% de la población nacional (Sobrino, 2019).

En 2018, se identificaron 401 ciudades habitadas por cerca de 92.7 millones de personas, lo que implicaba cerca del 74.2% de la población nacional, y que implicaba un crecimiento de 2.1 % más que en 2010, además de incorporar 36 nuevas urbes, crecimiento que refleja el incremento en la tendencia de urbanización del país (SEDATU, 2018). En 1970 tan solo 13 ciudades eran metrópolis, las cuales concentraban el 64.1% de la población urbana, para 1980 el número era de 26 zonas metropolitanas, concentrando el 68.8%, en 1990 se registraron 51 zonas metropolitanas, que albergaban al 81% de la población urbana nacional, y en el 2000, 83% de la población urbana habitaba en 56 zonas metropolitanas (Garza, 2003). Resalta el hecho de que, para 2018, de las ciudades registradas, 74 son zonas metropolitanas, 132 conurbaciones y 195 centros urbanos. Las primeras son las de mayor crecimiento demográfico, concentran cerca de 78.3 millones de habitantes, seguidas de los centros urbanos, con 7.3 millones y las conurbaciones, que cuentan con 7.0 millones (SEDATU, 2018).

Los criterios que definen una población urbana en el país se relacionan tanto con el nivel de población que habita en las localidades de México como con un grupo de variables socioeconómicas seleccionadas como distintivas de lo urbano. Aunque la mayoría de los estudios demográficos y urbanos de México consideran como primordial el umbral poblacional en el que las localidades de 15 mil habitantes se clasifican como urbanas, el umbral de 2,500 habitantes, usado anteriormente para considerar como urbanas las localidades con al menos 2,500 habitantes y como rurales a las localidades menores a ese tamaño, continúa siendo ampliamente utilizado para referirse a las localidades rurales, lo que

ha llevado a definir la categoría “mixta” o en transición rural-urbana para incluir en ella a las localidades entre ambos límites (Anzaldo-Gómez, 2012).

El sistema de asentamientos humanos de México ha experimentado cambios importantes a lo largo del tiempo, tales como: i) el tránsito de un patrón de urbanización de tipo preeminente, centrado fundamentalmente en las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey, hacia otro más heterogéneo que se diversifica en varias metrópolis de más de un millón de habitantes; en ese sentido, ii) el aumento sistemático en el número y tamaño de zonas metropolitanas, el cual pasó de 26 zonas que concentraban a 39.1% de la población nacional en 1980, a 74 que aglutinaban a 64.5% de la población en 2018; y iii) la consolidación en la región central del país de un patrón de urbanización extendido de tipo policéntrico (Anzaldo-Gómez, 2012; SEDATU, 2018).

Esta tendencia da señales claras de la consolidación de un país eminentemente urbano, por lo que se pronostica que el país pasará a contar con 961 ciudades en 2030, en las que se concentrará el 83.2% de la población nacional, tendencia que, además de ser muy dinámica, enfrenta riesgos derivados de una pobre institucionalidad en la gobernanza y de la persistencia de un modelo socio-económico muy desigual e inequitativo que seguirá concentrando población de muy bajo ingreso en las ciudades (ONU-Hábitat, 2017), impulsando el riesgo a desastre, especialmente para los sectores más vulnerables de la población, por eventos extremos de índole diversa, entre los que se encuentran los FEAT.

### *3.2.2 Las trayectorias socioeconómicas compartidas; una mirada al futuro de las ciudades mexicanas*

El tamaño proyectado y la distribución espacial de la población futura son impulsores importantes del cambio global y determinantes clave de la exposición y vulnerabilidad a las amenazas (Jones & O’Neill, 2016; Raymond et al., 2020). La información que proveen las proyecciones de la población futura permite entender su dinámica bajo determinadas circunstancias económicas, sociales, políticas y demográficas (García-Guerrero, 2014), las posibles tendencias que seguirán y, por ende, las implicaciones que su evolución tendrá en el futuro, incluida, entre tales, la exposición de la población a los FEAT.

En ese sentido, Jones & O’Neill (2016) desarrollaron espacialmente un conjunto de escenarios poblacionales globales, los cuales son consistentes con las nuevas trayectorias

socioeconómicas compartidas (SSPs, por sus siglas en inglés), las cuales se constituyeron a través de un modelo de reducción de escala parametrizado para producir proyecciones de cambio poblacional espacial que son cuantitativamente coherentes con las proyecciones de población y urbanización nacionales para los SSPs y cualitativamente consistente con los supuestos de las narrativas que subyacen a tales SSPs con respecto a los patrones de desarrollo espacial. Las SSPs describen cinco resultados alternativos para las tendencias en demografía, economía, desarrollo tecnológico, estilos de vida, gobernanza y otros factores sociales. Estos SSPs consisten en narrativas cualitativas del desarrollo futuro y proyecciones cuantitativas de elementos clave que incluyen el crecimiento de la población a nivel nacional y la composición educativa, la urbanización y el crecimiento económico.

Las proyecciones de población mencionadas fueron desarrolladas espacialmente a nivel global con una resolución de  $1/8^\circ$  ( $\sim 13.9\text{km}^2$ ) para la población urbana y rural consistente, tanto cuantitativa como cualitativamente, con los mencionados SSPs. Cuantitativamente, las proyecciones espaciales son consistentes con la población total, urbana y rural a nivel nacional. Cualitativamente, Jones & O'Neill (2016) interpretan las narrativas de los SSPs para las características relacionadas con el estilo de desarrollo urbano y suburbano previsto en cada una de las trayectorias socioeconómicas, y se producen las SSPs que comparten esas características, se calibra el modelo con datos históricos sobre la población espacial con la intención de que los valores de los parámetros se basen en patrones de desarrollo observados, utilizándose para producir las proyecciones.

Como se mencionó, el proceso de Jones & O'Neill (2016) implica, en primer lugar, la calibración del modelo con datos históricos de los diferentes países analizados, para estimar parámetros urbanos y rurales indicativos de ciertos patrones de cambio espacial, después de lo cual, se seleccionan los parámetros regionalmente representativos para cada SSP y se aplica el procedimiento de reducción de escala país por país. Tal procedimiento, comienza con una distribución cuadrículada de la población del año base, para lo cual los autores siguieron cinco pasos básicos: 1) se calculó una superficie potencial de población urbana (una distribución de valores que refleja el peso relativo de cada celda de la cuadrícula), 2) se calculó una superficie potencial de la población rural, 3) se asignó el cambio proyectado de la población urbana a las celdas de la cuadrícula, en relación proporcional con sus respectivos

potenciales urbanos, y 4) se asignó el cambio proyectado de la población rural a las celdas de la cuadrícula de acuerdo con el potencial rural. Tales superficies de población potencial, tanto urbana como rural, son continuas en todas las celdas y, como tal, cada celda puede contener población urbana y rural. Dado que el procedimiento de asignación puede llevar a cierta redefinición de la población de rural a urbana, 5) se procedió a la redefinición de la población como urbana o rural como una función de densidad y contigüidad con celdas completamente urbanas o rurales para igualar los totales proyectados a nivel nacional. Luego, estos pasos se repitieron para cada intervalo de tiempo de 10 años, desde 2010 hasta 2100. Los datos empleados en la presente investigación son producto del reescalado hecho por Gao (2017)<sup>12</sup>, en el que se alcanza un nivel de resolución de 1km x 1km, aunque sin violentar los procesos seguidos en las proyecciones realizadas por Jones & O'Neill (2016).

*Cuadro 6. Resumen de supuesto demográficos para cinco SSPs*

	SSP1- <i>Sustentabilidad</i>	SSP2 <i>Mitad del camino</i>	SSP3 <i>Rivalidad regional</i>	SSP4 <i>Desigualdad</i>	SSP5 <i>Desarrollo basado en combustibles fósiles</i>
<b>Crecimiento poblacional</b>					
Alta fertilidad	Bajo	Medio	Alto	Alto	Bajo
Otros de fertilidad baja	Bajo	Medio	Alto	Medio bajo	Bajo
Ricos de baja fertilidad	Medio	Medio	Bajo	Medio bajo	Alto
<b>Nivel de urbanización</b>					
Altos ingresos	Rápido	Moderado	Lento	Moderado	Rápido
Ingreso medio	Rápido	Moderado	Lento	Rápido	Rápido
Bajos ingresos	Rápido	Moderado	Lento	Rápido	Rápido
Patrón espacial	Concentrado	Patrones históricos	Mixto	Mixto	Disperso

**Nota:** Agrupaciones de países por factores que afectan el crecimiento de la población los resultados (fecundidad, mortalidad, migración) se realizan de acuerdo con las condiciones actuales de fecundidad e ingresos, mientras que las agrupaciones para la urbanización los supuestos se basan únicamente en los ingresos corrientes.

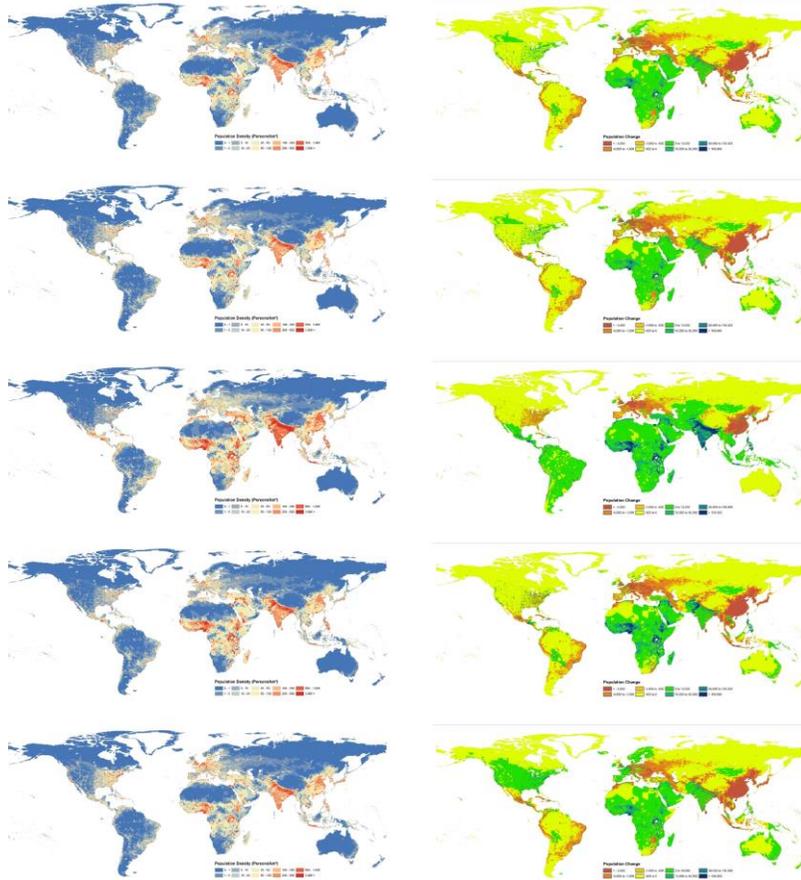
Fuente: Jones & O'Neill., 2016

<sup>12</sup> La reducción de escala de las proyecciones de Jones & O'Neill (2016) se basó en el mapa de conteo de población total de 1 km en 2000 del Proyecto Global de Cartografía Rural-Urbana (GRUMP), se agregaron a las cuadrículas de 1/8 grados de los mapas de población espacial del SSP, lo que resultó en un mapa de conteo de población total GRUMP de 1/8 grados en 2000. Luego se dividió en cuadrículas de 1km lo que da como resultado un mapa de peso de 1 km que muestra cómo la población de cada cuadrícula de 1/8 grados se distribuye en fracciones entre las cuadrículas de 1 km. Para mas detalles del proceso consultar Gao (2017), 'Downscaling Global Spatial Population Projections from 1/8-degree to 1-km Grid Cells'.

Las tendencias generales se aplican a tres grandes grupos de países para el período 2010-2100, para los factores demográficos que impulsan el cambio de población, Jones & O'Neill (2016) clasifican 232 países en función de la fecundidad y los ingresos actuales, obteniendo los siguientes grupos: alta fecundidad, baja fecundidad con altos ingresos (es decir, los correspondientes a la OCDE) y baja fecundidad. Para los supuestos sobre los niveles de urbanización, los grupos de países se definen solo por los niveles de ingresos actuales. Finalmente, la migración internacional se incluye explícitamente en las proyecciones de población a nivel nacional que corresponden a cada SSP, las tasas se desarrollan con base en una matriz existente a nivel mundial de inmigración y emigración y se ajustan para reflejar supuestos relacionados con cambios en cada SSP (Cuadro 6).

En cuanto a la SSP3 se prevén inversiones bajas en capital humano y un crecimiento de ingresos bajo, lo que lleva a plantear el supuesto de tasas relativamente altas de fertilidad y crecimiento, igualmente alto, de la población en los países que actualmente tienen una alta fecundidad. Por otra parte, la incertidumbre económica conduce a tasas de fecundidad relativamente bajas y a un crecimiento de la población bajo, o incluso un descenso, en los países de fecundidad actualmente baja. La migración es relativamente baja esa trayectoria, la SSP3, mientras que la urbanización avanza lentamente en SSP3 con patrones espaciales mixtos; de expansión en algunas áreas y un desarrollo más concentrado en otras. Como es posible observar en la Figura 27., las cinco SSPs conducen a resultados de proyecciones espaciales de población diferentes a escala continental, nacional y subnacional. Jones & O'Neill (2016) resaltan que los resultados a nivel de celda de la cuadrícula están más influenciados por el cambio de población a nivel nacional, en segundo lugar, por la tasa de urbanización y en tercer lugar por los supuestos sobre el estilo espacial de desarrollo. Sin embargo, la importancia relativa de estos factores es una función de la magnitud del cambio proyectado en la población total y la urbanización para cada país y entre las SSPs.

Figura 27. (a)–(e) Densidad de población proyectada para las cinco SSPs (2100), y (f)–(j) el cambio correspondiente proyectado de población (2010-20100).



Fuente: Tomado de Jones & O'Neill (2016).

El crecimiento observado de la población es alto para la SSP3, sin embargo, la menor tasa de urbanización en SSP3 conduce a una población rural mucho más grande, que se manifiesta en un patrón de cambio más disperso. La tasa de urbanización proyectada para las SSP5 es alta, sin embargo, la población total proyectada crece lentamente y no muestra un crecimiento sostenido en el tiempo, lo que produce pequeñas diferencias como resultado del patrón implícito de cambio espacial (concentración y expansión, respectivamente).

Tales cambios, tanto en el nivel de población como en la urbanización, establecen un patrón determinado de exposición a los fenómenos extremos de alta temperatura, además de definir una forma de evolución específica en tal exposición, al marcar una tendencia evolutiva en la distribución y aumento poblacional y urbano bajo las trayectorias socioeconómicas compartidas. La presente investigación, se centra en las SSP3 y SSP5, que marcan trayectorias demográficas y de urbanización disímiles, al proyectar, la primera, un

crecimiento poblacional elevado y un nivel de urbanización bajo, para el caso de México. Mientras que la SSP5, proyecta un crecimiento poblacional lento o bajo, y una urbanización rápida, para el caso mexicano.

### *3.2.3 La urbanización como catalizador de la exposición a los FEAT*

La evolución en la exposición al calor extremo depende no solo del cambio climático, sino también de los cambios en el tamaño y la distribución espacial de la población humana. Sus efectos físicos sobre las poblaciones humanas están bien documentados, pudiendo tener grandes impactos en su salud e incluso duplicando el nivel de mortalidad durante eventos de calor extremos (Anderson & Bell, 2011), a su vez, ciertos factores demográficos y socioeconómicos aumentan la vulnerabilidad a los problemas de salud relacionados con los FEAT. Anticipar los cambios en la exposición a eventos futuros de altas temperaturas es un componente clave para la comprensión de la vulnerabilidad futura y para una correcta planificación de acciones que permitan mitigar sus efectos adversos (Jones et al., 2015, 2018).

La vulnerabilidad al calor extremo no solo está determinada por la exposición al calor, sino también por la sensibilidad y la capacidad de adaptación, por lo que las áreas no urbanas con alta sensibilidad y baja capacidad de adaptación también podrían ser vulnerables a los FEAT, sin embargo, se considera que, en general, las áreas urbanas son más vulnerables a los eventos de calor extremo debido a la mayor exposición causada tanto por el “efecto isla de calor urbano” como por el nivel de concentración de población (Chen et al., 2016). Las olas de calor se encuentran entre los mayores peligros relacionados con el clima y se prevé un aumento en su frecuencia e intensidad durante el próximo siglo, debido a que la exposición a las olas de calor está en función de la distribución espacial de los eventos físicos y la correspondiente distribución de la población, la exposición futura estará determinada por cambios en ambas distribuciones (Jones et al., 2018).

Si bien existe una nutrida valoración de la exposición a eventos extremos y sus efectos, entre los que se encuentran los eventos de calor extremo (Anderson & Bell, 2009, 2011; Chen et al., 2015, 2016; Hauer, Evans, & Mishra, 2016; Monterroso & Conde, 2015), son pocos los que hacen énfasis en el aumento en la distribución e intensidad bajo escenarios de cambio climático desde

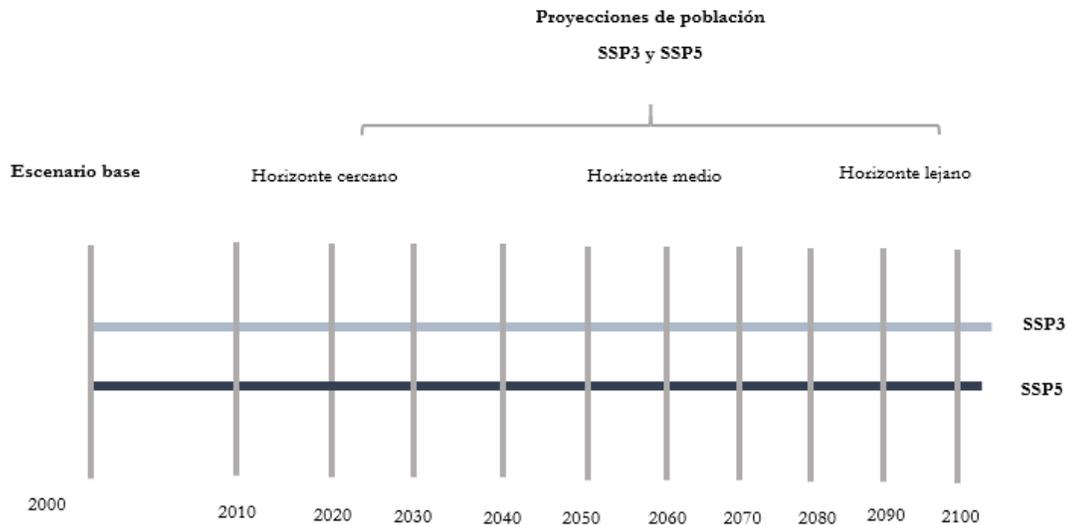
un punto de vista espacial. Jones et al. (2015; 2016) analizan la exposición a eventos de calor extremo, proyectando la exposición futura a través de conjuntos de proyecciones climáticas y de población. En el primer estudio de exposición que desarrollan, el cual se centra en la exposición a eventos de calor extremo en Estados Unidos, se emplean proyecciones de un conjunto de modelos climáticos regionales, congruentes con el escenario SRES A2, y una proyección de población espacialmente detallada consistente con los supuestos socioeconómicos de ese escenario, para proyectar la exposición futura y los cambios en la misma durante la segunda mitad del siglo XXI. Jones et al. (2015) encuentran que la exposición de la población estadounidense al calor extremo aumenta de cuatro a seis veces por encima de los niveles observados a fines del siglo XX, y que los cambios en las áreas de población son tan relevantes como los cambios en el clima para llegar a ese resultado, sin embargo, la importancia relativa de la población y el clima como factores que influyen en la exposición varía entre las regiones del país.

Su segundo estudio, sobre la exposición a eventos de calor extremo, se desarrolla a nivel mundial. Jones et al. (2016) proyectan la exposición futura a través de conjuntos de proyecciones climáticas, para dos escenarios de emisión alternativos (RCP4.5 y RCP8.5) y dos resultados alternativos de población y urbanización (SSP3 y SSP5), caracteriza la exposición a nivel global, regional y de celda de cuadrícula, además de cuantificar la dependencia de la exposición de los resultados de la población. Los resultados mostraron que el cambio climático es un determinante más fuerte de la exposición que el cambio demográfico en tales escenarios, con una reducción global en la exposición de más del 50% en una vía de emisiones más bajas, mientras que una vía de crecimiento de la población más lenta conduce a aproximadamente un 30% menos de exposición, la incertidumbre en los resultados está dominada por la variabilidad interanual en los extremos de calor (en relación con la variabilidad entre los miembros del conjunto de condiciones iniciales). Para algunas regiones, esta variabilidad es lo suficientemente grande como para que no se garantice una reducción en la exposición anual en cada año individual siguiendo la trayectoria de forzamiento más baja. Finalmente, encontramos que considerar explícitamente el efecto isla de calor urbano y las poblaciones urbanas y rurales por separado pueden influir sustancialmente en los resultados, aumentando generalmente la exposición proyectada, en las áreas urbanas.

Existen muchos índices para medir el calor extremo, sin que ninguno de ellos resulte un mejor predictor de mortalidad, o enfermedades, relacionada con el calor debido a la heterogeneidad de los grupos edad, estaciones y regiones geográficas específicos que pueden variar significativamente (Anderson & Bell, 2009, 2011; Hondula et al., 2014; Jones & O'Neill, 2013; Jones et al., 2015, 2018). Por ello, y por qué se investiga un área geográfica grande y se modelan los efectos en la población total en lugar de hacerlo en subgrupos, Jones et al (2015:2016) emplean un umbral de temperatura geográficamente uniforme y definen a la temperatura extrema como un máximo de 35 ° C o más.

Tomando en consideración el límite propuesto por Jones et al. (2015) para la determinación de un umbral de temperaturas que implique un riesgo para la población, especialmente para la que habita en las ciudades, así como las limitaciones de los datos disponibles para el país, la presente investigación analiza la evolución de la población expuesta a temperaturas máximas mensuales por encima de los 35°C, además, tomando en cuenta las condiciones locales de la evolución temporal de la distribución y aumento de las temperaturas máximas mensuales, analiza la exposición de la población a temperaturas que se encuentran por encima de las dos desviaciones estándar, es decir, a la población expuesta a temperaturas superiores a los 38.9°C.

Figura 28. Cortes temporales para los horizontes cercano y medio para las proyecciones de población desarrolladas por Jones & O'Neill (2016).



Fuente: Elaboración propia

Aunado a ello, la evolución de la distribución y el aumento de la población urbana, proyectada por Jones & O'Neill (2016), bajo dos distintas trayectorias socioeconómicas compartidas, en las que subyace un patrón y velocidad de crecimiento urbano, SSP3 y SSP5, permite analizar la exposición futura bajo dos caminos de desarrollo y crecimiento poblacional distintos. Tales trayectorias, las de Jones & O'Neill (2016), hacen énfasis en la concepción demográfica y poblacional de lo urbano, lo que implica una visión específica de la exposición a los fenómenos extremos de alta temperatura (FEAT) y, por ende, un análisis del riesgo que permite observar una parte del rompecabezas, un análisis centrado tanto en la habitabilidad del territorio como en el aumento y distribución de la población.

El análisis de los datos se centra en dos horizontes, uno de cercano plazo y el otro medio plazo, analizados a través de cuatro cortes temporales; 2020, 2030, 2050 y 2060 (Figura 28). Tales cortes se establecen con el fin de superponer los datos de la evolución de las temperaturas máximas mensuales, para las cuales solo se tienen dos proyecciones que se promedian para horizontes completos; 2015-2039 y 2045-2069. Además, se establece un escenario base a través de los datos proporcionados por Jones & O'Neill (2016) para el año 2000, datos que permiten obtener la exposición a través del análisis de los datos históricos

de temperaturas máximas mensuales del periodo 1950-2000, obtenidos de IPUMS TERRA (2021).

### **3.3 La exposición a los FEAT en las áreas urbanas de México desde una mirada poblacional**

Haciendo énfasis en el aspecto del crecimiento poblacional, tanto como constitutivo de la urbanización nacional como impulsor de la exposición a los FEAT, se observa como tal crecimiento de la población y la forma en que se distribuye establecen un patrón específico que moldea un escenario de exposición determinado, haciendo coincidir las áreas de distribución de la población mexicana con las zonas o superficies en las que los extremos de las temperaturas máximas se distribuyen.

Tal sinergia, toma una mayor relevancia cuando las coincidencias se dan en los centros de concentración poblacional por excelencia; las ciudades. Jones & O'Neill (2016) desarrollan proyecciones de población y urbanización bajo los supuestos de las SSPs, con la intención de analizar las implicaciones, en según término, que tiene el modelo de desarrollo y crecimiento poblacional que subyace a tales SSPs. En ese sentido, tales proyecciones son de gran utilidad para la evaluación de la exposición futura a los fenómenos extremos de alta temperatura, especialmente, en las grandes urbes, cuya tendencia futura parece ser la de su consolidación, crecimiento y multiplicación, convirtiéndose en un vehículo tanto para la prosperidad como para el riesgo a desastre al que la humanidad estará expuesta.

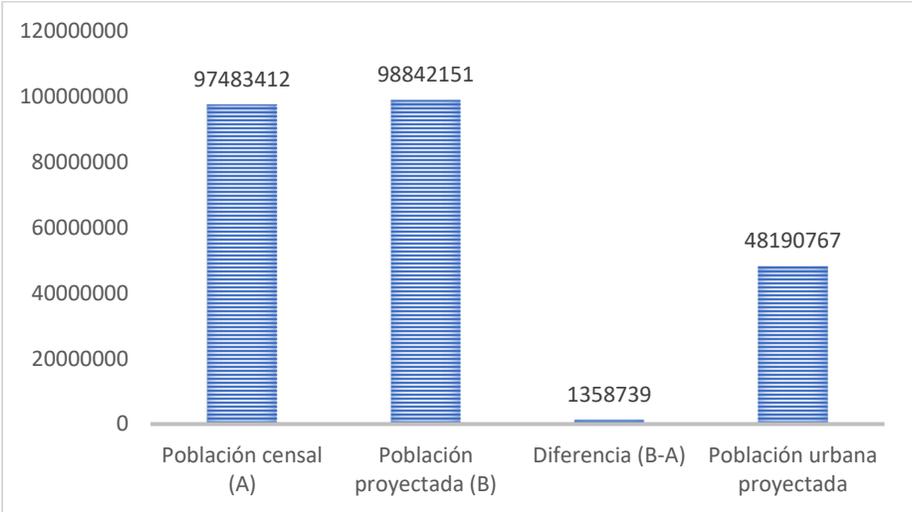
#### *3.3.1 El aumento poblacional y su distribución espacial como impulsor de la exposición a los FEAT en México*

Uno de los elementos fundamentales o una de las visiones principales de la urbanización es el crecimiento poblacional. Ese crecimiento es visto como constitutivo de lo urbano y como un elemento sin el cual las urbes no adquieren sus características (Garza, 2003; SEDATU, 2018; Sobrino, 2019; Unikel, 1968), tanto materiales como esenciales, principales. B. Jones & O'Neill (2016) analizan la evolución de la urbanización mundial a través, precisamente, de esta visión demográfica, tanto sus características distributivas como de incremento, o reducción, paulatino que se da en el tiempo. Ello, a través de la proyección futura de las

condiciones que impulsan el crecimiento poblacional, estableciendo diferencias específicas según las narrativas y características cuantitativas que subyacen a las SSPs., comportamiento que permite vislumbrar la posible distribución de la exposición a los FEAT y, por ende, planear diversas acciones de mitigación, en zonas de riesgo específicas, a través de políticas públicas nacionales y locales.

Con la intención de analizar el cambio que se da a través de tales proyecciones B. Jones & O’Neill (2016) establecen un escenario base, diseñado para el año 2000, el cual fue reescalado por Gao (2017) obteniendo una resolución espacial de 1km x 1km por pixel. Los datos muestran la distribución la población nacional, rural y urbana para dicho periodo, aunque este trabajo se centra en las proyecciones de población nacional y urbana. El cálculo de la población para el año base realizado por Jones & O’Neill (2016) rebasa en 1.4% las cifras reportadas por el INEGI para el mismo año (Figura 29), lo que representa una diferencia de 1, 358, 739 habitantes, diferencia que debe ser tomada en cuenta para la consideración de las proyecciones finales de exposición a FEAT.

Figura 29. Población nacional y urbana para el año 2000.



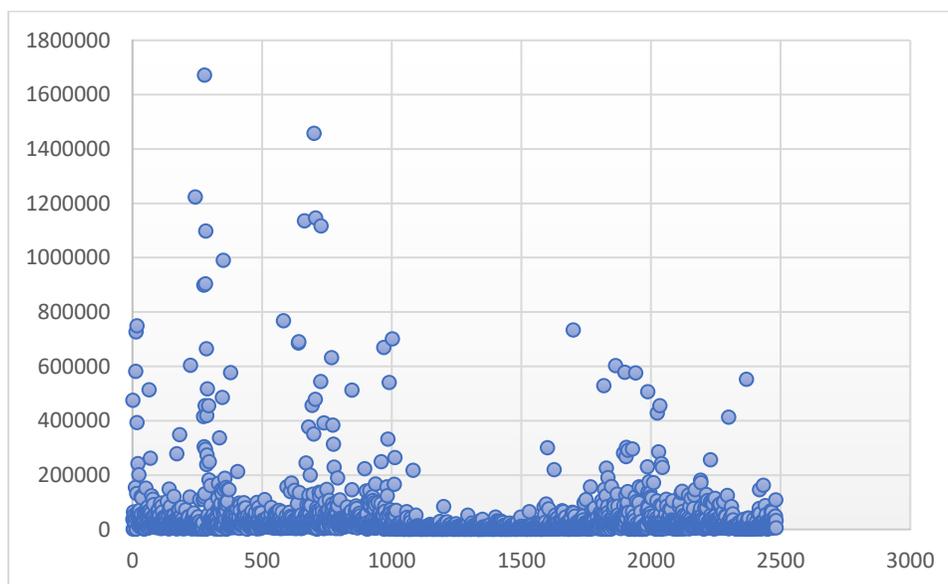
Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (2020) y Jones & O’Neill (2016)

En cuanto a la población urbana calculada por Jones & O’Neill (2016), las cifras establecen una población de 48,190,767 habitantes urbanos, lo que representa el 48.8% de la población nacional. Sin embargo, para ese mismo año, INEGI (2021) reporta que la población urbana representa el 75% de la población total, discrepancia que puede deberse al método de clasificación de las localidades urbanas, ya que, INEGI considera una población como urbana

a aquella que supera los 2,500 habitantes, método que arrojaría cifras elevadas de urbanización para ese año, pero que conllevaría una estabilización paulatina en periodos posteriores, tal como se verá en la aproximación que se alcanza entre las cifras de INEGI y las proyecciones de Jones & O'Neill (2016) para el año 2020.

En este sentido, según las cifras de Jones & O'Neill (2016), los municipios que muestran los mayores niveles de urbanización, es decir, los municipios en los que la población urbana equipara a la población total son Iztapalapa, Ecatepec de Morelos, Juárez, Ixtapaluca, Zapopan, Nezahualcóyotl, Tlalpan, León, Tláhuac y Gustavo A. Madero, con cifras que van del 85%, en el caso de Gustavo A. Madero, al 100% de urbanización, en el caso de Iztapalapa. Debido al constante cambio en el número de municipalidades que existen en el país, se emplearon las municipalidades declaradas en el año 2020, con el fin de hacer comparables los resultados y el análisis de datos, tanto para las cifras de población y la urbanización como para la exposición a los FEAT. De los 2,483 municipios, considerados en 2020, 83 se encuentran por encima de los 200 mil habitantes, mientras que, la gran mayoría, 2,400, se encuentran por debajo de dicho límite poblacional (Figura 30). De entre tales municipios, 1,604 presentan superficie de zonas que han sido categorizados como urbanos, dado que la clasificación de la cuadrícula desarrollada en el escenario base, según el criterio de Jones & O'Neill (2016), muestra niveles de densidad poblacional altos.

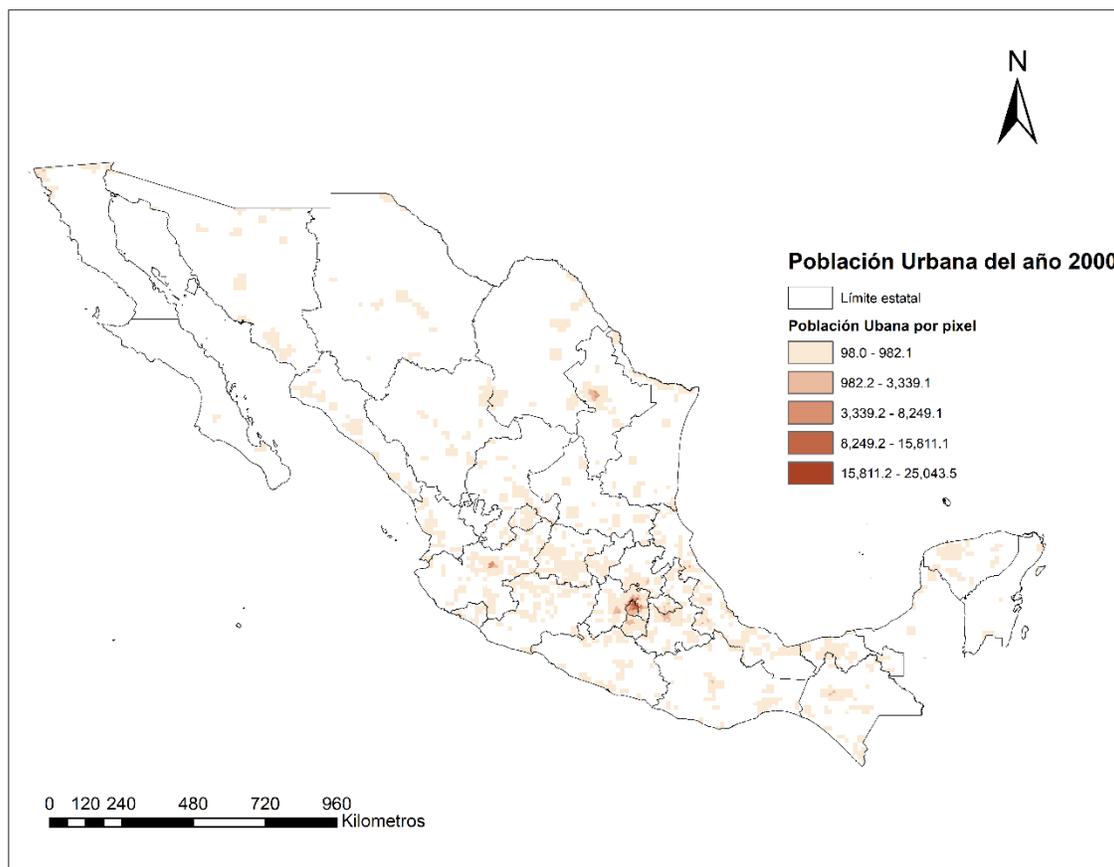
*Figura 30. Municipios agrupados por nivel de población.*



Fuente: Elaboración propia con datos de Jones & O'Neill (2016).

Tal superficie de distribución de la población urbana, o de urbanización desde una mirada demográfica, alcanza una superficie de 236, 092 km<sup>2</sup>, que se distribuye, principalmente, en la zona centro del país, aunque muestra nodos de concentración poblacional muy importantes (Mapa 9). La mayor superficie urbana se concentra en el estado de Veracruz, con 20,368.6 km<sup>2</sup>, seguido de Jalisco, con 17, 312.9 km<sup>2</sup>, y Michoacán, con 12,933.1km<sup>2</sup>. Sin embargo, si tomamos en cuenta la superficie urbana que representa el mayor porcentaje de la superficie estatal; tenemos, en primer lugar, a la Ciudad de México, la cual abarca el 98.1% de su superficie total, le sigue Morelos, cuya superficie urbana abarca el 79.5% de la superficie estatal, y por último Aguascalientes, Tlaxcala y el Estado de México, para los cuales la superficie clasificada como urbana que cubre más del 50% de su superficie total.

*Mapa 9. Rango de población urbana por píxel para el año base (2000).*



Fuente: elaboración propia con datos de Jones & O'Neill (2016)

En este sentido, el número y superficie de distribución de la población urbana juega un papel fundamental en la exposición a riesgos de desastre, ya que, como se describe en la siguiente

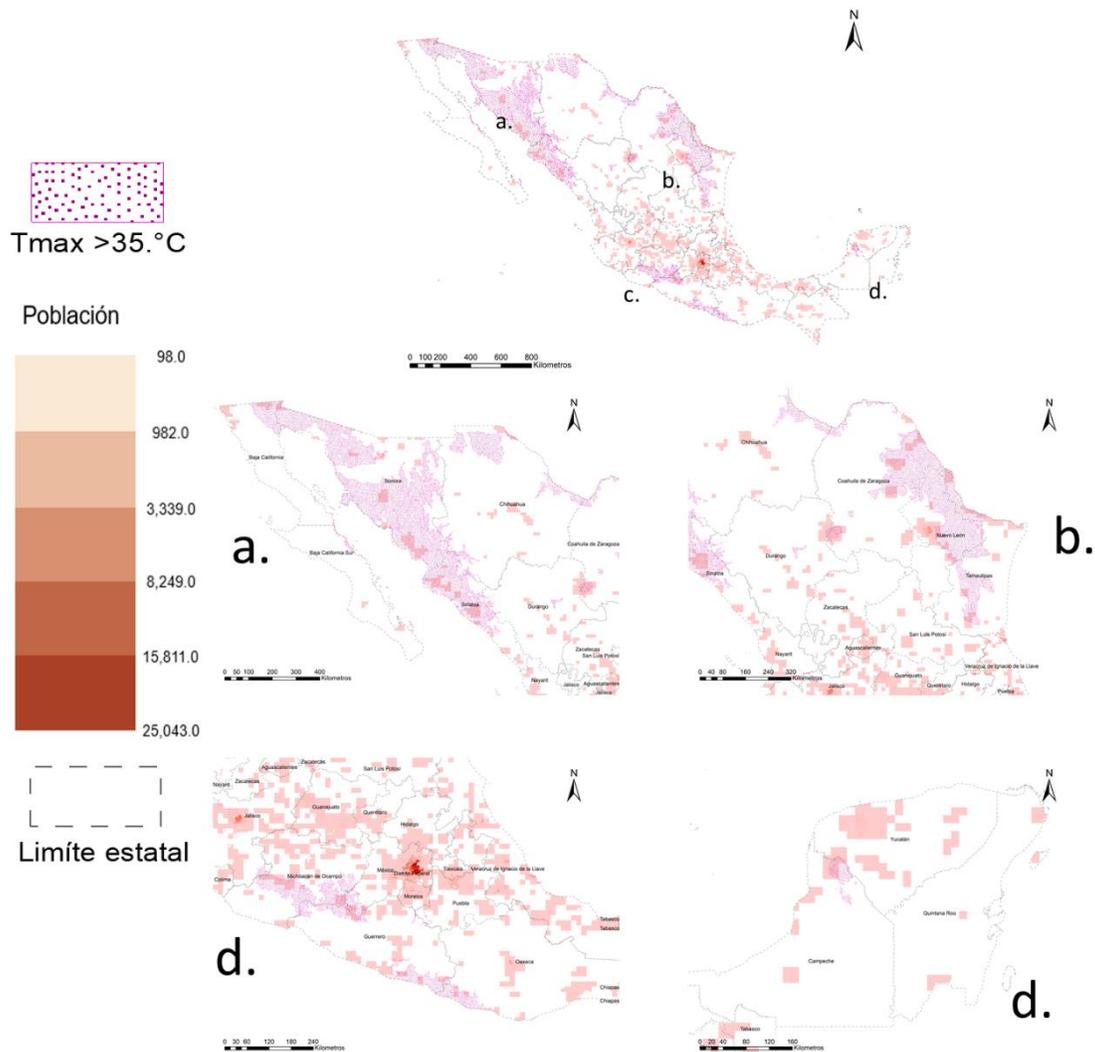
sección, la evolución de tales factores aumenta la posibilidad de afectaciones a la población vulnerable que habita en las urbes.

### *3.3.2 La exposición histórica de la población a los fenómenos extremos de alta temperatura en México*

Empleando los datos del escenario base de población desarrollado por Jones & O'Neill (2016) para el año 2000 y el escenario del promedio histórico de temperaturas máximas mensuales producido por IPUMS TERRA (2021), promedio que va de 1950 al 2000, se desarrolla el escenario base de exposición a los FEAT, con el fin de analizar, en secciones posteriores, el cambio futuro en la exposición, cambio que se producirá dada la variabilidad climática impulsada por el cambio climático y por el cambio que se da en la distribución y cantidad de la población bajo supuestos de desarrollo disimiles, específicamente, bajo dos trayectorias socioeconómicas compartidas que dilucidan patrones de crecimiento demográfico opuestos; la SSP3 y SSP5.

Considerando el número y distribución de la población del escenario base de Jones & O'Neill (2016), la población total expuesta a temperaturas máximas superiores a los 35.0°C se encuentra en torno a los 6,673,484 habitantes, de los cuales 1,325,433, cerca del 19.8%, viven en ciudades (Mapa 10). Tal exposición urbana, se concentra en los estados de Sonora, Sinaloa, Nuevo León, Tamaulipas y Michoacán, alcanzando un número de 143 municipalidades expuestas a este rango de temperaturas máximas. De los 143 municipios que presentan algún grado de exposición, los que muestran un mayor número de habitantes expuestos a temperaturas por encima de los 35.0°C son; Nuevo Laredo, con cerca de 150,851 habitantes expuestos, Culiacán, con cerca de 139,591 habitantes expuestos, y Gómez Palacio, con 85,131 habitantes expuestos.

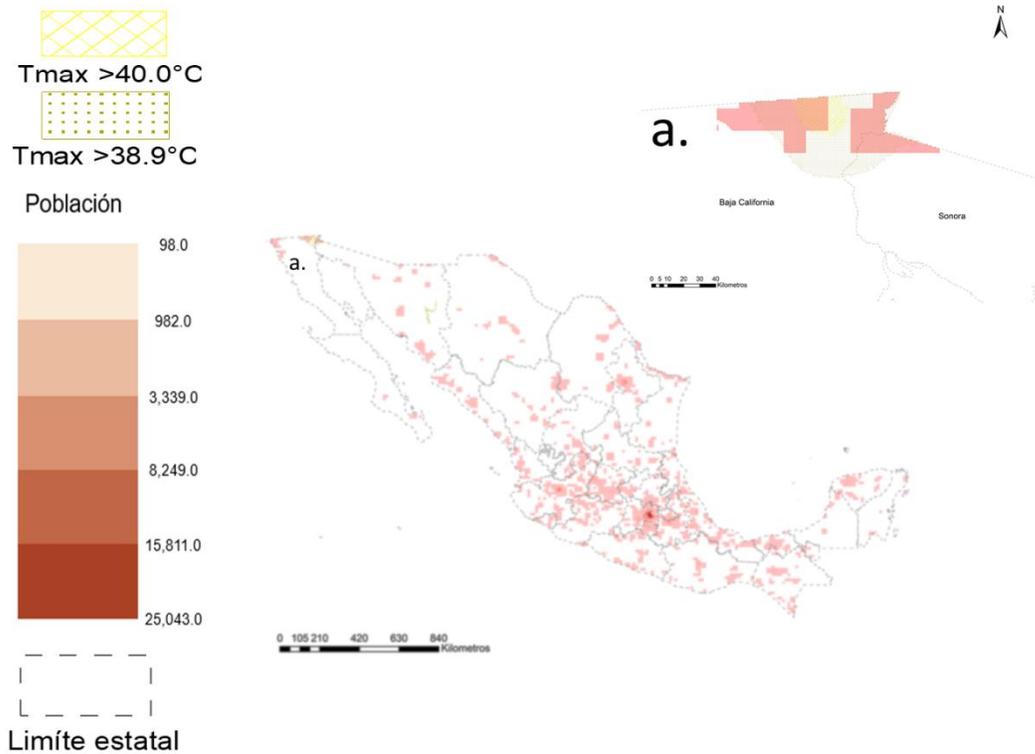
Mapa 10. Distribución base de le exposición a temperaturas máximas >35°C.



**Nota:** el rango de población hace referencia a la concentración por píxel, no por superficie total urbana.  
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, las temperaturas máximas superiores a las dos desviaciones estándar en relación con la media nacional, es decir, las temperaturas que se encuentran por encima de los 38.9°C, se ubican en el norte del país, específicamente en los estados de Sonora y Baja California, alcanzando una población expuesta de 164,129 habitantes, de los cuales el 36.1% se encuentra clasificada como población urbana, cerca de 59,336 habitantes, y se concentra en los municipios de San Luis Río Colorado y Mexicali (Mapa 11).

Mapa 11. Distribución base de la exposición a temperaturas máximas superiores 38.9°C.



**Nota:** el rango de población hace referencia a la concentración por píxel, no por superficie total urbana.  
Fuente: Elaboración propia.

Dentro de esta categoría destacan las temperaturas superiores a los  $40^{\circ}\text{C}$ , los cuales representan el 35% de la superficie de distribución de este grupo. La población expuesta a estas temperaturas máximas, las superiores a los  $40^{\circ}\text{C}$ , se concentra en el municipio de Mexicali y alcanza una cifra total de exposición de 26,873 habitantes, mientras que en área clasificada como urbana apenas llega a los 5,391 habitantes, solo el 20% del total. Si bien estas cifras nos dan una idea clara de las zonas de mayor exposición a los grupos de temperatura máxima evaluados, la variabilidad climática durante el periodo de análisis, de mayo a agosto, también resulta de importancia, especialmente por la redistribución de las temperaturas máximas en los meses que se consideran.

Tal redistribución se da de forma importante en el periodo evaluado, modificando la exposición a los FEAT e incrementando, o disminuyendo, la probabilidad de que se den impactos negativos en la población urbana. Para el umbral de  $35.0^{\circ}\text{C}$ , la mayor exposición se da durante el mes de junio, alcanzando la cifra de 8,820,441 habitantes expuestos. Por su

parte, para el umbral de 38.9°C, la exposición también alcanza su mayor cifra durante el mes de junio, presentándose un cambio importante en la distribución de las temperaturas máximas de este grupo, pasando a ocupar, principalmente, los estados de Sonora, Sinaloa y Baja California, alcanzando un incremento en la población expuesta con 484,835 habitantes. En ambos casos, tanto para el umbral de 35.0°C como para el de 38.9°C, la exposición se incrementa de forma significativa con relación al promedio evaluado (Anexo 1).

Si bien el escenario base permite plantear una idea clara de la importancia que tiene la exposición a dos medidas de temperaturas máximas que nos aproximan a los FEAT y sus efectos adversos sobre la población, es necesario entender cómo evoluciona la urbanización en el tiempo para tener un panorama completo del crecimiento en la exposición futura a los FEAT, impulsada tanto por las variaciones climáticas a nivel regional, producto del cambio climático global, como por la evolución y crecimiento de las ciudades. Elementos, el del cambio en el número y distribución de la población, que se ven reflejados en el análisis de los cambios futuros bajo las narrativas subyacentes a las SSPs, especialmente en cuanto a la población urbana.

### **3.4 La exposición futura a los FEAT. La evolución de las áreas urbanas mexicanas y las temperaturas máximas en un contexto de cambio climático**

Tanto la urbanización como el clima, y los elementos que los determinan, son procesos en constante cambio, dinámicos. Tal dinamismo, coadyuva a la reconfiguración constante de los patrones de exposición y riesgo de desastre por eventos extremos. Por ello, evaluar la evolución tanto de los factores climáticos como de la urbanización permite analizar los distintos posibles escenarios que se presentaran y, con ello, mejorar la toma de decisiones encaminadas a la reducción tanto de la exposición a eventos extremos de alta temperaturas como de los patrones de riesgo de desastre que se identifiquen.

Tal evaluación del riesgo y la exposición futuros es sumamente compleja. Los caminos y formas que tanto los patrones climáticos como los patrones de urbanización tomarán en el

futuro implican un alto grado de incertidumbre debido al gran número de factores que determinan ambos elementos. Debido a lo anterior, Jones & O'Neill (2016), desarrollaron proyecciones de población, su posible incremento y distribución, bajo supuestos disimiles, por lo que permiten obtener un panorama diverso según las posibles trayectorias que impulsan el crecimiento de la población en el mundo.

Las proyecciones de población bajo distintas trayectorias socioeconómicas compartidas, especialmente vistas desde un enfoque espacial, permiten adquirir una visión amplia de los mundos probables, mundos que son resultado de seguir un camino específico bajo una configuración determinada de factores; el nivel de población, el grado y velocidad de la urbanización, el nivel educativo de la población, entre otros. Además, proveen un marco de gran relevancia para la comprensión de los retos que tendrá la población humana para la mitigación y adaptación a las afectaciones producidas por el cambio climático; entre las que se encuentra el incremento en intensidad, frecuencia y área de distribución de los fenómenos extremos de alta temperatura.

#### *3.4.1 La exposición futura a fenómenos extremos de alta temperatura en México; la evolución de la urbanización desde las SSP*

El planteamiento de las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) ofrece la posibilidad de incorporar de manera coherente el futuro, en tanto que los desafíos del cambio climático no sólo son naturales, sino también sociales (Escoto et al., 2017), incorporando visiones de mundos posibles a través de un conjunto de cinco descripciones cualitativas de cambios futuros en la demografía, el desarrollo humano, la economía y el estilo de vida, las políticas e instituciones, la tecnología y el medio ambiente y los recursos naturales, las cuales pretenden ser una descripción de condiciones futuras plausibles que sirven como base para escenarios integrados de emisiones y uso de la tierra, así como análisis de impacto climático, adaptación y vulnerabilidad (Frame et al., 2018; O'Neill et al., 2015, 2016; van Vuuren & Carter, 2013). De entre tales narrativas, resulta de especial interés para esta investigación la SSP3, de rivalidad regional, y la SSP5, de dependencia en combustibles fósiles, debido a que describen un crecimiento poblacional y un tipo de urbanización contrario el uno del otro. Esta visión de una rivalidad regional, la de la SSP3, supone un desarrollo poblacional elevado, pero cuya distribución se da de forma dispersa, fragmentada, lo que implica una menor

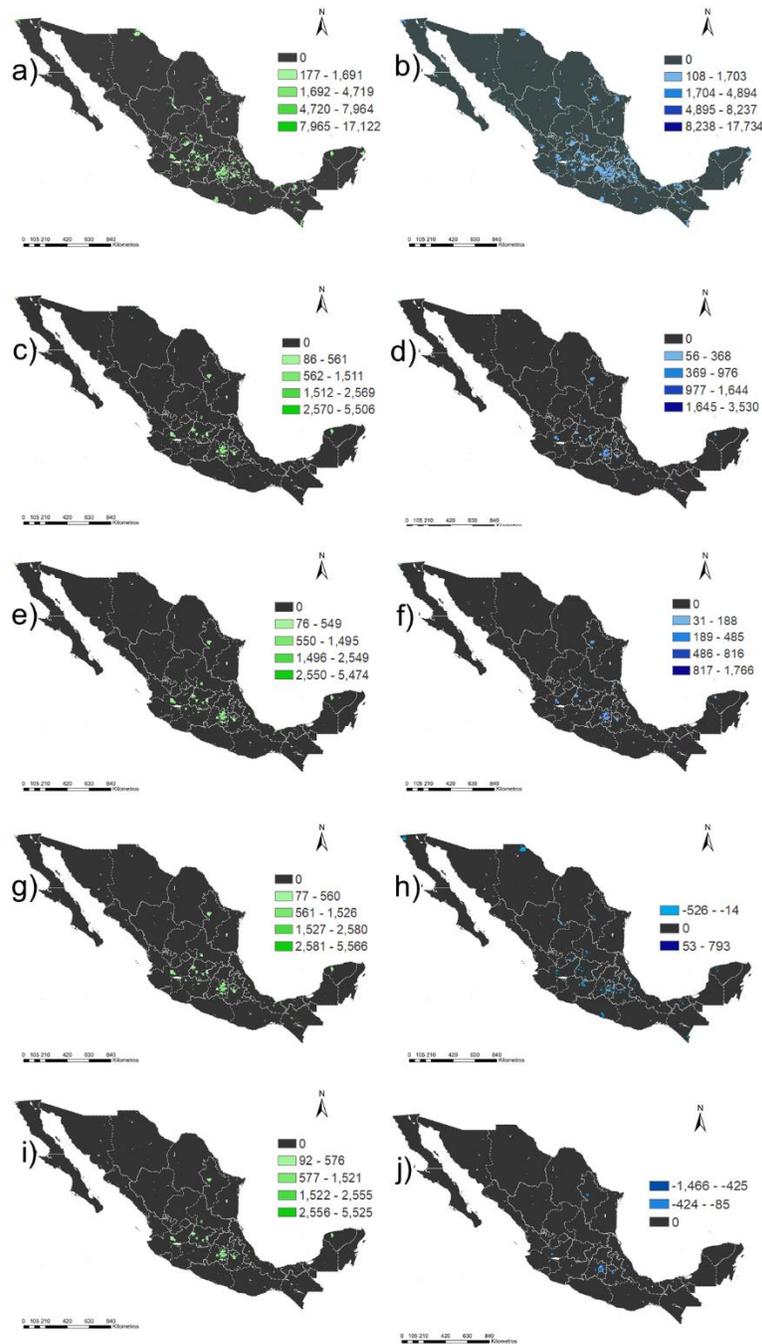
concentración de la población en las urbes. Es una proyección que implica un menor desarrollo de la superficie urbana, pero un alto nivel de población, es decir, una baja densidad por localidad, en la mayoría de las localidades, pero un alto nivel de población nacional.

Por otro lado, la visión que subyace a las proyecciones poblacionales de la SSP5, de un mundo altamente dependiente a los combustibles fósiles, supone un nivel poblacional bajo, con una urbanización rápida, lo que implica que la mayoría de la población se encuentra en las ciudades, además de un patrón de urbanización disperso, que forma nodos de concentración poblacional, por lo que muestra un crecimiento de la población nacional bajo, pero una alta densidad en las localidades, predominantemente en las localidades urbanas.

En el caso de México, para el año 2020, las proyecciones de Jones & O'Neill (2016), bajo las SSP3 y SSP5, que son de interés en esta investigación, establecen dos valores de población nacional, uno para cada SSP, que mantienen una ligera diferencia con respecto a lo reportado por el INEGI para el año 2020. La SSP3 proyectan una población de 128,818,956 habitantes a nivel nacional, mientras que la SSP5 proyecta una población de 123,274,245 habitantes, cifras que difieren en 2.25% para el caso de las SSP3 y en -2.17% para el caso de las SSP5, en relación a los 126,014,024 habitantes que reporta INEGI.

Sin embargo, dichas diferencias son relativamente pequeñas y permiten observar los supuestos que subyacen a las SSPs para las proyecciones de población. En el caso de la distribución de la población para el mismo año, 2020, bajo los supuestos del SSP3 (Anexo I(a)), los estados que concentran la mayor población son el Estado México con 19,569,390 habitantes, la Ciudad de México con 13,638,497 habitantes y el estado de Jalisco con 9,238,592. En cuanto a la población urbana, los mismos estados se mantienen en el orden que se presentó ya que, para el Estado de México el 98.73% de su población es clasificada por Jones & O'Neill (2016) como urbana, para la Ciudad de México el 99.99% de su población se encuentra clasificada como urbana, mientras que para Jalisco esa cifra se reduce al 82.58%. Los municipios que concentran una mayor población urbana son Iztapalapa con 2,805,384 habitantes, Ecatepec con 2,370,272 habitantes y Nezahualcóyotl con 1,867,969 habitantes. Por otro lado, la expansión urbana que se da sobre el territorio mexicano alcanza los 435,533.85 km<sup>2</sup>, ubicando a los estados de Veracruz, Michoacán y Jalisco como los de mayor superficie urbana.

Mapa 12. Cambios en nivel y distribución de la población urbana entre los periodos evaluados, bajo dos trayectorias de urbanización; SSP3 (verde) y SSP5 (azul)



**Nota:** Es posible observar el nivel de incremento o decremento en el nivel de población, así como las variaciones en la distribución de la población tanto para la SSP3 (verde) como para la SSP5 (azul); en los mapas a) y b) se observa el cambio del 2000 al 2020; en los c) y d) el cambio del 2020 al 2030; en los e) y f) el cambio del 2030 al 2040; en los g) y h) el cambio del 2040 al 2050; y en los i) y j) el cambio de 2050 al 2060.

Fuente: Elaboración propia con datos de Jones & O'Neill (2016) y Gao et al. (2017)

En cuanto a las proyecciones de población que siguen la narrativa planteada por la SSP5, para el año 2020, se proyecta una población nacional de 123,274,245 habitantes, de los cuales cerca del 84.7%, es decir, 104,441,410 personas habitan en zonas urbanas. En referencia a la SSP3, no hay cambios en cuanto a los estados de mayor importancia, tanto respecto a la población total como a la población urbana. La superficie urbana que se proyecta alcanza los 512,127.35 km<sup>2</sup>, cifra que supera en 2.2% la superficie proyectada por la SSP3 (Anexo I (b)).

Para el año 2030, la cifra de población nacional y urbana crece en ambas trayectorias socioeconómicas (Mapa 12). Para el caso de la proyección de población de la SSP3, México alcanza una población nacional de 145,518,226, lo que implica un aumento del 12.9%, y proyecta una población urbana de 118,119,259 de habitantes, lo que representa el 81.2% de la población total del país para este año y un incremento de 15.5% respecto de la superficie urbana del 2020. Los estados que concentran la mayor parte de la población urbana siguen siendo el Estado de México, con 21,775,570 habitantes, la Ciudad de México con 15,372,350 habitantes y Jalisco con cerca de 8,867,624 habitantes. A nivel municipio, los niveles más elevados de población urbana siguen encontrándose en Iztapalapa, Ecatepec y Nezahualcóyotl. La superficie de dispersión de la población urbana también se incrementa, alcanza los 470,092.39km<sup>2</sup>, para este 2030 (Anexo II (a)). Bajo la proyección de población de la SSP5 para el mismo año, la población nacional alcanza los 127,865,247 habitantes, de los cuales el 89.3% de la población es urbana, con 114,193,912 habitantes. Esta cifra de urbanización representa un incremento del 3% con relación al 2020, sin embargo, no hay cambios en cuanto a la primacía de los estados y municipios que concentran tal urbanización. En cuanto a la superficie de dispersión de la población urbana, se alcanzan los 626,968.30 km<sup>2</sup>, lo que representa un incremento del 22.4% con respecto a la proyección de 2020 de la SSP5 (Anexo II (b)).

Es necesario resaltar que, debido a los cortes temporales de los horizontes cercano y medio de las temperaturas máximas, solamente se consideran los años 2020 y 2030 para evaluar la exposición a FEAT en el horizonte cercano, y los años 2050 y 2060 para estimar la exposición a los FEAT en el horizonte medio. Sin embargo, la población proyectada por Jones & O'Neill (2016) para México en 2040 bajo la SSP3 es de 160,829,579 habitantes, de los cuales el 83.3%, 133,935,073 habitantes, son urbanos. Mientras que la proyección de población de

México para el mismo año bajo la narrativa de la SSP5 es de 128,674,024 habitantes, de los cuales 118,942,884 habitantes viven en zonas urbanas.

Considerando lo anterior, para el año 2050, según las proyecciones de población de la SSP3, México alcanza, a nivel nacional, los 175,101,367 habitantes, de los cuales el 85.6% es población urbana, cerca de 149,903,472 habitantes. Este cambio representa un incremento del 8.8% con respecto de 2040 y de 20.3% con respecto de 2030. En cuanto a la población urbana, el incremento es de un 11.9% respecto de la población urbana del año 2040 y de 26.9% respecto a la de 2030. La superficie de distribución de las áreas urbanas alcanza los 576,44.85km<sup>2</sup> manteniendo su presencia más importante, en cuanto a extensión, en los estados de Veracruz, Michoacán y Jalisco (Anexo III (a)). El cambio en el comportamiento de las proyecciones de población bajo la SSP5 dista mucho del presentado en la SSP3, la población crece a un ritmo mucho menor en algunas áreas del territorio nacional y en otras incluso decrece (Mapa 12), aunque presenta el mayor grado de expansión sobre el territorio. La población para el año 2050 alcanza la cifra de 125,837,600, una reducción de 3.3% con respecto al 2040, año en el que alcanzó su mayor nivel, y de 1.6% con respecto a 2030. Los habitantes de poblaciones urbanas se encuentran alrededor de los 119,026,736 de personas, lo que representa un incremento de 4.2% respecto del 2030 y de 0.7% tomando como referencia el año 2040, lo que, de manera general, implica un crecimiento constante, hasta este punto, de la población urbana, alcanzando una superficie de distribución de 832,089.86km<sup>2</sup> (Anexo III (b)).

Para el 2060, las proyecciones la SSP3 arrojan una población de 188,002,784 habitantes, lo que implica un incremento del 10.4% a nivel nacional con respecto del 2050. En cuanto a la población urbana, las cifras proyectadas alcanzan los 165,539,103 habitantes, lo que representa el 88.1% de la población total, lo que manifiesta un ritmo de urbanización lento pero sostenido a lo largo del periodo de tiempo evaluado (Mapa 12). Por otro lado, la superficie de distribución de la población urbana alcanza, en este año, los 631,219.89km<sup>2</sup>, un incremento respecto del 2050 de 9.5% (Anexo IV (a)). En tanto las SSP5 proyectan una población de 120,189,80, de los cuales el 96.1% habita en las ciudades. Si bien la población total muestra una reducción del 4.7%, la población urbana decrece a un ritmo menor, en un

3.0% (Mapa 12), sin embargo, la superficie que ocupa se incrementa, alcanzando los 951,960.30km<sup>2</sup> (Anexo IV(b)).

Como es posible observar en el Mapa 12., y en los Anexos correspondientes, para los periodos analizados la superficie de distribución de la población urbana, y su crecimiento en el tiempo, es mayor en el escenario SSP5, por lo que el crecimiento que se observa pareciera ser más importante en ese escenario, sin embargo, los niveles en la magnitud de población son superiores en el SSP3, lo que implica que, para ese escenario, la evolución de la población urbana, aunque menos dispersa, alcanza niveles de población superiores que los observados en la SSP5. En otras palabras, la SSP5 presenta las mayores superficies de distribución de la población urbana y, por ende, de concentración poblacional en relación con el total nacional. Mientras que, el SSP3 muestra los mayores niveles poblacionales, lo que implica una mayor cantidad de población urbana, aunque el porcentaje de población nacional que habita en las urbes es bajo, lo que traduce en una superficie de distribución de la población urbana mucho menor a la que se observa en la SSP5. El panorama que dilucidan las proyecciones de población bajo trayectorias socioeconómicas disímiles queda de manifiesto, mientras que las SSP3 proyectan un crecimiento de gran relevancia en cuanto los niveles de población, las urbes encuentran su máxima expresión bajo las proyecciones que siguen las directrices de las SSP5. Sin embargo, el crecimiento y distribución de la población, y la forma en que estos se dan, no entregan un panorama completo de los retos futuros que ello implica, es necesario entender otras partes del sistema, la forma en que evolucionan, se reconfiguran, e interactúan con el crecimiento y distribución de tal población.

#### *3.4.2 La exposición futura a los FEAT en las áreas urbanas; dos trayectorias en colisión*

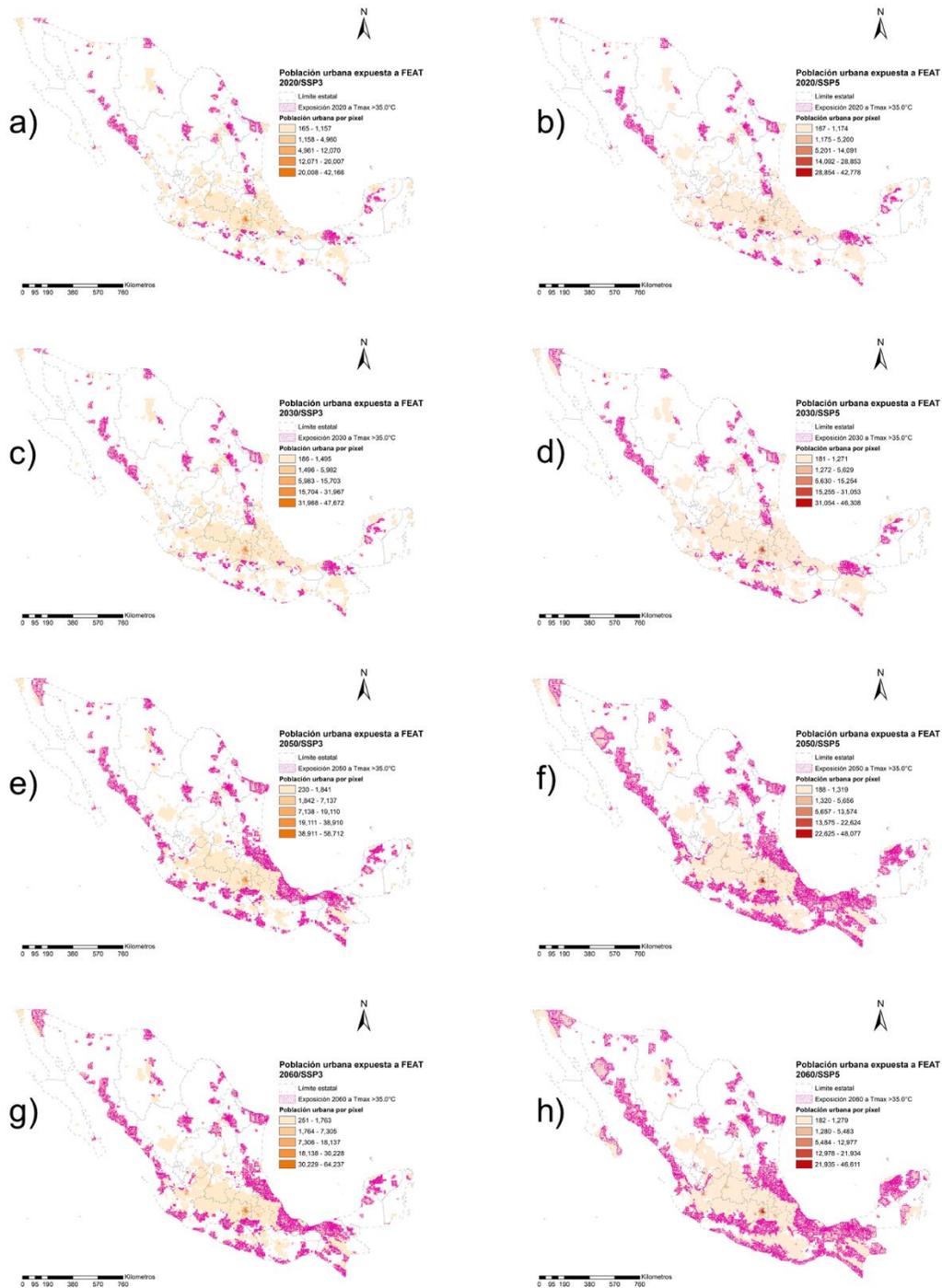
La evolución de las ciudades establece grandes ventajas para el desarrollo económico y social de la población mundial, aunque también plantea grandes retos. Uno de ellos es la coevolución de los riesgos de desastre, mientras mayor sea la concentración de la población en un solo sitio, el impacto de los eventos extremos crece. En el caso los FEAT, el aumento en intensidad y frecuencia, así como en su distribución en el territorio, plantea un riesgo enorme para la población más vulnerable, en la mayoría de los casos, niños y adultos mayores. Sin embargo, también se han observado efectos adversos en la población más joven,

basta ver las cifras de descensos por ondas de calor de la DGE (2018,2019,2020). En ese sentido, las proyecciones de población de Jones & O'Neill (2016) nos proporcionan la posibilidad de evaluar la cantidad de habitantes que se encuentran expuestos a temperaturas extremas, ante dos posibles escenarios de evolución de la población. Para el 2020, tomando en cuenta la evolución de las temperaturas máximas bajo un escenario HADGEM2ES en el periodo que va de 2015 a 2039 y un umbral que considera como extremas las temperaturas máximas que se encuentran por encima de los 35.0°C, el escenario SSP3 proyecta una población expuesta a la ocurrencia de los FEAT de alrededor de los 22,130,445, de ellos, cerca de 14,580,483 de personas habitan en ciudades, distribuidos en una superficie urbana de 95,366.5km<sup>2</sup>. En cuanto al escenario SSP5, bajo el mismo escenario de cambio climático y el mismo umbral de temperatura, el nivel de población expuesta a los FEAT es de 20,789,331, de los cuales cerca del 73.0% es considerada población urbana, es decir cerca de 15,178,921 de habitantes, y se distribuye en 112,639.2km<sup>2</sup> (Mapa 13).

Para el año 2030, la SSP3 proyectan una población expuesta a los FEAT, para un umbral de temperaturas máximas de 35.0°C o superior, de 25,101,697 personas, lo que representa un incremento de 13.4% con respecto al 2020. De la población total expuesta, 17,211,196 son habitantes de las urbes nacionales, cerca del 68.5%, y alcanza una superficie de exposición de 136, 009.6.5km<sup>2</sup>. En cuanto la SSP5, la población expuesta alcanza una cifra de 21,327,108 de personas expuestas, de las cuales 1,080,333 habita en las ciudades, lo que implica un crecimiento de apenas 2.6%, para la población nacional expuesta, y de 1.5%, para la población urbana, y cuya distribución se da en una superficie de 206,787.5km<sup>2</sup> (Mapa 13).

Considerando las limitaciones en cuanto a la disponibilidad de la información, el siguiente periodo evaluado, el horizonte medio, de las temperaturas máximas, bajo un escenario HADGEM2ES de cambio climático, abarca los años de 2045 a 2069, por lo que, para la evaluación de la exposición para este periodo, solamente se consideran las proyecciones de población para los años 2050 y 2060, dejando fuera las proyecciones del 2040, razón por la cual, puede observarse un incremento abrupto en la exposición a la ocurrencia de los FEAT, para ambos umbrales, especialmente para el caso de las proyecciones de la SSP3 que mantienen un ritmo de crecimiento mucho mayor a la SSP5.

Mapa 13. Cambio en la exposición a temperaturas superiores de 35°C para el periodo de 2020 a 2060 para la SSP3 (naranja) y la SSP5 (rojo).



**Nota:** Se observa el incremento en la exposición a los FEAT (umbral de 35.0°C) por parte de la población urbana, así como las variaciones en la distribución de tal exposición tanto para la SSP3 (naranja) como para la SSP5 (rojo); en los mapas a) y b) se observa el nivel de exposición del 2020; en los c) y d) el nivel de exposición del 2030; en los e) y f) el nivel de exposición del 2050; en los g) y h) el nivel de exposición del 2060.

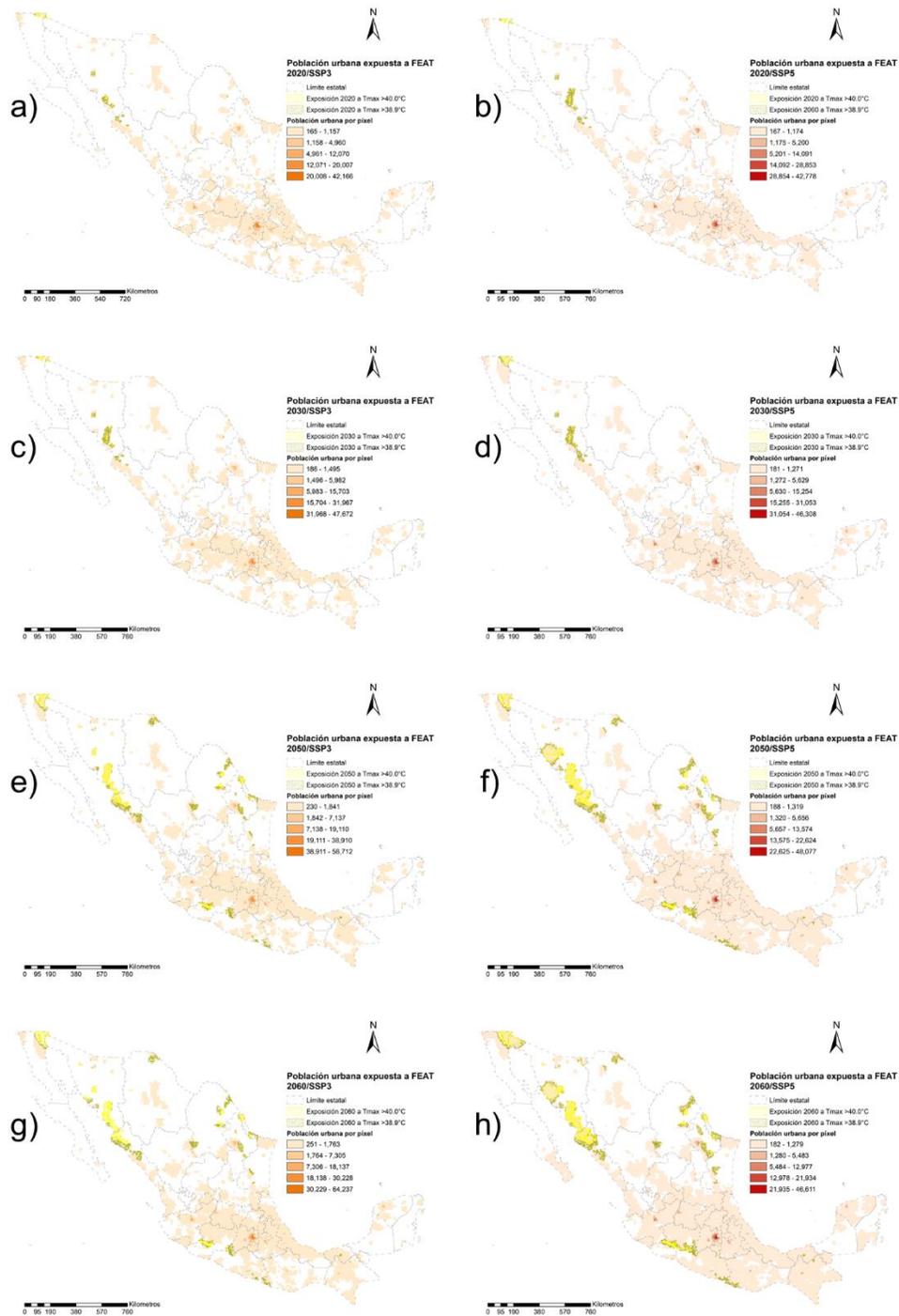
Fuente: Elaboración propia

Para el corte decenal de 2050, y un umbral de temperaturas máximas iguales o superiores a los 35.0°C, la SSP3 proyecta una población expuesta los FEAT de 55,169,800 de personas, lo que implica un incremento del 54.5% con respecto a las cifras del 2030 para este mismo escenario, lo que debe ser tomado con cautela debido a que no se están considerando las cifras para 2040. La población urbana expuesta, por otro lado, aumenta en un 58.2% con respecto a las cifras para 2030, alcanzando una población urbana expuesta de 41,212,733 personas, la cual se distribuye en 206,787.5km<sup>2</sup> de territorio urbano.

Por su parte, la SSP5 proyecta una población expuesta, para el umbral de 35.0°C, de 37,494,110, lo que implica un incremento, con respecto a 2030, del 43.1%, aunque se deben tener las mismas consideraciones que con las SSP3 para este periodo. En tanto la población urbana expuesta se distribuye en 308,422.8km<sup>2</sup> de superficie urbana, alcanzando los 33,708,653 habitantes lo que representa el 90.0% de la población total expuesta, y un incremento del 49.5% respecto del año de referencia anterior, el 2030 (Mapa 13).

Para el año 2060, considerando el mismo umbral de 35.0°C, las proyecciones de población bajo las narrativas de la SSP3 muestran una exposición cercana a los 58,957,299 millones de personas, de las cuales el 78.5% se clasifica como población urbana, es decir, hay una exposición de 46,327,972 en una superficie de 228,888.0km<sup>2</sup>. En cuanto a las proyecciones de la SSP5, para ese umbral de temperaturas máximas, la población total expuesta alcanza los 35,615,899, lo que implica una reducción de 5.1% con respecto al año de referencia anterior, el de 2050, y cuya población urbana expuesta alcanza los 32,914,560 distribuidas en una superficie de 353,903.3km<sup>2</sup>, lo que representa el 92.4% de la población expuesta a nivel nacional, y un decremento de 2.4% con respecto a la población urbana expuesta del 2050 (Mapa 13).

Mapa 14. Cambio en la exposición a temperaturas superiores de 38.9°C para el periodo de 2020 a 2060 para la SSP3 (naranja) y la SSP5 (rojo).



**Nota:** Se observa el incremento en la exposición a los FEAT (umbral de 38.9°C) por parte de la población urbana, así como las variaciones en la distribución de tal exposición tanto para la SSP3 (naranja) como para la SSP5 (rojo); en los mapas a) y b) se observa el nivel de exposición del 2020; en los c) y d) el nivel de exposición del 2030; en los e) y f) el nivel de exposición del 2050; en los g) y h) el nivel de exposición del 2060.

Fuente: Elaboración propia

La comparación de las proyecciones bajo dos SSPs permite observar las implicaciones de dos trayectorias de desarrollo distintas. El mayor crecimiento poblacional del SSP3 se traduce en tasas de exposición mayores que en el SSP5, un mundo más próspero y con menores volúmenes de población. Sin embargo, en éste último la urbanización es más acelerada y dispersa producto del mayor crecimiento económico y su dependencia en fósiles. Como resultado, la superficie donde se localiza la población urbana es mayor en este segundo escenario, a la vez que se encuentra más dispersa en el territorio. Estas diferencias se mantienen cuando consideramos FEAT con temperaturas más altas, si bien los volúmenes de población expuesta son menores.

En cuanto a las temperaturas máximas del umbral por encima de los 38.9°C. Para 2020, la SSP3 proyecta una población expuesta a los FEAT es de apenas 1,153,561 habitantes, lo que implica que, al subir el límite de consideración de los FEAT, la población expuesta apenas representa un 5.2% con respecto al umbral de 35.0°C. Del número de habitantes expuestos a nivel nacional, la población urbana expuesta apenas alcanza los 326,859, lo que representa apenas el 28.4% del total nacional, y que se distribuye en una superficie de 6,796.4km<sup>2</sup> (Mapa 14). Las cifras de las proyecciones de población expuesta a ese umbral para la SSP5 alcanzan el 1,064,928, de los cuales el 50.4% es considerado como población urbana, cerca de 535,774 habitantes, y una superficie urbana expuesta de 10,267.4km<sup>2</sup>, de los cuales el 21.5% se encuentra expuesta a temperaturas superiores a los 40.0°C (Mapa 14).

Para el 2030, la población expuesta de las SSP3 alcanza la cifra de 1,311,365 personas, de las cuales 594,746 habitan en ciudades, lo que implica un incremento del 45.0% con respecto a la población urbana expuesta en 2020, alcanzando una superficie de distribución de 9,775.2km<sup>2</sup>. La SSP5 muestra una exposición a la ocurrencia de los FEAT de 1,080,333 personas, con un mínimo crecimiento con respecto al 2020, de las cuales 778,837 personas radican en las urbes mexicanas, en una superficie de 14,222.6km<sup>2</sup>, lo que implica un incremento del 45.3% con respecto a la población urbana expuesta del 2020 (Mapa 14).

Como se mencionó anteriormente, las proyecciones de población de 2040 no se toman en cuenta debido a limitantes en las proyecciones climáticas, razón por la que se observar un incremento abrupto en el nivel de la población expuesta a los FEAT. Considerando lo anterior, la SSP3 proyecta, para 2050, una población expuesta de 9,931,752, lo que implica

un incremento de 87.7% con respecto al 2030. La población urbana expuesta, por otra parte, se incrementa en un 91.0% con respecto al año de referencia anterior, alcanzando los 6,655,902 de personas y una superficie de exposición de 54,951.0km<sup>2</sup>. Para la SSP5, dentro del umbral de temperaturas máximas superiores a los 38.9°C, las cifras alcanzan una exposición nacional de 6,555,916 de personas, lo que implica un incremento del 83.5% con respecto al 2030, mientras que la población urbana expuesta, que representa el 88.6% de las cifras totales, muestra un incremento del 86.6% con respecto al 2030, distribuyéndose en 92,256.9km<sup>2</sup> de superficie urbana (Mapa 14).

En el 2060, para la exposición a temperaturas máximas que se encuentran por encima de los 38.9°C, la SSP3 proyecta una exposición de 10,595,421 de personas, lo que implica un incremento del 6.3% con respecto al 2050. La población urbana expuesta alcanza el 71.9% del total, con 7,564,705 de habitantes expuestos, cuya distribución se da en 61,088.3km<sup>2</sup>. Por su parte, las proyecciones SSP5, muestran una cifra de 6,219,698 personas expuestas, lo que implica una reducción del 5.2% con respecto al 2050. Del total de la población expuesta, el 92.1% es población clasificada como urbana, en 105,536.8km<sup>2</sup> de superficie cerca de 5,729,393 de personas se encuentran expuestas a este umbral de temperaturas, tales cifras implican una reducción del 1.4% con respecto al 2050 (Mapa 14).

Es posible observar una mayor distribución de la población urbana expuesta, para ambos umbrales, en la SSP5, distribución que no se traduce en los mayores niveles de exposición poblacional debido a la magnitud del incremento poblacional que se observa en la SSP3, lo que hace que la SSP3 sea la que proyecta la mayor cantidad de población urbana expuesta. Tales resultados muestran un importante crecimiento en la exposición a través del tiempo evaluado, sin embargo, los cambios muestran solo una parte de la problemática, las variaciones intermensuales, que quedan ocultos debido al promedio de los datos de periodo, presentan rangos de exposición, para algunos meses, incluso superiores a los de los promedios analizados para el periodo de interés.

Ambos umbrales, y ambas trayectorias, muestran una variación significativa en la exposición mensual, que impulsa el incremento o descenso de las posibles afectaciones a la población urbana, y que da cuenta del dinamismo que presenta la exposición a los FEAT, especialmente cuando se analizan los cambios interanuales de las temperaturas máximas. Las diferencias

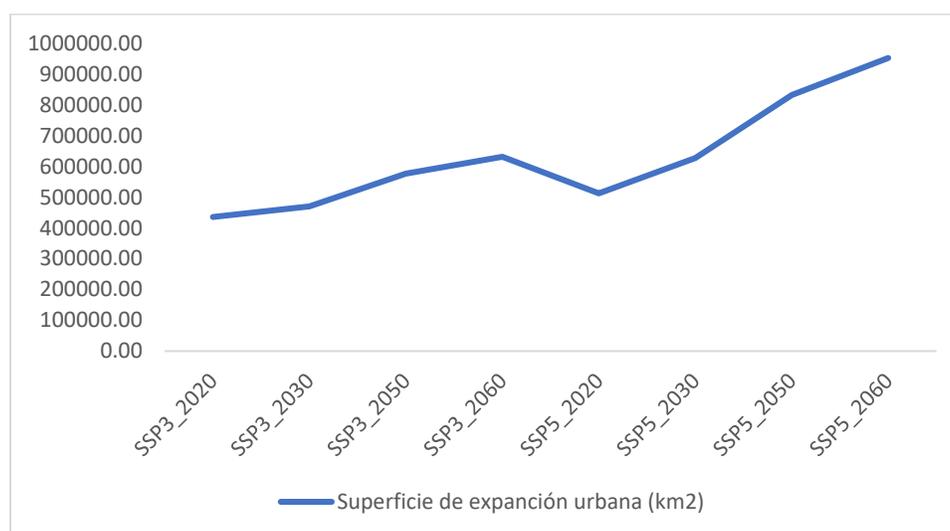
entre los SSPs y en el territorio también se aprecian cuando se analizan las variaciones mensuales en tal exposición, como resultado de las variaciones en temperatura máxima entre los meses de junio y agosto. Los resultados muestran que el mes de junio es el periodo de mayor exposición bajo los dos escenarios, si bien el total de población expuesta es más alto en el SSP5 como resultado del patrón geográfico de crecimiento de la población en éste (Ver Anexo 2).

### 3.5 Conclusiones

#### 3.5.1 El papel de la evolución urbana en la distribución de la exposición a los FEAT

Como se ha mencionado anteriormente, la expansión urbana, desde el punto de vista demográfico, es un determinante de gran relevancia en la exposición a eventos extremos y al riesgo de desastre. Es posible observar un crecimiento constante, a través de las proyecciones de ambas trayectorias socioeconómicas, SSP3 y SSP5, de la distribución en el espacio de la población urbana. Si bien, las SSP3 plantean un mundo cuyo crecimiento alcanza niveles altos de población, las SSP5 plantean una urbanización rápida y muestran, hasta el horizonte evaluado, una concentración mayor de la población nacional en las urbes, en relación al mostrado por las SSP3, llegando a superar hasta en un 33.7% el nivel para el año 2060 (Figura 31).

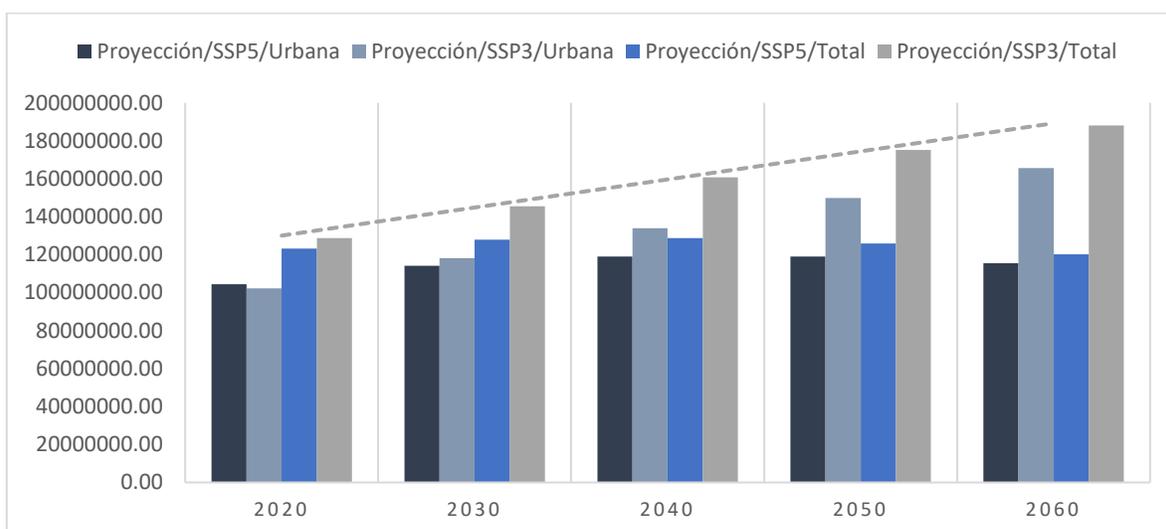
Figura 31. Superficie de distribución de la población urbana.



Fuente: Elaboración propia con datos de Jones & O'Neill (2016)

Sin embargo, pese a que esta distribución de la superficie clasificada como urbana es mayor en las SSP5 que en las SSP3, el nivel de población que proyectan las SSP3 supera con creces al nivel mostrado por las SSP5, hasta en un 36.0% en el 2050. Incluso, el nivel de población urbana que se encuentra en un mundo descrito por las SSP3 supera el nivel de población total de las SSP5 (Figura 32). Considerando lo anterior, los resultados muestran que un incremento poblacional como el descrito a través de las SSP3 pesa más en la determinación del grado de exposición que la concentración, por sí misma, de la población en las urbes, es decir, el incremento en la población urbana para determinado periodo tiene un peso mayor que un patrón de expansión mayor.

Figura 32. Población nacional y población urbana bajo dos SSPs (SSP5 Y SSP3) de 2020 al 2060.



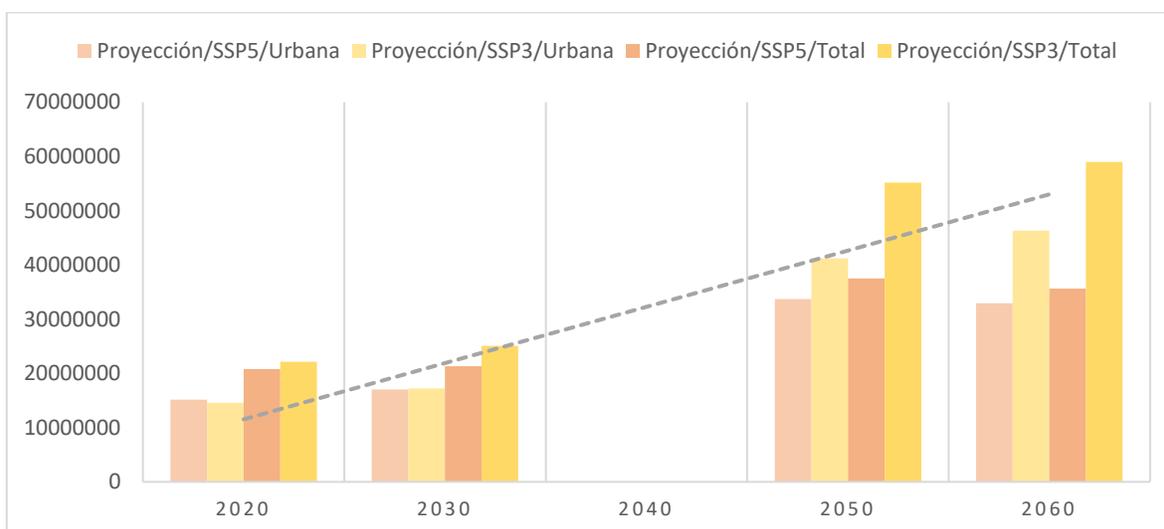
Fuente: Elaboración propia con datos de Jones & O'Neill (2016)

Si bien tales cifras por sí mismas ya tienen implicaciones importantes, queda claro que tanto el volumen de población como el grado de dispersión de la población necesariamente inciden, en determinado nivel, en el grado de exposición futuro a los FEAT, sin que, por sí mismos, sean un determinante definitivo y único de tal exposición. Para ello es necesario evaluar el crecimiento en distribución e intensidad de los eventos de calor extremo y el grado de interacción que tienen los procesos de cambio de ambos factores.

### 3.5.2 El aumento en la distribución, frecuencia e intensidad de la exposición a los FEAT en dos horizontes temporales

En cuanto a la exposición a los FEAT, tomando en consideración ambos factores, es posible observar que, para el umbral de temperaturas máximas de 35.0°C en un horizonte cercano, la exposición urbana en 2020 es un 4% superior para las SSP5, aunque la diferencia no es tan elevada, sin embargo, para 2030 las SSP3 muestran un mayor nivel de exposición debido al rápido incremento poblacional, manteniendo, para los siguientes cortes temporales, el mayor grado de exposición respecto al mostrado por las SSP5. Para el mismo corte temporal, la exposición total es dominada por las SSP3 con una diferencia del 6.1% y del 15.0% para el 2020 y el 2030 respectivamente, dominio que se mantiene para el resto de los horizontes.

Figura 33. Población nacional urbana expuesta a un umbral de 35°C o superior para dos SSPs (SSP5 Y SSP3) de 2020 al 2060.



Fuente: Elaboración propia con datos de Jones & O'Neill (2016)

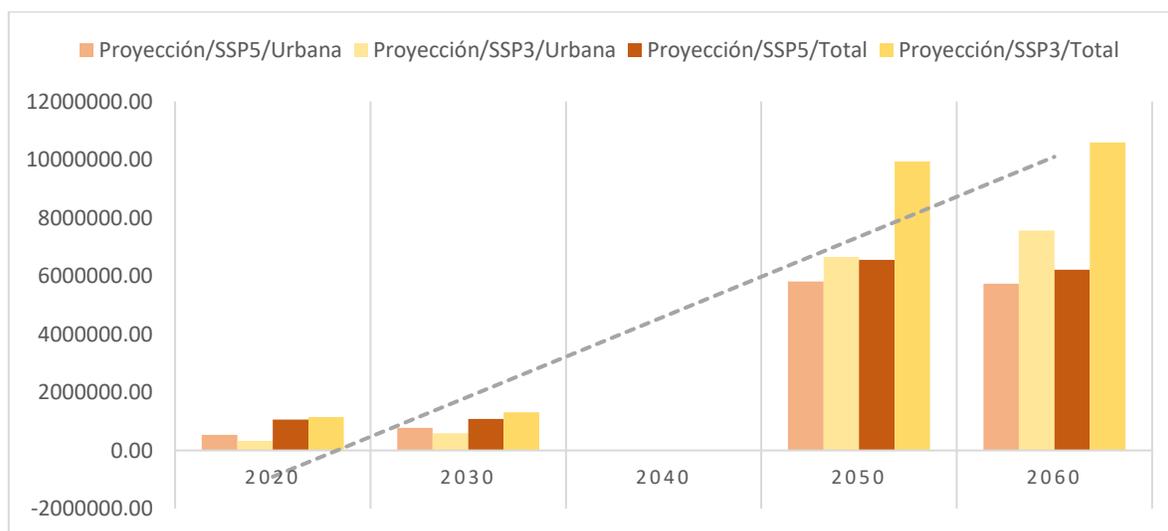
Para el horizonte medio, que abarca los cortes decenales de 2050 y 2060, la diferencia mostrada entre las SSPs en cuanto a la exposición total se incrementa, mostrando un panorama donde la exposición de las SSP3 es superior a la mostrada en los escenarios SSP5 en un 32.0% y un 39.6% para los años 2050 y 2060 respectivamente.

En cuanto al umbral de temperaturas máximas de 38.9°C, la exposición urbana es dominada, en el horizonte medio, por los escenarios de las SSP5, mostrando una diferencia del 39.0% y del 23.6% para el 2020 y el 2030 respectivamente. Tal diferencia, para el horizonte medio, se ve revertida en favor de las SSP3, cuyo grado de exposición rebasa la mostrada por las

SSP5 en un 12.8% y 24.3% para el 2050 y 2030 respectivamente, esto debido a dos factores, principalmente, por un lado, las SSP5 muestran una reducción de la población para el 2060 y, por otro lado, el alto nivel de población urbana que proyectan las SSP3 rebasa con creces incluso al nivel poblacional total de las SSP5.

La tendencia anterior no se ve reflejada en cuanto a la exposición nacional a temperaturas máximas superiores a los 38.9°C. Las SSP3 mantienen un mayor grado de exposición que las SSP5 debido a su sostenido crecimiento poblacional, reflejando diferencias que muestran hasta el 41.3% de mayor exposición a la ocurrencia de los FEAT, en 2060, que la mostrada por las SSP5.

*Figura 34. Población nacional urbana expuesta a un umbral de 38.9°C o superior para dos SSPs (SSP5 Y SSP3) de 2020 al 2060.*



Fuente: Elaboración propia con datos de Jones & O'Neill (2016)

Queda de manifiesto que un mundo como lo describen las SSP3, con un elevado crecimiento poblacional y una lenta, pero sostenida, urbanización, implica un aumento mucho mayor en la exposición urbana y nacional que un mundo con un bajo crecimiento poblacional y rápida urbanización, como lo son las SSP5. Sin embargo, ambos escenarios describen aumentos importantes en la exposición, tanto nacional como urbana.

En el caso de las SSP3, la población total expuesta a un umbral de 35.0 °C, pasa de representar el 17.0% de la población nacional, en 2020, a representar el 31% en 2060, mientras que para el umbral de 38.9°C, la exposición pasa de representar el 1.0% de la población nacional, en

el 2020, al 6.0% en 2050. Por otro lado, la población urbana expuesta a los FEAT pasa de representar el 65.9%, en el caso del umbral de 35.0°C, y el 28.3%, para el umbral de 38.9°C, a representar el 78.6% y el 71.4% respectivamente. Mientras que la exposición total que proyectan las SSP5 para un umbral de 35°C, pasa del 16.9% al 29.6% respecto de la población nacional. En tanto que la exposición total para un umbral de 38.9°C pasa de representar el 0.9% al 5.2% de la población total del país. El caso de la exposición urbana, del total de la exposición para 2060, representa hasta el 92.4% y el 92.1% para un umbral de 35°C y de 38.9°C respectivamente.

## ***Capítulo 4. La exposición urbana a los FEAT. Una mirada desde el uso urbano del suelo***

### **4.1 Introducción**

El incremento de la superficie urbana es una de las manifestaciones de lo urbano y establece, al igual que la mirada demográfica, una forma de visualizar y tratar las problemáticas que tienen lugar en las urbes (Chen et al., 2020). El entendimiento de los cambios constantes en la manifestación de la infraestructura urbana, es decir, de la urbanización estructural, así como su relación con las dinámicas de la población que habita las urbes, permite analizar los efectos de retroalimentación y de coevolución que establecen problemas como el de la exposición a los FEAT.

En tal caso, la interacción entre la materialización del suelo urbano, impulsada por factores socioeconómicos, y el incremento de la temperatura media global, producto del cambio climático, establece la conformación de patrones de exposición a eventos de calor extremo que, además de recrudecerse dentro de las fronteras urbanas, conllevan una serie de afectaciones disímiles en cuanto al territorio y que impactan con mayor frecuencia y dureza a la población más vulnerable debido, también, a los procesos socioeconómicos que alimentan a las urbes (Asefi-Najafabady, Vandecar, Seimon, Lawrence, & Lawrence, 2018; Baker, 2012; Jones et al., 2015). Sin embargo, tales impactos no están limitados a las zonas de vivienda de los pobladores más vulnerables, las diversas actividades que se realizan a lo largo y ancho del territorio urbano, ya sea de naturaleza laboral o recreacional, establecen un nivel de riesgo determinado que hace necesario el entendimiento de los límites urbanos tanto presentes como futuros (Hondula et al., 2014; Mitchell & Chakraborty, 2018).

Por ello, el presente capítulo analiza la urbanización estructural, entendida como la manifestación de la superficie y distribución del suelo urbano, tanto presente como futura a nivel nacional, sus patrones de crecimiento y los cambios en la distribución, a través de las proyecciones de suelo urbano desarrolladas por Chen et al. (2020) bajo dos trayectorias socioeconómicas compartidas, SSP3 y SSP5, que ilustran dos mundos posibles con trayectorias de urbanización opuestas (Jones & O'Neill, 2016; O'Neill et al., 2020; van Vuuren & Carter, 2013), tomando, a su vez, en consideración la evolución de las

temperaturas máximas nacionales a través del modelo HADGEM2-ES de cambio climático (UNIATMOS, 2015), con la intención de evaluar el grado de exposición a eventos de calor extremo para dos horizontes temporales; 2015-2039 y 2035-2069.

#### **4.2 La urbanización del suelo en México como determinante de la exposición presente a los FEAT**

Como se mencionó en el capítulo anterior, la urbanización puede manifestarse a través de dos fenómenos; el crecimiento poblacional y el crecimiento de la superficie del suelo urbano. Si bien ambos fenómenos se encuentran relacionados, el análisis de su evolución de forma individual permite abordar las problemáticas que subyacen a las urbes desde diferentes aristas. En ese sentido, el análisis de la exposición a fenómenos extremos de alta temperatura en las urbes, desde una visión de la evolución del suelo urbano, permite explorar las implicaciones de la frontera urbana y las actividades que ahí se ejecutan. Además, pese a que el suelo urbano cubre apenas una proporción reducida de la superficie terrestre mundial, es el hogar de más de la mitad de la población mundial y se expande aún más rápido que la misma población que la habita, ejerciendo un profundo impacto en la conservación de la biodiversidad, los ciclos biogeoquímicos y la constitución del riesgo a desastre a escala local y global (Chen et al., 2020).

La evolución de la urbanización estructural, aquella que se vislumbra desde el crecimiento en infraestructura en las urbes, es decir, desde el aumento en la distribución y superficie ocupada por el suelo urbano, permite observar aspectos diversos que un análisis desde el punto de vista demográfico pasa por alto; como las afectaciones a tal infraestructura y las implicaciones que tiene sobre la movilidad interna de la población urbana. En este sentido Chen et al. (2020), analiza, a través de proyecciones de la urbanización futura, el crecimiento del suelo urbano como constitutivo de la urbe, así como los impactos que tal urbanización tiene sobre el entorno natural, especialmente sobre la agricultura. Tales proyecciones presentan escenarios de expansión global del suelo urbano en el marco de las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSPs), teniendo como base comparativa la urbanización del

año 2015, con una resolución espacial de 1 km x 1km, lo que permite preservar los detalles espaciales y su uso en niveles nacionales y subnacionales y, a su vez, permiten vislumbrar escenarios opuestos de desarrollo urbano.

Aunado al ritmo de crecimiento de la superficie urbana, el incremento en la intensidad, frecuencia y superficie de distribución que abarcan los eventos extremos de alta temperatura impulsan la exposición a los FEAT de forma importante, estableciendo grandes retos para la adaptación y mitigación de los efectos adversos que el aumento de las temperaturas máximas tendrá sobre la población. Por ello, las proyecciones de suelo urbano permiten analizar y evaluar la exposición futura de las zonas, los lugares urbanizados, lo cual puede ser útil para considerar implicaciones sobre la infraestructura y los servicios urbanos, complementando la mirada demográfica presentada con anterioridad.

#### *4.2.1 La urbanización del suelo desde las trayectorias socioeconómicas compartidas*

Al igual que la población, el suelo urbano evoluciona, modifica e incrementa su distribución según las necesidades de la sociedad, lo que produce una diferenciación en el grado de la exposición a lo largo del territorio que ocupan las ciudades, pero sobre todo, produce una diferenciación temporal, es decir, la exposición presente de una urbe determinada, y la población que la habita, no será la misma en el futuro debido a los factores que impulsan su crecimiento y que movilizan la conformación de infraestructura y servicios en distintos puntos del territorio produciendo, a su vez, la movilización de la población dentro de la misma urbe.

Las trayectorias socioeconómicas compartidas o SSPs, por sus siglas en inglés, permiten dar un vistazo al desarrollo futuro de tal infraestructura urbana, a su posible distribución y cambio en la dimensión de la misma y con ello, permiten analizar el grado de exposición a la que una urbe, entendida desde su conformación estructural, estará expuesta bajo diferentes escenarios de crecimiento. En este sentido, Chen et al. (2020) desarrollaron simulaciones de escenarios de crecimiento del suelo urbano basadas en las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSPs), principalmente porque las SSPs proporcionan un marco completo al considerar posibilidades e incertidumbres de los factores socioeconómicos a futuro.

Como se ha mencionado antes, el marco de las SSPs tiene cinco escenarios y resulta un componente crítico en la evaluación del cambio climático mundial (Birkmann et al., 2015; Escoto et al., 2017; Jones & O’Neill, 2016; O’Neill et al., 2015; Riahi et al., 2016). Las SSPs describen cómo la sociedad, la demografía y la economía mundiales cambiarán en el próximo siglo en relación con los supuestos políticos y la narrativa socioeconómica, permitiendo suponer un camino de desarrollo determinado, lo que, a su vez, permite realizar simulaciones urbanas unificadas y comparables de varios escenarios, lo que elimina los obstáculos de la simulación basada en un único escenario al momento de buscar aplicaciones en los estudios de cambio climático y ambiental (Chen et al, 2020).

Las proyecciones desarrolladas por Chen et al. (2020) tienen una resolución de 1 km, que preserva los detalles espaciales y puede evitar las distorsiones en los patrones de superficie urbana global. La implementación técnica de tales proyecciones se basa en el modelo de simulación de uso de suelo (FLUS)<sup>13</sup>, el cual se centra en la estimación de la probabilidad de cambio de un tipo de cobertura de suelo determinado a una cobertura urbana. Este modelo utiliza un enfoque de aprendizaje automático para capturar las complejas relaciones entre la expansión de la tierra urbana y sus factores, destacando que la probabilidad de conversión de la cobertura de suelo a suelo urbano es producto de la probabilidad de ocurrencia, el efecto de vecindario, las restricciones de desarrollo y un factor de ajuste.

La principal diferencia con el ajuste realizado por Jones & O’Neill (2016), los cuales consideran el suelo urbano como uno de los factores de cambio en la distribución de la población urbana, es que Chen et al. (2020) se centra en la evaluación del suelo urbano consolidado, lo que reduce la superficie que supone como urbana tanto en el presente como en su evolución en el tiempo.

---

<sup>13</sup>. Para un mayor detalle es necesario consultar el documento de información complementaria en Chen et al., “*Global Projections of Future Urban Land Expansion under Shared Socioeconomic Pathways*”, 2020.

El modelo también adopta los mecanismos de los autómatas celulares, que se basan en el aprendizaje a nivel de celda o rejilla en una imagen satelital y que son capaces de reflejar las complejidades de la dependencia de la trayectoria y la retroalimentación positiva en los procesos reales de expansión del suelo urbano. El modelo emplea una serie de variables para estimar la probabilidad futura de ocurrencia o transformación de una cobertura determinada a suelo urbano, las cuales representan factores de impulso a la expansión de suelo urbano (Cuadro 7) (Chen et al., 2020).

*Cuadro 7. Variables socioeconómicas y físicas para la estimación de la posibilidad de ocurrencia de superficies urbanas.*

VARIABLES ESPACIALES	AÑO	RESOLUCIÓN	RECURSOS DE DATOS
Población	2010	0.5'	LandScan 2010 Global Population Project
PIB	2006	1 km	Ghosh et al. 2010
Índice de influencia humana	2004	0.5'	NASA Socioeconomic Data and Applications Center, Global Human Influence Index, v2
MED	2000	0.5'	Recuperada de DEM
Pendiente	2000	0.5'	Hijmans et al. 2005
Distancia a centros urbanos	2014	1 km	United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2014).
Distancia a caminos principales	1980-2010	1km	NASA, Socioeconomic Data and Applications Center, Global Roads Open Access Data Set (gROADS), v1
Distancia a caminos ordinarios			
Distancia a aeropuertos	2010	1 km	Huang et al. 2013
Distancia a ríos y lagos	2015	1 km	ESA, Climate Research Data Package, CCI-LC maps, v2.0.7
Distancia al mar	2015	1 km	
Ecorregiones	2001	Vector	World Wildlife Fund - Global 200 (terrestrial) Ecoregions, Olson et al. 2001

Fuente: Tomado de Chen et al, (2020)

En ese sentido, el modelo FLUS (Future Land-Use Simulation) se acompaña de los supuestos que subyacen a las SSPs, por lo que la simulación de la expansión futura del suelo urbano está limitada por la demanda de suelo urbano proyectada utilizando los datos socioeconómicos proporcionados por la base de datos de las SSPs (Chen et al, 2020), además, el procesamiento se da a través de 32 macro regiones, con características similares en cuanto a los supuestos de las SSPs, en las cuales, para cada macro-región, se entrena el modelo de clasificación a través de un muestreo del 30% de rejillas urbanas y no urbanas, a partir del

cual se genera la clasificación base, con los datos presentes de las variables empleadas, y el modelo emplea los supuestos de las SSPs para las condiciones futuras.

Es necesario resaltar el hecho de que se incluye a México como parte de una de las 32 macro regiones, lo que establece una ruta específica de desarrollo urbano, que influye en el nivel del cálculo de la superficie urbana tanto para el escenario base como para los escenarios futuros bajo las SSPs. Como se ha mencionado, esta investigación se centra en las SSP3 y SSP5, trayectorias que resultan opuestas en cuanto a los patrones de población y urbanización. En el caso de la base de datos desarrollada por Chen et al. (2020), la expansión urbana para los países en desarrollo, como el caso mexicano, es mayor bajo las SSP3, acompañada de un crecimiento poblacional igual de importante, como se ha visto con Jones et al. (2015), que la expansión urbana alcanzada por las SSP5. Tales patrones de urbanización, producto de un modelo de desarrollo socioeconómico probable, impulsan un determinado nivel de exposición a los FEAT y, por ende, una diferenciación en la manifestación de retos y oportunidades para hacer frente a los efectos del cambio climático sobre la variabilidad de las temperaturas máximas.

#### *4.2.2 La urbanización en el país como producto del crecimiento de la mancha urbana*

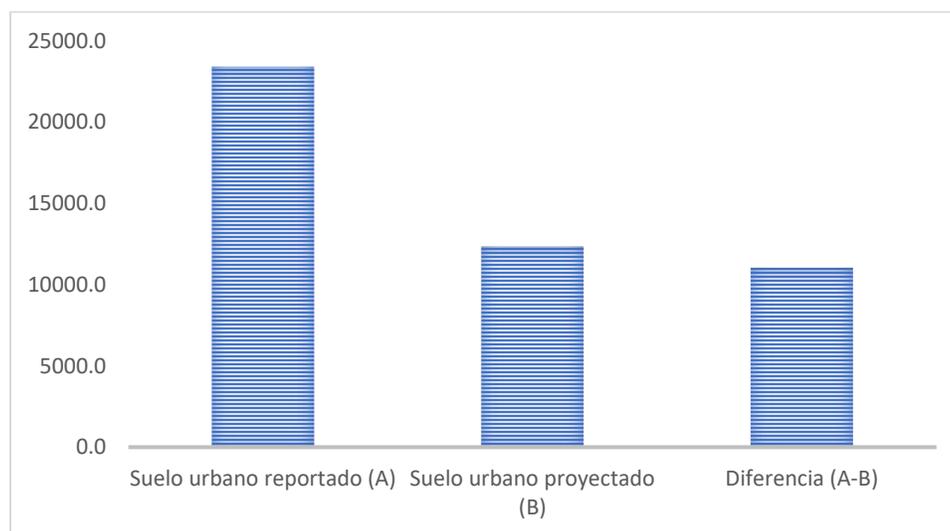
Como se ha mencionado, la urbanización es un proceso complejo, que tiene dos manifestaciones principales, una de naturaleza demográfica y la otra consistente en la evolución de la forma de vida de la población (Unikel, 1968), que se da a través de la modernización de las actividades diarias de dicha población, la provisión de servicios, la materialización de infraestructura y la naturaleza de las actividades económicas que se desarrollan en las urbes (Anzaldo-Gómez, 2012; SEDATU, 2018; Sobrino, 2019). El suelo urbano, en ese sentido, constituye uno de los elementos principales de la urbanización, al ser la manifestación territorial tanto de la provisión de servicios e infraestructura como de la consolidación de industria, empleo e incluso unidades habitacionales.

El análisis del incremento del suelo o mancha urbana, tanto presente como futuro, permite una comprensión adecuada de cómo el cambio futuro del suelo urbano afectará tanto a otros usos del suelo como al recrudescimiento o solución de diversos problemas sociales y ambientales que desafían el desarrollo sostenible de las sociedades humanas (Chen et al.,

2020; Schteingart & Salazar, 2005; Seto et al., 2011, 2012). En ese sentido, el análisis de la evolución del suelo urbano bajo distintas trayectorias socioeconómicas posibilita el entendimiento de los retos e impactos que tal evolución implicara en tanto a la exposición a riesgos, especialmente respecto a la exposición a los FEAT.

En cuanto a la evaluación del escenario base realizado por Chen et al. (2020), para el caso mexicano, que muestra el nivel de urbanización presente durante el 2015, se observa una superficie de suelo urbano de 12,343.2 km<sup>2</sup> que representa apenas el 0.6% de la superficie nacional. Sin embargo, los datos reportados por INEGI (2016) muestran una superficie de suelo urbano de 23,388.9 km<sup>2</sup>, lo que representa el 1.2% de la superficie nacional, lo que implica una discrepancia del 47.2% entre ambas fuentes (Figura 35). Tal diferencia está relacionada a la forma en la que se determinan las áreas urbanas en la clasificación de usos de suelo de Chen et al. (2020), a través del modelo FLUS, así como a la escala espacial para la que se realizaron tales clasificaciones.

*Figura 35. Superficie urbana nacional reportada y proyectada para el año 2015.*



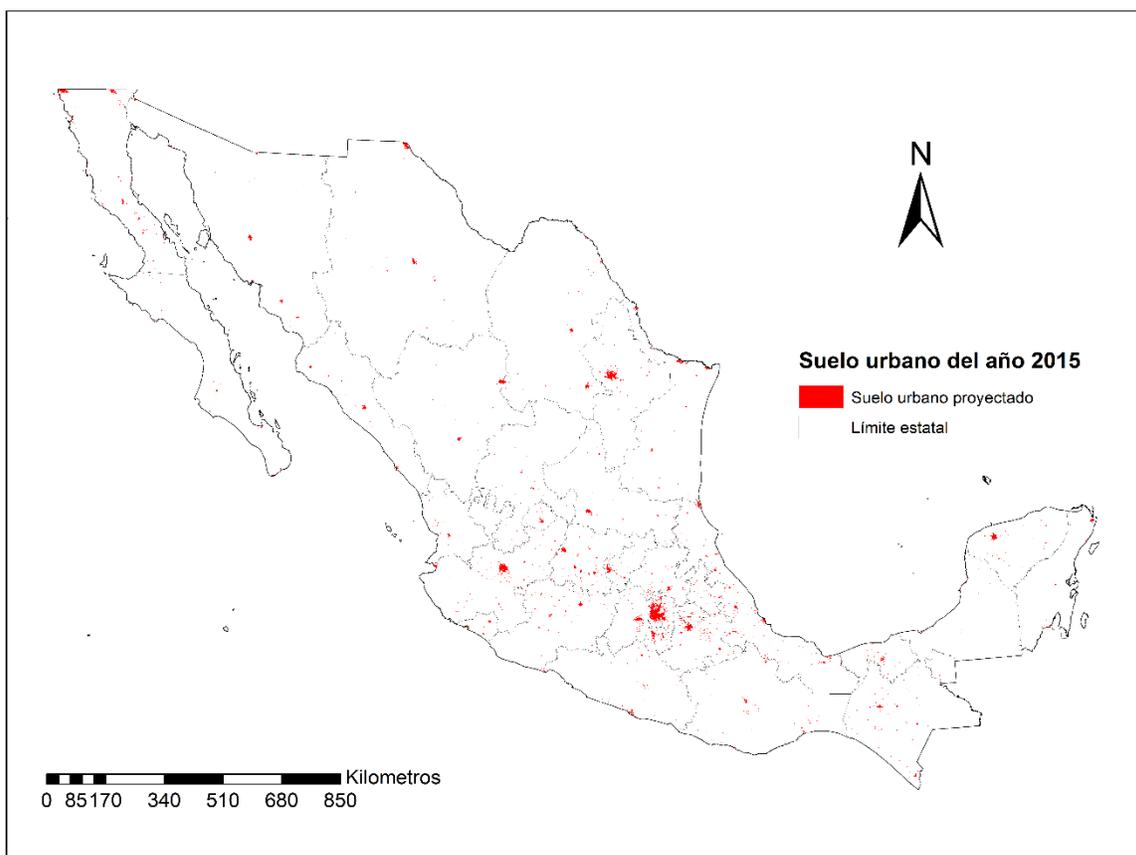
Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (2016) y Chen et al. (2020)

Sin embargo, aunque los datos base se encuentran subestimados en relación con los datos reportados por INEGI (2016) (Figura 35), es posible continuar con la evaluación ya que las proyecciones de Chen et al. (2020) permiten observar una razón de cambio en la urbanización presente con respecto a los futuros modelados, lo que nos acerca tanto a una determinación de la superficie de exposición futura a los FEAT, aunque tal debe tomarse con reservas, como

a una razón de cambio en tal exposición bajo trayectorias disimiles de urbanización, lo que permite observar cual escenario implica mayores impactos en materia de exposición.

En este sentido, la superficie de urbanización, como ya se mencionó, alcanza los 12, 347.2 km<sup>2</sup>, que se distribuye, principalmente, en la zona centro del país, aunque muestra otras zonas del país en las que la superficie urbana es de gran relevancia (Mapa 15). La mayor superficie urbana se concentra en el estado de México, con 1,319.4 km<sup>2</sup>, seguido de Jalisco, con 858.3 km<sup>2</sup>, y Veracruz, con 785.6 km<sup>2</sup>. Sin embargo, si se toma en cuenta la proporción de la superficie estatal cubierta por la superficie urbana; el primer lugar lo ocupa la Ciudad de México, cuya superficie urbana abarca el 42.7% de su superficie total, le sigue Morelos, con una superficie urbana que abarca el 6.6% de la superficie estatal, y por último el Estado de México, para el cual la superficie clasificada como urbana que cubre el 5.9% de la superficie estatal.

Mapa 15. Superficie de suelo urbano para el año base (2015).



Fuente: elaboración propia con datos de G. Chen et al. (2020).

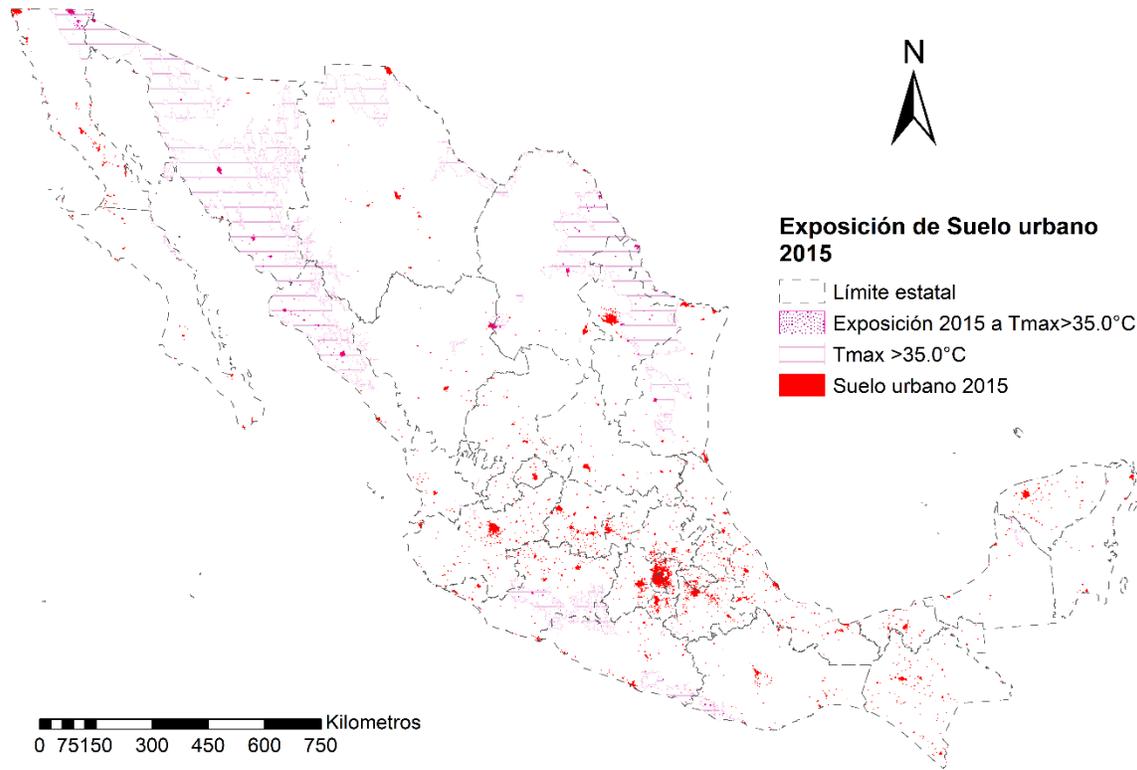
Las municipalidades con la mayor superficie urbanizada son los municipios de Ensenada con 349.1 km<sup>2</sup>, seguido Tijuana con 213.4 km<sup>2</sup> y el municipio de Mérida con 201.2 km<sup>2</sup>. Tal superficie de suelo urbano y su distribución establece patrones determinados de exposición a los FEAT, tanto por ser la manifestación territorial de la ubicación de la infraestructura urbana como por las dinámicas que implica la ubicación de tal infraestructura para la población urbana. Por ello, la siguiente sección muestra la exposición a los FEAT, determinada por la urbanización presente y el clima histórico promedio para el país.

#### *4.2.3 La urbanización estructural y sus implicaciones en la exposición futura a fenómenos extremos de alta temperatura en México*

Partiendo de los datos del escenario base de suelo urbano desarrollado por Chen et al. (2020) para el año 2015 y el escenario del promedio histórico de temperaturas máximas mensuales producido por IPUMS TERRA (2021) se desarrolla el escenario base de exposición a los FEAT, con el fin de comparar la evolución en los niveles de exposición a través de la superficie expuesta a los rangos de temperaturas máximas de interés, exposición impulsada tanto por la variabilidad climática producto del cambio climático como por los patrones de distribución del suelo urbano bajo supuestos de desarrollo opuestos, específicamente, bajo dos trayectorias socioeconómicas compartidas; la SSP3 y SSP5.

Tomando en cuenta tales escenarios, la superficie expuesta al primer grupo de temperaturas máximas de interés, las que superan los 35.0°C para el promedio que va del mes de mayo a agosto, alcanza los 1, 218.4 km<sup>2</sup> (Mapa 16). Tal superficie de exposición se concentra principalmente en los estados de Sonora con 266.8 km<sup>2</sup> de suelo urbano expuesto, lo que implica el 76.1% del suelo urbano de la entidad, Coahuila con una superficie de 251.7km<sup>2</sup>, lo que representa el 59.2% del suelo urbano del estado, y Sinaloa con una exposición de 208.6km<sup>2</sup>, es decir, el 87.7% del suelo urbano de la entidad. Aunado a ello, 115 municipios presentan algún grado de exposición, de ellos, los que muestran una mayor superficie de suelo urbano expuesto a temperaturas por encima de los 35.0°C son; Mexicali, con cerca de 173.6 km<sup>2</sup> expuestos, Hermosillo, con cerca de 115.8 km<sup>2</sup> de suelo urbano expuesto, y Culiacán, con 109.8 km<sup>2</sup> de exposición.

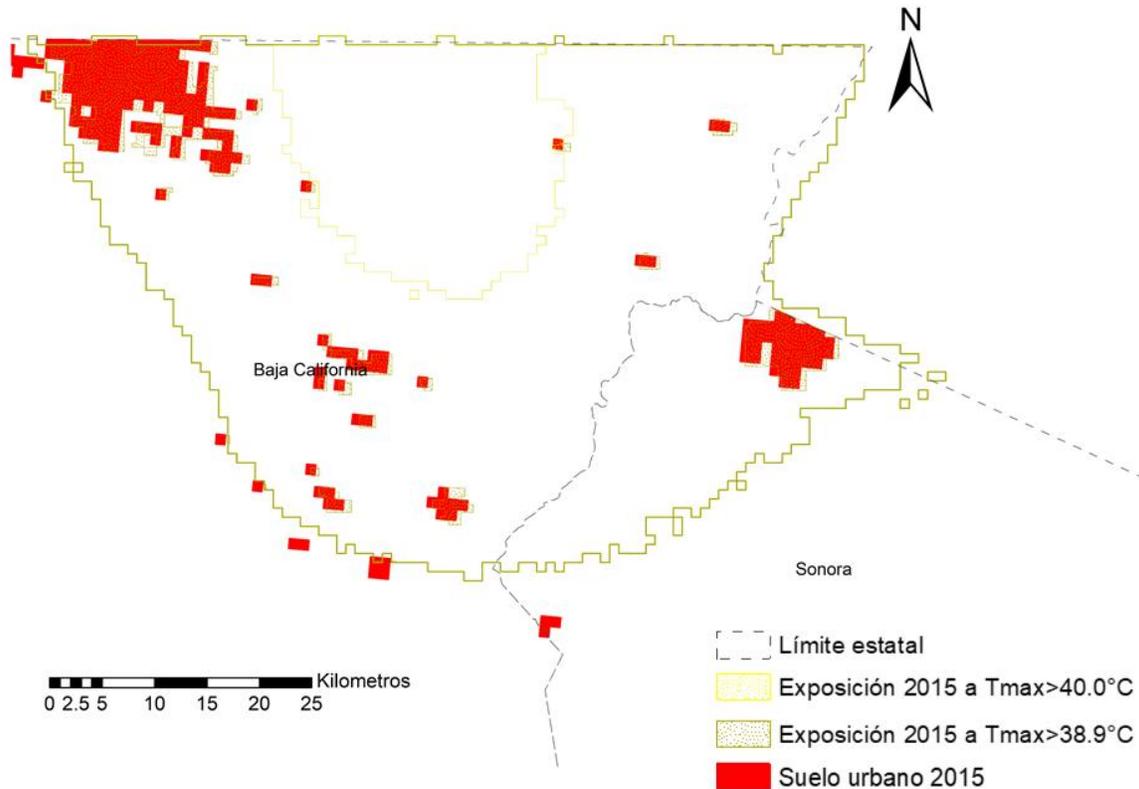
Mapa 16. Distribución de la exposición a temperaturas máximas superiores 35.0°C.



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las temperaturas máximas superiores a las dos desviaciones, su distribución se da principalmente en los estados de Sonora y Baja California, específicamente en los municipios de San Luis Río Colorado y Mexicali alcanzando una superficie urbana expuesta, para el primero, de 38.7km<sup>2</sup>, que implica el 94.0% de la superficie urbana del municipio, y, para el segundo, de 159.9 km<sup>2</sup>, el 87.0% de la superficie urbana total del municipio (Mapa 17).

Mapa 17. Distribución de la exposición a temperaturas máximas superiores 38.9°C.



Fuente: Elaboración propia.

Esas cifras de exposición muestran los patrones que sigue cada uno de los grupos de temperaturas máximas en tanto el promedio de meses considerado, sin embargo, tal periodo mantiene una variabilidad climática que puede incrementar o reducir la exposición del suelo urbano durante el periodo de análisis, de mayo a agosto, lo que vuelve de suma importancia el análisis de la exposición mensual, dentro del periodo de interés, debido a las diferencias en la distribución de las temperaturas máximas en los meses que se consideran.

En ese sentido, el clima y la distribución mensual de las temperaturas máximas se vuelven un factor predominante en los cambios en la superficie y distribución de la exposición a los FEAT, lo que hace necesaria la evaluación de las variaciones mensuales de la temperatura máxima dentro del periodo de interés, es decir, la evaluación de la exposición mensual para los meses de mayo, junio, julio y agosto.

La exposición al grupo de temperaturas máximas que rebasan los 35.0 °C, alcanza la superficie máxima de exposición para el mes de julio con 1,640.0km<sup>2</sup>, y muestra un cambio importante en su distribución de mayo a junio, pasando de abarcar los estados de Guerrero, Michoacán, Sinaloa y Sonora, a ubicarse solamente en los estados de Sonora, Sinaloa y Nuevo León. Por su parte, las temperaturas máximas que superan los 38.9°C, proyectan la superficie máxima de suelo urbano expuesto para el mes de junio con 349.2 km<sup>2</sup>, distribuyéndose, durante el mes de mayo, en los estados de Michoacán, Guerrero y Sonora. Mientras que para los meses de junio y julio su distribución se da principalmente en los estados de Sonora, Baja California y Sinaloa, llegando, durante el mes de agosto, a concentrarse solamente en los estados de Sonora y Baja California, específicamente en las municipalidades de San Luis Río Colorado y Mexicali (Anexo 3).

Los datos de la distribución y superficie de exposición de las temperaturas máximas superiores a los dos umbrales de interés, superiores a 35.0°C y a 38.9°C, da una idea clara de la importancia que pueden tener la variabilidad del clima durante este periodo sobre la exposición a los FEAT. Sin embargo, ello apenas es una parte del panorama ya que, considerar la evolución tanto de la superficie de suelo urbano como de las temperaturas máximas bajo la influencia del cambio climático permiten vislumbrar los retos y la importancia que la exposición a FEAT tendrá en un futuro y, además, la consideración de dos formas y patrones de urbanización, bajo la consideración de los supuestos que subyacen a las trayectorias socioeconómicas compartidas de interés (SSP3 y SSP5), permite observar las implicaciones de seguir determinado modelo de desarrollo en nuestras urbes, elementos que serán considerados en las secciones siguientes.

#### **4.3 La exposición futura a los FEAT; el crecimiento del suelo urbano como generador de las urbes mexicanas en un contexto de cambio climático**

El suelo urbano, entendido como la superficie que ocupa la infraestructura urbana, pese a cubrir solo una pequeña proporción de la superficie terrestre mundial, alberga a más de la mitad de la población mundial, e incluso crece a mayor velocidad la población urbana (Chen et al.,2020). El suelo urbano evoluciona, modifica e incrementa su distribución según las

necesidades de la sociedad, produciendo una diferenciación, en el caso de los FEAT, en el grado de la exposición a lo largo del territorio que ocupan las ciudades, estableciendo variaciones importantes en los impactos negativos en la urbe, por lo que la identificación de las zonas urbanas de mayor exposición así como la identificación de los patrones de movilidad de la población que las habita, que impulsan dicha exposición a los FEAT, esta intrínsecamente ligada a la evolución material de la urbanización, lo que vuelve necesario su análisis. Además, el efecto catalizador de las urbes sobre los FEAT, el efecto de ‘isla de calor’, añade valor a la necesidad de analizar tal crecimiento (Zavaleta et al., 2020).

En ese sentido, entender las posibles formas de progreso de la urbanización requiere un panorama amplio, un entendimiento de las diversas ramificaciones que la sociedad seguirá dándole forma a un tipo de mundo determinado, a un tipo y nivel de urbanización cuyos retos y beneficios retroalimentaran las determinaciones de la misma sociedad, pero, sobre todo, retroalimentaran las dinámicas adaptativas y de mitigación que la sociedad implemente frente al avance del cambio climático.

#### *4.3.1 El cambio en la dimensión del suelo urbano desde las SSP*

Por lo anterior, el uso de un marco como el de las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) posibilita la identificación e incorporación, de manera coherente, de los desafíos futuros, tanto naturales como sociales, que el cambio climático impulsará, incorporando visiones de mundos posibles a través de un conjunto de descripciones cualitativas, que impulsan factores cuantitativos de cambios futuros, las cuales suponen una descripción de condiciones futuras posibles y que se utilizan como base para escenarios integrados de emisiones y uso de la tierra, así como análisis de impacto climático, adaptación y vulnerabilidad (Chen et al., 2020; Escoto et al., 2017; O’Neill et al., 2015).

Como se ha mencionado, de entre las cinco narrativas disponibles, esta investigación se centra en el análisis de la SSP3, de rivalidad regional, y la SSP5, de dependencia en combustibles fósiles, debido a que describen un crecimiento poblacional y un tipo de urbanización contrario el uno del otro. En ese sentido, Chen et al. (2020) menciona que el escenario SSP5 produce una tendencia creciente y las mayores áreas de tierra urbana, mientras que los escenarios SSP2 y SSP3 arrojan tendencias similares a las de SSP5, aunque

con áreas de suelo urbano estimadas mucho más pequeñas. Sin embargo, ese comportamiento solo aplica para las simulaciones globales, a nivel regional, el nivel de desarrollo de los países influye en el comportamiento de la urbanización, haciendo que tales tendencias se modifiquen e incluso sean opuestas, al identificar grandes disparidades en las proyecciones de demanda de suelo urbano entre diferentes macro regiones.

La región de Latinoamérica, que consiste principalmente en países de bajos ingresos, experimenta una mayor expansión de suelo urbano en el escenario SSP3 que en el SSP5, por lo que se espera que la mayor parte del suelo urbano de reciente incorporación, en todos estos países, tenga lugar en los bordes de las áreas altamente urbanizadas existentes. Si bien México no está considerado dentro de la tendencia general de la región de Latinoamérica, Chen et al. (2020) desarrollan el comportamiento individual del país, estableciendo un comportamiento similar al de las proyecciones para Latinoamérica, en el que las SSP3 suponen un crecimiento de superficie urbana superior al de las SSP5 (Cuadro 8).

*Cuadro 8. Crecimiento urbano simulado entre 2015 y 2100 para cada SSP.*

Crecimiento urbano entre 2015 y 2100 (km <sup>2</sup> ) /Porcentaje de crecimiento desde 2015 (%)					
Región	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
México	4,449 (35.7)	7,667 (61.6)	18,850 (151.4)	3,915 (31.4)	3,743 (30.1)

Fuente: extracto tomado de Chen et al. (2020)

Por ello, para el caso de México, las SSP5 y SSP3 desarrollan dos patrones evolutivos específicos y disimiles para el crecimiento del suelo urbano nacional. Por un lado, para el 2020, la SSP3, la cual presupone el mayor crecimiento de la urbe en el largo plazo, proyecta una superficie total de suelo urbano de 13,344.22 km<sup>2</sup>, mientras que la SSP5 proyecta una superficie de 13,363.6 km<sup>2</sup>, haciendo de la SSP5, por apenas una diferencia de 19.4 km<sup>2</sup>, la trayectoria que mayor superficie urbana establece para este periodo, aunque para periodos posteriores la SSP3 supera con creces esta relación (Mapa 18). El mayor crecimiento, en relación con el escenario base, para ambas trayectorias lo tiene Sinaloa con un incremento del 20.7% en la SSP3 y de 19.2% en la SSP5, lo que significa una superficie de suelo urbano de 300.2 km<sup>2</sup> y de 294.5 km<sup>2</sup> respectivamente. Le sigue Nuevo León que, para la SSP3, presenta un incremento del 14.1%, alcanzando los 737.1 km<sup>2</sup> de superficie urbana, mientras que para la SSP5 tiene un incremento de 14.68%, lo que implica una superficie urbana de 741.6 km<sup>2</sup>. En cuanto al porcentaje que representan de la urbanización total, el estado de México y Jalisco ocupan las primeras posiciones con el 11.2% y el 6.7% para la SSP3 y el

11.5% y el 6.7% respectivamente, dominio que se mantiene hasta 2060 con variaciones menores. En tanto que la Ciudad de México ocupa el lugar de mayor relevancia en cuanto a la superficie que representa el suelo urbano en relación del total de la superficie estatal, con el 47.0% y el 48.9% para las SSP3 y SSP5 respectivamente, superando por mucho al resto de los estados.

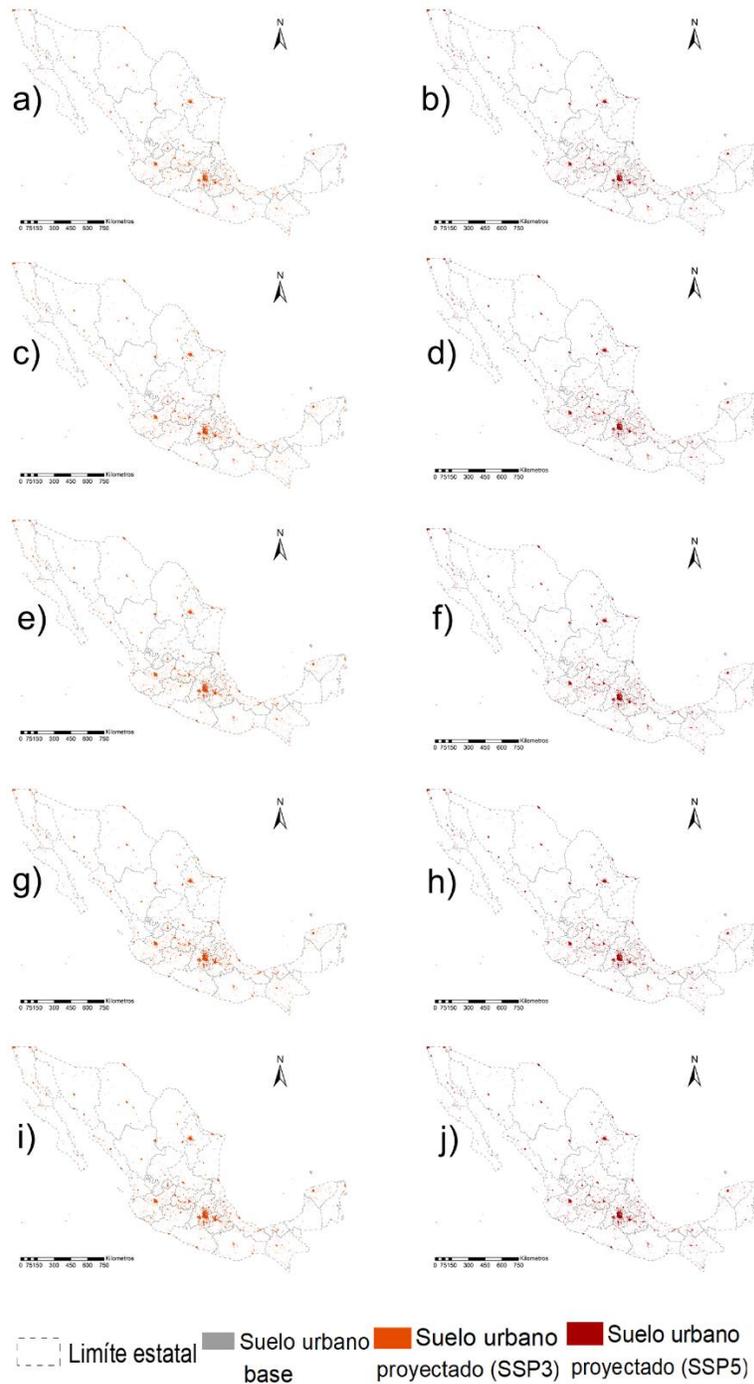
Para el 2030, la tendencia que se presenta durante el 2020 se revierte, la SSP3 proyecta una superficie total de suelo urbano de 15,577.1 km<sup>2</sup>, mientras que la SSP5 alcanza una superficie de 14,714.4 km<sup>2</sup>, lo que implica una diferencia de 862.8km<sup>2</sup> en favor de la SSP3 (Mapa 18). Bajo la SSP3, los estados que muestran el mayor incremento de superficie urbana, en relación con el periodo de 2020, son Tlaxcala con un incremento de 26.1%, alcanzando una superficie urbana de 192.4km<sup>2</sup>, seguido del Estado de México con un crecimiento de 19.1%, lo que representa una superficie de 1,842.4km<sup>2</sup>, y el estado de Sonora con un incremento del 18.9%, alcanzando una superficie de suelo urbano de 483.1km<sup>2</sup>. Por otro lado, para la SSP5 los estados que muestran el mayor incremento de suelo urbano, en relación con el año 2020, son; Aguascalientes con un incremento del 15.2%, lo que implica una superficie de suelo urbano de 165.7km<sup>2</sup>, Tlaxcala con un incremento del 13.9%, alcanzando una superficie de 162.3km<sup>2</sup>, e Hidalgo cuya superficie de suelo urbano se incrementa en un 12.9%, lo que implica 298.6km<sup>2</sup> de suelo urbano.

En cuanto al suelo urbano para 2040, la SSP3 proyecta una superficie de 17,759.4km<sup>2</sup>, un incremento del 12.2% en relación con 2030, mientras que la SSP5 la superficie urbana alcanza los 15,623.0km<sup>2</sup>, apenas el 5.8% de incremento en relación con el periodo anterior (Mapa 18). Para este periodo, el Estado de México y Jalisco mantienen la mayor superficie urbana, con relación al total, con 12.2% y 6.7% respectivamente, para la SSP3, y con 12.1% y 6.6% respectivamente, para la SSP5. Para ambas trayectorias, Tlaxcala mantiene el mayor crecimiento con 25.1% y 9.6% para las SSP3 y SSP5 respectivamente. En el caso de la SSP3 los estados que le siguen son Hidalgo y Nayarit con un incremento del 20.5% y del 17.2% respectivamente. En tanto, para las SSP5 los estados que muestran los mayores incrementos después de Tlaxcala son; México, con un incremento del 8.2%, y Nayarit, con un aumento de superficie urbana del 8.2%.

Las proyecciones de Chen et al. (2020) para el año 2050, muestran una superficie urbana de 19,979.2km<sup>2</sup> para la SSP3 y una superficie de 16,044.1km<sup>2</sup> para la SSP5 (Mapa 18). La diferencia continúa siendo en favor de las SSP3 con 3,935.1km<sup>2</sup>, mientras que el porcentaje de cambio se reduce, con apenas un incremento del 11.1% en el caso de la SSP3 y de 2.6% en el caso de la SSP5. El crecimiento de mayor relevancia, en el caso de la SSP3, lo muestra el estado de Tlaxcala con un incremento de superficie urbana de 25.1%, con una superficie de 504.9km<sup>2</sup>, seguido de Campeche con un incremento de 20.5%, lo que representa una superficie urbana de 159.8km<sup>2</sup>, y de Aguascalientes con el 18.6% de incremento, proyectando una superficie urbana de 233.7km<sup>2</sup>. Por su parte, para la SSP5, con incrementos mucho más modestos, el estado de Zacatecas es el que mayor superficie urbana acumula, en relación con el periodo de 2040, con un incremento de 6.2%, y una superficie urbana de 165.6km<sup>2</sup>, le siguen Tlaxcala, con un incremento del 4.5% y una superficie de suelo urbano de 187.19km<sup>2</sup>, y Sonora, con un incremento del 3.6% y 490.8km<sup>2</sup> de suelo urbano.

Por último, para 2060, las cifras de suelo urbano proyectadas para la SSP3 alcanzan los 22,159.3km<sup>2</sup> de superficie, mientras que la SSP5 apenas alcanzan los 16,065.8km<sup>2</sup>, lo que implica un incremento de 9.8% para las SSP3, y de 0.1% para la SSP5 (Mapa 18). Para la SSP3, el incremento de mayor importancia se presenta en Tlaxcala con 15.8%, lo que implica una superficie de 407.9km<sup>2</sup>, seguido por Colima con un aumento del 15.7%, alcanzando una superficie urbana de 193.6km<sup>2</sup>, y le sigue Aguascalientes con un 14.8% de incremento, llegando a mostrar una superficie de suelo urbano de 274.4km<sup>2</sup>. En cuanto a las proyecciones de la SSP5, el mayor incremento se observa en Tlaxcala con 0.6%, alcanzando los 188.3km<sup>2</sup>, le sigue Oaxaca y Campeche con un aumento del 0.5%, y una superficie urbana de 359.2km<sup>2</sup> y 107.1km<sup>2</sup> respectivamente.

Mapa 18. Evolución en la superficie y distribución del suelo urbano entre los periodos evaluados, bajo dos trayectorias de urbanización; SSP3 (naranja) y SSP5 (rojo)



**Nota:** Es posible observar el nivel de incremento en la superficie de suelo urbano, así como las variaciones en su distribución tanto para la SSP3 (*naranja*) como para la SSP5 (*rojo*); en los mapas a) y b) se observa la superficie del 2000 al 2020; en los c) y d) la superficie del 2020 al 2030; en los e) y f) la superficie del 2030 al 2040; en los g) y h) la superficie del 2040 al 2050; y en los i) y j) la superficie de 2050 al 2060.

Fuente: Elaboración propia con datos de Chen et al. (2020)

Si bien los incrementos de superficie urbana aumentan la probabilidad de exposición a los FEAT, la variabilidad climática juega un papel de gran relevancia en la determinación final de tal exposición, variabilidad que se ve impulsada por los cambios en la temperatura media que produce el cambio climático antropogénico. Por ello, el análisis conjunto del cambio que se presenta en la magnitud de la superficie alcanzada y en los patrones de distribución para ambos factores, tanto de la evolución del suelo urbano como la de las temperaturas máximas, permite la identificación de las zonas de exposición futura a fenómenos extremos de alta temperatura.

#### *4.3.2 La exposición futura de los FEAT en las ciudades mexicanas; el suelo urbano y las temperaturas máximas*

Las proyecciones generadas por Chen et al. (2020) en conjunto con las proyecciones de temperaturas máximas bajo un escenario HADGEMES, desarrollado por UNIATMOS (2015), permiten establecer la posible ocurrencia de los FEAT en un territorio determinado. La evaluación de tal ocurrencia o exposición futura, bajo dos definiciones de eventos extremos ( $>35.0^{\circ}\text{C}$  y  $>38.9^{\circ}\text{C}$ ) permite acercarse a la comprensión de los retos y necesidades para hacer frente al riesgo que conlleva para la población, especialmente la que presenta los mayores niveles de vulnerabilidad (Jones et al., 2015, 2018; Milner et al., 2017; Monterroso & Conde, 2017).

En ese sentido, tomando en cuenta la evolución de las temperaturas máximas bajo un escenario HADGEM2ES en un horizonte medio, en el periodo que va de 2015 a 2039, y un umbral que considera como extremas las temperaturas máximas que se encuentran por encima de los  $35.0^{\circ}\text{C}$ , las proyecciones dentro de la trayectoria SSP3, para el año 2020, muestran una superficie urbana expuesta a la ocurrencia de los FEAT de  $2,670.2\text{km}^2$ , lo que implica que el 20.0% de la superficie urbana total para este periodo se encontrara con algún nivel de exposición. En tanto las SSP5, muestran una superficie de suelo urbano expuesto de  $2,655.6\text{km}^2$ , lo que implica el 19.9% de la superficie urbana total proyectada por esta trayectoria socioeconómica (Mapa 19). Los estados que muestran los mayores niveles de exposición, bajo esta definición o umbral de temperaturas máximas, para ambas SSPs son; Nuevo León, con una superficie de suelo urbano expuesta de  $560.94\text{km}^2$  para la SSP3 y de

559.6km<sup>2</sup> para la SSP5, le sigue Tamaulipas con 331.6km<sup>2</sup> y 334.8km<sup>2</sup> de suelo urbano expuesto para las SSP3 y SSP5 respectivamente, y Coahuila con una superficie de exposición de 322.7km<sup>2</sup> en las SSP3 y de 321.6km<sup>2</sup> en las SSP5.

Las proyecciones para el año de 2030 muestran un comportamiento similar al de las del 2020, aunque se da un incremento en la superficie de exposición, la ubicación de dicha exposición es casi la misma, es decir, sobresalen las mismas zonas urbanas dentro de las áreas estatales o municipales a las que se encuentran adscritas. Para las temperaturas máximas superiores a los 35.0°C, las SSP3 muestran una superficie de exposición de 3,142.4km<sup>2</sup>, lo que implica un incremento cercano al 15.0% respecto a las cifras del 2020, y se mantiene en un 20.2% respecto a la superficie urbana que representa del total proyectado. En cuanto a las SSP5, se proyecta una superficie de suelo urbano expuesto de 2,932.6km<sup>2</sup>, lo que implica un crecimiento de apenas el 9.4% con respecto al 2020 (Mapa 19). Los estados que muestran la mayor superficie de exposición de suelo urbano continúan siendo Nuevo León, con 667.0km<sup>2</sup> de exposición para las SSP3 y con 617.3km<sup>2</sup> para las SSP5, seguido de Coahuila, con una superficie de 392.1km<sup>2</sup> para las SSP3 y de 370.1km<sup>2</sup> para las SSP5, y Tamaulipas, con 374.2km<sup>2</sup> para las trayectorias de urbanización SSP3 y con 365.0km<sup>2</sup> para las SSP5.

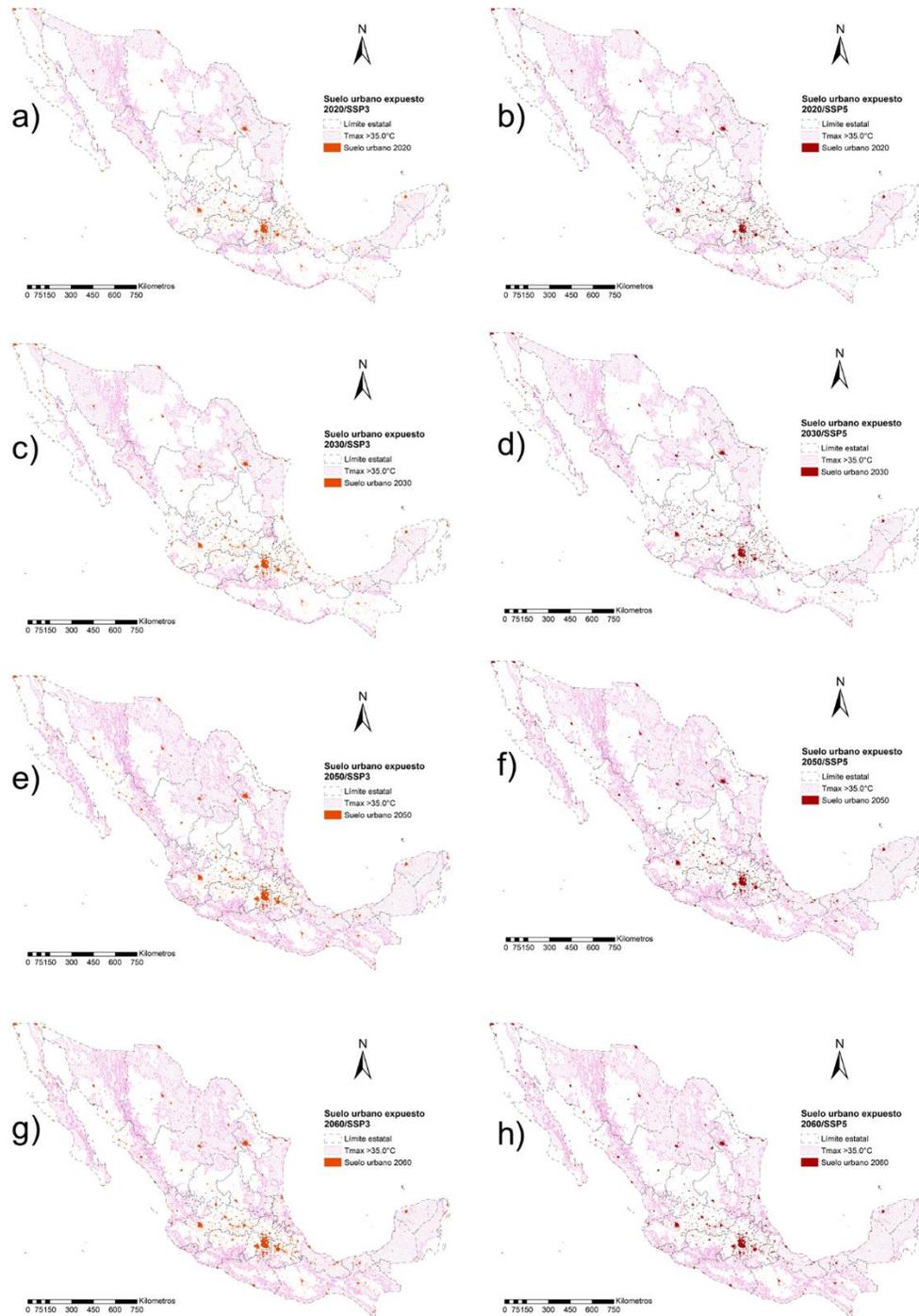
Si bien no es posible evaluar la exposición para el crecimiento de suelo urbano en 2040, al igual que con las proyecciones de exposición de la población, factor al que se podría atribuir el importante cambio que se observa en la transición de la superficie de exposición del 2030 al 2050, llama especialmente la atención la evolución que se produce en la distribución de las zonas urbanas que presentan la mayor exposición, es decir, la variación territorial de tal exposición, en la cual, queda clara la influencia de la evolución climática, especialmente en la evaluación que se presenta al considerar el horizonte medio de las temperaturas máximas modeladas por el escenario HADGEM.

En ese sentido, para la SSP3, las temperaturas máximas por encima de los 35.0°C muestran una superficie de exposición de 5,966.5km<sup>2</sup>, proyectando un incremento del 47.3% con respecto al 2030, mientras que, para la SSP5 se observa una superficie de exposición de 4,791.4km<sup>2</sup>, lo que implica un crecimiento de 38.8% con respecto al 2020, crecimiento, para ambos casos, impulsado tanto por el importante aumento de la superficie urbanizada como por el incremento en la distribución de las temperaturas máximas pertenecientes a este grupo

(Mapa 19). Es posible, por lo anterior, observar un cambio en cuanto a los estados que muestran la mayor superficie de suelo urbano expuesto. Para ambas SSPs, el estado de Nuevo León se mantiene por encima del resto, con una superficie de suelo urbano expuesto de 891.8km<sup>2</sup> para las SSP3 y de 762.3km<sup>2</sup> para la SSP5, le sigue el estado de Veracruz con 764.9km<sup>2</sup> y 576.5km<sup>2</sup> de suelo urbano expuesto para las SSP3 y SSP5 respectivamente, además del estado de Chihuahua con una superficie de exposición de 590.2km<sup>2</sup> para la SSP3 y de 513.7km<sup>2</sup> para la SSP5.

Para el año 2060, la superficie de exposición incrementa, pero, de nueva cuenta, la distribución de las zonas urbanas cuya exposición resulta de mayor relevancia se mantiene casi igual que la mostrada en el 2050, ello debido a la consideración estática de las condiciones climáticas. Para las temperaturas máximas que se encuentran por encima del umbral de 35.0°C, la superficie de exposición es de 6,594.6km<sup>2</sup>, cerca del 29.8% de la superficie urbana total, lo que implica un incremento del 9.5% respecto a 2050, lo que muestra una reducción en la velocidad de urbanización ya para este periodo. En cuanto a la SSP5, muestran una superficie de exposición de 4,797.9km<sup>2</sup> lo que representa un incremento de apenas 0.1% en relación con el 2050, y representa el 29.9% de la urbanización total, siendo esas cifras el nivel de crecimiento más bajo de las proyecciones, pero el más elevado en cuanto a la superficie urbana expuesta (Mapa 19). La distribución estatal de la superficie de suelo urbano expuesto no difiere de la mostrada en el 2050, los estados de mayor relevancia en este aspecto siguen siendo Nuevo León, con una superficie de exposición de 975.4km<sup>2</sup> para las SSP5 y 762.3km<sup>2</sup> para las SSP5, Veracruz, con 865.6km<sup>2</sup> para la SSP3 y 576.3km<sup>2</sup> para la SSP5, y Chihuahua, con 639.3km<sup>2</sup> para la SSP3 y 513.7km<sup>2</sup> para la SSP5. Es posible advertir que las SSP5 no muestran cambios respecto a la superficie de suelo urbano expuesto a nivel estatal, ello debido a que el incremento del 0.1% en relación con el 2050, además de no ser significativo, se distribuye entre estados que tienen niveles inferiores de exposición.

Mapa 19. Cambio en la exposición a temperaturas superiores de 35.0°C para el periodo de 2020 a 2060 para la SSP3 (naranja) y la SSP5 (rojo).



**Nota:** Se observa el incremento en la exposición a los FEAT (umbral de 35.0°C) del suelo urbano, así como las variaciones en la distribución de tal exposición tanto para la SSP3 (naranja) como para la SSP5(rojo); en los mapas a) y b) se observa el nivel de exposición del 2020; en los c) y d) el nivel de exposición del 2030; en los e) y f) el nivel de exposición del 2050; en los g) y h) el nivel de exposición del 2060.

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, considerando un umbral de temperaturas máximas superiores a los 38.9°C, para 2020 la SSP3 proyectan una exposición de 458.4km<sup>2</sup>, lo que implica un incremento en la superficie de exposición del 54.3%, aunque solo representa el 3.4% de la superficie urbanizada total. De la exposición proyectada cerca del 54.6% son temperaturas que rebasan los 40.0°C. Por su parte, la SSP5 proyecta una exposición de 466.5km<sup>2</sup>, superando por 1.7% a la SSP3, lo que implica un crecimiento de 54.3% con respecto al escenario base. Las temperaturas por encima de los 40.0°C para esta trayectoria abarcan 253.1km<sup>2</sup>, cerca del 54.3% de la exposición total calculada para la SSP5 con un umbral de 38.9°C (Mapa 20). Para ambas trayectorias, los estados que sobresalen, en cuanto a su superficie de exposición a estas temperaturas, son Sonora, con una superficie de 251.6km<sup>2</sup> para la SSP3 y de 256.1km<sup>2</sup> para las SSP5, y Baja California, con una superficie urbana expuesta de 193.0km<sup>2</sup> para la SSP3 y de 192.5km<sup>2</sup> para la SSP5.

En 2030, por otro lado, las temperaturas máximas de este umbral, para la SSP3, proyectan una superficie de exposición de 551.3km<sup>2</sup>, de los cuales el 54.7% se encuentra expuesto a temperaturas por encima de los 40.0°C, ello implica un incremento de 16.8% en la superficie de exposición con relación al 2020. Por su parte, para la SSP5 se observa una superficie de exposición de 2,932.6km<sup>2</sup> lo que implica un incremento de 11.3% con relación al 2020, superficie de la cual el 54.9% está expuesta a temperaturas máximas por encima de los 40.0°C (Mapa 20), Sonora y Baja California continúan concentrando la mayor concentración para ambas SSPs.

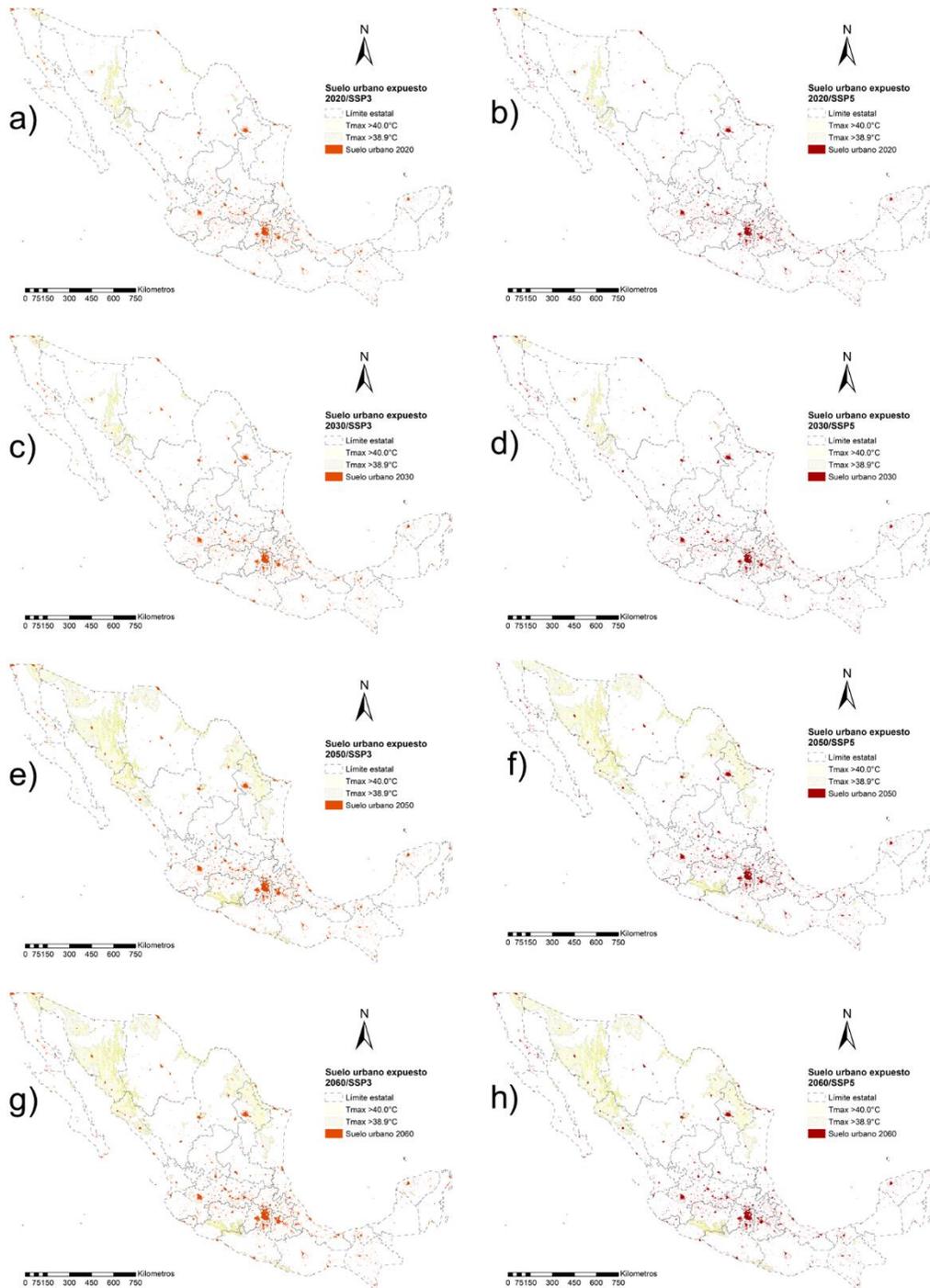
Como se mencionó, en la transición del 2030 al 2050 se observa un cambio importante en la ubicación espacial de la superficie de exposición, cambio que resulta más importante que el incremento en el área total de dicha superficie. El patrón mencionado, resulta, en gran medida, atribuible a la evolución de la distribución de las temperaturas máximas, al igual que en los resultados observados por Bryan Jones et al. (2015, 2018), el incremento y distribución de la temperatura máxima, bajo un escenario HADGEM2ES, muestra un peso mucho mayor en la determinación de las zonas de exposición que el crecimiento urbano, especialmente cuando se observa a través de la materialización de las urbes.

En ese sentido, para 2050 la exposición a las temperaturas máximas que se encuentran por encima de los 38.9°C, para las SSP3, alcanza una superficie de 2,065.3km<sup>2</sup>, cerca del 73.3%

de incremento en la superficie de exposición con respecto al 2030, de la cual 1,007.0km<sup>2</sup> se encuentra expuesta a temperaturas por encima de los 40.0°C. En cuanto a la superficie urbana expuesta para la SSP5, se observa una cifra de 1,622.5km<sup>2</sup>, de los cuales el 50.1% está expuesto a temperaturas por encima de los 40.0°C, lo que implica un crecimiento del 67.5% con respecto a las proyecciones de las SSP5 para el 2030 (Mapa 20). Hay una variación respecto a los estados que concentran la mayor superficie de exposición de suelo urbano, los cuales son coincidentes para ambas SSPs, son Sonora, Coahuila y Sinaloa con 477.2km<sup>2</sup>, 430.9km<sup>2</sup> y 350.1km<sup>2</sup> para la SSP3 y 371.6km<sup>2</sup>, 350.5km<sup>2</sup> y 261.1km<sup>2</sup> para la SSP5 respectivamente.

Para 2060, las temperaturas máximas que se encuentran por encima de los 38.9°C, muestran, en el caso de las SSP3, una superficie de exposición de 6,594.6km<sup>2</sup>, lo que implica un crecimiento del 10.9% en relación con la superficie expuesta para 2050. De ello, se estima que el 48.7%, es decir, 1,131.1km<sup>2</sup>, se encuentran expuestos a temperaturas superiores a los 40.0°C. Por su parte, las SSP5, proyectan una superficie de exposición de 4,797.9km<sup>2</sup>, apenas un incremento del 0.03%, de los cuales 812.9km<sup>2</sup>, cerca del 50.1%, se encuentra expuesto a temperaturas superiores a los 40.0°C (Mapa 20). En cuanto a los estados que muestran la mayor superficie de suelo urbano expuesto, Sonora, Coahuila y Sinaloa se mantienen como los de mayor relevancia, sufriendo incrementos en la exposición solamente para la SSP3. Para tales trayectorias, las SSP3, Sonora alcanza los 526.9km<sup>2</sup>, Coahuila presenta una superficie de suelo urbano expuesto de 487.2km<sup>2</sup> y Sinaloa muestra una superficie de exposición de 383.1km<sup>2</sup>.

Mapa 20. Cambio en la exposición a temperaturas superiores de 38.9°C para el periodo de 2020 a 2060 para la SSP3 (naranja) y la SSP5 (rojo).



**Nota:** Se observa el incremento en la exposición del suelo urbano a los FEAT (umbral de 38.9°C, así como las variaciones en la distribución de tal exposición tanto para la SSP3 (naranja) como para la SSP5(rojo); en los mapas a) y b) se observa el nivel de exposición del 2020; en los c) y d) el nivel de exposición del 2030; en los e) y f) el nivel de exposición del 2050; en los g) y h) el nivel de exposición del 2060.

Fuente: Elaboración propia

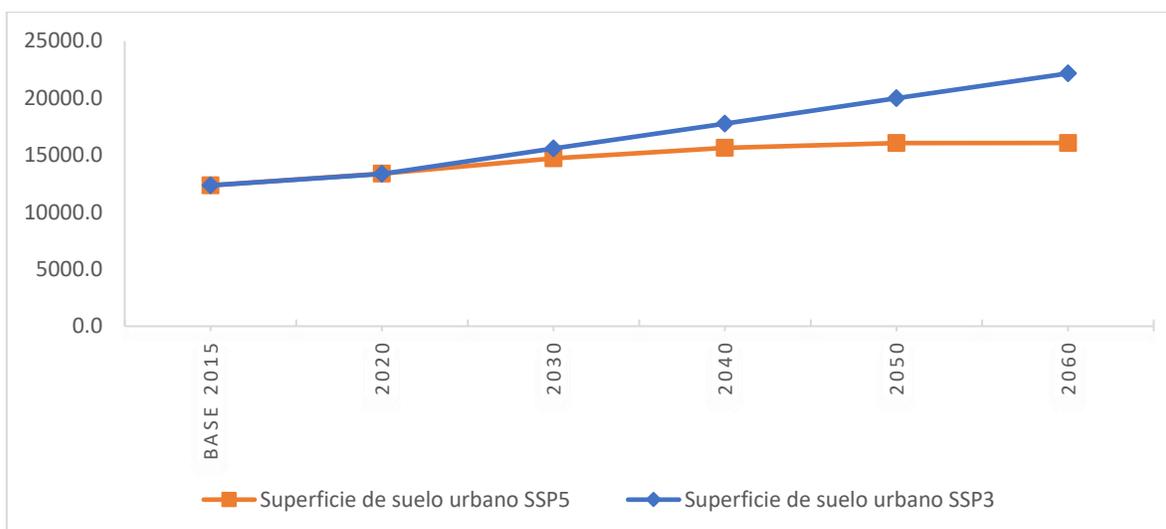
Como se mencionó, se observa que el motor de la exposición a los FEAT, cuando se considera a la urbanización como el cambio en la superficie de suelo urbano, es la variabilidad climática impulsada por el cambio climático. Si bien es posible advertir cambios en la exposición debido al crecimiento de la urbe, especialmente respecto a la superficie expuesta de las ciudades, los incrementos de mayor relevancia en tanto la distribución de la exposición se dan a través de los cambios en intensidad, frecuencia y distribución de las temperaturas máximas. En ese sentido, evaluar la variabilidad mensual, dentro del periodo de interés, se vuelve una tarea fundamental para el entendimiento del comportamiento de la exposición a eventos de calor extremo.

## **4.4 Conclusiones**

### *4.4.1 La urbanización y el papel del cambio climático en la distribución de los FEAT*

La expansión de la urbanización vista desde el incremento de la superficie urbana resulta determinante para la conformación del riesgo futuro, al ser uno de los impulsores de la exposición a eventos extremos, entre los que se encuentran, los fenómenos extremos de alta temperatura. En ese sentido, las proyecciones realizadas por Chen et al (2020) establecen un crecimiento continuo a partir del año 2020 hasta el 2060, pero con ritmos disimiles de crecimiento para las SSP3 y SSP5. La SSP3 supone, para 2060, un crecimiento de la superficie de suelo urbano del 76.9% en relación al 2015, pasando de los 12,347.2km<sup>2</sup> a 22,159.3km<sup>2</sup>, alcanzando su mayor porcentaje de cambio en el 2030 con un 14.3% de incremento respecto a 2020, y reduciéndose hasta un 9.8% para 2060 (Figura 36).

Figura 36. Superficie de suelo urbano.



Fuente: Elaboración propia con datos de Chen et al. (2020)

En el caso de las SSP5, pese a iniciar en 2020 con un crecimiento superior al de las SSP3, con un incremento del 7.6% respecto al 7.3% de las SSP3, el cambio en la superficie que proyectan no es tan elevado, pasando de los 12,347.2km<sup>2</sup>, del escenario base en 2015, a 16,065.8km<sup>2</sup> para 2060. Al igual que las SSP3, el porcentaje de cambio más relevante se da en el 2030, pasando de los 13,363.7km<sup>2</sup> de superficie urbana del 2020 a 14,714.4km<sup>2</sup> en 2030, un incremento del 9.2%, año a partir del cual se reduce la velocidad del crecimiento del suelo urbano, teniendo para 2060 un 0.1% de cambio en la superficie de urbanización.

Comparativamente, las SSP3 proyectan una superficie urbana menor en un 0.1% a la superficie de suelo urbano proyectado por las SSP5 en 2020, diferencia que se invierte a partir del cambio en 2030 en favor de las SSP3 con una superficie de suelo urbano superior en 5.5% a la que se observa en las SSP5, culminando en 2060 con una diferencia del 27.5% a favor de las SSP3. Tales diferencias juegan un papel fundamental en la determinación de la exposición, el crecimiento acelerado de la superficie urbana en la SSP3 determina un nivel de exposición a los FEAT superior al que se muestra en las SSP5, sin embargo, la distribución de tal urbanización, para ambas trayectorias, es muy similar, debido, principalmente, al método empleado para la proyección futura del crecimiento del suelo urbano.

Pese a ello, la determinación final del grado de exposición no se da únicamente por el incremento de la superficie urbana, los patrones climáticos para los periodos evaluados tienen

un peso muy importante en la configuración de la exposición futura a los FEAT, tanto en la superficie de exposición como en la distribución de tal exposición.

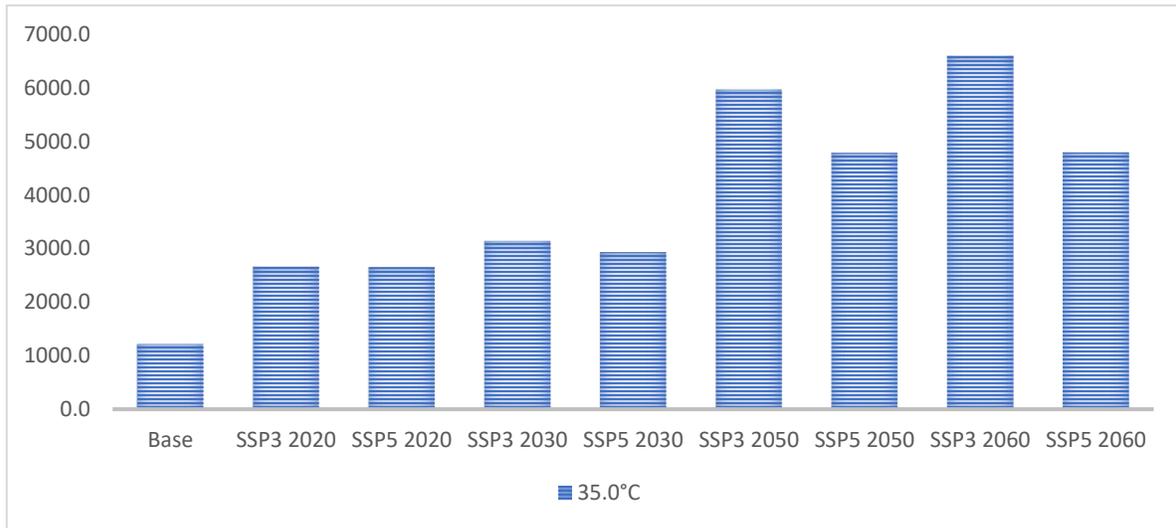
#### *4.4.2 La mancha urbana y el aumento en la distribución, frecuencia e intensidad de los FEAT en dos horizontes temporales*

La distribución de la superficie de exposición para el país, considerando tanto la distribución y crecimiento del suelo urbano y de las temperaturas máximas, se concentra, principalmente, en los estados del norte, sin embargo, el escenario que se plantee de desarrollo urbano influirá de forma significativa sobre el nivel de exposición, es decir, sobre la superficie de suelo urbano expuesto.

Ello, queda de manifiesto al observar el grado de exposición a las temperaturas máximas superiores a los 35.0°C. Para el 2020, la SSP5 superan el nivel de exposición que muestran las SSP3 por cerca del 0.5%, considerando un horizonte cercano (2015-2039) del escenario HADGEM desarrollado por UNIATMOS (2015), sin embargo, para el 2030, el ritmo de crecimiento del suelo urbano proyectado por la SSP3 invierte los niveles de exposición y la superficie urbana expuesta rebasa en 6.7% la considerada dentro de la SSP5. Es necesario resaltar que dicho incremento en la exposición es atribuible totalmente a la evolución de la urbanización, dado que las condiciones de las temperaturas máximas se mantienen estáticas tanto para el 2020 como para el 2030.

Para el 2050, el cambio en la exposición es mucho más elevado, tanto por el crecimiento urbano como por la redistribución y crecimiento de la superficie que abarcan las temperaturas máximas superiores a los 35.0°C. En este escenario, la exposición crece en un 7.3% para la SSP3 y en un 38.8% para la SSP5. La diferencia en la exposición que se presenta entre ambos mundos posibles, las SSP3 y SSP5, se incrementa en un 19.7% en favor de las SSP3 para el 2050, y para el 2060 tal diferencia alcanza un 27.2% (Figura 37). Lo más importante es el cambio que se presenta en la distribución de tal exposición, tanto el crecimiento de las zonas urbanas como la redistribución de las temperaturas máximas cambia el escenario del riesgo en el país; para el 2020-2030 los estados con el mayor nivel de superficie urbana expuesta son Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas, mientras que para el 2050-2060 los estados que muestran la mayor superficie urbana expuesta son Nuevo León, Veracruz y Chihuahua.

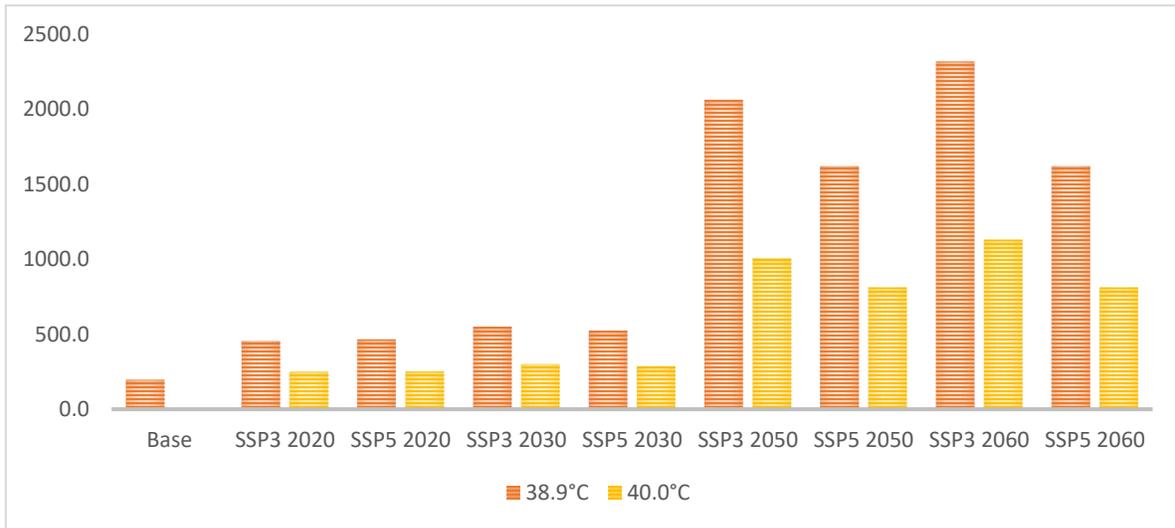
Figura 37. Superficie nacional de suelo urbano expuesto a temperaturas máximas superiores a 35.0°C para dos SSPs (SSP5 Y SSP3) de 2020 al 2060.



Fuente: Elaboración propia con datos de Chen et al. (2020)

En cuanto a la situación de la exposición a las temperaturas superiores a los 38.9°C, para el 2020, al igual que para el umbral de los 35.0°C, las SSP5 proyectan una exposición superior en 1.7% de la que se observa en la SSP3. Tal diferencia se modifica a partir del 2030, en el que la mayor exposición se observa en los escenarios de la SSP3, superando en un 4.6% la superficie de exposición que se identifica en la SSP5. Al igual que para el umbral de 35.0°C, la exposición para el 2050 se incrementa en un 73.3% y un 67.6% para las SSP3 y SSP5 respectivamente, en relación con el 2030, siendo 21.4% superior para la SSP3 que para la SSP5. Tal incremento, impulsado por el aumento en la superficie del suelo urbano y por el aumento en la superficie y redistribución de las temperaturas máximas, desplaza, a excepción de Sonora, a los estados que presentaban la mayor superficie urbana expuesta en el periodo de 2020-2030, Baja California y Chihuahua. Para el 2050-2060, son los estados de Sonora, Coahuila y Sinaloa los que presentan la mayor superficie urbana expuesta a tales temperaturas. Para el 2060, las SSP3 alcanzan una superficie de exposición de 2,320.4km<sup>2</sup>, rebasando en 30.1% la superficie que presentan las SSP5 (Figura 38).

Figura 38. Superficie nacional de suelo urbano expuesto a temperaturas máximas superiores a 38.9°C para dos SSPs (SSP5 Y SSP3) de 2020 al 2060.



Fuente: Elaboración propia con datos de Chen et al. (2020)

Es claro que el crecimiento sostenido del suelo urbano que manifiestan ambas trayectorias resulta un importante impulsor de la exposición a los FEAT, sin embargo, el ritmo de crecimiento que mantiene la SSP3, que presupone un incremento poblacional rápido para esta región del planeta, impulsa con mayor relevancia los niveles de exposición, especialmente en cuanto a la superficie de suelo urbano expuesto. Pese a ello, la distribución de tales niveles de exposición a los FEAT, al menos dentro de esta mirada de urbanización desde el crecimiento de suelo urbano, se dictada por la extensión y distribución de las temperaturas máximas según el umbral que se evalúa.

## ***Conclusiones generales; la exposición a los FEAT en México***

Los fenómenos extremos de alta temperatura (FEAT) son definidos, en la presente investigación, a través de dos umbrales; por un lado como aquellas temperaturas máximas que superan los 35.0°C, y por otro aquellas temperaturas máximas que se encuentran dos desviaciones estándar por encima de la media nacional histórica, es decir, aquellas que superan los 38.9°C. Ello con la intención de observar las diferencias que se produce tanto en la evolución de las temperaturas máximas como en el incremento de la exposición a los FEAT bajo diferentes consideraciones, una en la que se toma un valor absoluto ampliamente usado en la definición de las olas de calor (Barnett et al., 2010; Chen et al., 2015; Jones et al., 2015, 2018) y otra en la que se consideran los valores históricos del país, con la intención de acercarse a las condiciones nacionales. Tal evolución se evalúa bajo un escenario HADGEM2ES de cambio climático y dos supuestos de trayectorias de urbanización disímiles, que subyacen a las SSP3 y SSP5.

Derivado de ese análisis, por un lado queda en evidencia un crecimiento persistente de los niveles poblacionales y del suelo urbano en el país que impulsan, de manera disímil según la visión que se considere, el aumento de la exposición a los FEAT, analizados a través de ambos umbrales de temperaturas máximas, y por el otro queda de manifiesto la influencia del cambio climático en la reconfiguración del tablero de exposición al impulsar el aumento en la intensidad y superficie de distribución espacial de las temperaturas máximas, incremento que tiene un peso de gran relevancia en el establecimiento de los patrones distributivos de la exposición a los FEAT, especialmente cuando se considera una visión de urbanización desde el aumento del suelo urbano.

### *1. El crecimiento de la urbanización como constitutivo de los FEAT*

Como se mencionó, debido a que la urbanización es un proceso complejo, el crecimiento urbano puede ser visto a través de dos manifestaciones principales; una que refiere al crecimiento y concentración de la población en un punto del territorio determinado y la otra que consiste en la materialización de la infraestructura, servicios y demás elementos que permiten la concentración y modernización de las actividades diarias de la población, lo que produce una evolución de la forma de vida de tal población (Garza, 2003; Sobrino, 2019;

Unikel, 1968). En ese sentido, las visiones de Jones & O'Neill (2016) y la de Chen et al. (2020) de la evolución de la urbanización dentro del marco de las SSPs permite dar cuenta de ambas nociones de lo urbano y de su posible evolución futura, considerando dos escenarios de urbanización disimiles, las SSP3 y SSP5, de los retos que se presentan tanto para la adaptación y mitigación de las condiciones que impulsa el cambio climático como para el desarrollo económico y social de la población (Escoto et al., 2017; O'Neill et al., 2020, 2014; van Vuuren & Carter, 2013).

Las proyecciones de Jones & O'Neill (2016) permiten observar el crecimiento poblacional a nivel nacional, además, realizan una clasificación que separa a la población rural de la urbana, lo que permite analizar el crecimiento de esa última, al ser interés de esta investigación, y el grado de exposición que alcanza. Tales proyecciones estiman un aumento sostenido, aunque a un ritmo dispar, de la población urbana. Para la SSP3, Jones & O'Neill (2016) estiman que la población urbana del escenario base, la del año 2000, pasara de 48,190,767 habitantes a 165,539,104 para el 2060, último año de análisis de la presente investigación. Por otro lado, la SSP5 proyecta alcanzar un crecimiento poblacional de 119,026,737 habitantes para el 2050, periodo después del cual se presenta una reducción alcanzando los 115,491,297 de habitantes en 2060.

La tendencia observada en las proyecciones de población influye de forma importante en la exposición a los FEAT, especialmente al evaluar ambos escenarios. En las proyecciones de Jones & O'Neill (2016), la SSP3, pese al ritmo lento de urbanización y un patrón espacial mixto, la alta fertilidad de la región a la que pertenece México impulsa un crecimiento acelerado de la población que habita las ciudades, crecimiento que rebaza por mucho la población urbana de la SSP5, ya que, pese a suponer un ritmo rápido de urbanización y un patrón espacial disperso, la baja tasa de fertilidad que supone esta trayectoria, para la región a la que pertenece el país, impacta sobre su desarrollo poblacional y la concentración de la misma en las urbes mexicanas. Para ambas SSPs, el Estado de México, la Ciudad de México, Jalisco y Veracruz presentan la mayor concentración de población desde 2020 hasta 2060, situación fundamental para la determinación de la exposición a los FEAT en el país.

Sin embargo, al momento de considerar la superficie de distribución de la población urbana, elemento que influye en los patrones de exposición, la SSP5 supera con creces el crecimiento

proyectado por la SSP3. Para 2020, la superficie de distribución de la población urbana proyectada por la SSP3 alcanza los 435,533.8km<sup>2</sup> mientras que para el mismo periodo la SSP5 proyecta una superficie urbana de 512,127.3km<sup>2</sup>, 15% superior a la de la SSP3. Sin embargo, para el 2060, la SSP5 alcanza una superficie urbana de 951,960.3 km<sup>2</sup>, más de la mitad del territorio nacional, mientras que la SSP3 solamente llega a una distribución de 631,219.9 km<sup>2</sup>, tan solo el 66.3% de la proyectada por la SSP5. Cabe resaltar que cuando se habla de superficie urbana para Jones & O'Neill (2016) se habla exclusivamente del área de distribución de la población urbana, no se hace referencia a la superficie ocupada por el suelo urbano, es decir, por la infraestructura que delimita a las urbes. En ese sentido, los estados de Veracruz, Michoacán, Jalisco y Chiapas son los que muestran la mayor superficie de distribución de la población urbana para ambas SSPs, aunque en términos relativos, es decir, del porcentaje de superficie que representa del total estatal, la Ciudad de México, Tlaxcala, Aguascalientes y el Estado de México son los que muestran un mayor porcentaje. Tal situación es determinante en la conformación del patrón distributivo de la exposición a los FEAT, debido a que la zona centro es, por la elección de los umbrales de temperatura máxima, de las menos afectadas por los eventos de calor extremo.

Por otro lado, desde el incremento de la urbanización visto como el aumento en la superficie de suelo urbano, las proyecciones de Chen et al. (2020) analiza el crecimiento del suelo urbano bajo las dos trayectorias socioeconómicas de interés; la SSP3 y la SSP5. Al igual que para Latinoamérica, la SSP3 impulsa el mayor crecimiento de la mancha urbana en el país, pasando de 12,347.2km<sup>2</sup> en 2015 a 22,159.3km<sup>2</sup> en 2060, cifra que tan solo llega a los 16,065.8km<sup>2</sup> en 2060 para la SSP5, 27.5% menor superficie que para las SSP3. El crecimiento de tal urbanización es constante hasta 2060 para ambas trayectorias, aunque el porcentaje de tal incremento es muy superior para la SSP3, que se mantiene por encima del 9.0% para todos los periodos, a diferencia de la SSP5 que alcanza su menor nivel de cambio en 2060 con tan solo un 0.1% de incremento en la superficie urbana respecto a 2050. Cabe destacar que, la superficie de suelo urbano no considera ningún tipo de reconversión en su superficie, es decir, no se consideran perdidas en la superficie del uso de suelo urbano futuro (Chen et al., 2020). Los estados que presentan la mayor superficie de suelo urbano para los periodos evaluados, de 2020 a 2060, para ambas SSPs, son el Estado de México, Jalisco y

Veracruz, sin embargo, en cuanto al porcentaje de superficie estatal que representa el suelo urbano, son la Ciudad de México, Morelos y el Estado de México los que sobresalen.

Derivado de lo anterior, queda claro que la SSP3 impulsa los mayores valores de crecimiento poblacional y de suelo urbano, si bien la distribución de la población urbana es mayor en la SSP5, para los datos de Jones & O'Neill (2016), esta distribución no se da acompañada de altos valores poblacionales, lo que reduce su influencia en la determinación de la exposición a los FEAT. Ello, producto de la forma en la que Jones & O'Neill (2016) determinan la expansión de las celdas urbanas, al reasignar a la población rural que se encuentra dentro de celdas con una población urbana redefiniendo tal celda como completamente urbana, lo que produce un incremento, en la redefinición futura, de la expansión urbana o de la expansión de la superficie que ocupa la población urbana.

Además, es importante resaltar que la diferencia mostrada entre la magnitud de la superficie distribución de la población urbana y la magnitud de la distribución del suelo urbano se da por la forma de definir la urbanización. Las cifras de expansión de la población, de las trayectorias proyectadas por Jones & O'Neill (2016), son muy superiores a la superficie que abarca el suelo urbano, definido por las proyecciones de Chen et al. (2020), por lo que la comparación entre ambos debe darse en términos del aumento de la exposición desde las dos visiones, es decir, del como cada una de las visiones influencia y proyecta un crecimiento en la exposición a los FEAT y los factores que tienen un papel en los impactos de tal exposición, no en términos de valor absoluto de la superficie, es decir, la consideración de como el uso de una u otra visión influye en la determinación de los niveles de exposición a los FEAT y no en una comparación directa en cuanto a la superficie que ocupan territorialmente.

Para ambas visiones, la tendencia mostrada es la de un incremento, tanto para la población como para el suelo urbano, que puede variar según la SSP que se evalúe, siendo modesto en el caso de la SSP5, e incluso mostrando un declive en la segunda mitad del siglo, o sostenido en el tiempo para la SSP3, alcanzando los niveles más elevados en 2060, último año de evaluación para este estudio. En el caso de la exposición a los FEAT, la evolución de la población urbana y del suelo urbano incrementara tanto la magnitud de la población expuesta como la superficie en la que se presentara tal exposición. El crecimiento de las urbes mexicanas, que se da predominantemente en forma de aglomeraciones urbanas

interrelacionadas o zonas metropolitanas (SEDATU, 2018), tiende a la concentración de servicios, infraestructura y población en determinadas zonas del territorio, lo que las convierte en las áreas de mayor exposición, tanto por el nivel de población que las habita como por la magnitud de los flujos de movilidad que se dan en ellas, y cuya vulnerabilidad territorial puede ser mayor en relación a otras zonas del país, especialmente por el efecto catalizador de la temperatura conocido como ‘isla de calor’ (Cervantes, Vargas, & Barradas, 2001; Díaz et al., 2013; Zavaleta, Díaz, Vázquez, Morales, & Narcizo de Lima, 2020).

## *2. La evolución de la exposición de la población urbana a eventos extremos de alta temperatura en México*

En cuanto a los niveles de exposición urbana a los FEAT, en términos poblacionales, los datos de Jones & O’Neill (2016) establecen un incremento constante, aunque diferenciado según los umbrales de temperatura máxima, desde 2020 hasta 2060. Para la SSP3, la exposición urbana a un umbral de 35.0°C pasa de 1,325,434 personas expuestas en 2000, que es el año del escenario base, a 46,327,973 habitantes expuestos en el 2060, lo que implica un aumento del 97.1% en la población urbana expuesta, además de que representa el 78.6% de la población nacional expuesta para ese año. En el caso de la SSP5, el incremento, para el mismo umbral es del 96.0%, alcanzando una población urbana expuesta de 32,914,560 de habitantes, y representa el 92.4% del total expuesto para este escenario. Para ambas SSPs, para los periodos de 2020 y 2030, los estados que concentran la mayor población expuesta son Nuevo León, Tamaulipas, Sinaloa y Sonora, mientras que para los periodos de 2050 a 2060, la distribución de las temperaturas máximas del umbral de 35.0°C alcanza prácticamente todo el territorio, a excepción de algunos estados del centro del país, entre los que destacan la Ciudad de México y la mayor parte del Estado de México, estados que concentran gran parte de la población tanto urbana como nacional, ello debido tanto a la consideración de un umbral de temperaturas máximas tan elevado como al uso de promedios mensuales de temperaturas máximas, lo que, al ser el promedio mensual de temperatura máxima menor al umbral considerado, invisibiliza la posible ocurrencia de los FEAT.

Para la SSP3, la población expuesta a un umbral de temperaturas máximas por encima de los 38.9°C, pasa de los 59,336 habitantes urbanos expuestos a 7,564,705 para 2060, de los cuales el 37.5% están expuestos a temperaturas superiores a los 40.0°C. En cuanto a las SSP5, la

exposición a ese umbral de temperaturas máximas, el de los 38.9°C, alcanza, en 2060, una población urbana expuesta de 5,729,393 habitantes, de entre los que el 42.0% se encuentra expuesto a temperaturas superiores a los 40.0°C. Tal grado de exposición, para ambas trayectorias, se concentra en los estados de Baja California, Sonora y Sinaloa, además de sumar, para los periodos del 2050 y del 2060, a los estados de Guerrero y Michoacán.

Los incrementos en la exposición urbana, para ambas trayectorias, son de suma importancia, es claro que, en términos poblacionales, la SSP3 impulsa la mayor exposición a los FEAT, incluso cuando la SSP5 establece condiciones de concentración urbana, ya que, el crecimiento de la población para la SSP3 supera por mucho al que proyecta la SSP5. Por otro lado, los estados que muestran el mayor aumento de población urbana no son los que concentran la mayor exposición a los FEAT, al menos no de manera uniforme. De entre los estados del norte del país, que son los más afectados por la exposición a los FEAT, los mayores niveles de exposición si se concentran en los que presentan mayor nivel de población urbana, sin embargo, es evidente que los patrones distributivos de la exposición a los FEAT están determinados, en gran medida, por la variabilidad climática, en tanto intensidad y distribución, que impulsa el cambio climático.

Aunado a lo anterior, la variabilidad de las temperaturas máximas que se presenta entre los meses que componen el periodo de interés, que va de mayo a agosto, impulsa niveles de exposición que superan al escenario promedio. Para el umbral de 35.0°C, los meses de junio para los años 2020 y 2030 son los que muestran la mayor exposición, mientras que, para los años de 2050 y 2060 el mes de mayo proyecta los niveles más elevados de población expuesta, superando en más del 50% la exposición proyectada por el escenario promedio. Por su parte, el umbral de 38.9°C, muestra una mayor variabilidad, para el año 2020, los meses que muestran una mayor exposición que el promedio son agosto, para la SSP3, y junio, para la SSP5. Para el 2030, los meses de junio, para la SSP3, y julio, para la SSP5, son las que muestran una mayor exposición que la exposición promedio. Sin embargo, para los años de 2050 y 2060 el mes de julio es el que presenta los niveles más elevados de exposición, superando hasta en un 50% la exposición proyectada por los escenarios promedio.

Tales variaciones establecen un reto claro para el desarrollo de las ciudades, si bien el crecimiento urbano, desde una visión demográfica, impulsado por la SSP3 genera las

mayores cifras de exposición, un mundo en el que la población urbana se concentra en las urbes implica también retos importantes al concentrar niveles cercanos o incluso superiores al 90% de la exposición a los FEAT, para ambos umbrales de temperatura máxima. Si bien es cierto que la variabilidad climática entre periodos, evaluada a través del escenario de cambio climático (HADGEM2ES), es la que impulsa en mayor medida los cambios en la distribución de la exposición a los FEAT, para ambos umbrales, las variaciones tanto en la distribución como en la superficie ocupada por la población urbana juegan un rol de gran relevancia al completar el rompecabezas en la determinación de tal exposición.

3. *El incremento de la superficie de exposición a los FEAT a través de las dos miradas; distribución poblacional y de suelo urbano*

La diferencia más clara entre las dos visiones de urbanización se observa en la superficie de distribución de la exposición de la población urbana y de la del suelo urbano. Si bien, como se ha mencionado, la comparación entre los valores absolutos carece de sentido, el observar la distribución de la exposición moldeada por tales formas de la urbanización, permite analizar la importancia que tiene la consideración de una u otra al momento de evaluar la exposición a los FEAT.

En cuanto a los datos de las proyecciones de Jones & O'Neill (2016), la superficie de distribución de la población expuesta a un umbral de 35.0°C alcanza los 83,447.3km<sup>2</sup> durante el 2000, superficie que en 2060 se incrementa en un 63.5% para la SSP3, alcanzando los 228,888.0km<sup>2</sup>, y un 76.4% llegando a los 353,903.3km<sup>2</sup> para la SSP5. Mientras que la exposición a temperaturas máximas superiores a los 38.9°C pasa de una superficie de distribución de la exposición de los 1,450.0km<sup>2</sup> en el año 2000, para el escenario base, y para para el 2060 alcanza a los 61,088.3km<sup>2</sup> para la SSP3, y a los 105,536.8km<sup>2</sup> para la SSP5.

Por otro lado, Chen et al. (2020) proyecta una superficie de distribución del suelo expuesta a un umbral de 35.0°C que va de los 1,218.4km<sup>2</sup>, para el escenario base de 2015, a los 6,594.6km<sup>2</sup> para la SSP3 y a los 4,797.9km<sup>2</sup> para la SSP5, ambos en 2060. En tanto que, para un umbral de 38.9°C, la superficie del escenario base, el de 2015, es de 197.7km<sup>2</sup> y, en 2060, alcanza los 2,320.4km<sup>2</sup> para la SSP3 y los 1,622.9km<sup>2</sup> para la SSP5. En este sentido, al evaluarse el incremento de uso de suelo, el efecto de 'isla de calor', que consiste en el

incremento de la temperatura en las urbes con relación a la que se percibe fuera de ellas (Zavaleta-Palacios et al., 2020), tiene un efecto catalizador sobre las temperaturas máximas evaluadas, lo que incrementa el riesgo de enfermedades o muerte por exposición al calor extremo.

Existen diferencias importantes en la superficie de exposición para ambos tipos de proyecciones, las cuales, como ya se ha mencionado, provienen de la visión de urbanización que tienen ambos autores. Si bien se podría hacer una revisión de los métodos que usan para la clasificación de la superficie urbana, la diferencia de origen se puede encontrar en el hecho de que Jones & O'Neill (2016) clasifican la urbanización como el incremento de la población en cada celda de las proyecciones, es decir, la distribución de la población no está delimitada por consideraciones ligadas a la infraestructura urbana o al tipo de uso de suelo que se da en el territorio. Mientras que Chen et al. (2020) evalúa el cambio en la superficie urbana, es decir, en la infraestructura que conforma el suelo urbano de las ciudades, sin mirar cuestiones de población, al menos no de forma directa.

Además, es necesario resaltar la dirección inversa en cuanto al incremento de la superficie urbana. Para Jones & O'Neill (2016), la superficie de distribución está dada por supuestos de patrones de urbanización, para la SSP3 el patrón de urbanización es mixto, por lo que la población urbana no se concentra en un punto específico, es decir, las ciudades no concentran el mismo nivel de población, relativo a la población nacional, que bajo los supuestos de la SSP5, trayectoria que permite observar cómo la población se concentra en las ciudades, las cuales crecen de forma dispersa, alcanzando una superficie urbana mayor, aunque menos poblada. Sin embargo, para Chen et al. (2020), la urbanización, es decir, el incremento de suelo urbano sigue una dirección proporcional al de la población, para México, el suelo urbano bajo la SSP3 se incrementará en mayor medida que bajo la SSP5, debido a que el incremento en la población que habita las ciudades demandará una mayor superficie de suelo, el cual, tanto para América latina como para México, se dará en las periferias de las urbes mexicanas.

Estos patrones geográficos juegan un papel fundamental en la exposición a los FEAT, el cambio en la superficie de distribución de la población urbana que Jones & O'Neill (2016) consideran tiene un peso mayor en la determinación de los patrones de exposición que el

crecimiento en la superficie de suelo urbano que proyecta Chen et al. (2020). Sin embargo, la variabilidad climática, para ambas visiones, sigue teniendo el mayor peso en la definición de la exposición, sobre todo en la conformación de los patrones de distribución de tal exposición a eventos de calor extremo. En términos generales, la SSP3 es la que mayor exposición proyecta para ambas visiones de urbanización, tanto para Jones & O'Neill (2016) como para Chen et al. (2020), ya que, en el caso de Jones & O'Neill (2016), los mayores niveles de población expuesta se dan en esta trayectoria, sin que la superficie de distribución juegue un papel determinante en tal exposición, debido principalmente a los supuestos de crecimiento poblacional, mientras que para Chen et al. (2020), la conformación de los supuestos que impulsan el crecimiento del suelo urbano hacen que la mayor superficie expuesta se de en la SSP3.

Aunado a lo anterior, si bien Bryan Jones et al. (2015; 2018) evalúan el peso específico que tiene tanto el incremento poblacional como la distribución y aumento en la superficie que abarcan las temperaturas extremas, analizando escenarios estáticos de población en comparación con escenarios dinámicos de clima y viceversa, la constitución de los datos analizados en la presente investigación, permite observar la importancia del cambio en la urbanización, a través de las dos miradas, en dos periodos de temperatura que se suponen estáticos para la evaluación inter anual, es decir, para 2020 y 2030 se emplea un solo escenario de temperaturas máximas, con lo que se suponen condiciones climáticas constantes, y para 2050 y 2060 se emplea otro escenario de temperaturas máximas. Tal composición de los datos permite evaluar la importancia del cambio en una y otra de las variables, aunque de forma indirecta, en la determinación de la superficie y patrones distributivos de la exposición a los dos umbrales de temperaturas máximas y, por ende, a los fenómenos extremos de alta temperatura. Con ello, es posible observar que, los periodos de cambio en las condiciones climáticas son determinantes para la distribución de la exposición a los FEAT, mientras que tanto el aumento poblacional y su superficie de distribución como el aumento en la superficie de suelo urbano son relevantes en cuanto a la magnitud de la superficie de exposición a los FEAT y no tanto en la distribución o redistribución en el tiempo de los mismos.

Tomando en cuenta los supuestos que subyacen a ambas SSPs, además de los resultados de la presente investigación, el desarrollo de la urbanización en la SSP3 implicará desafíos altos tanto para la mitigación como para la adaptación de los efectos del cambio climático, especialmente en cuanto a los impactos producidos por los FEAT, la suposición de los altos niveles de crecimiento poblacional, según Jones & O'Neill (2016), y el elevado incremento en la superficie de suelo urbano, de acuerdo con Chen (2020), estará acompañada de niveles educativos y de crecimiento económico bajos, debido a los pobres niveles de comercio internacional producto de la debilidad de las instituciones internacionales y una falta de cooperación tanto regional como internacional, además de un lento avance tecnológico y un uso de suelo poco regulado (ERA4CS, 2020; Jones & O'Neill, 2016; O'Neill et al., 2020, 2016), lo que impulsará un crecimiento importante en la periferia de las urbes (Chen et al., 2020), lo que podría conllevar que la vulnerabilidad de la población urbana se incremente, aunque, debido a los patrones de distribución poblacional, la población urbana no será tan significativa en la SSP3 en relación a la población nacional, es decir, representará porcentajes de población urbana bajos con relación a los que se muestran en una SSP5.

En tanto que, la SSP5 cuyos resultados proyectan una exposición a los FEAT, para ambos umbrales, menor que en la SSP3, en relación a la población y superficie de suelo urbano expuestos, implicará altos desafíos para la mitigación a los efectos del cambio climático, especialmente en cuanto a los efectos de los FEAT sobre la población urbana, aunque los desafíos para la adaptación serán menores, debido, principalmente, al importante crecimiento económico y al veloz progreso tecnológico producto de un alto nivel de comercio internacional, altos niveles educativos y la tendencia de estabilización poblacional a la mitad del siglo, lo que implica un crecimiento poblacional bajo y, por ende, menores niveles de exposición, tal como lo muestran los resultados. Además, pese a que el patrón de distribución de la población que muestran Jones & O'Neill (2016) es mucho mayor en la SSP5, al momento de comparar los resultados entre las trayectorias, el nivel en el crecimiento proyectado de la población influye mucho más en la determinación de exposición alcanzada en esta trayectoria, aunque los porcentajes de población urbana respecto a la población nacional resultan ser mucho más importantes, incluso en cuanto a las cifras de exposición, que en la que se muestra en la SSP3.

Sin embargo, ambas trayectorias impulsan una tendencia de crecimiento en la exposición que implica una serie de retos para la adaptación y la mitigación a los impactos de los FEAT impulsados por el cambio climático en las urbes mexicanas. Tanto el crecimiento poblacional y el incremento en el suelo urbano como el aumento en las temperaturas máximas establecerán un patrón de exposición a los FEAT, cuyos impactos se verán recrudecidos por las características inherentes a las urbes, debido tanto al efecto catalizador de la temperatura como por la concentración de población, dado que el modelo de crecimiento urbano que se da en el país suele impulsar a la población más vulnerable a las áreas de mayor riesgo (Asefi-Najafabady et al., 2018; Birkmann et al., 2015; IPCC, 2021a, 2021b).

Lo anterior hace necesaria la implementación de infraestructura que permita la reducción de los posibles impactos sobre la población al aumento en la intensidad y frecuencia de los FEAT en las urbes, además de la implementación de políticas públicas encaminadas a la reducción de la vulnerabilidad de la población urbana. Como se ha mencionado, si bien los niveles de exposición más altos no son coincidentes con la zona de mayor dinamismo urbano y poblacional, las urbes del norte del país, que también concentran un porcentaje importante de la población tanto estatal como nacional, se verán afectadas por los cambios en el clima y por la posible tendencia de evolución que tomen en un futuro ya que, si bien hay un incremento en ambas SSPs, tanto para el suelo urbano como para la población, el nivel de exposición proyectado por un mundo como el que describe la SSP3 es mucho mayor que el que vislumbra una trayectoria SSP5.

#### *4. Los datos y su análisis; limitaciones y oportunidades de mejora*

Pese a que el avance en las estimaciones de la exposición a los FEAT de la presente investigación es un paso en la dirección correcta de la reducción de riesgos futuros en las urbes, queda claro que la carencia de proyecciones futuras de temperaturas máximas diarias limita la identificación a detalle de las zonas de mayor importancia de exposición a eventos extremos de alta temperatura, como lo son las olas de calor. Por ello, el presente estudio apenas consigue acercarse a una realidad que podría ser mucho más alarmante de lo que concebimos a través de los datos que se analizaron, es imposible observar más allá de los promedios de las temperaturas máximas mensuales proyectados por el modelo HADGEM2ES de UNIATMOS (2015), lo que impide observar el número de días por encima

de los límites o umbrales de temperatura máxima establecidos, de igual forma no se alcanza a determinar el número de días/persona que se encuentran expuestos a los umbrales de temperatura establecidos, tal como lo hace Bryan Jones et al. (2015; 2018) para evaluar un umbral de 35.0°C.

Aunado a ello, la identificación de las zonas de exposición se da a través de datos nacionales, no se toman en consideración los extremos de las temperaturas a nivel local, es decir, si la temperatura no rebasa las dos desviaciones estándar de la media nacional, no se considera para el análisis. Ello invisibiliza los impactos que la población local, al mantener una resistencia a determinado nivel de temperatura, puedan tener debido al aumento en las temperaturas máximas impulsado por el cambio climático. Esta forma de tratar los datos deja fuera una de las zonas del país de mayor relevancia, la zona centro, en la que se concentra la mayor parte de la población urbana y de la superficie de suelo urbano, tanto en el presente como en las proyecciones futuras de Jones & O'Neill (2016) y de Chen et al. (2020), para ambas SSPs. Además, es necesario mencionar la subestimación de la urbanización en Chen et al. (2020), ya que su escenario base se encuentra 47.2% por debajo de la superficie urbana reportada por INEGI (2016) para el mismo año, el 2015. Por ello, pese a que las proyecciones permiten observar el comportamiento del crecimiento de la urbanización bajo los supuestos de la SSP3 y la SSP5, el crecimiento real de la superficie futura del suelo urbano puede ser mucho mayor al que se supone en los datos procesados de las proyecciones de Chen et al. (2020) y derivado de tal subestimación, la exposición futura a eventos de calor extremo del suelo urbano puede ser superior.

##### *5. La exposición presente y futura a los FEAT; el camino a seguir*

Pese a las limitantes de los datos, la presente investigación aporta a la identificación de zonas urbanas de expuestas, tanto en el presente como en el futuro, a las altas temperaturas mediante la distinción de dos umbrales que implican un grado de peligro determinado según la vulnerabilidad de la población que se encuentre expuesta a ellas. Sin embargo, aún es necesario analizar la posible evolución de las temperaturas máximas a través de la consideración de otros escenarios, además del escenario HADGEM2ES evaluado. Aunado a ello, es necesario el desarrollo de proyecciones de temperaturas diarias bajo escenarios de cambio climático, lo que permitiría una mayor claridad y fiabilidad en la identificación de

zonas de exposición a eventos de calor extremo, tanto en las urbes como en el resto del territorio nacional.

De igual manera, como se ha mencionado, la evaluación de los umbrales de temperatura no considera el cambio en las condiciones locales, es decir, invisibilizan incrementos, por importantes que sean, que se encuentren por debajo de los 35.0°C, por lo que la evaluación del cambio local es una asignatura pendiente en materia de la evaluación de la exposición a temperaturas máximas que pudieran suponer un riesgo para la población tanto nacional como urbana. Además, la consideración de los incrementos de la temperatura impulsados por el efecto de ‘isla de calor’ no se toman en cuenta en esta investigación, por lo que su consideración futura implicaría un entendimiento importante respecto del rol que juegan las urbes mexicanas en la exposición a los FEAT y a los impactos en la salud y mortalidad de las poblaciones que las habitan.

Sin embargo, la aportación que produce la presente investigación es de relevancia, al establecer escenarios de exposición urbana a los FEAT para el país, a través de la consideración de dos umbrales de temperatura máxima y la reconfiguración que sufrirán debido al cambio climático, así como dos posibles rutas evolutivas de la urbanización, a partir del marco de las SSPs, y los retos que impondrán a los impactos del cambio climático, especialmente en cuanto al cambio en la intensidad y frecuencia de las temperaturas máximas, lo que coadyuva a la configuración del tablero de exposición a los fenómenos extremos de altas temperaturas.

Aunado a ello, investigaciones como esta, en las que el entendimiento del camino que puede seguir el desarrollo futuro proyectado por las SSPs, facilitan la evaluación de las implicaciones de las proyecciones futuras sobre temas tan diversos como la agricultura, educación, uso de suelo, pobreza, riesgos, vulnerabilidad, entre otros aspectos (Moss et al., 2010; O’Neill et al., 2015), que, pese a ser representaciones simplificadas, permiten dar un vistazo a los impactos e interacciones futuras que la evolución de los factores sociales pueden tener, haciendo de las SSPs descritas un instrumento novedoso que posibilita el modelado de los nexos entre el cambio climático y el societal a lo largo del tiempo (Escoto et al., 2017).

Lo anterior, permite hacer uso de estas herramientas en la planeación y determinación de políticas públicas que guíen el desarrollo, social y económico, y la toma de decisiones para

la selección del mejor camino a seguir, reduciendo los posibles impactos, sin limitarse a ello, de fenómenos extremos como el abordado en esta investigación, además de atender las posibles consecuencias que las interacciones futuras, como la establecida entre la evolución del clima y el cambio en la urbanización, tendrán sobre los distintos sectores de la población, presentando un escenario que facilite la toma de decisiones y la implementación de políticas públicas con miras a gestionar y reducir el riesgo de impactos negativos sobre dicha población.

En ese sentido, entender cómo evolucionará la desigualdad, en cuanto a futuros beneficios y afectaciones sobre la población, tanto entre países como al interior de los mismos, se vuelve esencial para el diseño de las políticas públicas, especialmente las enfocadas a la reducción de la vulnerabilidad y el aumento de la capacidad adaptativa, especialmente en materia de cambio climático (Escoto et al., 2017), lo que, a su vez, hace a las SSPs una herramienta esencial para las investigaciones que se enfoquen en los posibles caminos del desarrollo económico y social futuro, las interacciones que se den con factores diversos, como el clima y el medio ambiente, y las consecuencias o impactos que deriven de tales interacciones.

## Referencias

- Almejo, R., García, J., & Benítez, I. (2014). *La Urbanización en México 2010-2030 : un esbozo de los retos y oportunidades asociados al crecimiento urbano y regional oportunidad*.
- Anderson, B. G., & Bell, M. L. (2009). Weather-Related Mortality. *Epidemiology*, *20*(2), 205–213. <https://doi.org/10.1097/ede.0b013e318190ee08>
- Anderson, B. G., & Bell, M. L. (2011). Heat waves in the United States: Mortality risk during heat waves and effect modification by heat wave characteristics in 43 U.S. communities. *Environmental Health Perspectives*, *119*(2), 210–218. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002313>
- Anzaldo-Gómez, C. (2012). Hacia una revisión de los referentes empíricos para medir la urbanización en México. *Coyuntura Demográfica*, *2*, 5.
- Aragón-Durand, F. (2011). Adaptación al cambio climático y gestión del riesgo de desastres en México. In *Cambio Climático, Amenazas Naturales y Salud en México*.
- Aragón-Durand, F. de J. (2011). Adaptación al cambio climático y gestión del riesgo de desastres en México. In *Cambio Climático, Amenazas Naturales y Salud en México* (pp. 131–158). México, D.F.
- Asefi-Najafabady, S., Vandecar, K. L., Seimon, A., Lawrence, P., & Lawrence, D. (2018). Climate change, population, and poverty: vulnerability and exposure to heat stress in countries bordering the Great Lakes of Africa. *Climatic Change*, *148*(4), 561–573. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2211-5>
- Baker, J. (2012). Climate Change, Disaster Risk, and the Urban Poor. In *Climate Change, Disaster Risk, and the Urban Poor*. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-8845-7>
- Banco Mundial. (2019). Urbanization. Retrieved from World Development Indicators website: <http://wdi.worldbank.org/table/3.12>
- Banco Mundial. (2020). Desarrollo Urbano. Retrieved from <https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevolucion/overview>
- Barnett, A. G., Tong, S., & Clements, A. C. A. (2010). What measure of temperature is the best predictor of mortality? *Environmental Research*, *110*(6), 604–611. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2010.05.006>
- Birkmann, J., Cutter, S. L., Rothman, D. S., Welle, T., Garschagen, M., van Ruijven, B., ... Pulwarty, R. (2015). Scenarios for vulnerability: opportunities and constraints in the context of climate change and disaster risk. *Climatic Change*, *133*(1), 53–68. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0913-2>
- Bouwer, L. M. (2019). *Loss and Damage from Climate Change*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72026-5>
- CDC. (2012). *Climate Change and Extreme Heat Events*.
- CENAPRED. (2019). Atlas Nacional de riesgos. Retrieved from <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-estatales.html>
- Cervantes, J., Vargas, M. A., & Barradas, V.

- L. (2001). Clima, urbanización y uso del suelo en ciudades tropicales de México. *Ciudades*, 51(August), 19–24. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2531-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2531-0_16)
- Chen, G., Li, X., Liu, X., Chen, Y., Liang, X., Leng, J., ... Huang, K. (2020). Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14386-x>
- Chen, J., Wang, H., & Zhu, H. (2017). Analytical approach for evaluating temperature field of thermal modified asphalt pavement and urban heat island effect. *Applied Thermal Engineering*, 113, 739–748. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.080>
- Chen, K., Bi, J., Chen, J., Chen, X., Huang, L., & Zhou, L. (2015). Influence of heat wave definitions to the added effect of heat waves on daily mortality in Nanjing, China. *Science of the Total Environment*, 506–507, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.092>
- Chen, K., Zhou, L., Chen, X., Ma, Z., Liu, Y., Huang, L., ... Kinney, P. L. (2016). Urbanization level and vulnerability to heat-related mortality in Jiangsu Province, China. *Environmental Health Perspectives*, 124(12), 1863–1869. <https://doi.org/10.1289/EHP204>
- CONAGUA. (2018). *Reporte del Clima en México 2018*.
- CONAGUA. (2019). *Reporte anual del clima en México 2019*. 1–18.
- CONAGUA. (2021). *El reporte del clima en México 2020*.
- Conde, C., Estrada, F., Martínez, B., Sánchez, O., & Gay, C. (2010). Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera*, 24(1), 125–140.
- Conde, C., & Saldaña-Zorrilla, S. O. (2007). Cambio climático en América Latina y el Caribe : Impactos , vulnerabilidad y adaptación. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 23(2), 23–30.
- Coumou, D., & Rahmstorf, S. (2012). A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*, 2(7), 491–496. <https://doi.org/10.1038/nclimate1452>
- Coumou, D., & Robinson, A. (2013). Historic and future increase in the global land area affected by monthly heat extremes. *Environmental Research Letters*, 8(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/034018>
- Delgado Ramos, G. C., De Luca, A., & Vazquez, V. (2016). *In the midst of a transition: Mexico's pathway towards urban adaptation and mitigation to climate change*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11771.67367>
- DGE. (2018). *Temperaturas Naturales Extremas ( Temporada de Calor 2018 )*.
- DGE. (2019). *Temperaturas Naturales Extremas ( Temporada de Calor 2019 )*.
- DGE. (2020). *Temperaturas Naturales Extremas ( Temporada de Calor 2020 )*.
- Díaz, R., Castro, A., & Aranda, P. (2013). Mortalidad por calor natural excesivo en el noroeste de México : Condicionantes sociales asociados a esta causa de muerte. *Frontera Norte*, 26, 155–177.
- ERA4CS. (2020). SENSES Toolkit. Retrieved from <https://climatescenarios.org/primer/socioeconomic-development>
- Escoto, A., Sánchez, L., & Gachuz, S. (2017). Shared Socioeconomic Pathways (SSP):

- New waysto assess climate and social change. *Estudios Demograficos y Urbanos*, 32(3), 669–693.  
<https://doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>
- Frame, B., Lawrence, J., Ausseil, A. G., Reisinger, A., & Daigneault, A. (2018). Adapting global shared socio-economic pathways for national and local scenarios. *Climate Risk Management*, 21(May), 39–51.  
<https://doi.org/10.1016/j.crm.2018.05.001>
- Gao, J. (2017). Downscaling Global Spatial Population Projections from 1/8-degree to 1-km Grid Cells. *NCAR Technical Note*, 9. Retrieved from  
<https://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes:553>
- García-Guerrero, V. M. (2014). El Futuro demográfico de México y las proyecciones de población; Uso de los pronósticos probabilísticos en la planeación nacional. In *Gobierno, Territorio y Población* (pp. 71–119). México.
- Garza, G. (2003). *La urbanizacion de México en el siglo XX*. México, D.F.
- Gencer, E., Folorunsho, R., Linkin, M., Wang, X., Natenzon, C. E., Wajih, S., ... Panda, A. (2018). Disasters and Risk in Cities. *Climate Change and Cities*, 61–98.  
<https://doi.org/10.1017/9781316563878.010>
- González, V. (2017). Expansión urbana y cambio climático. In UNAM (Ed.), *Cambio climático y gobernanza; una visión transdisciplinaria*.
- Graizbord, B. (2007). Megaciudades, globalización y viabilidad urbana. *Investigaciones Geograficas*, 63(20), 125–140.  
<https://doi.org/10.14350/rig.29914>
- Graizbord, B., & Monteriro, F. (2011). *Mega ciudades y cambio climático; ciudades sostenibles en un mundo cambiante* (Primera ed; B. Graizbord & F. Monteriro, Eds.). El Colegio de México.
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864), 756–760.  
<https://doi.org/10.1126/science.1150195>
- Hallegatte, S. (2014). Natural Disasters and Climate Change. In *Natural Disasters and Climate Change*.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-08933-1>
- Hauer, M. E., Evans, J. M., & Mishra, D. R. (2016). Millions projected to be at risk from sea-level rise in the continental United States. *Nature Climate Change*, 6(7), 691–695.  
<https://doi.org/10.1038/nclimate2961>
- Hernández, J. Á. (2019). Ruralidad y procesos urbanos. In J. Sobrino & V. Ugalde (Eds.), *Desarrollo urbano y metropolitano en México* (pp. 119–169). Ciudad de México.
- Hondula, D. M., Georgescu, M., & Balling, R. C. (2014). Challenges associated with projecting urbanization-induced heat-related mortality. *Science of the Total Environment*, 490, 538–544.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.130>
- INECC. (2017). Escenarios de cambio climático. Retrieved from  
<https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/escenarios-de-cambio-climatico-80126>
- INECC. (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015 en México. *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*, 845.

- INEGI. (2021). Cuentame INEGI. Retrieved from [http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur\\_urb.aspx?tema\\_P](http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema_P)
- IPCC. (2000). Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. *Resumen Para Responsables de Políticas*, 24. Retrieved from <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-spm.pdf>
- IPCC. (2002). Cambio climático y biodiversidad. In *Biodiversidad 2014. Reporte de estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. <https://doi.org/10.21068/b001.2014.208>
- IPCC. (2012). *Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático*.
- IPCC. (2013). Bases físicas. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL\\_SPANISH.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf)
- IPCC. (2014). Impactos, adaptación y vulnerabilidad. *Informe de Síntesis*, 1–176. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/impact-adaptation-vulnerability/impact-spm-ts-sp.pdf>
- IPCC. (2015). Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico. Contribución del Grupo de Trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. In *Ipcc*.
- IPCC. (2019). Calentamiento Global de 1,5 °C. In *Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IPCC. (2021a). *Comunicado de Prensa IPCC*.
- IPCC. (2021b). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In *Energy and Environment*. <https://doi.org/10.1260/095830507781076194>
- IPUMS TERRA. (2021). IPUMS Terra's climate data. Retrieved from <https://terra.ipums.org/>
- Jones, B., & O'Neill, B. (2013). Historically grounded spatial population projections for the continental United States. *Environmental Research Letters*, 8(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/044021>
- Jones, B., & O'Neill, B. (2016). Spatially explicit global population scenarios consistent with the Shared Socioeconomic Pathways. *Environmental Research Letters*, 11(8). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/8/084003>
- Jones, B., O'Neill, B., Mcdaniel, L., McGinnis, S., Mearns, L. O., & Tebaldi, C. (2015). Future population exposure to US heat extremes. *Nature Climate Change*, 5(7), 652–655. <https://doi.org/10.1038/nclimate2631>
- Jones, B., Tebaldi, C., O'Neill, B. C., Oleson, K., & Gao, J. (2018). Avoiding population exposure to heat-related extremes: demographic change vs climate change. *Climatic Change*, 146(3–4), 423–437. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2133-7>
- Jordán, R., Riffo, L., & Prado, A. (2017).

- Desarrollo sostenible, urbanización y desigualdad en América Latina y el Caribe* (GIZ & CEPAL, Eds.). Retrieved from file:///C:/Users/user/Downloads/S1700701\_es (1).pdf
- Knutti, R., Abramowitz, G., Collins, M., Eyring, V., Gleckler, P. J., Hewitson, B., & Mearns, L. (2010). Good Practice Guidance Paper on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. *IPCC Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections*, 15pp.
- Kovats, R. S., & Hajat, S. (2008). Heat stress and public health: A critical review. *Annual Review of Public Health*, 29(November 2019), 41–55. <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843>
- LeRoy, S., Garfin, G., & Black, M. (2016). Anticipating Cascading Effects from Climate Extremes. *Eos*, 97, 28–29. <https://doi.org/10.1029/2016eo048971>
- Mearns, L. O., & Hulme, M. (2001). Climate Scenario Development. *Climate Change 2001: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 739–768.
- Méndez, R. (2018). Fenómenos climáticos extremos y sus efectos en el Caribe. *AULA*, 61, 98–107.
- Milner, J., Harpham, C., Taylor, J., Davies, M., Quéré, C. Le, Haines, A., & Wilkinson, P. (2017). The challenge of urban heat exposure under climate change: An analysis of cities in the Sustainable Healthy Urban Environments (SHUE) database. *Climate*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/cli5040093>
- Mitchell, B. C., & Chakraborty, J. (2018). Exploring the relationship between residential segregation and thermal inequity in 20 U.S. cities. *Local Environment*, 23(8), 796–813. <https://doi.org/10.1080/13549839.2018.1474861>
- Molina, M., Sarukhán, J., & Carabias, J. (2017). *El cambio climático; causas, efectos y soluciones* (Primera ed).
- Monterroso, A., & Conde, C. (2015). Exposure to climate and climate change in Mexico. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(4). <https://doi.org/10.1080/19475705.2013.847867>
- Monterroso, A., & Conde, C. (2017). Adaptive capacity: identifying the challenges faced by municipalities addressing climate change in Mexico. *Climate and Development*, 0(0), 1–13. <https://doi.org/10.1080/17565529.2017.1372264>
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- O’Neill, B., Carter, T. R., Ebi, K., Harrison, P. A., Kemp-benedict, E., Kok, K., ... Pichs-Madruga, R. (2020). Achievements and needs for the climate change scenario framework. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00952-0>
- O’Neill, B., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., ... Solecki, W. (2015). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169–180.

- <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
- O'Neill, B., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., ... van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, *122*(3), 387–400.  
<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>
- O'Neill, B., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, *9*(9), 3461–3482.  
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- ONU-Hábitat. (2017). Tendencias de desarrollo urbano en México. Retrieved from <https://onuhabitat.org.mx/index.php/tendencias-del-desarrollo-urbano-en-mexico>
- ONU HABITAT. (2020). *World cities report 2020 -The Value of Sustainable Urbanization*.  
<https://doi.org/10.18356/c41ab67e-en>
- Peng, R. D., Bobb, J. F., Tebaldi, C., McDaniel, L., Bell, M. L., & Dominici, F. (2011). Toward a quantitative estimate of future heat wave mortality under global climate change. *Environmental Health Perspectives*, *119*(5), 701–706.  
<https://doi.org/10.1289/ehp.1002430>
- PINCC. (2016). *Reporte Mexicano de Cambio Climático. Grupo I. Bases científicas. Modelos y modelación* (C. Gay & J. Rueda, Eds.). D.F.
- PNUD. (2010). *Gestión del Riesgo Urbano*. 4. p. Retrieved from [www.unisdr.org](http://www.unisdr.org)
- Puente, S. (1999). Social vulnerability to disasters in Mexico: an assessment method. In J. Mitchell (Ed.), *Crucibles of hazard: mega-cities and disasters in transition* (pp. 295–334). Tokyo, New York.
- Raymond, C., Horton, R. M., Zscheischler, J., Martius, O., AghaKouchak, A., Balch, J., ... White, K. (2020). Understanding and managing connected extreme events. *Nature Climate Change*, *10*(7), 611–621.  
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-0790-4>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... Tavoni, M. (2016). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, *42*, 153–168.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Ríos, D., Ceppi, C., Meléndez, K., & Molero, J. J. (2014). *Cambio climático, fenómenos meteorológicos extremos y análisis de riesgos*. *106*, 147–156.
- Romero, H., Salgado, M., & Smith, P. (2010). Cambios climáticos y climas Urbanos: Relaciones entre zonas termales y condiciones socioeconómicas de la población de Santiago de Chile. *Revista INVI*, *25*(70), 151–179.  
<https://doi.org/10.4067/s0718-83582010000300005>
- Samaniego, J., Montero, L., & Ruiz-tagle, M. (2015). Sendas de desarrollo bajas en carbono en ciudades metropolitanas en América Latina. *Cepal*, 160.
- Sánchez, L. (2014). Una mirada demográfica a las metas de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero en México. In S. Giorguli & V. Ugalde (Eds.), *Gobierno, Territorio y*

- Schleussner, C. F., Lissner, T. K., Fischer, E. M., Wohland, J., Perrette, M., Golly, A., ... Schaeffer, M. (2016). Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: The case of 1.5 °c and 2 °c. *Earth System Dynamics*, 7(2), 327–351. <https://doi.org/10.5194/esd-7-327-2016>
- Schteingart, M., & Salazar, C. (2005). *Expansión urbana, sociedad y ambiente*. Ciudad de México.
- SEDATU. (2018). *Sistema Urbano Nacional 2018*. Retrieved from <https://www.google.com.mx/maps/place/México/>
- Seto, K. C., Fragkias, M., Guneralp, B., & Reilly, M. K. (2011). A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion. *PloS One*, 7(4), 1–10. <https://doi.org/10.1371/Citation>
- Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyra, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(40), 16083–16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>
- Seto, K. C., Sánchez-Rodríguez, R., & Fragkias, M. (2010). The new geography of contemporary urbanization and the environment. *Annual Review of Environment and Resources*, 35, 167–194. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-100809-125336>
- Seto, K. C., Sánchez, R., & Fragkias, M. (2010). The new geography of contemporary urbanization and the environment. *Annual Review of Environment and Resources*, 35, 167–194. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-100809-125336>
- Seto, K. C., & Shepherd, J. M. (2009). Global urban land-use trends and climate impacts. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(1), 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2009.07.012>
- Simon, D., & Holloway, R. (2014). *Urbanisation and global environmental change : New intergenerational challenges Urbanisation and global environmental change : new intergenerational challenges*. (August). <https://doi.org/10.1504/IJGE.2007.013061>
- Sobrino, J. (2019). Urbanización de México, 1970-2010. In V. Ugalde & J. Sobrino (Eds.), *Desarrollo urbano y metropolitano en México* (1ra ed., p. 584). Ciudad de México.
- Song, X., Wang, S., Li, T., Tian, J., Ding, G., Wang, J., ... Shang, K. (2018). The impact of heat waves and cold spells on respiratory emergency department visits in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 615(222), 1499–1505. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.108>
- Sotelo Pérez, M., & Sotelo Pérez, I. (2017). Una aproximación al marco teórico de los riesgos. *Observatorio Medioambiental*, 20(0), 9–36. <https://doi.org/10.5209/obmd.57944>
- UNAM. (2013). *México frente al cambio climático : retos y oportunidades*.
- UNAM. (2020). Olas de calor, cada vez más frecuentes en México. Retrieved April 8, 2021, from <http://ciencia.unam.mx/leer/1018/las-olas-de-calor-cada-vez-mas-frecuentes-en-mexico#:~:text=Las olas de calor pueden tener un impacto intenso en, trabajo y de productividad laboral.>

- UNAM, & PINCC. (2016a). *Reporte mexicano de cambio climático; bases científicas*.
- UNAM, & PINCC. (2016b). *Reporte Mexicano de Cambio Climático. Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación* (C. Gay, B. Ortiz-Espejel, N. Muñoz, & M. Le Ball, Eds.). Ciudad de México.
- UNDESA. (2018). World Urbanization Prospects. In B. Graizbord, A. Mercado, & R. Few (Eds.), *Demographic Research* (Vol. 12). Retrieved from <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>
- UNDRR. (2020). DESINVENTAR.
- UNIATMOS. (2015). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación*. 22. Retrieved from <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/se rvmapas/>
- Unikel, L. (1968). El proceso de urbanización en México. *Demografía Y Economía*, *II:2, 1*, 135–149.
- van Vuuren, D. P., & Carter, T. R. (2013). Climate and socio-economic scenarios for climate change research and assessment: Reconciling the new with the old. *Climatic Change*, *122*(3), 415–429. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0974-2>
- van Vuuren, D. P., Riahi, K., Calvin, K., Dellink, R., Emmerling, J., Fujimori, S., ... O'Neill, B. (2017). The Shared Socio-economic Pathways: Trajectories for human development and global environmental change. *Global Environmental Change*, *42*, 148–152. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.10.009>
- Vogel, M. M., Zscheischler, J., Wartenburger, R., Dee, D., & Seneviratne, S. I. (2019). Concurrent 2018 Hot Extremes Across Northern Hemisphere Due to Human-Induced Climate Change. *Earth's Future*, *7*(7), 692–703. <https://doi.org/10.1029/2019EF001189>
- Yang, J., Yin, P., Sun, J., Wang, B., Zhou, M., Li, M., ... Liu, Q. (2019). Heatwave and mortality in 31 major Chinese cities: Definition, vulnerability and implications. *Science of the Total Environment*, *649*, 695–702. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.332>
- Zavaleta, M., Díaz, E., Vázquez, W., Morales, H., & Narcizo de Lima, G. (2020). Urbanization and its relationship with urban heat island in Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *7*(2), 1–12. <https://doi.org/10.19136/era.a7n2.2485>
- Zhang, W., Li, Y., Li, Z., Wei, X., Ren, T., Liu, J., & Zhu, Y. (2020). Impacts of climate change, population growth, and urbanization on future population exposure to long-term temperature change during the warm season in China. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(8), 8481–8491. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07238-9>
- Zhao, Y., Sultan, B., Vautard, R., Braconnot, P., Wang, H. J., & Ducharne, A. (2016). Potential escalation of heat-related working costs with climate and socioeconomic changes in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *113*(17), 4640–4645. <https://doi.org/10.1073/pnas.1521828113>
- Zimmerman, R. (2020). Heat measures for climate and infrastructure services. *Urban Climate*, *34*(May), 100658. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100658>

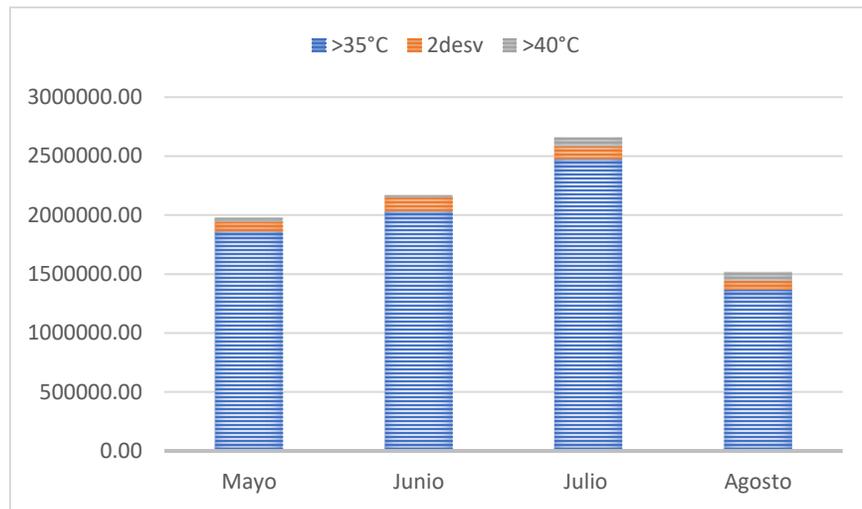
## ***Anexos***

### *Anexo 1. La variabilidad de la exposición a fenómenos extremos de alta temperatura en el país*

Si bien las ciudades y la población de las mismas no sufren cambios tan abruptos, en cuanto a su tamaño y distribución, al pasar los meses, las temperaturas máximas si sufren cambios importantes en su intensidad y distribución durante los meses que componen el periodo evaluado, de mayo a agosto. Tales cambios modifican la exposición a los FEAT, incrementando o disminuyendo la probabilidad de que se presenten efectos adversos en la población.

Para el caso de las temperaturas máximas que superan los 35°C, la exposición alcanza la cifra de 7,951,692 habitantes para el mes de mayo, incrementándose en un 10.9% para el mes de junio, con una exposición de 8,820,441 habitantes, en tanto que para el mes de julio, la cifra se reduce, en relación al mes anterior, en un 10%, lo que establece una exposición de 8,899,362 habitantes, mientras que para el mes de agosto las cifras de exposición se reducen aún más, un 27.9% , llegando a los 6,491,253 habitantes. Para las poblaciones urbanas el comportamiento es distinto al anteriormente descrito. La exposición a temperaturas máximas se incrementa para los primeros tres meses del periodo evaluado (mayo, junio y julio) y decrece durante el mes de agosto, pasando de 1,862,548 habitantes durante el mes de mayo, a un máximo de 2,474,873 habitantes para el mes de julio, y reduciendo la exposición a 1,369,083 habitantes para el mes de agosto (Figura 39).

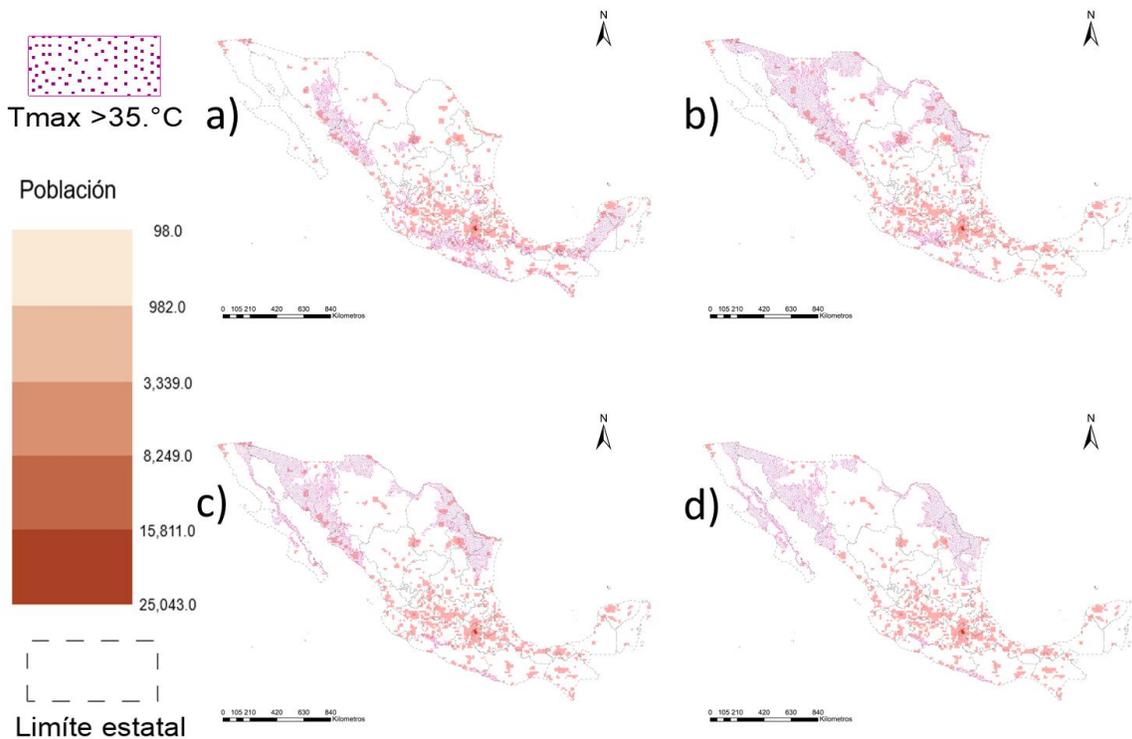
Figura 39. Cambios en la exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C, durante el periodo de evaluación.



Fuente: elaboración propia

La distribución de tales temperaturas se mantiene, casi de forma constante, en los estados del norte del país; Baja California, Sonora, Sinaloa, Nuevo León y Tamaulipas, aunque sufre cambios importantes respecto al mes de mayo, al perder presencia en la península de Yucatán (Mapa 21). Tales cambios están dados por redistribución de las temperaturas máximas durante los meses analizados.

Mapa 21. Distribución de la exposición a temperaturas máximas superiores 35.0°C, para los meses de mayo (a), junio (b), julio (c) y agosto (d).



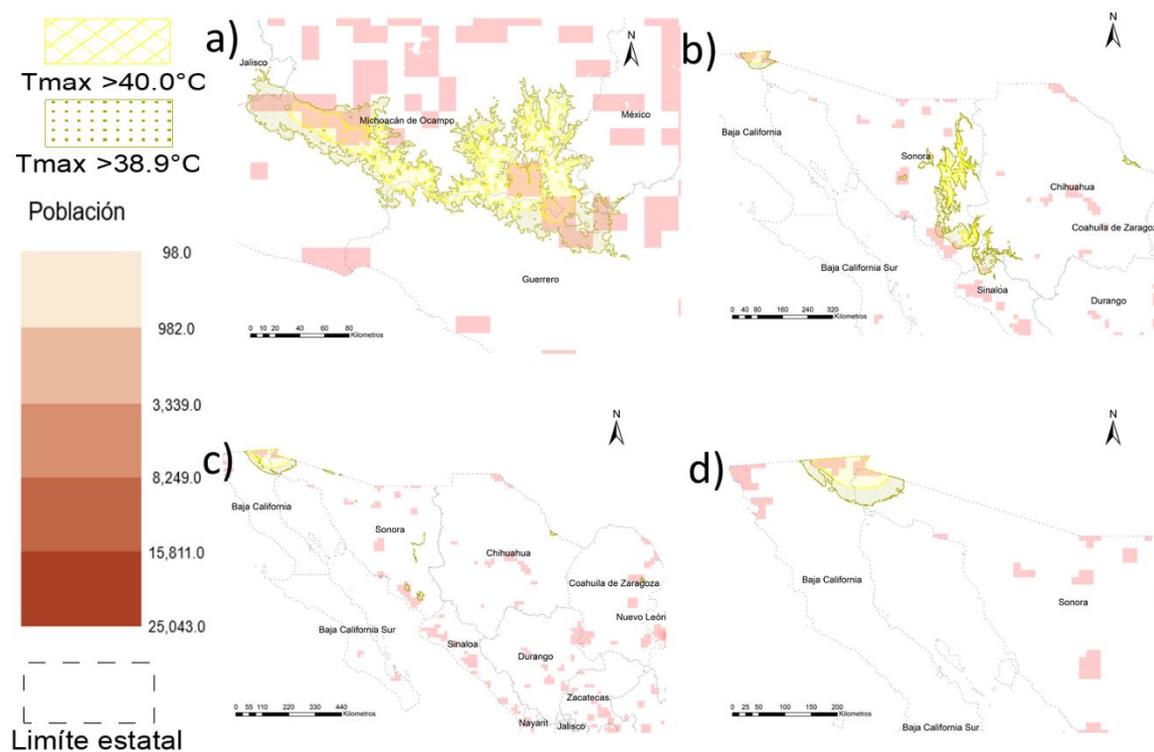
**Nota:** el rango de población hace referencia a la concentración por píxel, no por superficie total urbana.  
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las temperaturas máximas del segundo grupo, es decir, las que superan los 38.9°C (Mapa 22.), su distribución durante el mes de mayo se da, principalmente, entre los estados de Michoacán y Guerrero, con una exposición de 451,182 habitantes. Para el mes de junio, se da un cambio importante en la distribución de las temperaturas máximas de este grupo, pasando a ocupar, principalmente, los estados de Sonora, Sinaloa y Baja California, alcanzando un incremento en la población expuesta con 484,835 habitantes. Para el mes de julio, la población expuesta se reduce a 466,703 habitantes, y su distribución se centra en el estado de Baja California, en el municipio de Mexicali, aunque aún mantiene una presencia reducida en los estados de Sonora, Coahuila y Chihuahua. Durante el mes de agosto, la población expuesta se reduce a 332,453 habitantes, limitando su zona de distribución a los estados de Baja California, en el que tiene mayor presencia, y Sonora.

Dentro de este grupo de temperaturas máximas, el comportamiento de la distribución de la población urbana expuesta es similar a la población total expuesta, ello, principalmente, por

que el factor cuya redistribución es evaluada se limita a los cambios en la temperatura y no a cambios en la distribución e incrementos de la población. Para el mes de mayo la exposición alcanza los 81,036 habitantes, mientras que para el mes de junio se llega a la cifra más elevada de población expuesta con 115,735, y en julio se comienza a notar un descenso en la exposición de la población con 108,913 habitantes, para, finalmente, alcanzar la cifra más baja del periodo evaluado durante el mes de agosto con 76,160 habitantes expuestos, aunque cobran mayor relevancia las temperaturas superiores a los 40°C, que entran dentro de este grupo de temperaturas máximas, las cuales representan el 94.6% de la exposición en este mes.

Mapa 22. Distribución de la exposición a temperaturas máximas superiores 38.9°C, para los meses de mayo (a), junio (b), julio (c) y agosto (d).



**Nota:** el rango de población hace referencia a la concentración por píxel, no por superficie total urbana.  
Fuente: Elaboración propia.

Si bien el escenario base permite plantear una idea clara de la importancia que tiene la exposición a dos medidas de temperaturas máximas que nos aproximan a los FEAT y sus efectos adversos sobre la población, es necesario entender cómo evoluciona la urbanización en el tiempo para tener un panorama completo del crecimiento en la exposición futura a los

FEAT, impulsada tanto por las variaciones climáticas a nivel regional, producto del cambio climático global, como por la evolución y crecimiento de las ciudades. Elementos, el del cambio en el número y distribución de la población, que se ven reflejados en el análisis de los cambios futuros bajo las narrativas subyacentes a las SSPs, especialmente en cuanto a la población urbana.

*Anexo 2. La variabilidad de la exposición futura de los FEAT en las ciudades mexicanas*

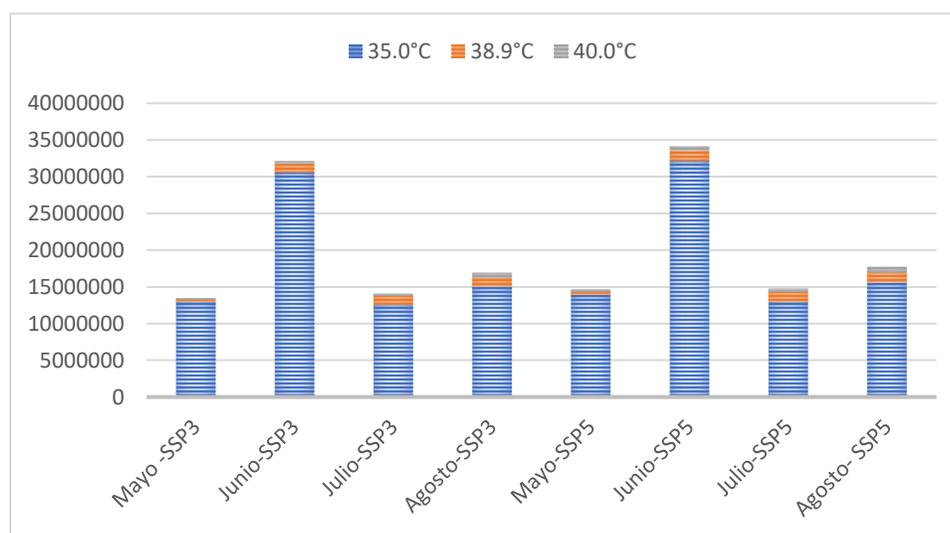
La temperatura máxima no sigue un patrón uniforme de crecimiento, distribución e intensidad a lo largo y ancho del territorio, patrones que son reconfigurados constantemente al paso de los meses. Como se ha mencionado, la selección de un periodo cálido para el país, de mayo a agosto, tiene como finalidad evaluar, de forma viable, la posible distribución de eventos extremos de alta temperatura, sin embargo, la variación que se da dentro del periodo evaluado también es digno de consideración debido, principalmente, a que algunos de los meses evaluados muestran un incremento de temperaturas máximas, en intensidad y distribución, que supera con creces el promedio evaluado. Tales cambios modifican la exposición a los FEAT, incrementando o disminuyendo las posibles afectaciones sobre la población mexicana.

En ese sentido, en el año 2020, para las temperaturas por encima de los 35°C, la SSP3 permite observar un población urbana expuesta de 12,984,804 habitantes, población que para el mes de junio se incrementa en un 57.5%, alcanzando una población expuesta de 30,576,164 personas, cifra que es superior en un 52.3% a los 14,580,483 personas expuestas que reporta el escenario promedio, para la población urbana, situación que se repite, aunque con una menor intensidad, para el mes de agosto, el cual supera la cifra de población expuesta promedio en 2.9%. Para la SSP5, la situación no es muy distinta, los meses de junio, con 32,122,427 personas, y julio, con 15,567,653 personas, superan a la población expuesta promedio, dentro del umbral de temperaturas de 35.0°C, en un 52.8% y un 2.4%, siendo mayo y julio los meses que se mantienen por debajo de tal promedio de exposición (Figura 40).

En cuanto al umbral de 38.9°C de temperaturas máximas, tanto la SSP3 y la SSP5 muestran un comportamiento similar, únicamente el mes de mayo se encuentra por debajo de las cifras de población expuesta, mientras que los meses de junio, julio y agosto superan con creces la

exposición en este rango de temperaturas máximas. Para la SSP3, el mes de junio, que es el que mayor valor presenta, supera en 73.0% la cifra de 326,858.59 habitantes expuestos, alcanzando una exposición de 1,210,558 habitantes. Para las SSP5, para el mes de junio, mes que muestra también la mayor exposición, la cifra promedio es inferior en un 63.2%, ya que la exposición registrada en tal mes es de 1,453,687 habitantes. (Figura 40).

Figura 40. Cambios en la población expuesta a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C (anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2020.



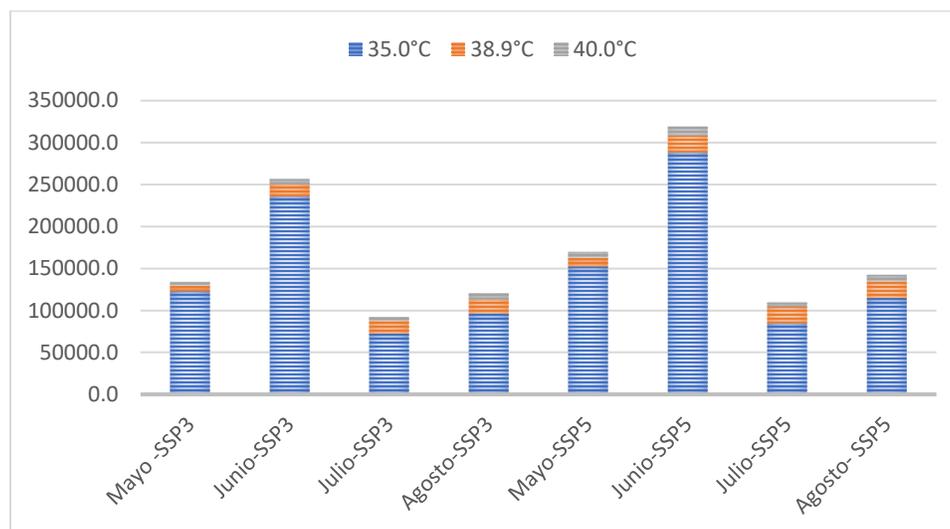
Fuente: elaboración propia

Otro aspecto de gran relevancia son las dinámicas en cuanto a los patrones de distribución. Para el umbral de 35.0°C, es posible observar el mayor incremento en la distribución de las temperaturas durante el mes de junio, que para la SSP3 alcanza una superficie de exposición de 235,789.5km<sup>2</sup>, superando en un 59.6% los 83,447.3km<sup>2</sup> que muestra el escenario de exposición promedio. Por su parte, para la SSP5, la superficie de exposición alcanza su máximo nivel también en junio, con 288,166.6km<sup>2</sup>, cifra que supera en 61.0% a los 112,639.2km<sup>2</sup> de superficie de exposición que muestra el escenario base (Figura 41).

Para el umbral de temperaturas máximas por encima de los 38.9°C, la SSP3 muestra un incremento constante en la superficie de exposición, alcanzando su máximo en el mes de agosto en el que la superficie de distribución de la población urbana alcanza los 16,167.7km<sup>2</sup>, superando en un 57.9% el escenario promedio. En tanto que, la SSP5 muestra un incremento hasta el mes de junio, donde alcanza la máxima superficie de exposición con 20,230.4km<sup>2</sup>,

superando el escenario promedio en un 49.2%, para reduciéndose en un 3.8% en julio y retomando un incremento del 0.3% para agosto.

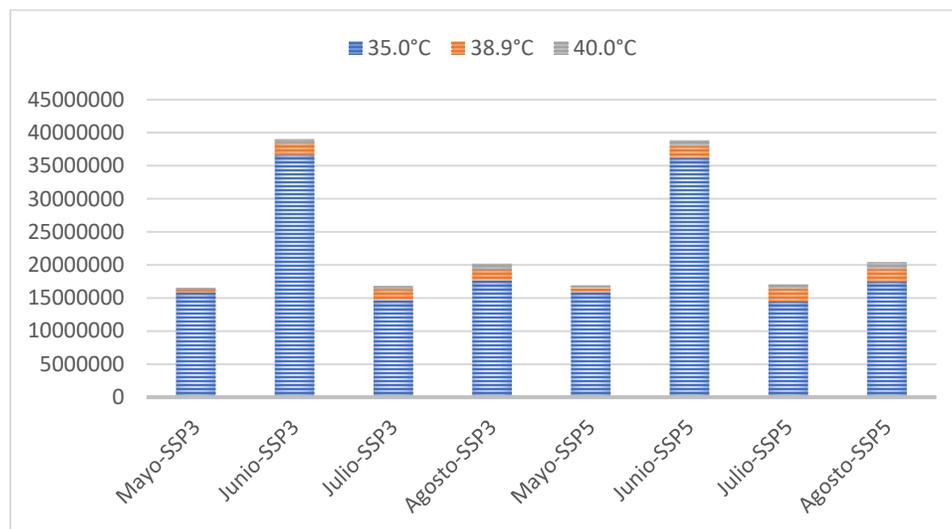
*Figura 41. Cambios en la superficie de exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2020.*



Fuente: elaboración propia

Para el 2030, la SSP3 permite observar un incremento importante de la población expuesta para el mes de junio, alcanzando los 36,666,296 habitantes urbanos expuestos a temperaturas por encima de los 35.0°C, cifra que supera en un 53.0% la mostrada por el escenario promedio. Para la SSP5, la cifra de exposición en junio, mes que muestra el mayor nivel de exposición, es muy similar al de la SSP3, cerca de 36,241,834 personas se encuentran expuestas a este umbral de temperaturas. Mientras que, para el umbral de 38.9°C, la SSP3 muestra la mayor población expuesta durante el mes de junio con 1,707,842, mientras que la SSP5 proyecta que para el mes de julio la población expuesta será de 1,898,233, superando en 71.8% la población expuesta del escenario promedio (Figura 42).

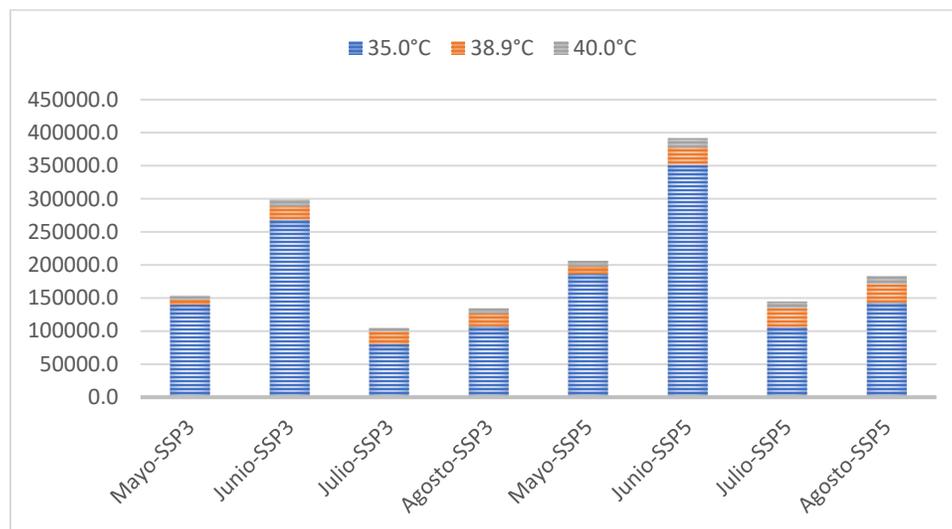
Figura 42. Cambios en la población expuesta a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C (anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2030.



Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la superficie de distribución de la exposición a 35.0°C mencionada, que se observa en el 2030, el mes de junio se mantiene como el de mayor relevancia con una superficie de 268,991.5km<sup>2</sup> para la SSP3 y 351,832.3km<sup>2</sup> para la SSP5, superando en 61.3% las cifras de ambos escenarios promedio. Por otro lado, la superficie de distribución de mayor relevancia de la población urbana expuesta a un umbral de 38.9°C, en el SSP3, se presenta durante el mes de junio con cerca de 19,582.3km<sup>2</sup>, 50.1% superior al promedio, mientras que para la SSP5, la mayor superficie de exposición se alcanza durante el mes de julio, llegando a los 28,603.8km<sup>2</sup> (Figura 43).

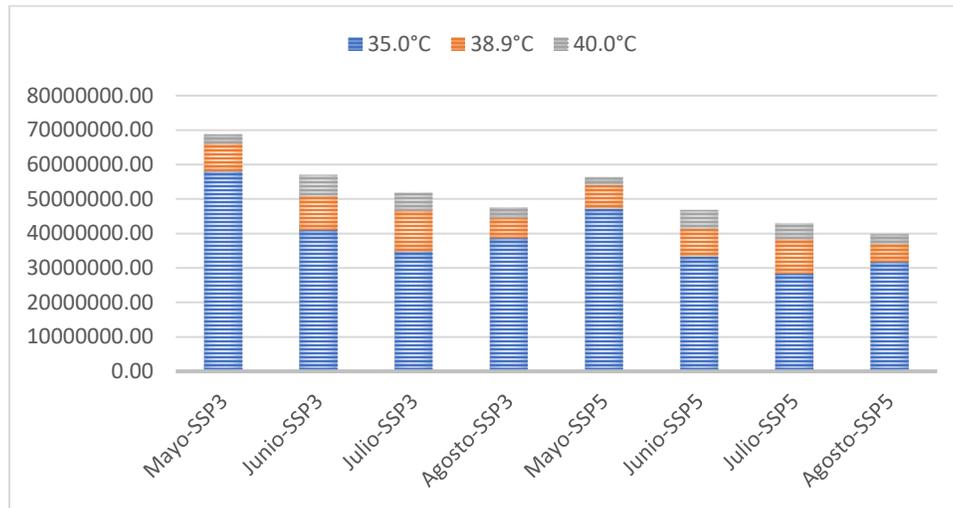
Figura 43. Cambios en la superficie de exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C (anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2030.



Fuente: elaboración propia

Para el 2050, debido, principalmente, al cambio en el horizonte del escenario HADGEMES de cambio climático, el mes de mayo es el que mayor exposición a temperaturas superiores a los 35.0°C muestra. Para la SSP3 la cifra de mayor exposición, la del mes de mayo, ronda los 58,007,512 habitantes urbanos, mientras que para el SSP5 la cifra se encuentra en los 47,172,731 habitantes de las ciudades mexicanas. Para el umbral de los 38.9°C, la SSP3 muestra el mayor nivel de exposición en el mes de junio, con 9,789,831 habitantes, cifra superior al escenario promedio en un 32.0%, mientras que la SSP5 proyecta la mayor exposición en el mes de julio, con 9,967,924 habitantes urbanos expuestos, superando la exposición de su escenario promedio en 41.8% (Figura 44).

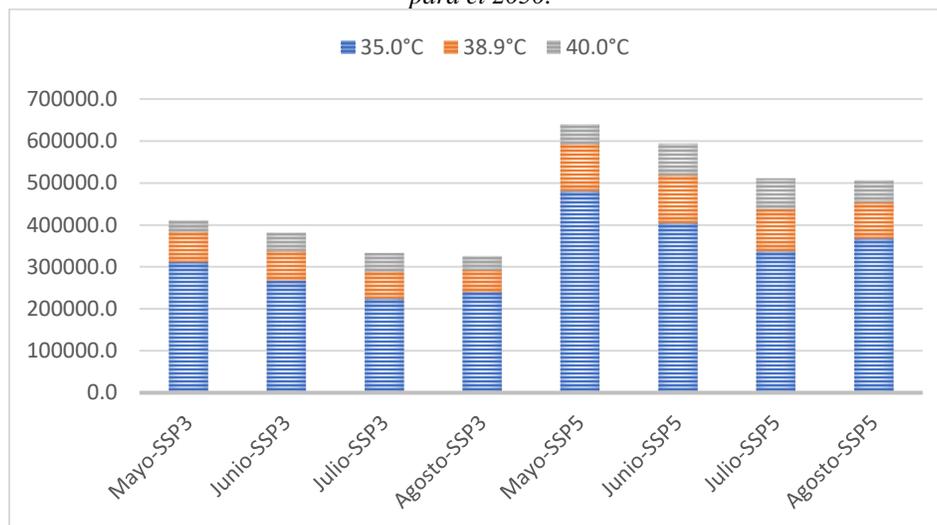
Figura 44. Cambios en la población expuesta a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2050.



Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la superficie de distribución de la exposición a temperaturas máximas superiores a los 35.0°C, tanto la SSP3 como la SSP5 proyecta la máxima distribución en el mes de mayo con 311,821km<sup>2</sup> y 481,076.6km<sup>2</sup> respectivamente. Mientras que para el umbral de 38.9°C, la SSP3 muestra la máxima superficie de exposición en mayo, con 72,986.2km<sup>2</sup>, mientras que las SSP5 proyectan la máxima superficie de exposición en junio con 115,012.6km<sup>2</sup> (Figura 45).

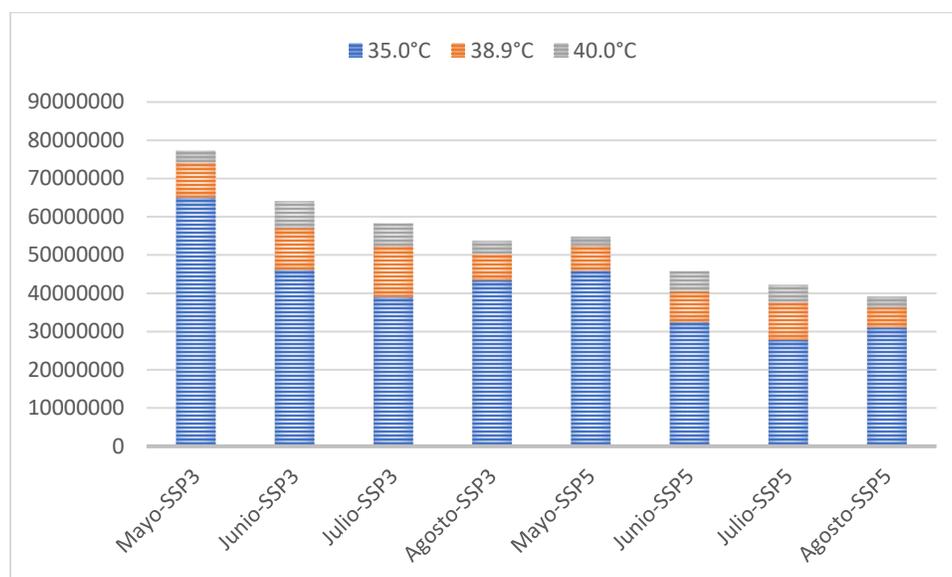
Figura 45. Cambios en la superficie de exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2050.



Fuente: elaboración propia

Para el 2060 y para ambas SSPs, el mes de mayo proyecta la mayor población urbana expuesta a temperaturas superiores a los 35.0°C; 64,979,619 habitantes para la SSP3 y 45,912,217 habitantes para la SSP5. Mientras que, para el umbral de los 38.9°C, la SSP3 proyecta una población expuesta durante el mes de mayo superior en un 50.1% al escenario promedio, cerca de 9,209,841 habitantes urbanos. Por su parte, la SSP5 proyecta 9,764,653 habitantes expuestos para el mes de julio, cifra superior al escenario promedio en 40.6% (Figura 46).

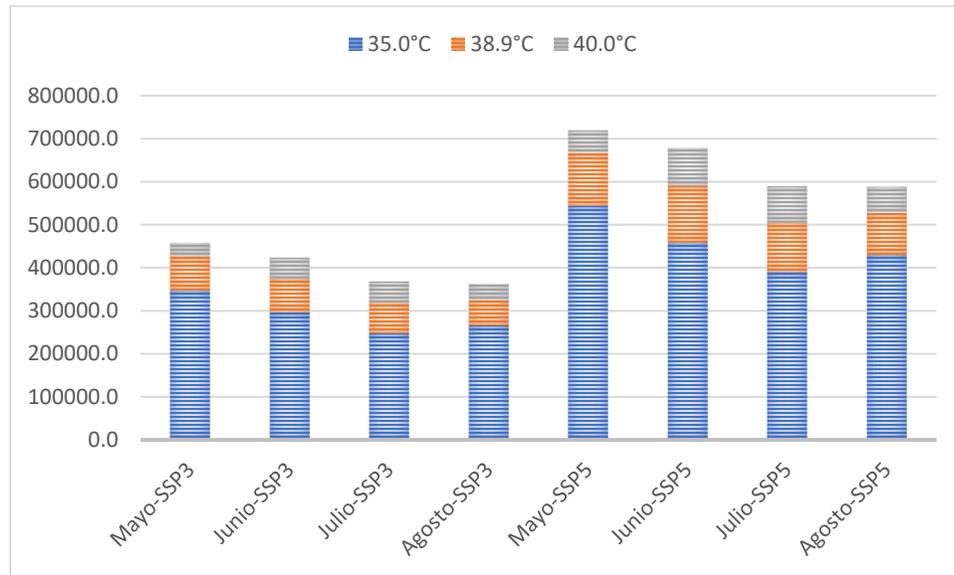
*Figura 46. Cambios en la población expuesta a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2060.*



Fuente: elaboración propia.

La superficie de exposición al umbral de 35.0°C proyectada por la SSP3, para 2060, alcanza su máximo durante el mes de mayo con 347,301.1km<sup>2</sup>, 34.1% superior a la proyección promedio. mientras que, para la misma SSP3, el umbral de temperaturas máximas superiores a los 38.9°C, proyecta una superficie urbana expuesta de 80,151.1km<sup>2</sup>. Para la SSP5, se proyecta una superficie urbana expuesta al umbral de 35.0°C de 544,802.4km<sup>2</sup> durante el mes de mayo, y, para el umbral de 38.9°C, se proyecta una superficie de exposición de 132,725.3km<sup>2</sup>, superior en 20.5% del escenario promedio (Figura 47).

Figura 47. Cambios en la superficie de exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2060.

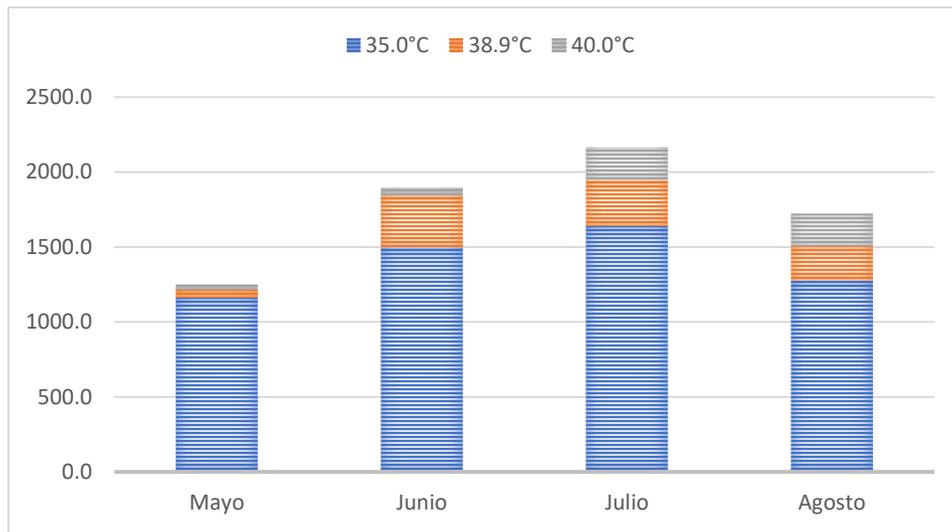


Fuente: elaboración propia

*Anexo 3. El papel de la variabilidad climática como modelador de la exposición a FEAT*

Queda claro que el suelo urbano sufre un proceso de cambio constante, incrementando su superficie y modificando los patrones de distribución de la urbanización desde un punto de vista estructural. Sin embargo, tal cambio, en comparación con la variabilidad de las temperaturas máximas, se da a un ritmo lento. Por ello, el clima y su distribución mensual se vuelve un factor predominante en los cambios en la superficie y distribución de la exposición a los FEAT, lo que hace necesaria la evaluación de las variaciones mensuales de la temperatura máxima dentro del periodo de interés, es decir, la evaluación de la exposición mensual para los meses de mayo, junio, julio y agosto (Figura 48).

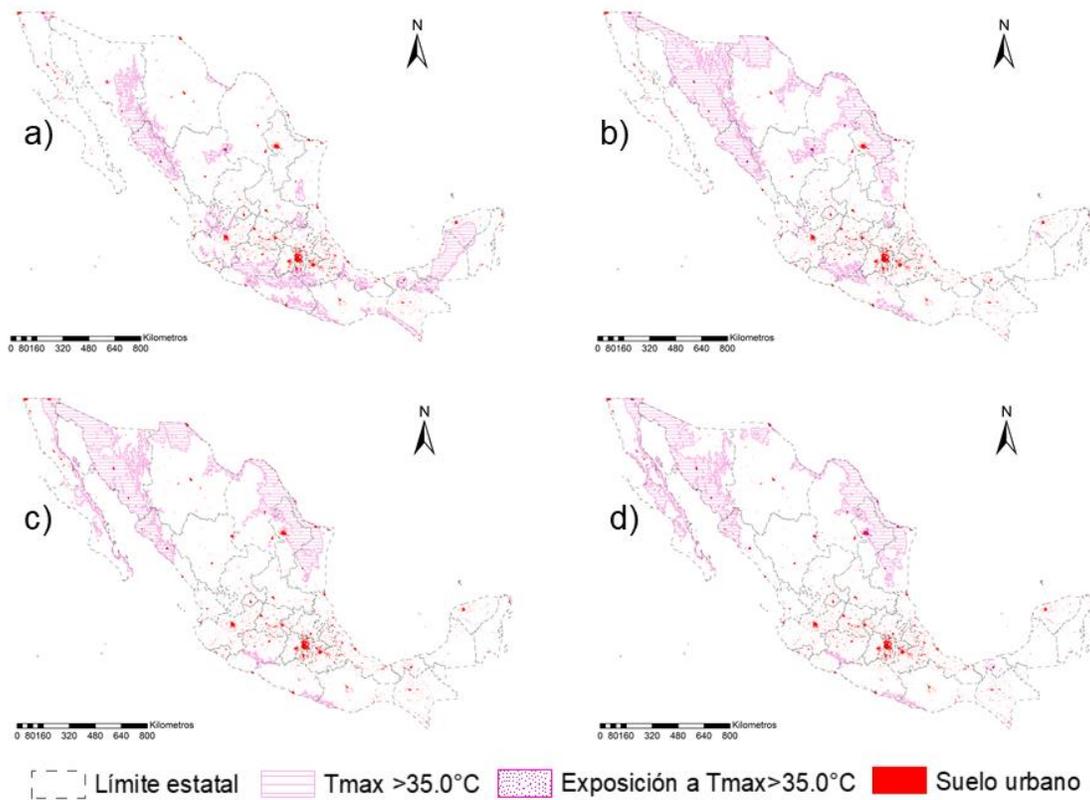
Figura 48. Cambios en la exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C, durante el periodo de evaluación.



Fuente: elaboración propia

En este sentido, para la exposición del grupo de temperaturas máximas que rebasan los 35.0 °C, la superficie de exposición para el mes de mayo alcanza los 1,161.8 km<sup>2</sup>, sufriendo un incremento del 22% para el mes de junio, lo que implica una superficie urbana expuesta de 1,497.3km<sup>2</sup>, alcanzando la mayor superficie de suelo urbano expuesto en el mes de julio con 1,640.0km<sup>2</sup> de exposición, lo que implica un incremento del 29.0% en relación al mes de mayo, en tanto durante el mes de agosto la superficie de suelo urbano expuesto se reduce, alcanzando apenas los 1,276.8 km<sup>2</sup>, es decir, se presenta una reducción de 22.1% con respecto al mes de julio (Mapa 23). Su distribución, durante el mes de mayo, se da principalmente en los estados de Guerrero, Michoacán, Sinaloa y Sonora, mientras que para los meses de junio, julio y agosto su distribución permanece casi constante, abarcando principalmente los estados de Sonora, Sinaloa y Nuevo León.

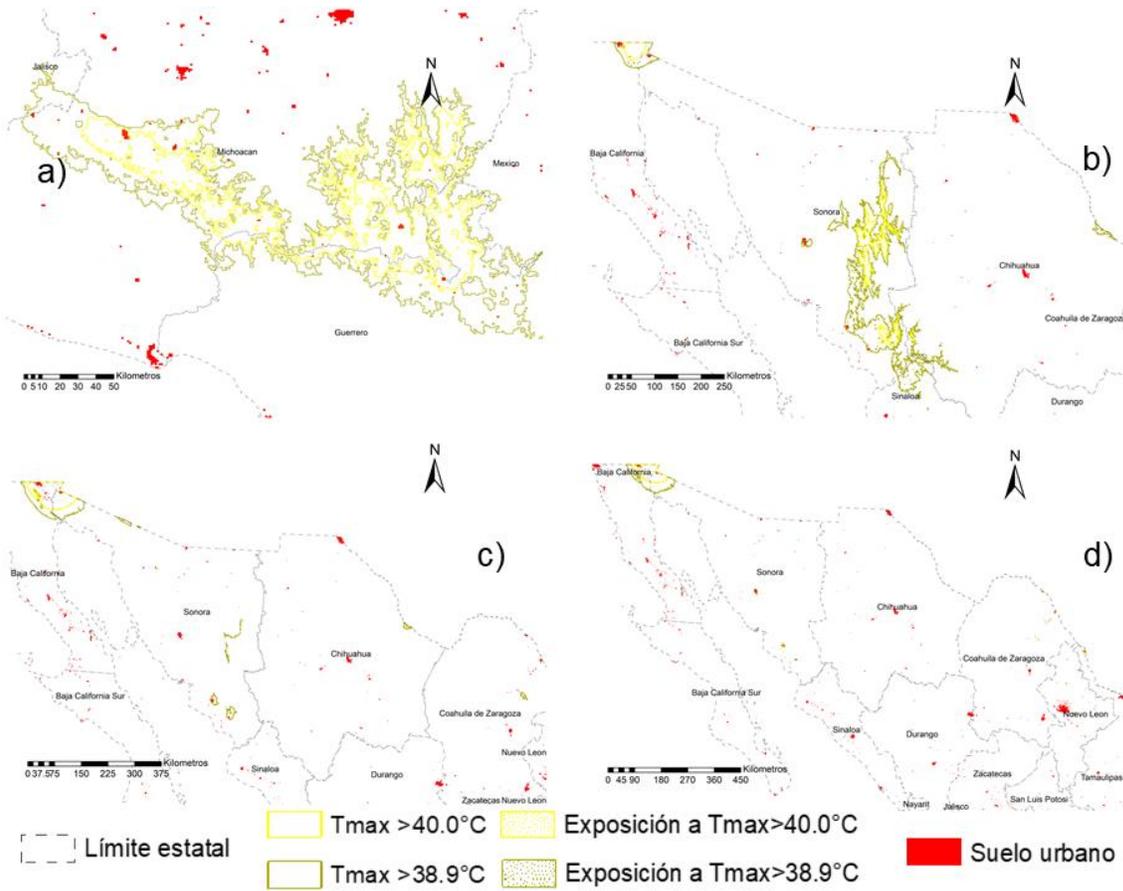
Mapa 23. Distribución de la exposición a temperaturas máximas superiores 35.0°C, para los meses de mayo (a), junio (b), julio (c) y agosto (d).



Fuente: Elaboración propia.

Para el segundo grupo de temperaturas, las que superan los 38.9°C, la superficie de suelo urbano expuesto alcanza los 54.8km<sup>2</sup>, aumentando para el mes de junio a 349.2 km<sup>2</sup>, lo que implica un incremento del 84.3%, en tanto para los meses de julio y agosto tan solo presenta una superficie de exposición de 305.3km<sup>2</sup> y 229.7km<sup>2</sup> respectivamente, haciendo del mes de junio el de mayor importancia en cuanto a la superficie de exposición que alcanza. Estas temperaturas se concentran, durante el mes de mayo, en los estados de Michoacán, Guerrero y Sonora. Mientras que para los meses de junio y julio su distribución se da principalmente en los estados de Sonora, Baja California y Sinaloa, llegando, durante el mes de agosto, a concentrarse solamente en los estados de Sonora y Baja California, específicamente en las municipalidades de San Luis Río Colorado y Mexicali (Mapa 24).

Mapa 24. Distribución de la exposición a temperaturas máximas superiores 38.9°C, para los meses de mayo (a), junio (b), julio (c) y agosto (d).



Fuente: Elaboración propia.

Los datos de la distribución y superficie de exposición de las temperaturas máximas superiores a los dos umbrales de interés, superiores a 35.0°C y a 38.9°C, da una idea clara de la importancia que pueden tener la variabilidad del clima durante este periodo sobre la exposición a los FEAT. Sin embargo, ello apenas es una parte del panorama ya que, considerar la evolución tanto de la superficie de suelo urbano como de las temperaturas máximas bajo la influencia del cambio climático permiten vislumbrar los retos y la importancia que la exposición a FEAT tendrá en un futuro y, además, la consideración de dos formas y patrones de urbanización, bajo la consideración de los supuestos que subyacen a las trayectorias socioeconómicas compartidas de interés (SSP3 y SSP5), permite observar las implicaciones de seguir determinado modelo de desarrollo en nuestras urbes, elementos que serán considerados en las secciones siguientes.

*Anexo 4. Las dinámicas de exposición futura a los FEAT en las ciudades mexicanas; la variabilidad mensual en las temperaturas máximas*

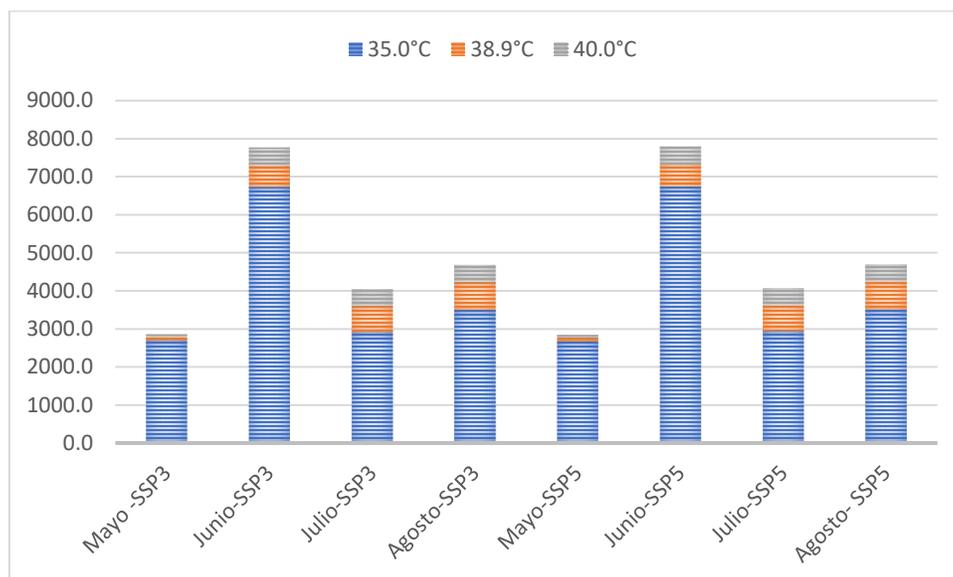
El incremento en la exposición del suelo urbano es producto de dos factores, el crecimiento y cambio en la distribución tanto del suelo urbano como de las temperaturas máximas. En ese sentido, las temperaturas máximas no mantienen un desarrollo constante a lo largo del año, tampoco a lo largo del periodo de interés que va de mayo a agosto, por lo que tal variabilidad produce una exposición diferenciada a los impactos de los eventos extremos de alta temperatura. Debido a ello, es necesario analizar el comportamiento que tiene la exposición a través de las variaciones mensuales de la temperatura máxima, pero sin dejar de considerar la evolución del suelo urbano bajo las trayectorias socioeconómicas compartidas de interés, las SSP3 y SSP5, en los horizontes cercano y medio.

En ese sentido, para el año 2020 las SSP3 muestran una variación intermensual importante, para las temperaturas por encima de los 35°C, es posible observar un incremento para el mes de junio del 59.9% de la superficie expuesta a este grupo de temperaturas en relación a las que se presentan en el mes de mayo, es decir, la superficie de exposición del mes de mayo, cerca de 2,699.7km<sup>2</sup>, se incrementa a 6,733.0km<sup>2</sup> para el mes de junio, siendo este el mes que muestra la mayor superficie de suelo urbano expuesto. Para el mes de julio la superficie de exposición se reduce en un 54.4%, alcanzando los 2,933.0km<sup>2</sup> de suelo urbano y vuelve a incrementarse en agosto en un 16.4%, alcanzando los 3,510.8km<sup>2</sup> de superficie urbana expuesta. Para el mismo grupo de temperaturas, bajo la SSP5, el comportamiento no varía significativamente, se da un incremento importante en la superficie expuesta del mes de mayo al mes de junio, pasando de los 2,683.7km<sup>2</sup> para mayo a los 6,743.9km<sup>2</sup> en junio, sufriendo una reducción del 56.4% en julio e incrementando la superficie de exposición alcanzada en ese mes en un 16.4% para agosto.

En tanto que para las temperaturas superiores a los 38.9°C, es posible observar un incremento del 83.8% en la superficie de exposición de 92.3km<sup>2</sup> que se presenta en mayo a los 570.1km<sup>2</sup> que se alcanzan en junio, manteniendo un incremento constante, aunque mucho más modesto, apenas del 15.8%, para el mes de julio con 677.8km<sup>2</sup>, hasta alcázar los 727.1km<sup>2</sup> para agosto. Por otro lado, la SSP5 pasa de una exposición de 89.1km<sup>2</sup> en mayo a 572.8km<sup>2</sup> en junio,

incrementándose en un 17% en julio y alcanzando los 728.8km<sup>2</sup> en el de agosto, mes en el que alcanza la cifra máxima de exposición (Figura 49).

*Figura 49. Cambios en la exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2020.*



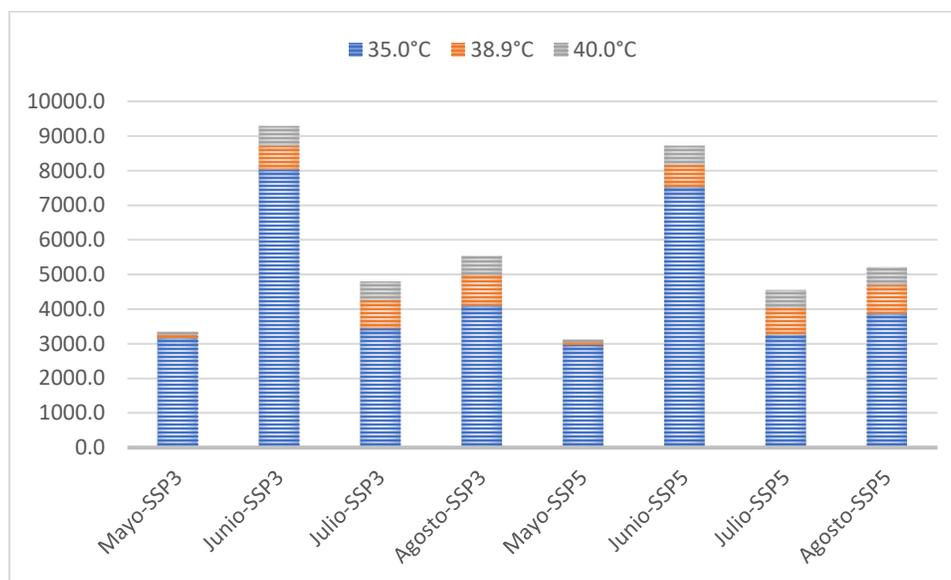
Fuente: elaboración propia

Para las SSP3 en el año 2030, la superficie de exposición a temperaturas máximas a los 35.0°C se sitúa en torno a los 3,174.7 km<sup>2</sup>, aumentando en 60.5% para el mes de junio, alcanzando los 8,038.2km<sup>2</sup>, máxima superficie de exposición para el periodo de evaluación. Para el mes de julio se presenta una reducción del 57.1% respecto al mes anterior y para agosto la superficie de exposición cierra en torno a los 4,105.4km<sup>2</sup>, lo que implica un incremento del 15.9% respecto a julio. En cuanto a las temperaturas del umbral de 38.9°C, se da un incremento sostenido en el periodo de interés, pasando de 99.8km<sup>2</sup>, en mayo, a los 897.0km<sup>2</sup> en agosto (Figura 50).

Para las SSP5, durante el 2030 la superficie de exposición a las temperaturas por encima del umbral de los 35.0°C parte, en el mes de mayo, de una superficie de exposición de 2,971.8km<sup>2</sup>, alcanzando su mayor nivel de exposición en junio, con 7,529.1km<sup>2</sup>, y reduciendo un 56.6% para el mes de julio, cerrando en agosto con 3,876.0km<sup>2</sup> de superficie se suelo urbano expuesto. Dentro de la misma trayectoria, la superficie urbana que se encuentra

expuesta a temperaturas máximas por encima de los 38.9°C alcanza en mayo un área de 91.3km<sup>2</sup> y mantiene un crecimiento sostenido hasta el mes de agosto donde se observa una superficie de suelo urbano expuesto de 897.0km<sup>2</sup>, de los cuales el 60.5% está expuesto a temperaturas por encima de los 40.0°C (Figura 50).

*Figura 50. Cambios en la exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2030*



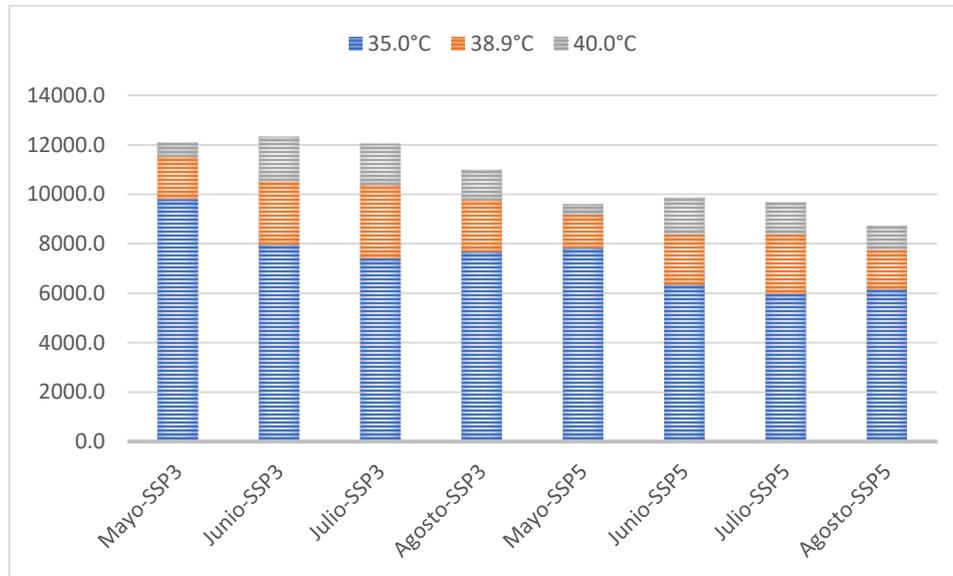
. Fuente: elaboración propia

Para el 2050, las SSP3 muestran durante mayo un incremento en la superficie expuesta a temperaturas por encima de los 35.0°C, con respecto a los periodos anteriores, se observa un máximo de superficie expuesta con 9,802.2km<sup>2</sup>, superficie que se reduce en los meses de junio y julio, alcanzando los 7,417.5km<sup>2</sup> para ese último mes, y se incrementa en un 3.4% para el mes de agosto, llegando a los 7,678.9km<sup>2</sup>. El comportamiento de la superficie de exposición para las temperaturas máximas superiores a los 38.9°C es distinto, se presenta un incremento de la temperatura del mes de mayo a julio del 58.2%, donde alcanza un máximo de exposición de 2,969.3km<sup>2</sup>, y presenta un descenso para el mes de agosto de 29.7% (Figura 51).

En el caso de las SSP5, para el umbral de 35.0°C, la superficie urbana expuesta presenta un máximo en mayo, con 7,843.0km<sup>2</sup> de suelo urbano expuesto, reduciendo hasta en un 76.3% para el mes de junio y recuperando un 3.4% en agosto, cerrando con una superficie de

exposición de 6,170.6km<sup>2</sup>. El caso de la exposición a temperaturas superiores a los 38.9°C es distinto, se presenta un crecimiento sostenido de mayo a julio, pasando de los 1,338.8km<sup>2</sup> a 2,393.8km<sup>2</sup>, para después descender en 33.1% en agosto, alcanzando los 1,600.6km<sup>2</sup> (Figura 51).

*Figura 51. Cambios en la exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C (anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2050.*



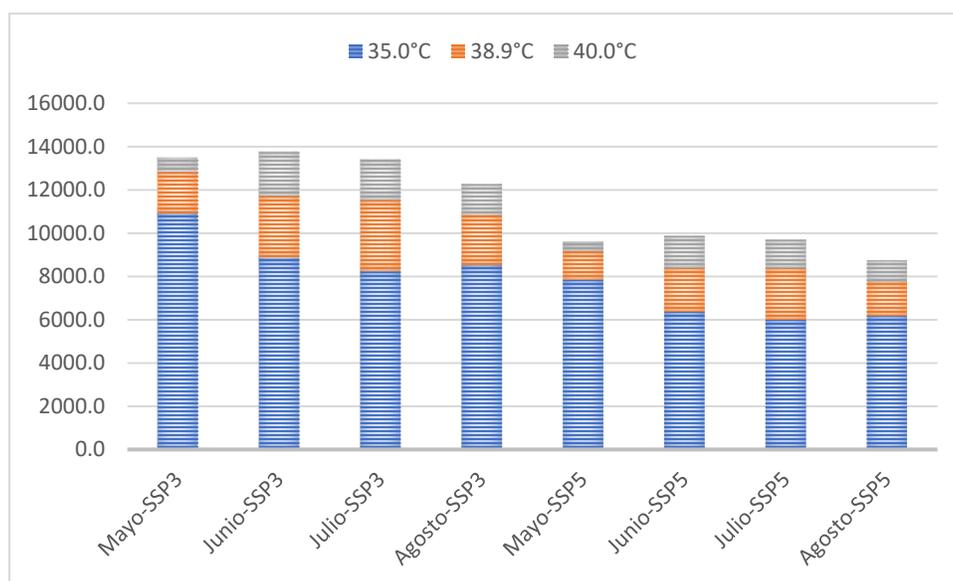
Fuente: elaboración propia

Por último, para el periodo de 2060 y un umbral de temperaturas máximas de 35.0°C, las SSP3 muestran una superficie de 10,900.1km<sup>2</sup> para el mes de mayo, la cual se reduce en un 18.7% y un 7.2% para el mes de junio y julio respectivamente, volviendo a incrementarse en agosto en un 3.0% alcanzando los 6,176.6km<sup>2</sup>. En cuanto a las temperaturas máximas por encima del umbral de 38.9°C, la superficie de exposición más baja se presenta en el mes de mayo, con 1,932.8km<sup>2</sup>, mientras que la mayor la muestra el mes de julio con 3,307.8km<sup>2</sup>, de los cuales el 56.3% se encuentra expuesto a temperaturas por encima de los 40.0°C, superficie que se reduce durante agosto en un 29.2% (Figura 52).

Para las SSP5, la superficie máxima de exposición a las temperaturas por encima de los 35.0°C se alcanza durante mayo, con 7,851.4km<sup>2</sup>, mes a partir del cual se presenta una reducción sostenida durante los meses de junio y julio, alcanzando, en ese último mes, los 5,992.7km<sup>2</sup>, los cuales se incrementan en un 3.0% durante el mes de agosto, llegando a una

superficie de 6,176.8km<sup>2</sup>. En cuanto a la superficie expuesta a las temperaturas que se encuentran por encima de los 38.9°C, la superficie para el mes de mayo alcanza los 1,340.3km<sup>2</sup>, incrementando a 2,038.2km<sup>2</sup> y 2,397.1km<sup>2</sup> para los meses de junio y julio, reduciendo, con respecto a ese último mes, en un 33.1% para el mes de agosto, donde alcanza apenas una superficie de 1,604.0km<sup>2</sup> (Figura 52).

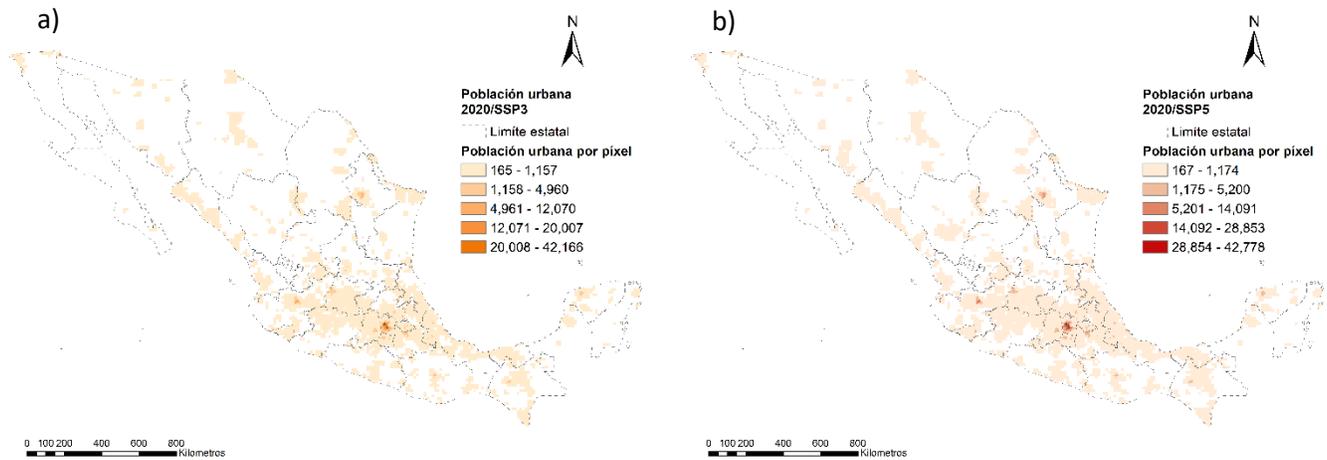
Figura 52. Cambios en la exposición a temperaturas máximas superiores a los 35°C (azul), 38.9°C(anaranjado) y 40°C (gris), durante el periodo de evaluación (Mayo-Agosto) para las SSP3 y SSP5 para el 2060.



Fuente: elaboración propia

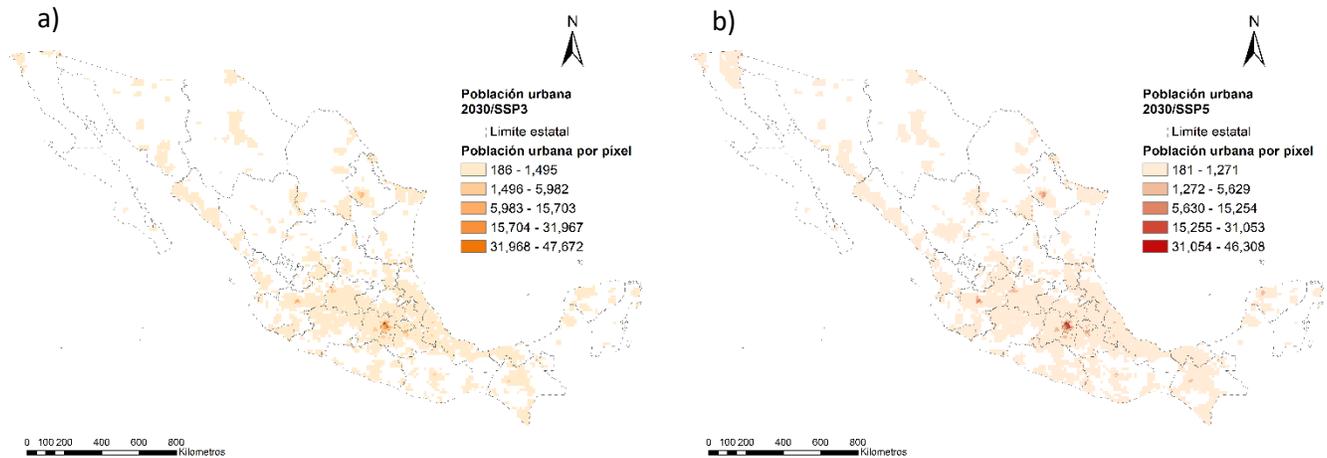
Derivado de los datos anteriores, queda claro que las variaciones de temperatura intermensuales modifican los patrones de exposición, dejando en segundo término, en ese aspecto, a la evolución de la urbanización. Para todos y cada uno de los escenarios la variabilidad espacial de las temperaturas máximas juega un papel de gran relevancia en la determinación de la ubicación de la exposición. El ritmo de crecimiento del suelo urbano, especialmente para las SSP3, es de gran relevancia en cuanto a la determinación de la superficie expuesta, sin embargo, la localización de nuevas áreas de exposición, es decir, la redistribución de los patrones de exposición a los FEAT está impulsada principalmente por las condiciones climáticas.

Anexo I. Distribución de la población para el año 2020, bajo dos trayectorias de urbanización; SSP3 (a) y SSP5 (b).



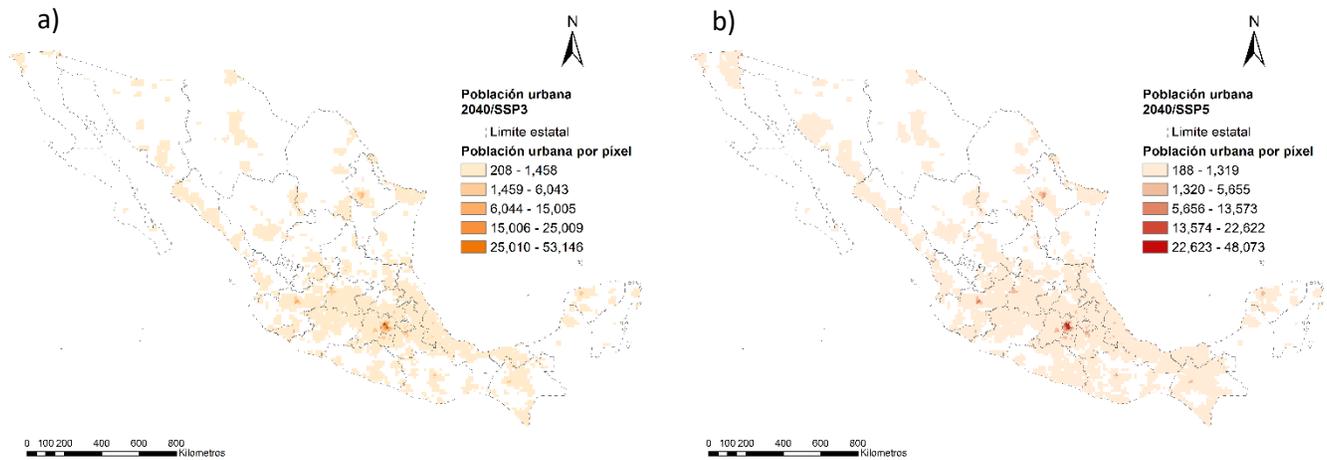
Fuente: Elaboración propia con datos de Jones & O'Neill (2016) y Gao et al. (2017)

Anexo II. Distribución de la población para el año 2030, bajo dos trayectorias de urbanización; SSP3 (a) y SSP5 (b).



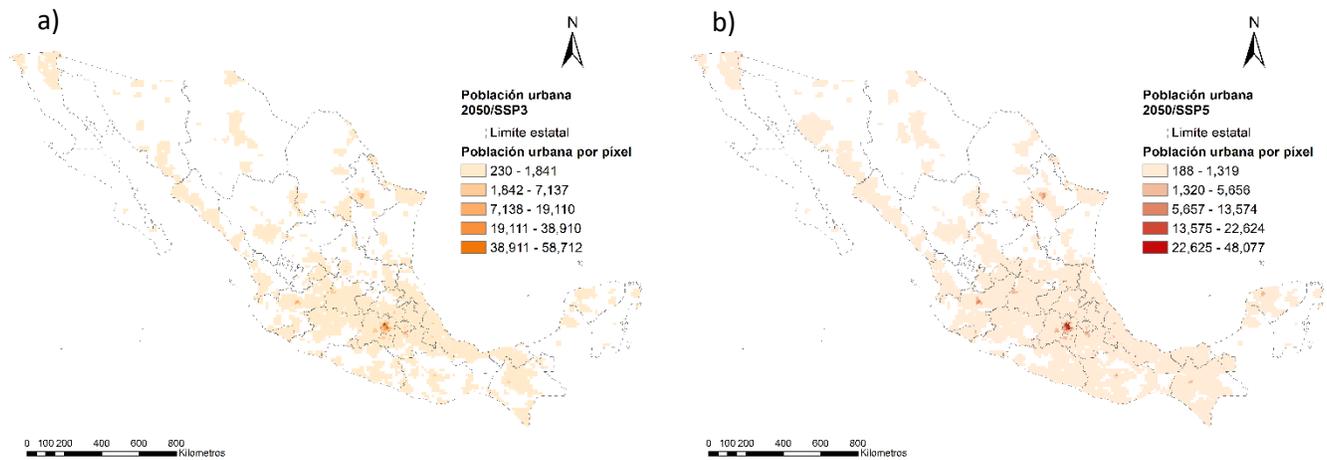
Fuente: Elaboración propia con datos de Jones & O'Neill (2016) y Gao et al. (2017)

Anexo III. Distribución de la población para el año 2040, bajo dos trayectorias de urbanización; SSP3 (a) y SSP5 (b).



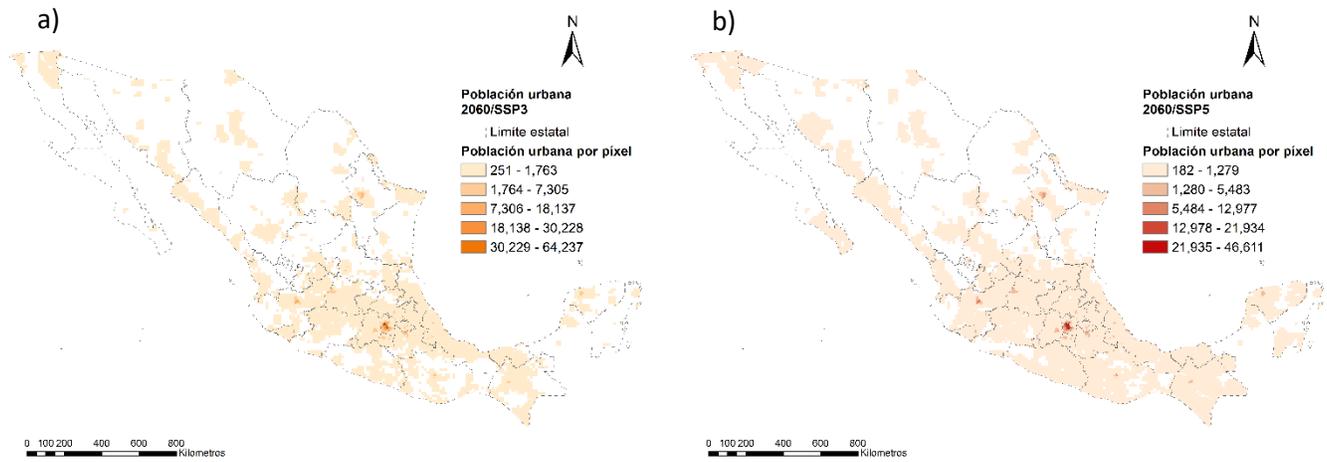
Fuente: Elaboración propia con datos de Jones & O'Neill (2016) y Gao et al. (2017).

Anexo IV. Distribución de la población para el año 2050, bajo dos trayectorias de urbanización; SSP3 (a) y SSP5 (b).



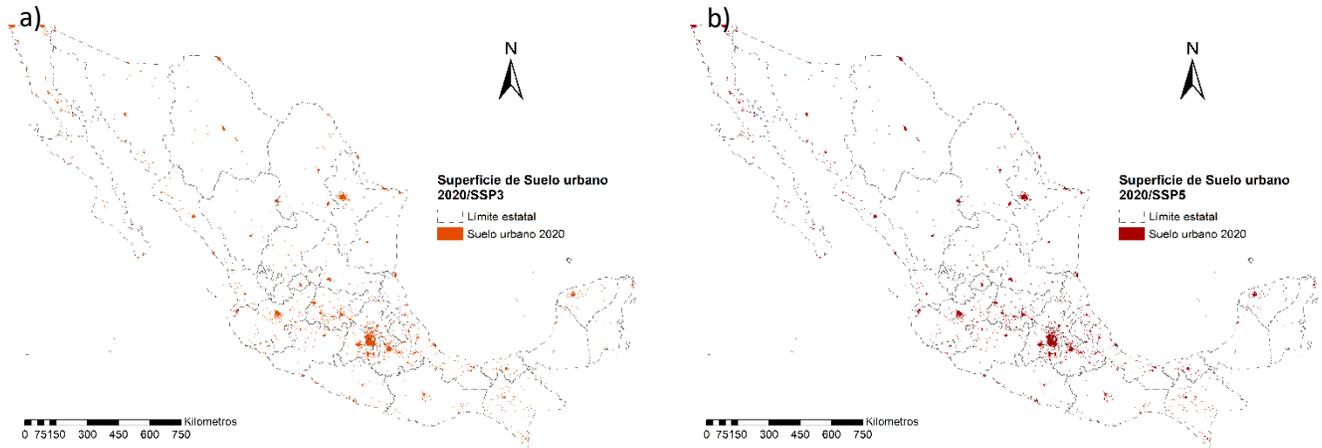
Fuente: Elaboración propia con datos de Jones & O'Neill (2016) y Gao et al. (2017).

Anexo V. Distribución de la población para el año 2060, bajo dos trayectorias de urbanización; SSP3 (a) y SSP5 (b).



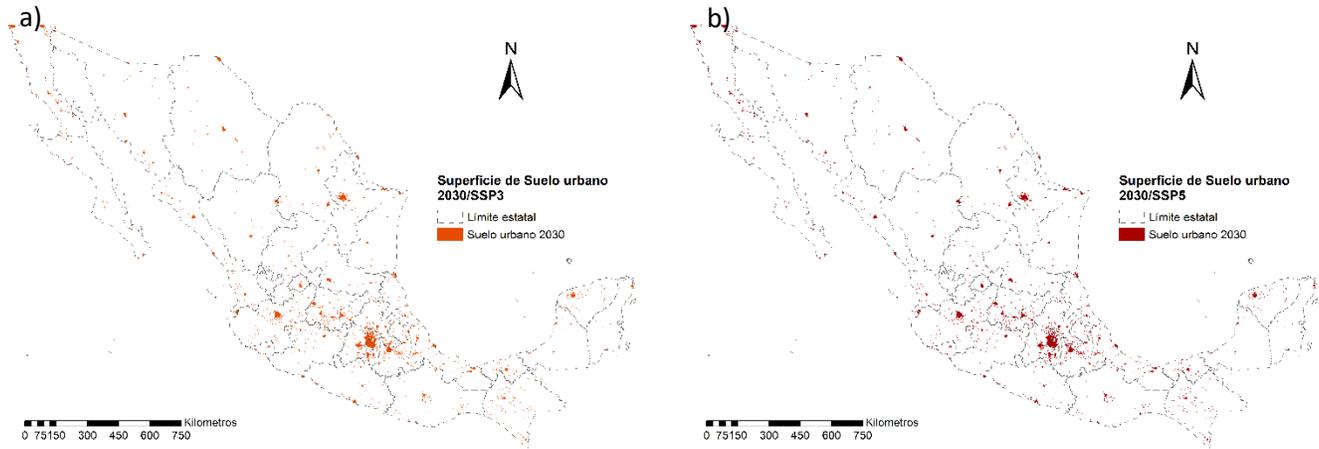
Fuente: Elaboración propia con datos de Jones & O'Neill (2016) y Gao et al. (2017).

Anexo VI. Distribución del suelo urbano para el año 2020, bajo dos trayectorias de urbanización; SSP3 (a) y SSP5 (b).



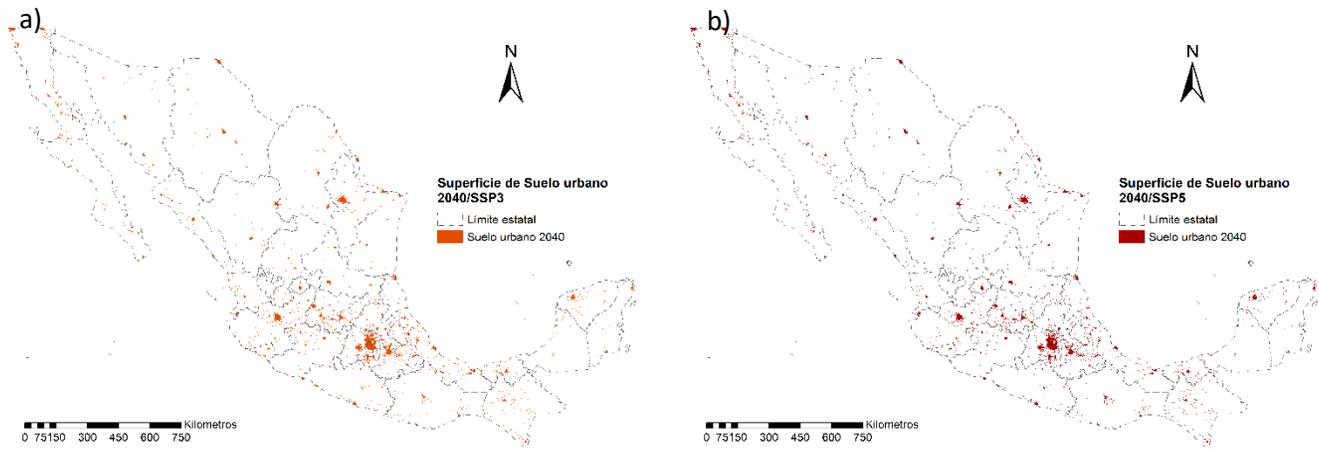
Fuente: Elaboración propia con datos de G. Chet et al (2020).

Anexo VII. Distribución del suelo urbano para el año 2030, bajo dos trayectorias de urbanización; SSP3 (a) y SSP5 (b).



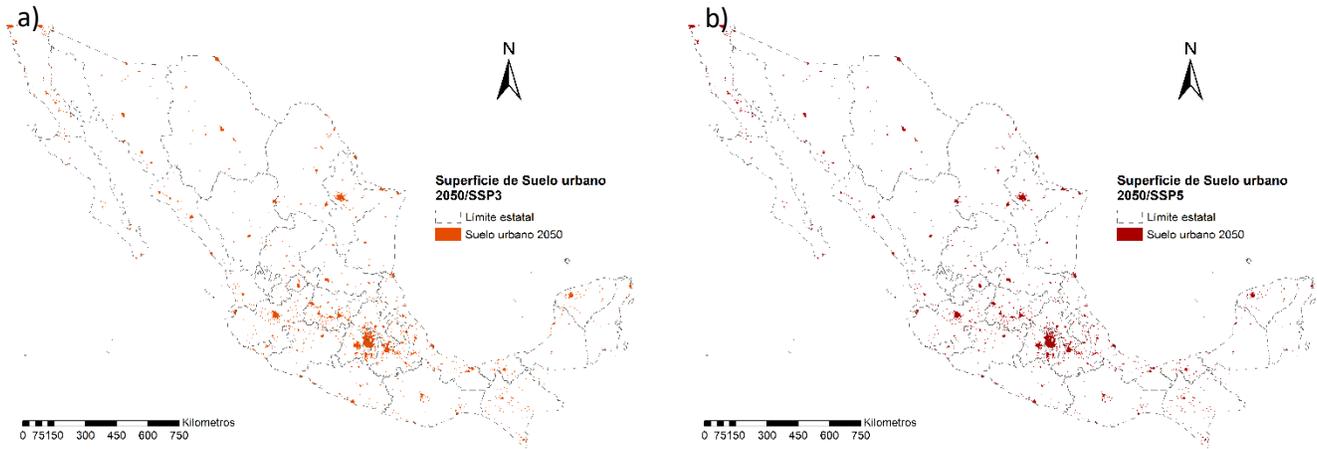
Fuente: Elaboración propia con datos de G. Chet et al (2020).

Anexo VIII. Distribución del suelo urbano para el año 2040, bajo dos trayectorias de urbanización; SSP3 (a) y SSP5 (b).



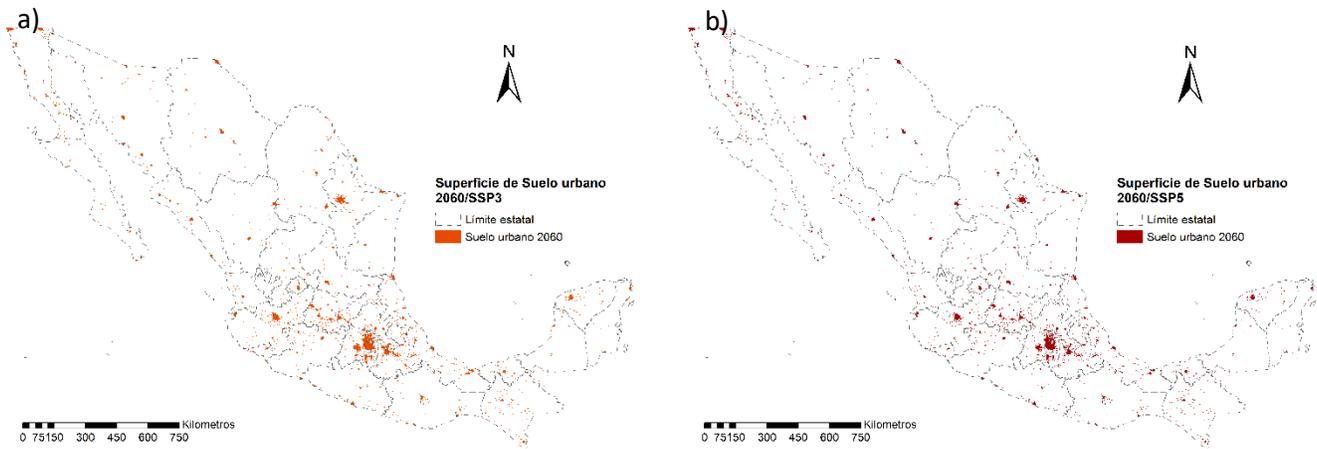
Fuente: Elaboración propia con datos de G. Chet et al (2020).

Anexo IX. Distribución del suelo urbano para el año 2050, bajo dos trayectorias de urbanización; SSP3 (a) y SSP5 (b).



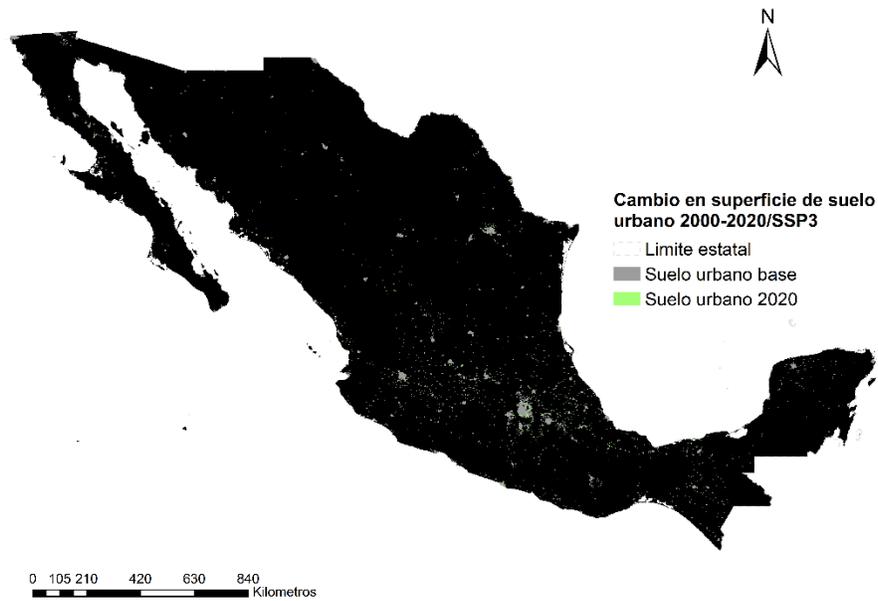
Fuente: Elaboración propia con datos de G. Chet et al (2020).

Anexo X. Distribución del suelo urbano para el año 2060, bajo dos trayectorias de urbanización; SSP3 (a) y SSP5 (b).



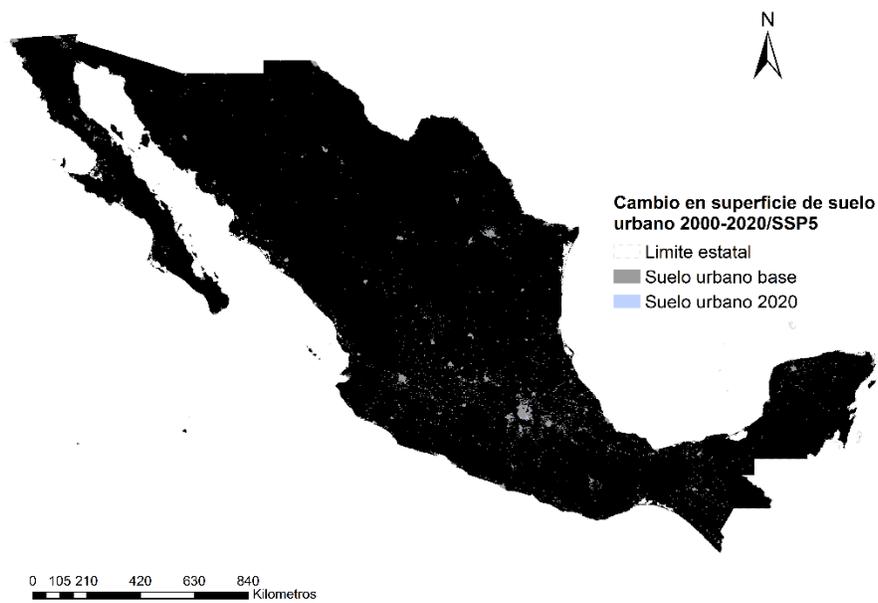
Fuente: Elaboración propia con datos de Chen et al (2020).

*Anexo XI. Cambio en la distribución del suelo urbano para el año 2020, bajo los supuestos de urbanización de la SSP3*



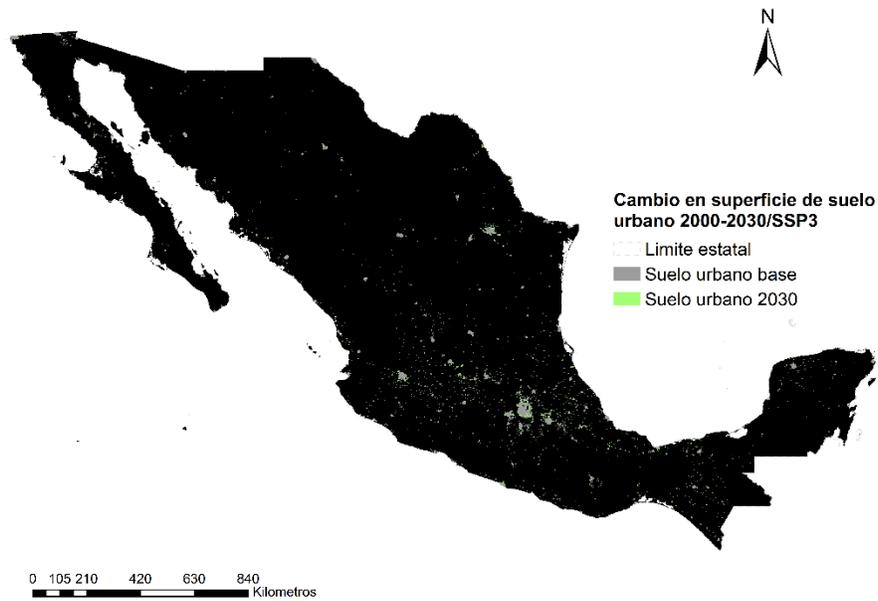
Fuente: Elaboración propia con datos de Chen et al (2020).

*Anexo XII. Cambio en la distribución del suelo urbano para el año 2020, bajo los supuestos de urbanización de la SSP5*



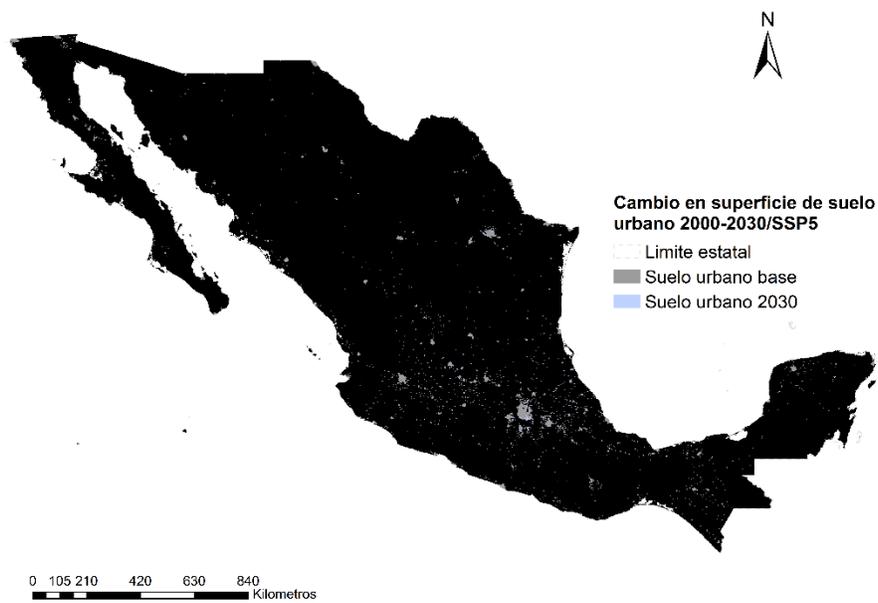
Fuente: Elaboración propia con datos de Chen et al (2020).

Anexo XIII. Cambio en la distribución del suelo urbano para el año 2030, bajo los supuestos de urbanización de la SSP3



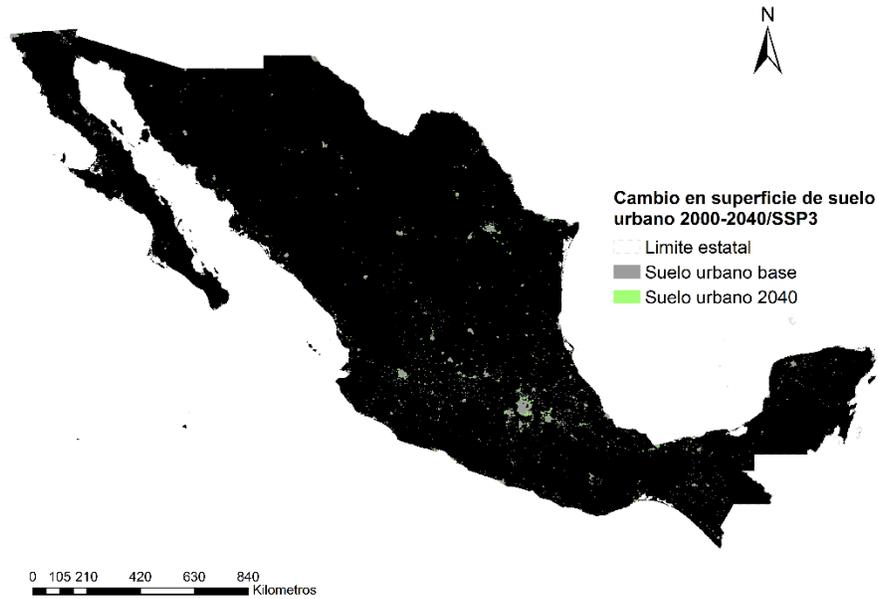
Fuente: Elaboración propia con datos de Chen et al (2020).

Anexo XIV. Cambio en la distribución del suelo urbano para el año 2030, bajo los supuestos de urbanización de la SSP5



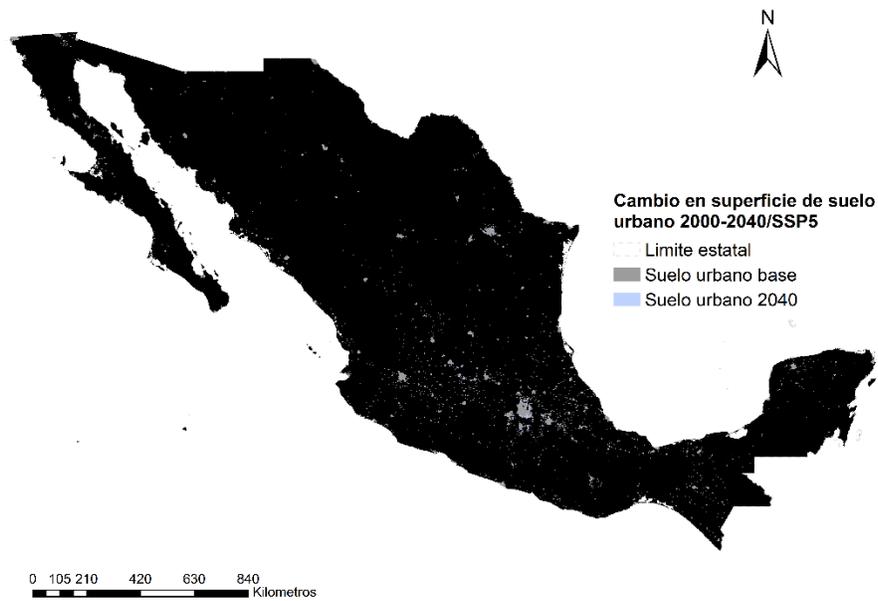
Fuente: Elaboración propia con datos de Chen et al (2020).

Anexo XV. Cambio en la distribución del suelo urbano para el año 2040, bajo los supuestos de urbanización de la SSP3



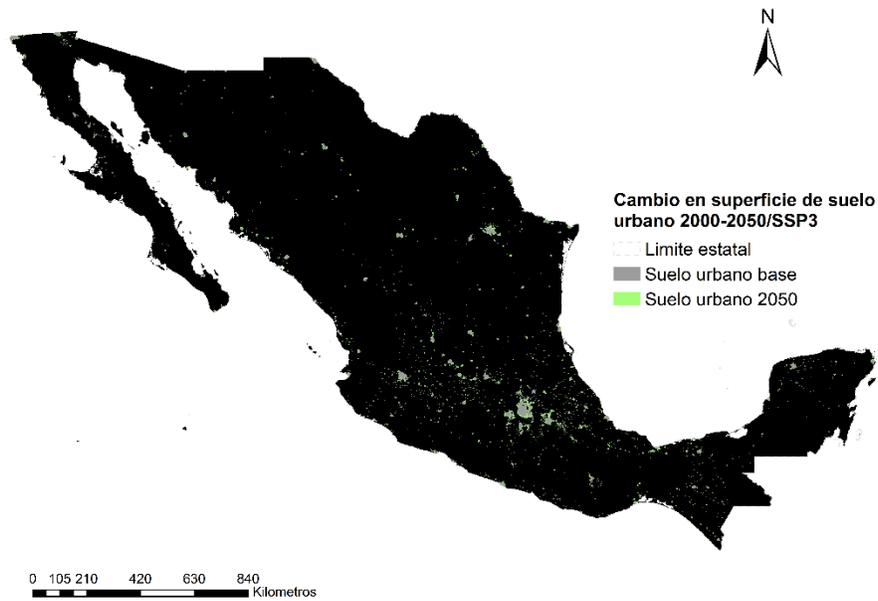
Fuente: Elaboración propia con datos de Chen et al (2020).

Anexo XVI. Cambio en la distribución del suelo urbano para el año 2040, bajo los supuestos de urbanización de la SSP5



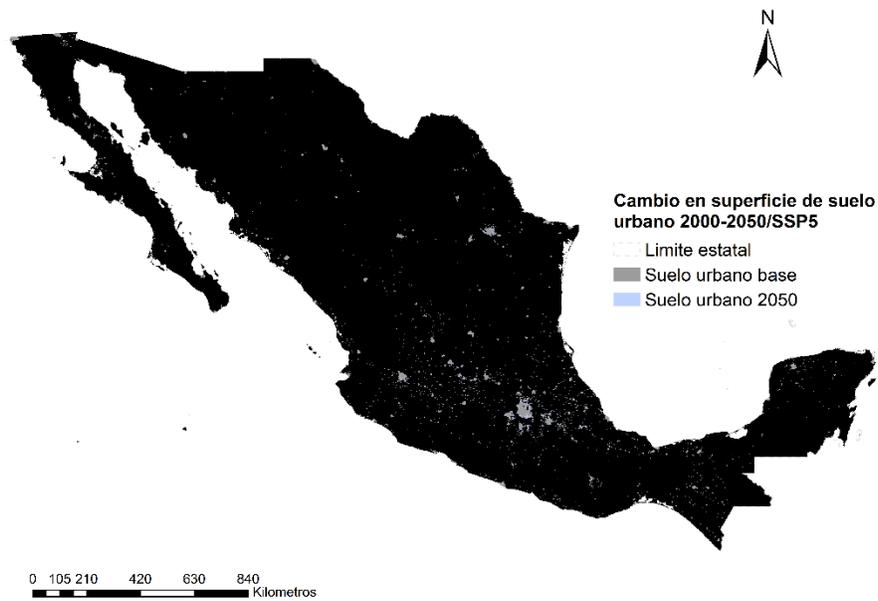
Fuente: Elaboración propia con datos de Chen et al (2020).

Anexo XVII. Cambio en la distribución del suelo urbano para el año 2050, bajo los supuestos de urbanización de la SSP3



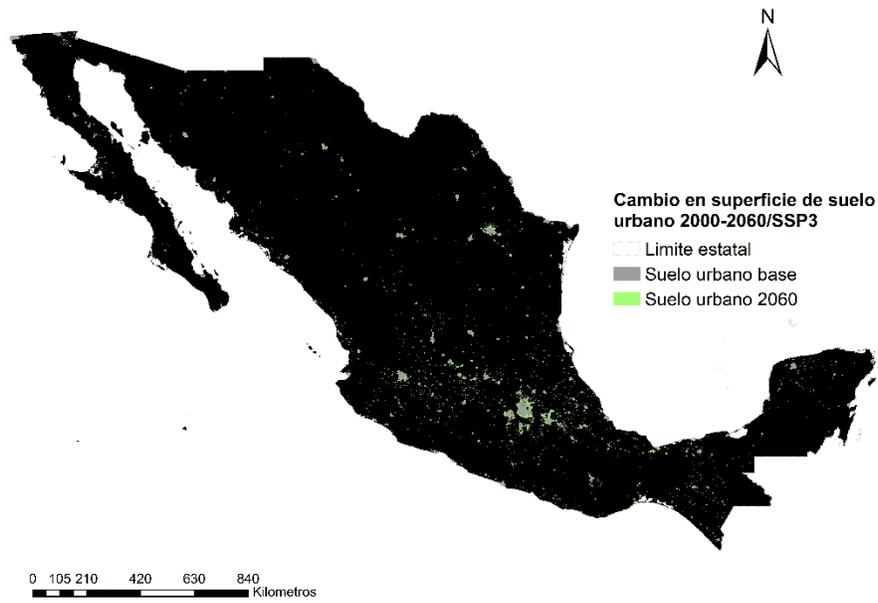
Fuente: Elaboración propia con datos de Chen et al (2020).

Anexo XVIII. Cambio en la distribución del suelo urbano para el año 2050, bajo los supuestos de urbanización de la SSP5



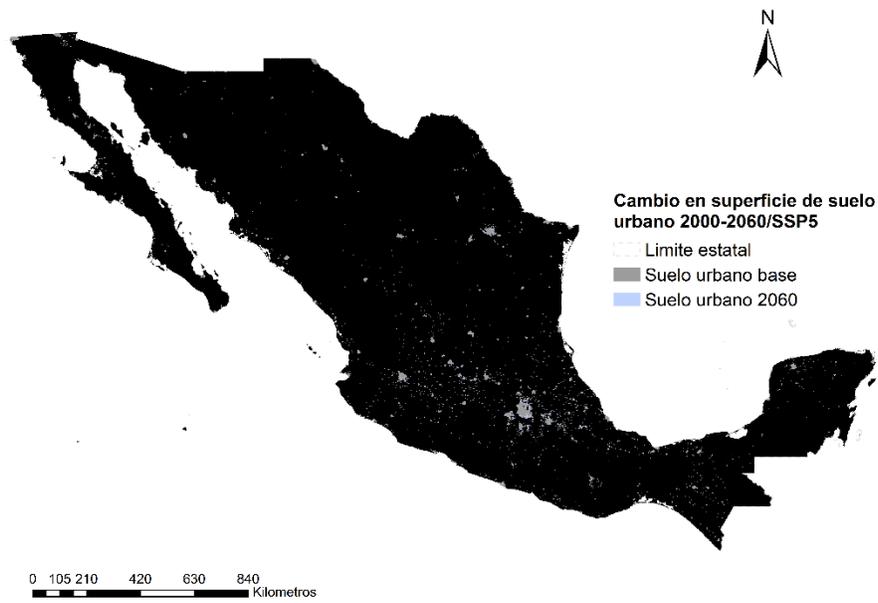
Fuente: Elaboración propia con datos de Chen et al (2020).

Anexo XIX. Cambio en la distribución del suelo urbano para el año 2060, bajo los supuestos de urbanización de la SSP3



Fuente: Elaboración propia con datos de Chen et al (2020).

Anexo XX. Cambio en la distribución del suelo urbano para el año 2060, bajo los supuestos de urbanización de la SSP5



Fuente: Elaboración propia con datos de Chen et al (2020).