

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA
CENTRO DE INVESTIGACIONES SOCIOECONÓMICAS**

TESIS

TESIS
2016

EIMMY DAYANNE LARA DÍAZ

**“USO DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y CLIMA URBANO
EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY”**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA

CENTRO DE INVESTIGACIONES SOCIOECONÓMICAS

MAESTRÍA EN ECONOMÍA REGIONAL

TESIS

**USO DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y CLIMA URBANO EN LA ZONA
METROPOLITANA DE MONTERREY**

que se presenta como requisito parcial para obtener
el grado de Maestro en Economía Regional

EIMMY DAYANNE LARA DÍAZ

Comité Evaluador:

Dr. Nicholas P. Sisto (Director)

Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco (Co-director)

Dr. Erick R. Bandala González (Lector)

Saltillo, Coahuila.

Agosto de 2016

RESUMEN

En esta investigación se explora la relación entre el uso de energía eléctrica y el clima urbano en la zona metropolitana de Monterrey (ZMM). Primero, se efectúa un análisis de los determinantes del uso de electricidad en la ZMM entre 1993 y 2013, considerando como proxy del uso de electricidad el Índice de Producción Estatal de Electricidad (IEME). Se tiene en cuenta como factores explicativos, la población, las viviendas y el Índice de Producción Manufacturera (IPM), y como variables climáticas: temperaturas diarias máximas, mínimas, promedio; número de días por mes con temperatura extrema (igual o mayor a 38°C); y, número de olas de calor por mes (tres días consecutivos o más con temperatura extrema). De este análisis se concluye que las variables climáticas ejercen una influencia importante sobre el uso de energía eléctrica en la ZMM. Segundo, se realiza un análisis histórico de las variables climáticas ya mencionadas, para la ZMM y para dos zonas rurales cercanas, entre diciembre de 1953 y diciembre de 2013. Se determina la existencia de una isla de calor urbana (ICU) en la ZMM, en promedio estimada en 1.02°C y se establece que ésta ha ejercido una presión adicional sobre el uso de electricidad del 1.5% entre 1993 y 2013. Del análisis histórico de las zonas rurales, se pueden observar manifestaciones heterogéneas del proceso de calentamiento global que parecen relacionarse con las diferencias geográficas entre las dos zonas (elevación sobre el nivel del mar y distancia al mar). Finalmente, se realizan recomendaciones de política pública, enfocadas a los elementos de diseño urbano que pudieran reducir el efecto ICU en la ZMM y así limitar el costo del sobreuso de energía eléctrica.

Palabras clave:

Energía eléctrica, Clima urbano, Temperaturas, Isla de Calor, Zona Metropolitana de Monterrey.

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
Problema de Investigación.....	2
Preguntas de investigación	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos.....	2
1. REVISIÓN DE LITERATURA	3
1.1. Uso de energía eléctrica.....	3
1.2. CLIMATOLOGÍA URBANA.....	8
En el ámbito internacional.....	8
En México	11
2. USO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA ZMM, 1993-2013.....	13
2.1. DATOS EMPLEADOS Y RESULTADOS PRELIMINARES	13
2.1.1. Uso de energía eléctrica.....	13
2.1.2. Producción manufacturera	17
2.1.3. Población y Viviendas	19
2.1.4. Temperatura.....	19
2.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN.....	26
3. ANÁLISIS HISTÓRICO DE LAS TEMPERATURAS LA ZMM Y ÁREAS RURALES CERCANAS.....	30
3.1. DATOS EMPLEADOS.....	30
3.2. Observaciones por décadas.....	30
Temperaturas mínimas	31
Temperaturas máximas.....	36
Temperaturas promedio.....	41
Días extremadamente calurosos	46
Olas de calor	47
4. ANÁLISIS DE LA ISLA DE CALOR EN LA ZMM	51
4.1. Diferencial temperaturas mínimas.....	51
Área urbana de Monterrey-Área rural El Cuchillo.....	51
Área urbana de Monterrey-Área rural La Rinconada.....	53
Área rural El Cuchillo-Área rural La Rinconada.....	54
4.2. Diferencial temperaturas máximas	56

Área urbana de Monterrey-Área rural El Cuchillo.....	56
Área urbana de Monterrey-Área rural La Rinconada.....	58
Área rural El Cuchillo-Área rural La Rinconada.....	59
4.3. Diferencial temperatura promedio.....	61
Área urbana de Monterrey-Área rural El Cuchillo.....	61
Área urbana de Monterrey-Área rural La Rinconada.....	62
Área rural El Cuchillo-Área rural La Rinconada.....	64
5. ANÁLISIS DE TENDENCIAS	66
5.1. Diferenciales temperaturas mínimas	66
Área urbana de Monterrey-Área rural El Cuchillo.....	66
Área urbana de Monterrey- Área rural La Rinconada.....	67
Área rural El Cuchillo- Área rural La Rinconada.....	67
5.2. Diferenciales temperaturas máximas.....	68
Área urbana de Monterrey-Área rural El Cuchillo.....	68
Área urbana de Monterrey- Área rural La Rinconada.....	69
Área rural El Cuchillo- Área rural La Rinconada.....	70
5.3. Diferencial temperaturas promedio	71
Área urbana de Monterrey-Área rural El Cuchillo.....	71
Área urbana de Monterrey-Área rural La Rinconada.....	72
Área rural El Cuchillo-Área rural La Rinconada.....	73
6. ISLA DE CALOR	75
6.1. Efecto de la isla de calor sobre el uso de energía eléctrica.....	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE POLÍTICA	79
7. BIBLIOGRAFÍA	81

Índice de Tablas

Tabla 1 Unidades económicas y Población. Nuevo León, ZMM y Resto del Estado.....	13
Tabla 2 Valor máximo y mínimo y mes por año. IEME Nuevo León. 1993-2013.....	16
Tabla 3 Matriz de correlaciones	26
Tabla 4 Tabla de regresiones log-log. Variable dependiente: logaritmo natural del Índice Estatal Mensual de la Electricidad, 1993-2013. N=252.	29
Tabla 5 Definición de décadas para las tres estaciones climáticas.....	31
Tabla 6 Resumen hallazgos temperaturas mínimas, máximas y promedio.....	45
Tabla 7 Crecimiento de la Población, superficie urbana y viviendas particulares. 1950-2010	76
Tabla 8 Isla de Calor en el área urbana de Monterrey. Temperaturas mínimas, máximas y promedio.....	77

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Ubicación estaciones meteorológicas: El Cuchillo – 19016, Monterrey - 19052, 19054 La Rinconada.....	31
Ilustración 2 Crecimiento del área urbana de Monterrey 1950-2010.....	75

Índice de Gráficos

Gráfico 1 Indicador Mensual de la electricidad para Nuevo León. 1993- 2013	15
Gráfico 2 Índice de Variación estacional mensual. 1993-2013.....	17
Gráfico 3 Indicador Mensual de producción manufacturera Nuevo León 1993-2013.....	19
Gráfico 4 Diagrama de caja y bigotes. Temperatura máxima mensual. Nuevo León 1993-2013	21
Gráfico 5 Diagrama de caja y bigotes. Temperatura mínima mensual. Nuevo León 1993-2013	21
Gráfico 6 Diagrama de caja y bigotes. Temperatura promedio mensual. Nuevo León 1993-2013	22
Gráfico 7 Índice Estatal Mensual de la Electricidad y Temperatura promedio máxima mensual. Nuevo León. 1993-2013.....	23
Gráfico 8 Índice Estatal Mensual de la Electricidad y Número de días por mes con temperatura extrema. Nuevo León.1993-2013	24
Gráfico 9 Índice Estatal Mensual de la Electricidad y número días consecutivos con temperatura extrema. Nuevo León. 1993-2013	25
Gráfico 10 Área urbana de Monterrey. Distribución de frecuencias de temperaturas mínimas registradas por década.....	32
Gráfico 11 Área urbana de Monterrey. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas mínimas registradas por década.	33
Gráfico 12 Área rural El Cuchillo. Distribución de frecuencias de temperaturas mínimas registradas por década	34

Gráfico 13 Área rural El Cuchillo. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas mínimas registradas por década	34
Gráfico 14 Área rural La Rinconada. Distribución de frecuencias de temperaturas mínimas registradas por década	35
Gráfico 15 Área rural La Rinconada. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas mínimas registradas por década	36
Gráfico 16 Área urbana de Monterrey. Distribución de frecuencias de temperaturas máximas registradas por década.	37
Gráfico 17 Área urbana de Monterrey. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas máximas registradas por década.....	37
Gráfico 18 Área rural El Cuchillo. Distribución de frecuencias de temperaturas máximas registradas por década.	38
Gráfico 19 Área rural El Cuchillo. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas máximas registradas por década.	39
Gráfico 20 Área rural La Rinconada. Distribución de frecuencias de temperaturas máximas registradas por década.	40
Gráfico 21 Área rural La Rinconada. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas máximas registradas por década	40
Gráfico 22 Área urbana de Monterrey. Distribución de frecuencias de temperaturas promedio registradas por década.	41
Gráfico 23 Área urbana de Monterrey. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas promedio registradas por década.	42
Gráfico 24 Área rural El Cuchillo. Distribución de frecuencias de temperaturas promedio registradas por década.	43
Gráfico 25 Área rural El Cuchillo. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas promedio registradas por década.	43
Gráfico 26 Área rural La Rinconada. Distribución de frecuencias de temperaturas promedio registradas por década.	44
Gráfico 27 Área rural La Rinconada. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas promedio registradas por década.	45
Gráfico 28 Estaciones El Cuchillo, Monterrey y La Rinconada. Número de días por año con temperatura igual o superior a 38°C.....	47
Gráfico 29 Onda de calor, Área urbana de Monterrey. Número de eventos: 2 días consecutivos, 3 días o más consecutivos con temperatura igual o superior a 38°C (100°F) por década.Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional	48
Gráfico 30 Onda de calor Área rural El Cuchillo. Número de eventos: 2 días consecutivos, 3 días o más consecutivos con temperatura igual o superior a 38°C (100°F) por década.Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional	48
Gráfico 31 Onda de calor Área rural La Rinconada. Número de eventos: 2 días consecutivos, 3 días o más consecutivos con temperatura igual o superior a 38°C (100°F)	

por década.Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional	49
Gráfico 32 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura mínima entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, por década.....	52
Gráfico 33 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura mínima entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, por década.....	52
Gráfico 34 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura mínima entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, por década.....	53
Gráfico 35 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura mínima entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, por década.....	54
Gráfico 36 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura mínima entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, por década	55
Gráfico 37 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura mínima entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, por década	56
Gráfico 38 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura máxima entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, por década.....	57
Gráfico 39 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura máxima entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, por década.....	57
Gráfico 40 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura máxima entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, por década.....	58
Gráfico 41 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura máxima entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, por década.....	59
Gráfico 42 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura máxima entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, por década	60
Gráfico 43 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura máxima entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, por década	60
Gráfico 44 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura promedio entre	61
Gráfico 45 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura promedio entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, por década	62
Gráfico 46 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura promedio entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, por década	63
Gráfico 47 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura promedio entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, por década	63
Gráfico 48 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura promedio entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, por década.....	64
Gráfico 49 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura promedio entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, por década.....	65
Gráfico 50 Diferencial de temperaturas mínimas entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, promedio por década	66
Gráfico 51 Diferencial de temperaturas mínimas entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, promedio por década.....	67
Gráfico 52 Diferencial de temperaturas mínimas entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, promedio por década	68

Gráfico 53 Diferencial de temperaturas máximas entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, promedio por década	69
Gráfico 54 Diferencial de temperaturas máximas entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, promedio por década.....	70
Gráfico 55 Diferencial de temperaturas máximas entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, promedio por década	71
Gráfico 56 Diferencial de temperaturas promedio entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, promedio por década	72
Gráfico 57 Diferencial de temperaturas promedio entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, promedio por década.....	73
Gráfico 58 Diferencial de temperaturas promedio entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, promedio por década	74

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con cifras del Banco Mundial¹ más del 90% del crecimiento poblacional tiene lugar en las ciudades por lo que para el 2030 se estima que el 60% de la población mundial vivirá en áreas urbanas. Como consecuencia de esta tendencia, los impactos negativos relacionados con la urbanización se harán más visibles, entre otros, los concernientes con el medio ambiente.

Un efecto derivado directamente del desarrollo urbano y las actividades humanas es la denominada isla de calor urbana (ICU). La Environmental Protection Agency (EPA)² de los Estados Unidos, la define como las más altas temperaturas experimentadas por las áreas urbanas en comparación con áreas rurales cercanas y menciona que en una ciudad de un millón de personas la temperatura promedio anual puede ser de 1°C a 3°C más caliente que sus alrededores, y que en las noches la diferencia puede alcanzar los 12°C. Menciona dentro de las principales causas de este fenómeno: la reducida vegetación en las áreas urbanas; las propiedades de los materiales de construcción que favorecen la absorción de calor; la geometría urbana, densidad y altura de las construcciones y las emisiones antropogénicas producto de la actividad económica, tráfico, etc.; y factores climáticos como cielos claros, vientos calmos y factores geográficos como la cercanía a cuerpos de agua o zonas montañosas que puedan influir sobre los patrones de vientos. Se señalan como consecuencias directas de este fenómeno: mayores costos de acondicionamiento del aire, emisión de gases de efecto invernadero y aire contaminado, enfermedades y muertes relacionadas con el calor y el aumento en la demanda de energía, principalmente en el verano.

De acuerdo con la OECD (2010), el efecto ICU sigue un círculo vicioso debido a que el ambiente construido en ciudades altamente concentradas, refleja menos la luz solar y absorbe y retiene más el calor, lo que hace que se demande más energía para climatización generando más contaminación y dada la insuficiente vegetación estos gases se concentran e intensifican la ICU, lo que incrementa nuevamente la temperatura. Dado esto, menciona que para los Estados Unidos se estima que entre 3% y 8% de la electricidad anual es usada para compensar los efectos ICU, es decir, para aparatos de climatización, y que como consecuencia del círculo descrito se estima que su uso masivo puede aumentar el efecto ICU hasta en 1°C. Además, plantean que los efectos ICU incrementarán la demanda futura de energía en todo el mundo.

Esta investigación se centra en explorar la relación entre el uso de electricidad y el clima local, partiendo de la identificación de los determinantes del uso de electricidad y de la caracterización del clima urbano, donde se considera la existencia del fenómeno ICU y su posible influencia sobre el uso de electricidad.

El análisis se enfoca en la zona metropolitana de Monterrey (ZMM) debido a que es una de las áreas urbanas más importantes de México. Experimentó un crecimiento significativo tanto

¹ Ver www.bancomundial.org/temas/cities/datos.htm, consultado el 01 de junio de 2016.

² Ver <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-impacts> consultado el 13 de julio de 2016.

económico como poblacional desde 1950, por lo que se busca caracterizar la evolución del clima urbano desde esa época, explorando la existencia del fenómeno ICU y su relación con el uso de energía eléctrica.

El documento se compone de dos principales apartados. En el primero, se explora la relación entre el uso de energía eléctrica y el clima local para el periodo 1993-2013, por medio de un análisis econométrico. En el segundo, se realiza un análisis histórico del clima urbano donde se trata de identificar el efecto ICU y su influencia sobre el uso de electricidad en el periodo de diciembre de 1953 a diciembre de 2013. Finalmente, se presentan las conclusiones y las recomendaciones de política pública.

Problema de Investigación

Esta investigación pretende, mediante un análisis de los determinantes del uso de electricidad en la ciudad y de la caracterización del clima urbano, establecer cuál ha sido la influencia del clima urbano en el uso de energía eléctrica en la ZMM.

Preguntas de investigación

- ¿Existe una relación entre el uso de electricidad y el clima en la ZMM?
- ¿Cómo ha evolucionado el clima urbano en la ZMM entre diciembre de 1953 y diciembre de 2013?
- ¿Es posible detectar un fenómeno de isla de calor en el área urbana? Y de ser el caso, ¿cuál ha sido su influencia sobre el uso de electricidad en la ZMM?

Objetivo general

Determinar la relación entre uso de electricidad y clima local en la ZMM.

Objetivos específicos

- Establecer los determinantes del uso de electricidad en la ZMM para el periodo 1993-2013.
- Caracterizar la evolución del clima en la ZMM entre diciembre de 1953 y diciembre de 2013.
- Determinar la existencia y magnitud del fenómeno de isla de calor en la ZMM entre diciembre de 1953 y diciembre de 2013.
- Identificar la relación entre el fenómeno de isla de calor y el uso de electricidad durante el periodo 1993-2013.

1. REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Uso de energía eléctrica

Tradicionalmente la demanda de energía eléctrica ha sido estudiada desde el punto de vista microeconómico en el que se plantea que el consumidor se enfrenta a un problema de maximización de utilidad en el que elige distintas cantidades de bienes de consumo sujeto a una restricción de ingreso. Este tipo de planteamiento ha recibido múltiples críticas por los supuestos empleados: consumidor representativo que toma decisiones racionales, empresas que siguen un comportamiento optimizador y mercados que funcionan perfectamente. También se ha resaltado la falta de detalle en la representación formal de la tecnología y la falta de consideración de las características propias de los países, en particular la diferenciación entre países desarrollados y países en desarrollo (Bhattacharyya & Timilsina, 2009)

En cuanto a las herramientas utilizadas para modelar y pronosticar la demanda de energía eléctrica, pueden clasificarse como estáticas o dinámicas, estos últimos a pesar de ser más ricos en resultados presentan problemas econométricos: la posible existencia de correlación entre la demanda rezagada y los errores y que mediciones erróneas lleven a malas estimaciones de los precios medios de la energía; también univariadas o multivariadas y técnicas que van desde series de tiempo hasta modelos híbridos. Otro aspecto en el que pueden agruparse es de acuerdo con el tipo de datos utilizados, ya sean macrodatos o microdatos, cada uno de estos ofrece ventajas y desventajas. Normalmente para los datos agregados se cuenta con amplia información histórica, pero para pocas variables lo que limita los estudios. Y para los datos desagregados, frecuentemente se dispone de variables en cortes transversales lo que dificulta los análisis sobre la influencia del cambio en los precios sobre el consumo (Romero-Jordán, Peñasco, & Río, 2014)

La especificación log-lineal es la más comúnmente usada en los estudios de demanda de energía debido a su facilidad y simplicidad. En 1970's ocurrió una ola de modelos trans-log y posteriormente de modelos logit. El problema en común de estas aproximaciones es que siguen los supuestos microeconómicos tradicionales y la principal dificultad a la que se enfrentan los análisis de los sectores comercial y residencial es la disponibilidad de datos. (Bhattacharyya & Timilsina, 2009)

Dos aspectos importantes de la demanda de electricidad, según Bhattacharyya & Timilsina (2009) son: primero, que es una demanda derivada que surge de la satisfacción de necesidades a través del uso de ciertos aparatos que funcionan a partir de energía eléctrica y segundo, que la electricidad puede ser vista como un bien de demanda final, cuando es consumida por los hogares y como un bien de demanda intermedia, cuando es usada como insumo para las actividades productivas, por lo que resulta pertinente hacer la distinción entre sectores de consumo pues responden a factores diferentes. Los hogares consumen energía para satisfacer ciertas necesidades y maximizar su grado de satisfacción, mientras que para

el comercio y las industrias al constituir un insumo, su objetivo es minimizar su costo total de producción.

En relación a los determinantes de la demanda de energía eléctrica no existe un consenso. Varios autores mencionan que se ve afectada por los precios, el ingreso, las preferencias, variables demográficas y por factores exógenos como las condiciones climáticas. Dentro del enfoque tradicional, se puede mencionar a Badri (1992) quien realizó un estudio para los Estados Unidos en el que concluye que el precio de la electricidad, el precio del gas y el ingreso son los factores determinantes, siendo el precio la variable más importante y que la elasticidad difiere entre sectores de consumo: residencial (-1.02) , comercial (-0.71) e industrial (-0.78).

Es importante hacer una distinción entre elasticidades de corto y largo plazo pues difieren entre sí. Por ejemplo, en el sector residencial la respuesta a corto plazo ante un incremento en el precio de la electricidad es reducir su consumo restringiendo el uso de ciertos aparatos eléctricos y en el segundo caso, la respuesta consiste en reemplazarlos por aparatos que utilicen la energía de forma más eficiente. Esta consideración es trabajada por Pérez & Acosta (1980-1989), quienes argumentan que el modelo simple de demanda resulta inadecuado porque esa distinción entre corto y largo plazo implica un cambio en el comportamiento del consumidor. Plantean que la elasticidad precio-consumo en el corto plazo con un stock de “bienes eléctricos” fijo deberá ser menor que en el largo plazo, cuando el consumo se afecta por la adquisición o retiro de dichos bienes.

Un aspecto vinculado a lo anterior, es tratado por Dubin & MaFadden (1984) quienes analizan el efecto que tienen la posesión y uso de aparatos eléctricos sobre la demanda de electricidad, que entra como una demanda derivada. Demuestran que la respuesta de los hogares dependen de su “cartera” de aparatos y plantean que ignorar este efecto, puede llevar a sesgos e inconsistencias en la estimación de las elasticidades.

Otro factor que ha sido estudiado es el acceso a la electricidad. Berndt & Samaniego (1983) sostienen que la demanda de energía no es sólo función de los precios, el ingreso y otras variables socioeconómicas, sino que también depende del nivel de acceso, especialmente en países en desarrollo. Encuentran para México que un incremento del ingreso tiene un doble efecto, incrementando no sólo el consumo de electricidad, sino también el acceso al servicio.

Dentro de las variables socioeconómicas que pueden considerarse, de acuerdo con Pérez & Acosta (1980-1989), para el sector residencial: número de hogares que cuentan con el servicio, el tamaño del hogar, también podrían considerarse como aproximación a la cobertura del uso de electricidad o la rapidez con la que se expande algún índice de construcción de viviendas nuevas o la proporción de hogares conectados. Por otro lado, para el sector industrial un factor que puede tener una influencia importante son los salarios reales pagados y también podría capturarse el crecimiento industrial con algún indicador de construcción o creación de industrias. Para todos los casos es importante considerar y

controlar periodos donde hayan ocurrido racionamientos o cortes del servicio, pues se altera la demanda de manera exógena lo que tiene influencia en la estimación de la misma.

En general los resultados han demostrado que la elasticidad precio es de signo negativo y por el contrario la elasticidad ingreso es positiva. Las elasticidades a largo plazo son mayores que las de corto plazo. También se ha demostrado que la demanda de electricidad es sensible a la temperatura y a la demanda rezagada. (Romero-Jordán, Peñasco, & Río, 2014)

Se han realizado múltiples investigaciones en muchas regiones y países, que buscan identificar el efecto de los factores climatológicos. Salisu & Ayinde (2016) realizan una revisión de ellas y mencionan que se ha determinado que la relación es de tipo no lineal y que aun usando distintas referencias de temperatura, la relación entre estas variables se mantiene.

La variable climática más usada por los investigadores es la temperatura (Mirasgedis 2006, Valor et al 2001, Pardo et al 2002, Moral-Carcedo & Vicens Otero (2005) Bessec & Fouquau (2008) Do, Lin, & Molnár (2016) Corral (2010)). Do, Lin, & Molnár (2016) mencionan que de la revisión de literatura hecha por ellos no encontraron ningún estudio que no utilice la temperatura y use otra variable meteorológica en su lugar. En gran número de investigaciones la temperatura es representada en días-grados de calentamiento y enfriamiento (HDD, CDD) esto para tratar con la no linealidad de la relación. Las variables HDD y CDD son una medida de la intensidad y duración del frío en el invierno o el calor en el verano e indican las necesidades o sensibilidad de enfriamiento o calentamiento de una ubicación en particular. Sin embargo, este tipo de aproximación tiene algunas críticas, como lo exponen Bessec & Fouquau (2008): las variables HDD y CDD se calculan sobre unos valores umbral elegidos arbitrariamente, generalmente alguna temperatura de referencia del lugar de estudio y esta medida hace que el modelo sea menos robusto que considerar directamente el nivel de temperatura.

Otra forma es por medio de un índice de temperatura ponderado por la población, que resulta útil cuando no se cuentan con datos de consumo de electricidad desagregados regionalmente. Esta ponderación es posible porque el clima afecta el consumo de electricidad a través de la respuesta de las personas, que usarán más o menos electricidad ante determinadas condiciones. Otras variables que han sido trabajadas son la humedad, la nubosidad, la radiación solar, la velocidad del viento, etc.

Como sostienen Psiloglou, Giannakopoulos, Majithia, & Petrakis (2009), en muchos casos la modelación del consumo de energía eléctrica es multivariada y consiste en una mezcla entre factores climáticos y otros importantes factores económicos, como los precios de la energía, el ingreso, el producto interno bruto, el valor de importaciones y exportaciones, el índice de demanda de energía, etc. Es el caso del análisis hecho por Bessec & Fouquau (2008) para modelar el consumo de electricidad en un panel de 15 países de la UE durante las dos últimas décadas. Los autores incorporan las variables: población, la producción

manufacturera y la temperatura a una regresión de umbral logística suavizada. Encuentran una diferenciación clara entre países fríos y cálidos, para los primeros los picos de consumo ocurren durante los meses de invierno, mientras que países como España, Portugal y Grecia suceden durante el verano. El método utilizado tiene la ventaja de permitir una evaluación más directa del impacto de la temperatura pues se considera como una variable explicativa dentro del modelo y una desventaja es que el valor de umbral debe ser estimado.

Romero-Jordán, Peñasco, & Río (2014), realizan un análisis de demanda de electricidad para regiones de España entre 1998 y 2009. Encuentran que está positivamente relacionada con la demanda del año anterior, ingreso, rango de temperatura, calentador de agua en los hogares y número de grados HDD y CDD. Y negativamente con los precios de la electricidad, precios del gas, calefacción en los hogares y presencia de personas mayores en los mismos.

Al-Zayer & Al-Ibrahim (1996), realizan una investigación donde modelan el impacto de la temperatura sobre la demanda de energía eléctrica para una provincia en Arabia Saudita. Para esto, los autores aplican el test de cambio estructural para identificar si entre los meses más cálidos y más fríos existen diferencias significativas en cuanto al consumo de electricidad, y sus resultados confirman esta hipótesis, por lo que concluyen que el consumo de electricidad es sensible a cambios en las temperaturas y juega un papel importante en la demanda de electricidad.

Otros autores que han explorado esta relación son Stanton & Gupta (1969) quienes centran su atención en la relación entre picos de demanda semanal y variables climáticas, planteando un modelo no lineal del clima y definiendo una metodología para calcular la función de densidad de probabilidad del pico de demanda anual. Thompson (1976) también se centró en los picos de demanda, y en su pronóstico tomó como base sus tendencias y desviación estándar. Lee & Chiu (2013) investigaron la relación entre demanda de electricidad y temperatura en 24 países de la OECD para el periodo 1978-2004 y en sus resultados encuentran una elasticidad ingreso entre 0.919-1.685 y una elasticidad precio de -0.233 a -0.065. Como variables significativas el PIB per cápita, que tiene una relación positiva y la temperatura con la que demuestran que existe un fuerte vínculo no lineal.

En un sentido microeconómico, Henley & Peirson (1997) investigan la relación entre la temperatura del aire y la demanda de energía para calefacción en una muestra de hogares del Reino Unido y en específico intentan demostrar si la modelación paramétrica o no paramétrica es la más adecuada. Dentro de los factores que explican la demanda de energía por parte de los hogares mencionan: ingreso, efecto de pérdida de calor, precio por cierto nivel de confort térmico y preferencias de los consumidores. De su análisis llegan a que en la relación entre energía para calefacción y temperatura del aire actúan múltiples efectos: físico, económicos y de elección de los consumidores, que son los que determinan la forma exacta de la relación. De la estimación paramétrica concluyen que es posible rechazar la linealidad de la relación, pero comparada con la estimación no paramétrica, resulta estar sesgada para temperaturas extremas y falla al capturar los efectos umbral. Por otro lado, los

resultados no paramétricos revelan que el hogar típico del Reino Unido, exhibe poca sensibilidad a temperaturas bajo los 10°C y sobre los 20°C. Entre estos umbrales, la demanda se muestra más sensible a cambios en la temperatura.

Salisu & Ayinde (2016) plantean que para la demanda de energía no sólo son importantes los factores meteorológicos sino también factores estacionales y que la no consideración de estos efectos podría conllevar a sesgos o a resultados erróneos en las estimaciones. Do, Lin, & Molnár (2016) también resaltan la importancia de estos factores, que denominan como estacionalidad multinivel, pues está probado que en el consumo de energía existen patrones en los meses del año, días de la semana y horas del día y todos ellos son fácilmente predecibles y pueden ser modelados.

Un intento por capturar estos ciclos estacionales fue hecho Martín-Rodríguez & Cáceres-Hernández (2005) por medio del uso de datos de alta frecuencia mediante la aplicación de una función spline. Identificaron patrones: anuales, diferencias entre invierno y verano; semanales, diferencias entre sábados y domingos y días en semana; dentro de un día, los niveles de demanda son más bajos a primeras horas de la mañana y a media tarde se incrementan debido a que las demandas industrial y domésticas coinciden. Concluyen que el consumo de electricidad depende, entre otros factores, del clima (necesidades de calentamiento y enfriamiento), de la hora establecida (necesidades de iluminación) y de las actividades económicas que se lleven a cabo en el lugar. Por esto último, consideran que la disponibilidad de datos desagregados geográficamente, puede ser muy útil para distinguir entre las diferentes estacionalidades, facilitando la gestión eléctrica y ganando en eficiencia.

Considerando esta estacionalidad, Valor, Meneu, & Caselles (2001) en su trabajo para España, identifican dos efectos estacionales: diario y mensual. Para esto construyen un índice de variación estacional mensual y diario y consideran la temperatura promedio porque es la que mejor captura las oscilaciones térmicas diarias, mientras que las temperaturas máximas y mínimas pueden ser más adecuadas para analizar picos o valles de consumo de energía.

Para México, Ramos, Fiscal, Maqueda, Sada, & Buitrón (1999) del Instituto de Investigaciones Eléctricas, realizaron un informe sobre las variables que influyen en el consumo de energía eléctrica, entre ellas mencionan al clima como la variable más importante, pues los usuarios domésticos pueden llegar a consumir hasta diez veces más energía en el verano que en invierno. Del mismo instituto Maqueda & Sánchez (2011) realizan una investigación en donde compararan las curvas de demanda eléctrica doméstica en dos regiones de México: Central y Peninsular, donde además desagregan las curvas de consumo de los principales electrodomésticos utilizados en los hogares. Demuestran que el patrón de consumo es diferente debido a las características y tipo de equipamiento de cada región. Determinan que a nivel nacional, el consumo de energía eléctrica por iluminación artificial es de 43% del total en promedio. En el área central, la demanda máxima ocurre en el mes de enero en horas de la noche. Los principales usos fueron: equipos de refrigeración 38.8%, lavavajillas 4.3%, plancha 0.6%. Mientras que, en el área peninsular la máxima

demanda ocurre en el mes de julio en horas de la noche, siendo los principales usos: acondicionador de aire 20%, refrigerador 16% y ventilador 5%.

Otros análisis regionales encontrados para México, uno hecho para la ciudad de Monterrey por Ramírez, Cuevas, & Curiel (2012) quienes estudian la evolución del consumo agregado para la zona metropolitana de 1993 a 2010. Mediante la estimación de una función tipo Cobb-Douglas modelan el consumo de energía y aplican el método de cointegración Engel-Granger y de corrección de error (ECM) para captar los efectos de corto plazo. Encontraron que un incremento de un punto porcentual en el número de hogares, incrementa el consumo en el largo plazo en 0.61%, y en el corto plazo en 0.30%. Y en cuanto al impacto climatológico, encontraron que para los meses de mayo, junio y julio la demanda de energía eléctrica se incrementa, lo que se relaciona de manera directa con las mayores temperaturas. Para la ciudad de Tampico, Tamaulipas, Morales-Ramírez & Alvarado-Lagunas (2014) estimaron el consumo de energía eléctrica a partir de un análisis de series de tiempo mensuales de 1998 a 2005. Utilizaron como variables dependientes el crecimiento en el número de usuarios, el precio del servicio, el nivel de ingreso promedio de los habitantes del municipio y efectos estacionales. Entre sus resultados se destaca que la variable que más aporta a la explicación de las variaciones del consumo es el crecimiento en el número de usuarios, por un incremento de un punto porcentual de los primeros, el consumo se incrementa en 1.35%. Otros hallazgos, se consume más electricidad en los meses calurosos y hay poca sensibilidad de los usuarios ante incrementos en las tarifas.

1.2. CLIMATOLOGÍA URBANA

En el ámbito internacional

El clima urbano es una importante preocupación en la actualidad. De acuerdo con Georgii (1968), las ciudades modifican el clima debido a la transformación de la topografía natural mediante la construcción de calles, casas, edificios e industrias, y también, como consecuencia de la mayor densidad de estas construcciones. Peña (1980) refiriéndose a los hallazgos de Lowry, W. en su artículo “*The Climate of cities*” de 1967, quien planteó que el efecto sobre el clima es causado por la menor capacidad del pavimento para permitir la evaporación del agua de las precipitaciones y enfriar el ambiente, por el contrario, el suelo de cemento genera recalentamiento de la atmósfera urbana.

Otros factores a considerar son las actividades humanas, tanto domésticas como industriales que también son fuentes de calor. Georgii (1968) argumenta que en las ciudades la contaminación produce una especie de “campana” en la que quedan inmersas y modifica todo el balance de radiación en el área urbana. Peña (1980) menciona a Pédelaborde (1970) quien apoya esta posición, pues sostiene que a pesar de que la contaminación hace que las áreas urbanas reciban menos energía solar, su clima es más cálido, resultado de la aglomeración y la contaminación. Como se evidenció en estos documentos, el fenómeno de isla de calor es propio de los desarrollos urbanos, por esta razón los primeros estudios se realizaron en

grandes ciudades de Europa y los Estados Unidos, también existen numerosos estudios hechos para países asiáticos y latinoamericanos.

El primer análisis cuantitativo sobre el clima urbano del que se tiene referencia, fue realizado por Luke Howard para la ciudad de Londres en 1833, donde observó la variada distribución de las temperaturas en distintos puntos de la ciudad. Howard es considerado como un precursor en los estudios del clima urbano.

Posteriormente, en su libro *“The climate in the cities”* Kratzer (1956, p. 106), realiza un análisis bastante amplio del clima en las principales ciudades europeas y encuentra que existe una relación directa entre el tamaño de una ciudad y la diferencia de temperatura entre la ciudad y el resto del país. También, plantea que la presencia de la industria y la forma de la ciudad son aspectos que pueden ampliar este diferencial (pág. 109).

Después, Tony Chandler publica *“The Climate of London”* en 1965 donde intenta capturar la manera y el grado en el que los cambios en la morfología de la ciudad se reflejan en el clima, para esto toma registros diarios de estaciones climáticas y logra establecer que la ciudad por sí misma es un determinante del clima debido a: su densidad, composición, estructura de las construcciones, cantidad de superficie verde, tráfico, etc., y este libro, de acuerdo con Martínez (2014) debe citarse como impulsor del estudio de las islas de calor, ya que en 1970, este concepto fue reconocido por parte de la Organización Meteorológica Mundial.

Oke (1973) efectúa un análisis para ciudades europeas intentando demostrar la forma de la relación entre la intensidad de la isla de calor urbana y el tamaño de una ciudad, medido por su población. Encontró al igual que Chandler, una relación directa y reconoció un aspecto adicional, que el límite para el fenómeno se halla en la disponibilidad de energía para soportarlo.

En relación a las consecuencias económicas de este fenómeno, Guhathakurta & Gober (2007) analizan el fenómeno de isla de calor para la ciudad de Phoenix, Arizona e intentan determinar su impacto sobre el uso de agua residencial. Mencionan que esta ciudad experimentó un rápido crecimiento entre 1950 y 1998 pasando de 330 mil habitantes a más de 4 millones, lo que por supuesto tuvo un efecto sobre el consumo de agua. Cabe destacar, que los autores estiman la demanda de agua por dos fuentes: directa e indirecta. La directa, a través de la mayor demanda de agua para la irrigación vegetal y llenado de piscinas y la indirecta, a través del incremento en el consumo de energía eléctrica, que es de fuente termoeléctrica. Encuentran que un incremento en la temperatura mínima ocasionado por la isla de calor de 1°F incrementa el uso promedio de agua por sector censal en 290 galones mensuales y si además, el diferencial entre temperatura máxima y mínima decrece en 1°F, la demanda por agua se incrementa en 681 galones mensuales.

Rosenfeld et al. (1998) realizan una estimación de las estrategias de mitigación de las islas de calor en la ciudad de Los Ángeles, California, refieren que un sexto de toda la energía

generada en los Estados Unidos se destina al acondicionamiento de edificios y que cerca de la mitad de esa proporción es usada en ciudades clasificadas como islas de calor, donde la demanda por aire acondicionado ha crecido 10% en los últimos 40 años. De sus resultados sostienen que con la implementación de estrategias dirigidas en contra del calentamiento y la contaminación, se lograría reducir la isla de calor en la ciudad de los Ángeles en 3°C, lo que significaría un ahorro de electricidad del 10%.

Dentro del estudio del clima urbano, un aspecto de gran interés son los periodos o eventos de calor extremo denominados “olas de calor”. Meehl & Tebaldi (2004) Analizan la mayor intensidad, duración y frecuencia de las olas de calor en el siglo 21, centrándose en los eventos específicos de olas de calor de 1995 en Chicago y 2003 en París. Para esto, se refieren primero a la definición de ola de calor indicando que muchas de ellas cuantifican la duración y/o intensidad ya sea en la temperatura mínima nocturna o la máxima durante el día. Utilizan en específico dos definiciones, que se ha demostrado están suficientemente relacionadas con impactos sociales sobre la economía y la salud humana. La primera, se concentra en la severidad del “peor” evento de calor anual y sugiere que varias noches consecutivas con altas temperaturas nocturnas afectan de manera importante la salud humana. Y la segunda definición, se basa en el concepto de exceder umbrales específicos lo que permite analizar tanto la duración de la ola como la frecuencia. Los autores encuentran que en el futuro, Europa y Norte América experimentarán olas de calor más intensas, más frecuentes y más largas.

Otro acercamiento a este tema, fue elaborado por Ruddell et al. (2010), quienes señalan al calentamiento global y las islas de calor como responsables de los eventos de calor más extremos en las ciudades, definiéndolos como altas temperaturas sostenidas que exceden el rango normal de variabilidad de la temperatura. Realizan una investigación de las olas de calor a nivel de microclimas para el área metropolitana de Phoenix, Arizona, considerando olas de calor de cuatro días durante el verano de 2005. En sus conclusiones indican que la exposición a estos umbrales de temperatura varía significativamente dentro del área urbana, siendo los grupos de población más vulnerables las minorías, las personas mayores y los residentes de bajos ingresos, debido a que en sus zonas de habitación las áreas verdes son más escasas y no poseen los recursos necesarios para acondicionar sus viviendas ante estos eventos.

Estos autores también resaltan, que existe suficiente evidencia del riesgo que tiene para la salud humana la exposición prolongada a temperaturas excesivamente cálidas. De acuerdo con el Centro de Prevención y Control de enfermedades (CDC) (Luber, Sánchez, & Conklin, 2006) durante el periodo de 1999 a 2003 se reportaron un total de 3,342 muertes como resultado del calor extremo. Además, muchas de estas muertes, independientemente de su relación con condiciones médicas crónicas eran prevenibles, por ejemplo, evitando realizar actividades vigorosas al aire libre, bebiendo cantidades adecuadas de líquidos, usando ropa ligera y aire acondicionado.

En México

Existen varias publicaciones relacionadas con el estudio de las islas de calor para las ciudades mexicanas. Uno de los principales estudiosos del clima urbano en México, es el climatólogo Ernesto Jáuregui quien ha realizado varias investigaciones sobre el clima en la ciudad de México y otras ciudades del país. En Jáuregui (1986) estimó el efecto de isla de calor para las ciudades más grandes: Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara, usando datos estaciones climatológicas urbanas y rurales. Encontró que para el mes de enero, Monterrey presentaba la menor velocidad de enfriamiento, que atribuyó a la mayor obstrucción de los edificios vecinos a la estación meteorológica que oscurecían parte del cielo y al calor generado por el uso de la calefacción. Para la ciudad de México, planteó que la rapidez de enfriamiento era mayor en lo rural que en la ciudad, dando lugar a una isla fresca después de las 11 de la mañana y que la isla de calor alcanza su máximo poco antes del alba, y resaltó que este resultado era contrario a lo observado en ciudades europeas. Posteriormente, en Jáuregui (1992) realizó un análisis de la isla urbana de calor en la ciudad de México, replicando la primera publicación realizada en México sobre islas de calor de Manuel Moreno y Anda en 1899, quien comparó los climas de México (urbano) y Tacubayá (rural). Para esto utilizó registros de estaciones meteorológicas en estos lugares y estudió las variaciones estacionales del diferencial de temperatura. Encontró que a consecuencia de la fuerte urbanización durante el periodo 1878-1899 se advierte una tendencia creciente de las temperaturas mínimas y estimó la magnitud de la isla de calor en 2°C.

Magaña (2013) realiza un estudio sobre olas de calor en México. Menciona que México ha registrado aumentos en sus temperaturas máximas tanto en el sur como en el norte, siendo cada vez más elevadas y frecuentes lo que incrementa la probabilidad de ocurrencia de olas de calor. Encuentra que las olas de calor tienen una mayor duración en el norte del país, extendiéndose en ocasiones por más de dos semanas, siendo además intensas lo que las cataloga como peligrosas. Construye índices de calor para evaluar los peligros de este tipo de eventos sobre la salud humana y afirma que las regiones más afectadas en épocas recientes son los estados de Baja California, Sonora, Sinaloa, San Luis Potosí y Veracruz. Establece que en México el riesgo de muerte por ondas de calor es significativo, así se encuentran numerosos casos de muertos, menciona que, en julio del 2006 en Mexicali, Baja California se registraron 10 muertes a causa de calor excesivo, más de 48°C. Los resultados muestran que las afectaciones por ondas de calor para México repercuten significativamente en hombres de edad productiva, entre los 25 y 64 años, seguido de hombres mayores de 65 y, en menor medida, los que se encuentran entre 15 y 24 años de edad. Para el caso de las mujeres, resultan ser menos afectadas. Los casos más frecuentes de fallecimientos en el sexo femenino tienen lugar entre 25 y 44 años y al igual que en el grupo masculino, las más afectadas son mujeres en edad productiva. Plantea como medidas de política implementar Sistemas de Alerta Temprana (SIAT), acciones preventivas en sectores y regiones vulnerables, entre organismos privados y de gobierno, llevar cabo medidas estructurales en

las ciudades afectadas por ondas de calor con programas de reforestación urbana o de cuerpos de agua en la ciudad.

A nivel regional, Martínez-Austria, Bandala, & Patiño-Gómez (2015) estudiaron la tendencia de las temperaturas y las olas de calor en el noroeste de México, por medio de datos de registros del clima en la ciudad de Mexicali y en la cuenca del río Yaqui en el estado de Sonora de 1960 a 2011, sometidos a tres metodologías diferentes: ajuste lineal, test de Spearman y el test de Sen, con las que llegaron a los mismos resultados: un claro proceso de calentamiento que ha incrementado las temperaturas máximas y en la ocurrencia de olas de calor en la región, especialmente durante las últimas décadas, que para el caso de Mexicali, concentraron el 82% de las olas de calor registradas.

Para la ciudad de Toluca, se encontraron varias investigaciones. Una realizada por Jáuregui (1979) que comparó la temperatura entre la ciudad y el campo y obtuvo que como resultado del crecimiento de la ciudad y la contaminación, se formó una isla de calor que estimó en 5°C. Varios años después, Morales et al. (2007) a diferencia de los otros documentos revisados, tomaron únicamente el registro de la temperatura en dos días típicos de invierno y verano, durante el día y la noche de 2004 y 2005 y otras variables usualmente usadas: presión atmosférica, dirección y velocidad del viento y humedad relativa. Encontraron que las anomalías climáticas de la ciudad son debidas principalmente a los cambios en el uso del suelo, a los materiales de construcción y a la existencia de isla de calor, estimada en invierno: 3°C en día y 1.5°C en la noche, y en verano de 2°C.

La relación entre los cambios en el uso del suelo y las temperaturas es también analizada por García-Cueto et al. (2007) para el caso de la ciudad de Mexicali, tomando registros de meses representativos para cada una de las estaciones del año. Obtuvieron que las zonas agrícolas son más frías y las zonas urbanas y cercanas al desierto son más calientes. Plantean, además, que la existencia de áreas con vegetación, aún dentro de las ciudades como parques, jardines en áreas residenciales, etc., enfrían el ambiente lo que podría reducir la demanda de energía y podría traducirse en una herramienta para los planificadores urbanos. También para esta ciudad, Austria & Bandala (2016) realizan un análisis sobre las tendencias y umbrales de las temperaturas extremas y las olas de calor entre 1969-2011, encontrando una clara tendencia creciente tanto en las temperaturas como en la frecuencia y duración de eventos de olas de calor durante las últimas décadas, especialmente durante los meses de julio y agosto.

Para la ciudad de Tampico, Evans & Schiller (2005) sostienen que en ciudades con clima húmedo la isla de calor muestra una intensidad similar a la hallada en otras investigaciones para ciudades argentinas, con un diferencial de 3°C entre el centro y la periferia. Como punto interesante, destacan la presencia de múltiples islas de calor, coincidentes con la estructura policéntrica de la ciudad.

2. USO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA ZMM, 1993-2013.

En esta sección se presenta un análisis del uso de energía eléctrica en la ZMM en el periodo de 1993 a 2013. Adicionalmente, se explora su relación con algunas variables como: producción manufacturera, población, viviendas particulares habitadas y variables climáticas: temperatura máxima, mínima y promedio, número de días por mes con temperatura extrema y olas u ondas de calor. Estas últimas, relacionadas con el clima son de especial interés para el propósito de esta investigación, permitiendo establecer desde distintos enfoques el efecto del clima sobre el uso de electricidad.

2.1.DATOS EMPLEADOS Y RESULTADOS PRELIMINARES

2.1.1. Uso de energía eléctrica

La variable analizada corresponde al índice estatal mensual de la electricidad (IEME) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía –INEGI- para el periodo 1993-2013. Este indicador es usado teniendo en cuenta dos aspectos: primero, en su cálculo se consideran tanto las actividades de suministro como las de generación³ y segundo, será una variable proxy para la ZMM debido a la limitación de información, pero cabe aclarar que esto no constituye una restricción de gravedad ya que el estado de Nuevo León tiene la particularidad de que fuera de la ZMM no existen otras concentraciones urbanas ni económicas de importancia, por lo que tratar con información a nivel estatal para el análisis de la zona metropolitana es adecuado. Como soporte para esta afirmación, se presenta la Tabla 1, en la que se muestran las unidades económicas y la población para el total del estado, el total de la zona metropolitana y el resto de municipios. Las unidades económicas fueron obtenidas a partir de los Censos Económicos de 1999, 2004, 2009 y 2014. Los registros de población, fueron tomados de los Censos Generales de Población y Vivienda 1990 y 2000, y el Censo de Población y Vivienda 2010.

Tabla 1 Unidades económicas y Población. Nuevo León, ZMM y Resto del Estado

Zona	Unidades económicas				Población		
	1999	2004	2009	2014	1990	2000	2010
Total Nuevo León	12,491	10,823	12,632	13,846	3,098,736	3,834,141	4,653,458
Total ZMM	11,219	9,710	11,268	12,355	2,671,715	3,381,005	4,106,054
%	89.8	89.7	89.2	89.2	86.2	88.2	88.2
Resto	1,272	1,113	1,364	1,491	427,021	453,136	547,404
%	10.2	10.3	10.8	10.8	13.8	11.8	11.8

Fuente: Elaboración propia a partir de Censos económicos 1999, 2004, 2009 y 2014. Censos Generales de Población y Vivienda 1990 y 2000, y el Censo de Población y Vivienda 2010

De la Tabla 1 se observa que históricamente la zona metropolitana de Monterrey ha agrupado alrededor del 89% de las unidades económicas del estado y para la población, ocurre algo

³ Para mayor detalle de la metodología del cálculo del indicador estatal mensual de la electricidad IEME, ver http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/cn/ieme/doc/SCNM_Metodologia_17.pdf ___Consultado el 09 de mayo de 2016.

similar, concentrando para el 2010, el 88.2% del total de la población estatal. Esto asegura que esta información a este nivel constituye una buena aproximación de los datos para el área urbana.

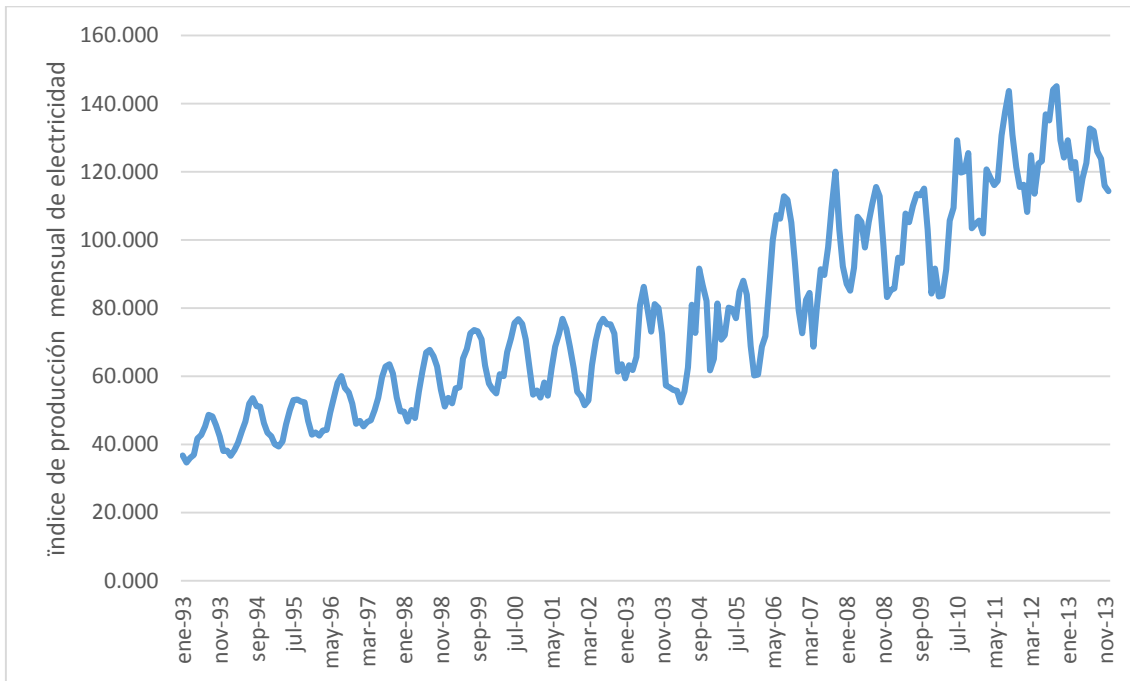
La ZMM definida en 2010 por el Consejo Nacional de Población (CONAPO), está conformada por trece municipios: Apodaca, Cadereyta Jiménez, Carmen, García, San Pedro Garza García, General Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, Salinas Victoria, San Nicolás de los Garza, Santa Catarina y Santiago. Se destaca, como la tercera área metropolitana que más concentra población en el país, de acuerdo con información de los censos de 1990, 2000 y 2010, después de las áreas metropolitanas del Valle de México y Guadalajara. Y en cuanto a su importancia económica, Trejo (2013) en su estudio de las economías de las zonas metropolitanas en México afirma que ocupa el segundo lugar por su participación en el valor agregado nacional, aportando para el 2008 un poco más del 10%, y se ha consolidado junto con las zonas metropolitanas del Valle de México y Guadalajara, como motores de desarrollo económicos en sus regiones y en el país.

El análisis se desarrolla a partir de los datos históricos del Índice Estatal Mensual de la Electricidad (IEME) para el estado de Nuevo León de enero de 1993 a diciembre de 2013. Su comportamiento se ilustra en el Gráfico 1, en el que se observa una clara tendencia creciente que puede explicarse por el efecto del crecimiento poblacional y económico, relación que será explorada más adelante. Se evidencia también, una oscilación estacional más clara durante los primeros años, con meses donde ocurren picos de uso y otros donde ocurre lo contrario, estas oscilaciones o estacionalidad multinivel como lo plantean Do & Molnár (2016) son una característica importante del consumo de electricidad. Después del 2003, el comportamiento de la serie parece un poco más errático.

Un aspecto que debe tenerse en cuenta es que Nuevo León y los demás estados del norte del país son los que registran el mayor consumo de energía, esto como lo sugieren Maqueda & Sánchez (2011) debido al uso intensivo de equipos de climatización artificial y al mayor poder adquisitivo de la población de estos estados.

Otra manera de analizar su comportamiento es identificando los meses donde el IEME toma su valor máximo y mínimo, de manera que pueda relacionarse con la estacionalidad mensual, esto se presenta en la Tabla 2. Como es de esperarse, el uso de electricidad ha mantenido un crecimiento continuo a lo largo del periodo, los meses de mayor uso coinciden en su mayoría con meses de verano, a excepción del 2007 y 2012 cuando se registró en octubre. Por otro lado, los menores valores ocurren en los meses de invierno, con excepción, del 2004, 2007 y 2013 cuando ocurrieron en el mes de abril.

Gráfico 1 Indicador Mensual de la electricidad para Nuevo León. 1993- 2013



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI

Varios estudios (Valor, Meneu, & Caselles, 2001; Psiloglou, Giannakopoulos, Majithia, & Petrakis, 2009; Ali, Jawed, & Sharif, 2013) calculan un índice de variación estacional mensual (MSVI) que permite observar de manera más clara los cambios a lo largo de un periodo. Siguiendo a Valor, Meneu, & Caselles (2001, pág. 1414), el $MSVI_{ij}$, que es el valor del índice para el mes i del año j , se define como:

$$MSVI_{ij} = \frac{E_{ij}}{\bar{E}_j}$$

Donde E_{ij} es el consumo de electricidad para el mes i en el año j y \bar{E}_j es el consumo promedio mensual para el año j . Su interpretación es, de acuerdo con Psiloglou, Giannakopoulos, Majithia, & Petrakis, (2009): el valor promedio del MSVI muestra el comportamiento relativo a lo largo de los meses del año, y los valores máximos y mínimos indican las desviaciones de ese comportamiento.

Tabla 2 Valor máximo y mínimo y mes por año. IEME Nuevo León. 1993-2013

Año	Máximo		Mínimo	
	Valor	Mes	Valor	Mes
1993	48.703	Agosto	34.683	Febrero
1994	53.566	Agosto	36.697	Febrero
1995	53.223	Agosto	39.408	Marzo
1996	60.04	Agosto	42.581	Febrero
1997	63.536	Septiembre	45.28	Febrero
1998	67.751	Agosto	46.701	Febrero
1999	73.542	Agosto	52.03	Febrero
2000	76.773	Agosto	54.64	Diciembre
2001	76.826	Agosto	53.718	Febrero
2002	76.86	Julio	51.506	Febrero
2003	86.216	Junio	57.304	Diciembre
2004	91.655	Septiembre	52.32	Abril
2005	88.087	Septiembre	60.225	Diciembre
2006	112.87	Agosto	60.537	Enero
2007	120.057	Octubre	68.651	Abril
2008	115.529	Septiembre	83.251	Diciembre
2009	115.084	Octubre	84.305	Diciembre
2010	129.254	Julio	83.474	Febrero
2011	143.781	Septiembre	101.972	Febrero
2012	145.133	Octubre	108.269	Febrero
2013	132.73	Julio	111.763	Abril

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI

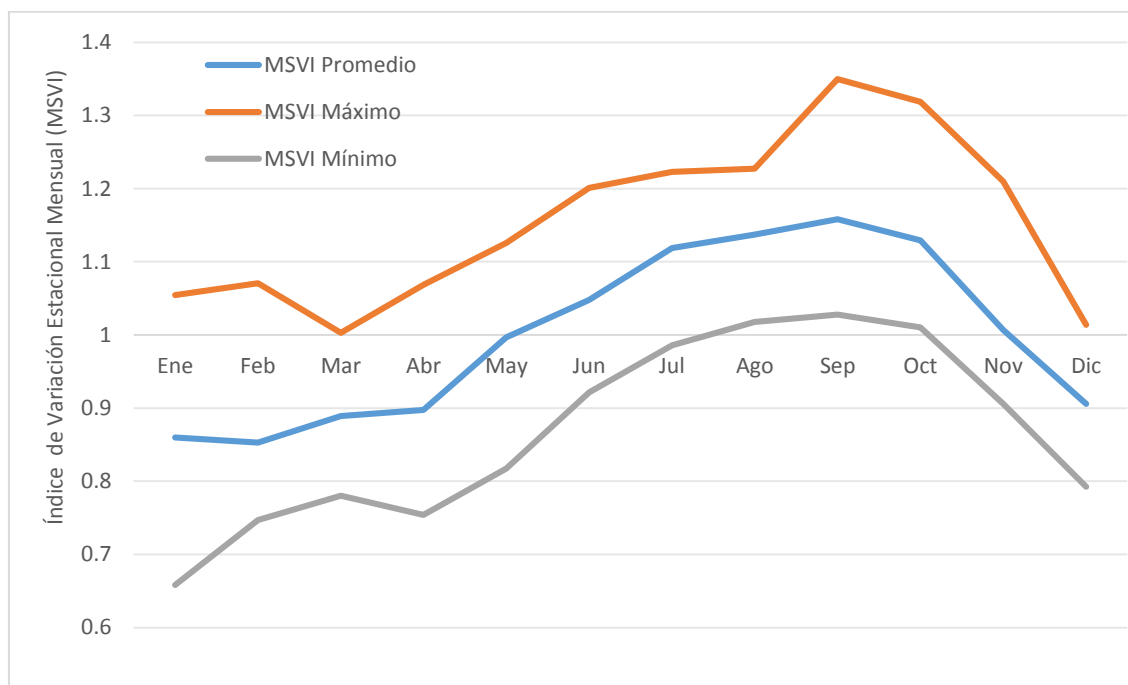
En el Gráfico 2 se presentan los resultados del MSVI para el IEME. Se muestra el valor promedio, máximo y mínimo para cada uno de los doce meses del año para el periodo 1993-2013. Es interesante que, comparado con los resultados de las investigaciones ya citadas hechas para España, Atenas, Londres y Grecia, para Nuevo León se obtienen desviaciones mucho más amplias, lo que es signo de una alta variabilidad en el uso de energía en todos los meses durante el periodo.

Para este análisis es importante considerar el comportamiento del ciclo climático anual en México, de acuerdo con Tejeda-Martínez, et al. (2005) quienes se refieren al trabajo de Domínguez (1941) para la región noroeste del país es: primavera (marzo a junio), verano

(junio a septiembre), otoño (octubre y noviembre) e invierno (diciembre a marzo), pero que aquí se considera igualmente válido para el estado de Nuevo León⁴.

El MSVI muestra que el uso electricidad de Nuevo León es relativamente bajo durante los primeros meses del año, alcanzando su mínimo en el mes de marzo, mes de transición entre el invierno y la primavera. En los meses siguientes se da un aumento gradual en el uso de electricidad, relacionado con el incremento en la temperatura ambiente, que alcanza su punto máximo en septiembre, durante el verano. En los meses siguientes se da una disminución en el uso, alcanzando niveles mínimos en diciembre, mes que da comienzo de la temporada de invierno.

Gráfico 2 Índice de Variación estacional mensual. 1993-2013



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI

Lo anterior hace visible la relación que existe entre el uso mensual de electricidad y la temperatura en el área urbana de Monterrey, lo que coincide con lo encontrado por otras investigaciones, y además como destacan Al-Zayer & Al-Ibrahim (1996), Valor, Meneu, & Caselles (2001) la forma de campana a lo largo del año es un indicio de que normalmente el pico de consumo ocurre durante los meses más cálidos.

2.1.2. Producción manufacturera

Se utiliza el índice de producción manufacturera (IPM) a nivel estatal, que como se mencionó antes constituye una buena aproximación de los valores de la zona metropolitana. En el Gráfico 3, se presenta su comportamiento de enero de 1993 a diciembre de 2013. Se observa

⁴ Las temporadas del año para Nuevo León se definieron: primavera entre marzo y mayo; verano entre junio a septiembre; otoño, octubre y noviembre e invierno de diciembre a febrero.

una tendencia creciente en el tiempo resultado del crecimiento económico, que si se mide considerando el número de establecimientos fue del 14.2% pasando de 10,820 en 1990 a 12,355 establecimientos en 2014⁵. Se observan ciertos picos que ocurren en distintos momentos del año, generalmente en octubre, junio y diciembre. Los descensos se presentan normalmente entre los meses de enero y febrero. Hacia finales de 2008, se observa una fuerte caída, que puede ser atribuible a la crisis económica mundial⁶, mostrando una recuperación de su tendencia hacia comienzos de 2009.

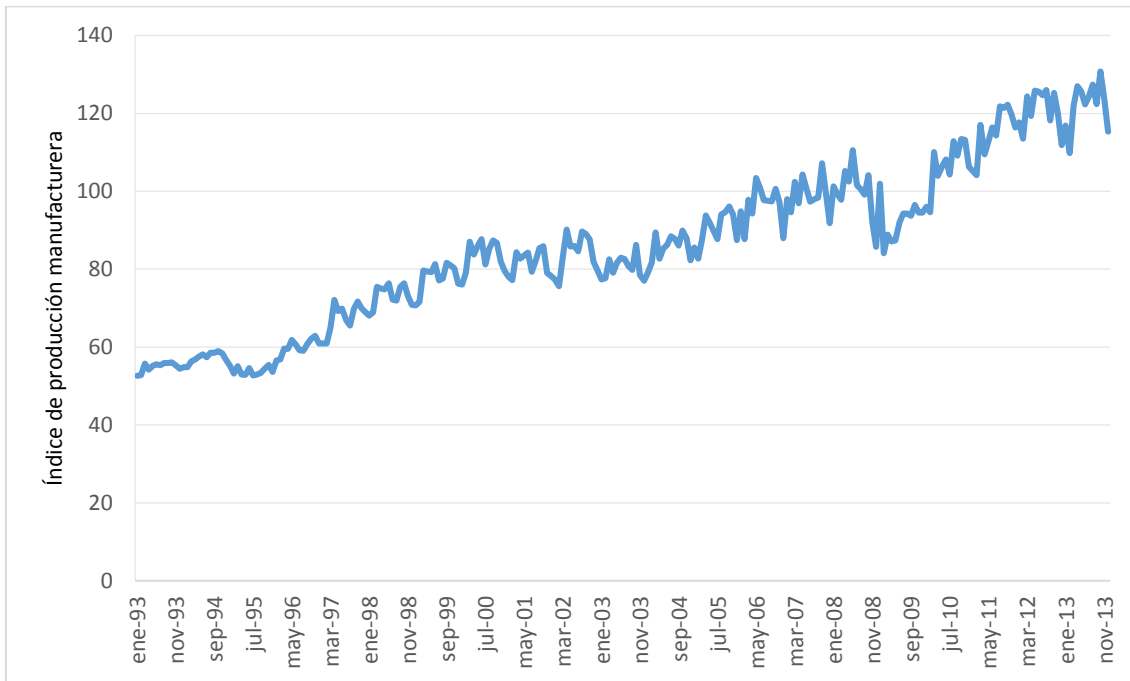
La variable normalmente utilizada para capturar el efecto del crecimiento económico es el producto interno bruto o algún otro indicador similar como el producto nacional bruto (como en Psiloglou, Giannakopoulos, Majithia, & Petrakis (2009)), sin embargo, se decide utilizar el indicador de la actividad manufacturera porque está a frecuencia mensual (mientras que el PIB estatal está a frecuencia anual) y a que históricamente esta actividad ha sido muy importante para el estado y también a nivel nacional. De acuerdo con cifras del Sistema de Cuentas Nacionales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, la actividad manufacturera constituyó en 1993 el 24.21% del PIB estatal, en 2003 el 24.21%, en 2011 el 25.59% y en 2014 representó el 24.18%. Estas cifras permiten sugerir que esta actividad ha mantenido su importancia relativa de manera más o menos estable durante los últimos 20 años. Dentro del PIB nacional de las actividades secundarias, Nuevo León también juega un papel importante, en 1993 representó el 8.65%, en 2003 el 8.53%, en 2011 el 11.12% y finalmente en 2014 el 10.47%. Cabe mencionar que, a lo largo de estas dos décadas, la actividad manufacturera de Nuevo León se ubicó en tercer lugar, después del Estado de México y del Distrito Federal.

Otro aspecto que soporta la inclusión de esta variable es que el sector industrial en México históricamente ha participado con cerca del 60% de las ventas de totales de electricidad (58% en 2013), a pesar de representar menos del 1% del total de usuarios (0.8% en 2013), por lo que se espera que su comportamiento afecte el uso de energía eléctrica del estado. Lo anterior, de acuerdo con información del Sistema de Información Energética con información (SIE) de la Comisión Federal de Electricidad CFE.

⁵ De acuerdo con cifras de los Censo Económicos 1990, 2014 realizados por el INEGI.

⁶ Este efecto crisis se considera en la modelación que se muestra más adelante, pero no resulta significativo y se decide no incluirlo.

Gráfico 3 Indicador Mensual de producción manufacturera Nuevo León 1993-2013



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI

2.1.3. Población y Viviendas

Los registros de población y viviendas particulares habitadas es posible obtenerlos a nivel municipal, pero se optó por manejar el registro estatal, para tener uniformidad con las demás variables. Inicialmente, se contaba registros censales e intercensales reportados por el INEGI para la entidad en 1990, 1995, 2000 y 2010, por lo que para tener un mayor número de observaciones se interpolaron a registros mensuales a partir de la tasa media de crecimiento entre censos y conteos de población, obteniendo series mensuales para el periodo de 1993 a 2010. Para obtener datos de población mensual para los años de 2010 a 2013, se tomaron las tasas de crecimiento poblacional estimadas por la CONAPO para estos años y para el número de viviendas, se tomó la tasa de crecimiento calculada a partir del registro reportado por la Encuesta Intercensal de 2015.

2.1.4. Temperatura

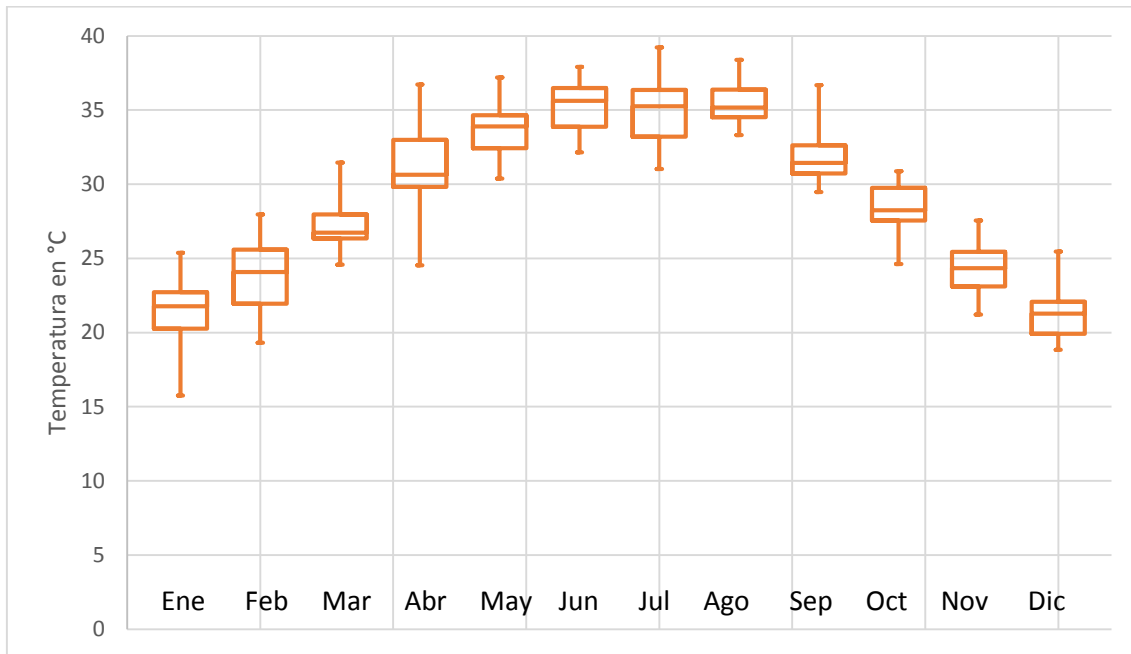
Se cuenta con registros diarios de temperatura mensuales, para el mismo periodo: enero de 1993 a diciembre 2013 de las que se calculan las siguientes variables: temperatura máxima mensual, calculada a partir del promedio de los registros de temperatura máxima diaria; temperatura mínima mensual, a partir del promedio de los registros diarios de temperaturas mínimas y temperatura mensual promedio, obtenida del promedio mensual de los promedios aritméticos entre la temperatura máxima y mínima diaria. Los registros diarios de temperaturas corresponden a los reportados por la estación climatológica automática (EMA) 19052 ubicada en la ciudad de Monterrey.

Considerar estas tres medidas de temperatura es importante, ya que como lo mencionan Valor, Meneu, & Caselles (2001), cada una permite cierto tipo de análisis: la temperatura promedio captura mejor las oscilaciones térmicas y la temperatura máxima y mínima pueden ser más adecuados para analizar picos o valles de consumo de energía. Dado que el objetivo de esta investigación es encontrar la mejor relación entre uso de electricidad y temperatura, se examinan las tres.

Para explorar el comportamiento de la temperatura durante el periodo, se presentan diagramas de caja y bigotes para cada uno de los doce meses y para las tres medidas. En todos se destaca la forma acampanada a lo largo de los meses, igual a la vista anteriormente para el uso de electricidad.

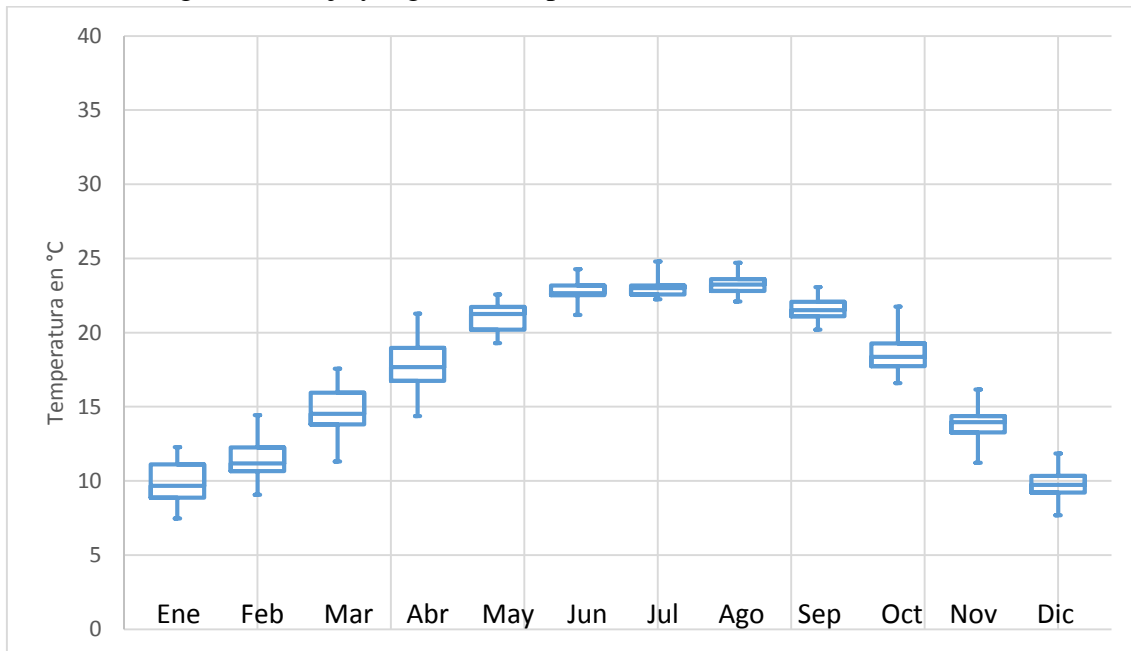
El Gráfico 4 muestra la temperatura máxima mensual a lo largo del periodo y como es de esperarse los mayores valores se presentaron durante los meses de verano, junio, julio y agosto, destacándose el mes de julio. En todos los meses se observa una alta variabilidad, siendo la mayor la del mes abril. Las temperaturas mínimas se presentan en el Gráfico 5, se evidencia igualmente que durante los meses de verano se dieron las temperaturas superiores, siendo en agosto las más altas y menos variables. Por el contrario, durante los meses de primavera, la temperatura fue más volátil, particularmente en los meses de marzo y abril. En cuanto a la temperatura promedio, Gráfico 6, los meses de primavera fueron los más variables, contrario a los meses de otoño y de igual manera se resaltan las mayores temperaturas entre junio y agosto.

Gráfico 4 Diagrama de caja y bigotes. Temperatura máxima mensual. Nuevo León 1993-2013



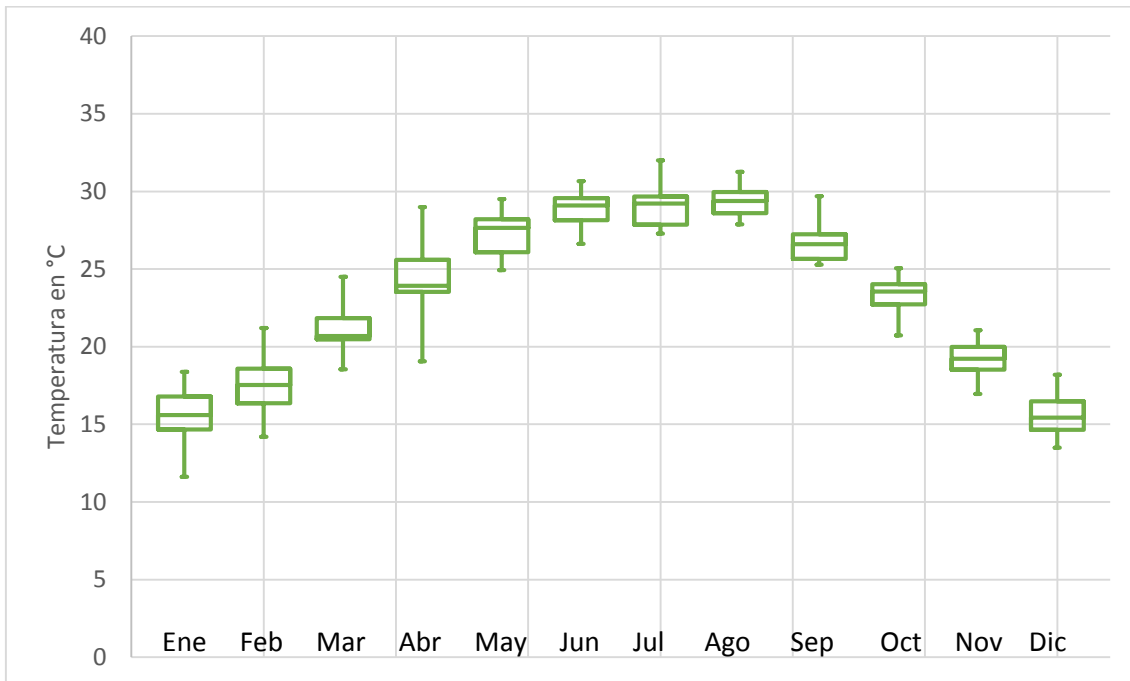
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional.

Gráfico 5 Diagrama de caja y bigotes. Temperatura mínima mensual. Nuevo León 1993-2013



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional.

Gráfico 6 Diagrama de caja y bigotes. Temperatura promedio mensual. Nuevo León 1993-2013



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional.

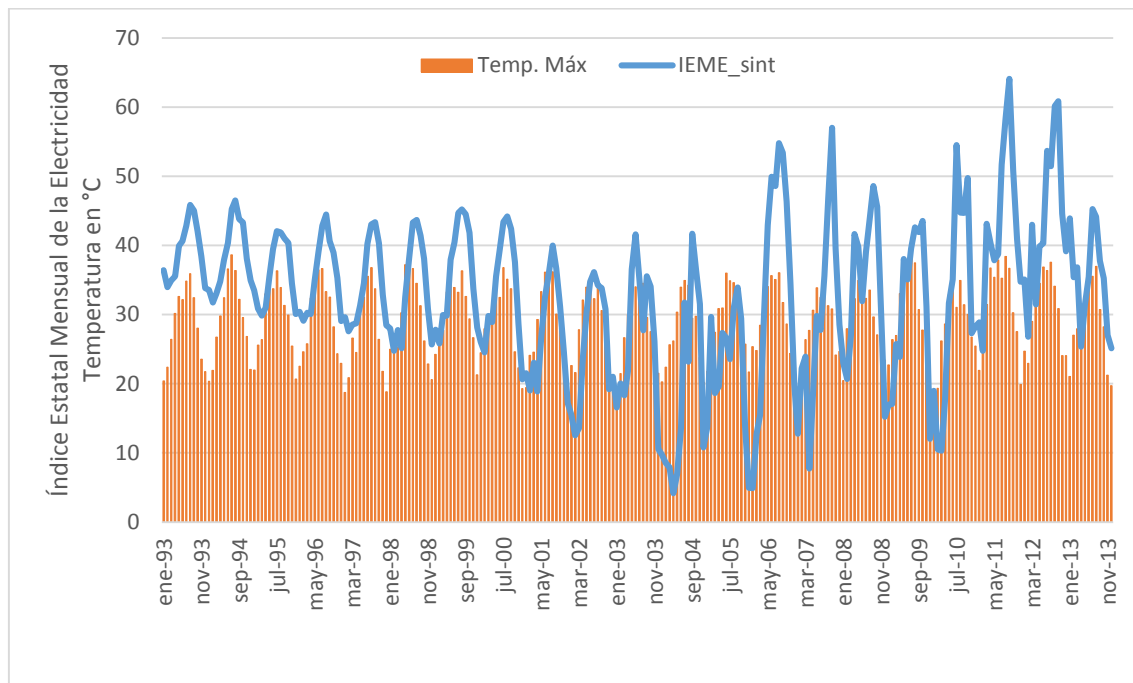
De lo presentado en los gráficos anteriores, y tomando como referencia las temperaturas promedio se puede observar que en el área urbana predominan las temperaturas medias y altas⁷, lo que apunta a que las temperaturas máximas pueden afectar de manera más directa y prolongada el uso de la electricidad que las temperaturas mínimas, debido al uso masivo de aparatos de climatización.

Una manera de ahondar un poco más en la relación, es analizando su comportamiento de manera conjunta. En el Gráfico 7 se presenta en azul el IEME sin tendencia, para poder ver su comportamiento de manera más clara, y la temperatura máxima mensual registrada en el periodo⁸, y se observa que los picos de uso en el IEME coinciden en su mayoría con los meses cuando se experimentan mayores temperaturas, lo que sugiere la existencia de una fuerte relación entre estas variables.

⁷ Partiendo de las temperaturas promedio, se definieron como temperaturas altas, las mayores al percentil 70 que corresponden a 27°C; temperaturas medias a partir del percentil 40 al 60, 21.8°C a 25.5°C y temperaturas bajas las ubicadas en el percentil 10 que corresponde a 13.3°C para el periodo de 1993-2013.

⁸ Se realizó el mismo ejercicio con las temperaturas mínimas y promedio, obteniéndose resultados similares.

Gráfico 7 Índice Estatal Mensual de la Electricidad y Temperatura promedio máxima mensual. Nuevo León. 1993-2013



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional y de datos de INEGI

Para indagar sobre esto de manera más específica, se introduce el concepto de temperatura extrema. En la literatura sobre los efectos del clima extremo sobre la salud humana⁹ (Sherwood & Huber, 2010; Bouchama & Knochel, 2002), se ha establecido como umbral los 37°C-38°C (100°F), por lo que aquí se define como la temperatura igual o superior a los 38°C, valor que es cercano al percentil 90, calculado en 37°C. Este es otro criterio utilizado en varios documentos¹⁰ (Miller, Hayhoe, Jin, & Auffhammer, 2007; García, Tejeda, & Jáuregui, 2008) como umbral de temperatura, pero se elige el primero bajo el supuesto que temperaturas superiores a este umbral (38°C) al tener efectos sobre la salud y el confort

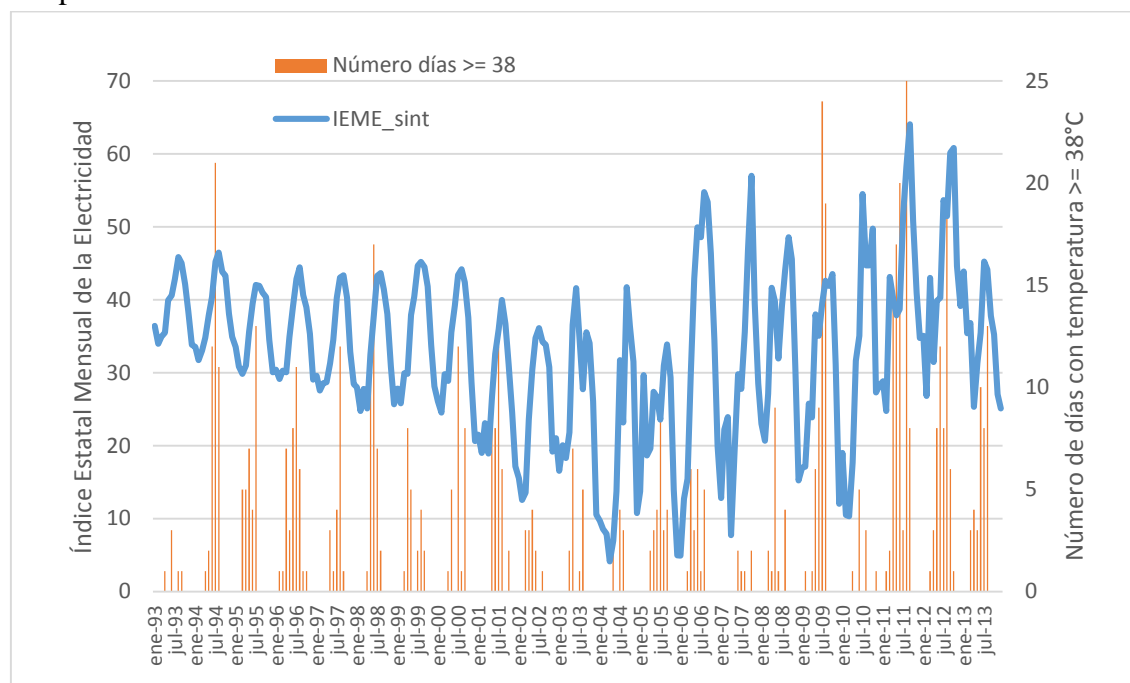
⁹ De acuerdo con Sherwood & Huber (2010), los humanos y la mayoría de los mamíferos poseen una temperatura corporal interna cercana a los 37°C (98.6°C) y una exposición prolongada a temperaturas superiores a los 35°C (95°F) puede inducir a problemas de salud, debido a que el cuerpo es incapaz de enfriarse con temperaturas exteriores superiores a las del interior. Desde un punto de vista clínico Bouchama & Knochel (2002) establecen el punto de corte para un golpe de calor (que puede ser letal) una temperatura interna de 40°C (104°C), temperaturas inferiores ocasionan una condición médica menos grave conocida como agotamiento por calor.

¹⁰ Austria & Bandala (2016) mencionan que, para México, el Centro Nacional de Prevención y Atención de Desastres (CENAPRED) sugiere también como umbral el percentil 90, esto para el diseño de mapas de riesgo de olas de calor. También en Magaña (2013) se menciona el percentil 90 de la temperatura máxima, como el umbral por encima del cual los valores son tan altos que tienen sólo el 10% de probabilidad de ocurrir de acuerdo a los datos del pasado reciente.

ejercen presión adicional sobre el uso de electricidad, que es el interés central en esta investigación.

Para analizar la relación entre temperatura extrema y uso de electricidad, se hizo un conteo del número de días por mes en los que se registró un evento de este tipo. En el Gráfico 8, se muestra junto con el IEME sin tendencia. Se observa que la mayoría de estos eventos coinciden con picos en el uso de electricidad en el periodo, debido a que ocurrieron en su mayoría durante los meses de junio, julio y agosto.

Gráfico 8 Índice Estatal Mensual de la Electricidad y Número de días por mes con temperatura extrema. Nuevo León.1993-2013



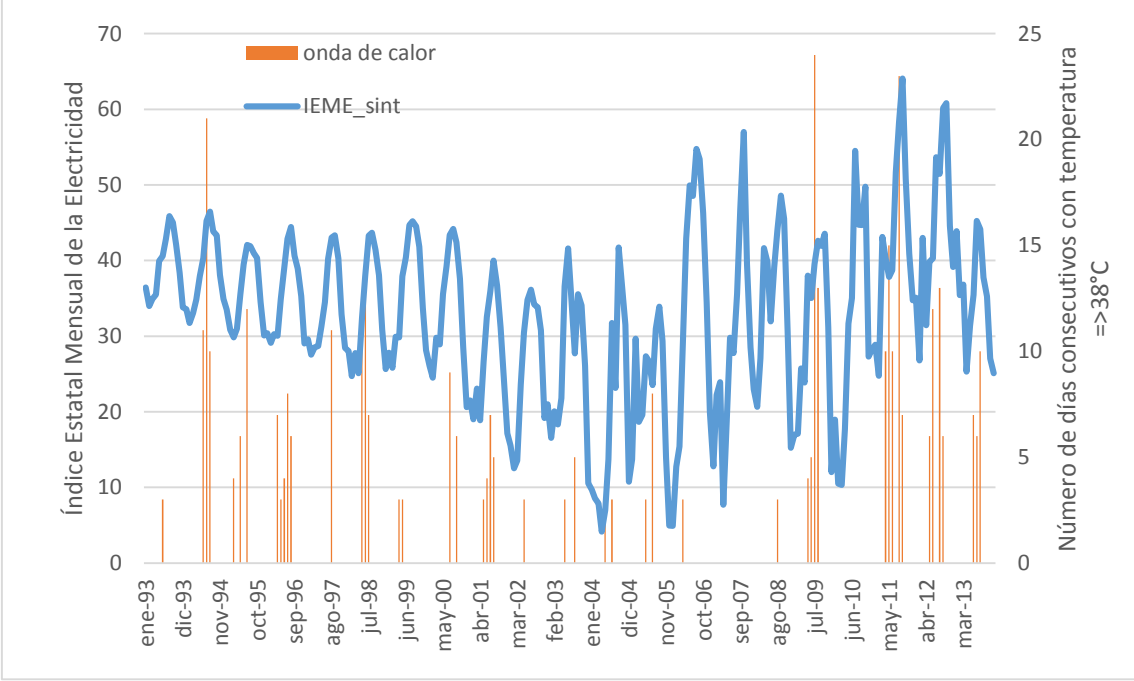
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional y de datos de INEGI

Otro evento climatológico extremo que ha demostrado tener impactos negativos sobre la economía y la salud humana son las ondas u olas de calor (Meehl & Tebaldi, 2004). De acuerdo con García, Tejeda, & Jáuregui (2008) no existe una definición oficial por parte de la Organización Meteorológica Mundial, debido a que varían en carácter e impacto aún en una misma localidad. Estos eventos se entienden como periodos o días consecutivos inusualmente cálidos. No existe tampoco un consenso para la longitud de dicho periodo, en Ruddell, Harlan, Grossman-Clarke, & Buyantuyev (2010), en su estudio para Phoenix, US la definen como periodos de 4 días. En García, Tejeda, & Jáuregui (2008), en su análisis para Mexicali, México, tomaron un solo día con temperatura superior a 44°C. En el Reino Unido la Oficina Meteorológica considera dos o más días consecutivos con temperatura de 30°C durante el día y 15°C o más en la noche. La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOOA) de los Estados Unidos considera para el cálculo de estos umbrales no sólo la

temperatura máxima sino la humedad del ambiente, establece que índices de calor entre 39°C-51°C (103°F-124°F) como peligrosos y valores iguales o superiores a 51.6°C (125°F) como extremadamente peligrosos. Aquí dada la extensión de la serie (21 años) y al comportamiento no tan extremoso visto en los promedios mensuales, se tomarán como periodos de 3 o más días con temperaturas extremas, es decir, con temperaturas iguales o superiores a 38°C.

Su relación con el IEME sin tendencia, se muestra en el Gráfico 9. La ola de calor por mes fue calculada a partir del conteo del número de días donde se registró temperatura extrema, seleccionando los casos donde ocurrieron tres o más días consecutivos y sumándolos para obtener así un conteo por mes. Se obtiene un resultado similar al del Gráfico 8, donde la mayoría de los registros de ondas de calor ocurren durante los meses de verano por lo que coinciden con los picos en el uso de electricidad.

Gráfico 9 Índice Estatal Mensual de la Electricidad y número días consecutivos con temperatura extrema. Nuevo León. 1993-2013



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional y de datos de INEGI

Resumiendo las relaciones hasta aquí exploradas entre las variables, se presenta en primera instancia la matriz de correlaciones, Tabla 3 entre todas las variables presentadas. Se observan altas y positivas correlaciones entre el IEME y las variables de Población, Viviendas y Producción Manufacturera debido a que las dos primeras a lo largo del periodo capturan la tendencia creciente tanto del IEME como del índice de producción manufacturera; con las demás variables también existe una correlación positiva, pero de menor magnitud.

Se identifican igualmente altas correlaciones (mayores a 0.8) entre las variables climáticas, por lo que en la modelación no se incluirán de forma simultánea sino de manera separada, evitando así problemas de multicolinealidad.

Tabla 3 Matriz de correlaciones

	IEME	Pob	Viv	Prod_M~f	Tempmax	Tempmin	Tempprom	Dias_t~t	onda
IEME	1.0000								
Pob	0.9260	1.0000							
Viv	0.9324	0.9944	1.0000						
Prod_Manuf	0.9203	0.9562	0.9521	1.0000					
Tempmax	0.2707	0.0544	0.0602	0.1354	1.0000				
Tempmin	0.2869	0.0526	0.0515	0.1403	0.9436	1.0000			
Tempprom	0.2899	0.0626	0.0645	0.1488	0.9862	0.9848	1.0000		
Dias_t_ext	0.2288	0.1145	0.1313	0.1349	0.6504	0.5240	0.5986	1.0000	
onda	0.1732	0.0783	0.0969	0.0804	0.5215	0.4128	0.4767	0.9400	1.0000

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional y de datos de INEGI

2.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN

Se reportan en la Tabla 4 las distintas regresiones estimadas por OLS en una estructura doble logarítmica, con el objetivo de analizar los resultados en términos de elasticidades. Se introducen una a una las variables para encontrar la relación que funciona mejor estadísticamente y se adicionaron una variable de tendencia $t=1,2...T$ y una variable dummy para los meses de verano, que toma el valor de uno para los meses junio, julio, agosto y septiembre y cero en caso contrario

En las regresiones (1) a (3), se intentó capturar con distintas variables el componente de tendencia de la electricidad, siendo la población y las viviendas las que mayor ajustaron. Ante un incremento del 10% en el número de habitantes, el IEME se incrementa 30%; y ante un aumento en el número de viviendas del 10%, el IEME se incrementa en 19.5%. Este mayor efecto de la población puede tener explicación en el hecho de que el uso de electricidad será diferente en una vivienda unipersonal que en una vivienda familiar¹¹, por lo que la medición por medio de las viviendas puede subestimar el verdadero uso de electricidad.

En la regresión (4), se incluye el índice de producción manufacturera (IPM) que tiene también un efecto significativo y positivo sobre el IEME, por un incremento del 10% en el IPM, el IEME se incrementa en 13.6%, lo que se explica por la relación que existe entre la mayor producción industrial y la necesidad de energía eléctrica como insumo para dicha producción.

En las regresiones (5) a (15) se introdujeron una a una las variables climáticas, relacionadas con el componente estacional del uso de la electricidad, todas resultan estadísticamente significativas en las distintas especificaciones, con un efecto positivo sobre el uso de electricidad y con buen ajuste. En todos los casos se realizan las regresiones de dos maneras,

¹¹ El 44.4% de las viviendas particulares en Nuevo León tienen entre 3 y 4 ocupantes, de acuerdo con cifras del Censo de población y vivienda 2010.

la primera considerando la población y el índice de producción manufacturera y la segunda, considerando las viviendas en lugar de la población.

Las regresiones (5) y (6) consideran la dummy para los meses de verano, se obtuvo un efecto positivo y bastante importante. Durante los meses de verano el IEME es superior 1.6%, en comparación con el resto del año. Las demás variables también resultan significativas y se reduce de manera sustancial el efecto del IPM quedando en 3.9% con la población y 4.3% en el caso de las viviendas.

Las regresiones (7) y (8) incluyen las variables: población (viviendas), índice de producción manufacturera y temperatura máxima, todas arrojan significativas y con un efecto positivo sobre el uso de electricidad. Ante un incremento del 10% en las temperaturas máximas, el IEME se incrementa en 3.9% (y 3.8%). Las regresiones (9) y (10) incluyen las variables de temperatura mínima, población (viviendas para (10)) e índice de producción manufacturera. Esta especificación presenta un ligero mayor ajuste que la anterior. Ante un incremento del 10% en las temperaturas mínimas, el IEME aumenta 2.6% (versus 2.2%). Las regresiones (11) y (12) incluyen la variable de temperatura promedio, población (viviendas) e índice de producción manufacturera. Naturalmente, su efecto se encuentra entre el de las otras dos temperaturas, ante un incremento del 10% en la temperatura promedio, el IEME se incrementa 3.5% (y 3.4%) y su nivel de ajuste es igual al obtenido con las temperaturas mínimas.

Tal y como podría suponerse, la mayor presión sobre el uso de electricidad es la que ejerce la temperatura máxima, sin embargo, el efecto de un incremento en las temperaturas mínimas es también bastante importante. Esto puede explicarse, como lo plantean Moral-Carcedo & Vicéns-Otero (2005), por la existencia de temperaturas umbral a partir de los cuales es necesario el uso de aplicaciones de confort como aires acondicionados y ventiladores. De acuerdo con su planteamiento, la respuesta de la demanda de electricidad depende especialmente de las características climáticas del área geográfica que a su vez condicionan, los equipos instalados y las condiciones bajo las que entrarán en funcionamiento. En el caso de la ciudad de Monterrey, las temperaturas generalmente son cálidas y exigen el uso de sistemas de enfriamiento y ventilación por lo que incrementos en dichas temperaturas ejercen una presión adicional sobre el uso de electricidad. En cuanto a las temperaturas mínimas, por lo general se registran durante la noche o la madrugada cuando la mayoría de las personas están en sus casas, por lo que mayores temperaturas llevan al necesario uso de las aplicaciones de confort mencionadas lo que hace que su influencia sobre el uso de electricidad sea también bastante importante.

Las regresiones (13) y (14) usan como variable climática los eventos de temperatura extrema, obteniendo un efecto un poco más alto cuando es modelado con la población, que con las viviendas. Por un incremento del 10% en la ocurrencia de este tipo de eventos (i.e. días con temperatura igual o superior a 38°C) el IEME se incrementa 0.46% y 0.43%.

Las regresiones (15) y (16) incluyen la variable ola de calor. Su efecto sobre el IEME es positivo y significativo, por lo que un incremento del 10% en la ocurrencia de ondas de calor presiona el uso de electricidad en 0.4% (cuando se modela con la población o con las viviendas).

Con estos resultados se comprueba que, aunque medida de distintas maneras, la temperatura se mantiene como una variable climática importante para explicar el uso de la electricidad. Las variables relacionadas con eventos de temperatura extrema y olas de calor también parecen tener un efecto significativo sobre este uso, pero como se dijo antes, este resultado puede derivar de que estos eventos ocurrieron durante los meses más cálidos, es decir, los de mayor uso. Este resultado puede encontrar explicación en que la frecuencia mensual del IEME no permite aislar el efecto que días con estas características puedan tener sobre el uso de electricidad, tal vez, al realizar el análisis de electricidad con información diaria sea posible encontrar alguna relación.

Tabla 4 Tabla de regresiones log-log. Variable dependiente: logaritmo natural del Índice Estatal Mensual de la Electricidad, 1993-2013. N=252.

Regresores en ln	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
Tendencia	0.31 (23.35)															
Población		3.03 (41.11)			2.21 (11.46)		2.49 (12.7)		2.69 (14.43)		2.6 (13.74)		2.05 (9.13)		1.93 (8.39)	
Viviendas			1.95 (41.07)			1.36 (11.97)		1.49 (12.8)		1.16 (14.72)		1.56 (13.93)		1.24 (9.31)		1.18 (8.63)
IPM				1.36 (37.57)	0.39 (4.41)	0.43 (5.4)	0.24 (2.65)	0.32 (3.89)	0.14 (1.68)	0.23 (2.89)	0.18 (2.06)	0.26 (3.3)	0.45 (4.4)	0.51 (5.36)	0.52 (4.96)	0.56 (5.8)
D: Verano					0.16 (9.81)	0.16 (11.88)										
Temp. Max							0.39 (11.83)	0.38 (11.54)								
Temp. Min									0.26 (13.94)	0.22 (13.85)						
Temp. Promedio											0.35 (13.16)	0.34 (12.97)				
Días con temp. Extrema													0.046 (5.86)	0.043 (5.15)		
Ola de calor															0.04 (4.51)	0.04 (4.18)
R²	0.69	0.87	0.87	0.85	0.92	0.93	0.92	0.92	0.93	0.93	0.93	0.93	0.90	0.90	0.89	0.89
F	545.1	1690.3	1686.6	1411.3	1004.5	1039.3	1009.4	1016.2	1162.7	1185.7	1103.3	1117.5	712.2	720.4	672.8	682.7

En paréntesis se muestra el estadístico t.

Todas los regresores están transformados por medio del logaritmo natural.

Población y Viviendas expresado en miles de personas.

Dummy Verano: toma el valor de 1 para los meses: junio, julio, agosto y septiembre; 0 en caso contrario.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional y de datos de INEGI

3. ANÁLISIS HISTÓRICO DE LAS TEMPERATURAS DE LA ZMM Y ÁREAS RURALES CERCANAS.

Para abordar uno de los objetivos planteados, se realizó el análisis histórico de las temperaturas registradas en el área urbana de Monterrey y dos áreas rurales circundantes. De las comparaciones y observaciones obtenidas en este apartado se procede en la siguiente sección a diagnosticar el fenómeno de isla de calor.

3.1.DATOS EMPLEADOS

Se cuenta con registros diarios de temperatura máxima, temperatura mínima, y promedio de tres estaciones climatológicas automáticas (EMA), como se puede ver en la Ilustración 1: estación 19016- El Cuchillo, estación 19052-Monterrey y 19054- La Rinconada del 01 de diciembre de 1953 al 30 de noviembre de 2013, ubicadas en distintos puntos del estado y a diferentes altitudes:

- La estación Monterrey, ubicada en la ciudad de Monterrey a 515 metros sobre el nivel del mar (msnm),
- La estación El Cuchillo, ubicada en el municipio de China, Nuevo León. Se encuentra a 145 msnm, y
- La estación La Rinconada, ubicada en el municipio de García, Nuevo León, a 1000 msnm.

Las localizaciones donde están ubicadas las estaciones El Cuchillo y La Rinconada, serán referidas como áreas rurales, mientras que la estación Monterrey, como área urbana.

3.2.Observaciones por décadas

Para realizar el análisis histórico de esta información, se definieron décadas para cada una de las estaciones climáticas, como se muestra en la Tabla 5. Este análisis se realiza tanto para las temperaturas máximas como mínimas y promedio. El número de observaciones reportadas corresponde al número de registros de temperatura promedio por década. Para el caso de la estación Monterrey y El Cuchillo, el total de los registros difieren un poco entre tipos de temperatura. En Monterrey el total de registros de temperaturas máximas es 21,402 y temperaturas mínimas es 21,419. En El Cuchillo, los registros de temperaturas máximas son 20,617, los de las mínimas si corresponden con el total reportado. Para La Rinconada, los totales coinciden para todos los tipos de temperaturas.

Ilustración 1 Ubicación estaciones meteorológicas: El Cuchillo – 19016, Monterrey - 19052, 19054 La Rinconada



Fuente: Elaboración propia a partir de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional y <http://www.movimet.com/wp-content/uploads/2013/10/nuevoleon.jpg> -consultado el 17/05/2016.

Tabla 5 Definición de décadas para las tres estaciones climáticas

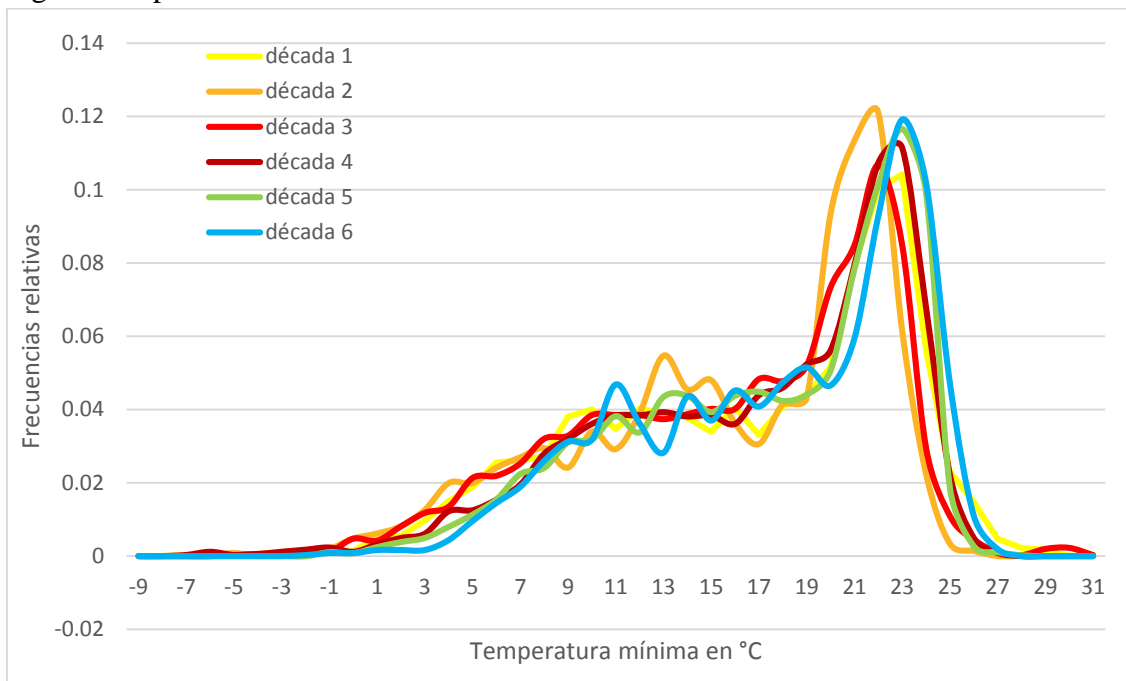
Década	Fechas	Número de Observaciones		
		Estación Monterrey	Estación El Cuchillo	Estación La Rinconada
Década 1	01-dic-1953 a 30-nov de 1963	3,600	3,652	3,590
Década 2	01-dic-1963 a 30-nov de 1973	3,563	3,532	3,620
Década 3	01-dic-1973 a 30-nov de 1983	3,559	3,621	3,516
Década 4	01-dic-1983 a 30-nov de 1993	3,436	3,225	3,284
Década 5	01-dic-1993 a 30-nov de 2003	3,612	2,942	3,560
Década 6	01-dic-2003 a 30-nov de 2013	3,650	3,652	3,527
Total		21,420	20,624	21,097

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional.

Temperaturas mínimas

Se construyó la distribución de frecuencias relativas de las temperaturas mínimas registradas en cada una de las décadas para las tres estaciones. En las temperaturas mínimas en el área urbana, Gráfico 10, se observa un desplazamiento progresivo hacia la derecha a lo largo de las décadas, es decir, que en décadas recientes la concentración de frecuencias se ubica en temperaturas mínimas más altas.

Gráfico 10 Área urbana de Monterrey. Distribución de frecuencias de temperaturas mínimas registradas por década.



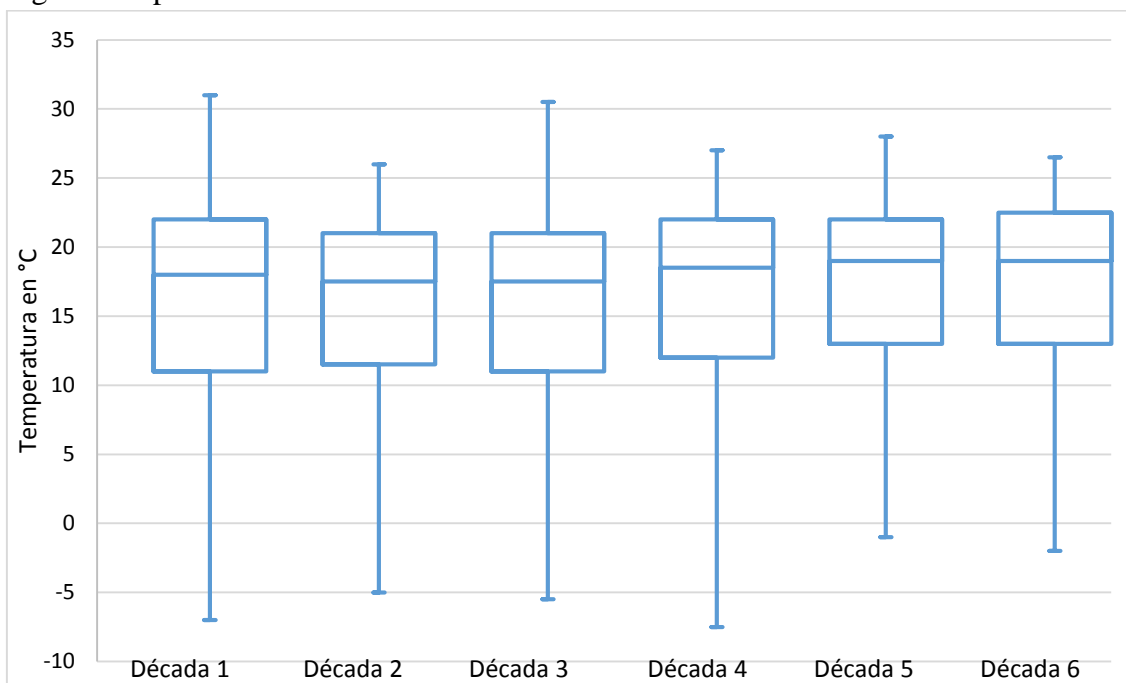
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional.

El Gráfico 11, muestra la misma información en un diagrama de caja y bigotes que permite realizar una comparación de las distribuciones década por década de manera más directa. Cada diagrama señala los valores: mínimo, cuartil 1, mediana, cuartil 3 y máximo para cada década, donde el tamaño de caja va del cuartil 2 al 3, concentrando el 50% de los datos, y dividido por una línea horizontal que indica la mediana, la extensión del bigote inferior representa el valor mínimo y la del bigote superior, el valor máximo.

Para el área urbana (Gráfico 11), se observa que la distribución no es simétrica, el tamaño de la caja se ha reducido lo que da cuenta del desplazamiento observado en la distribución, principalmente en las dos últimas décadas y se destaca que este desplazamiento ha ocurrido por un incremento de 2°C en el cuartil 1 (entre la década 1 y la década 6), mientras que en el cuartil 3 sólo ocurrió un incremento de 0.5°C en la última década. Se resalta también la tendencia creciente de la mediana a partir de la década 3, pasando de 17.5°C a 19°C en la última década. Los valores extremos, tanto mínimos como máximos, fueron menos extremos durante las dos últimas décadas, en comparación con las demás.

Lo anterior, apunta a que el área urbana ha experimentado un crecimiento gradual en estas temperaturas.

Gráfico 11 Área urbana de Monterrey. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas mínimas registradas por década.

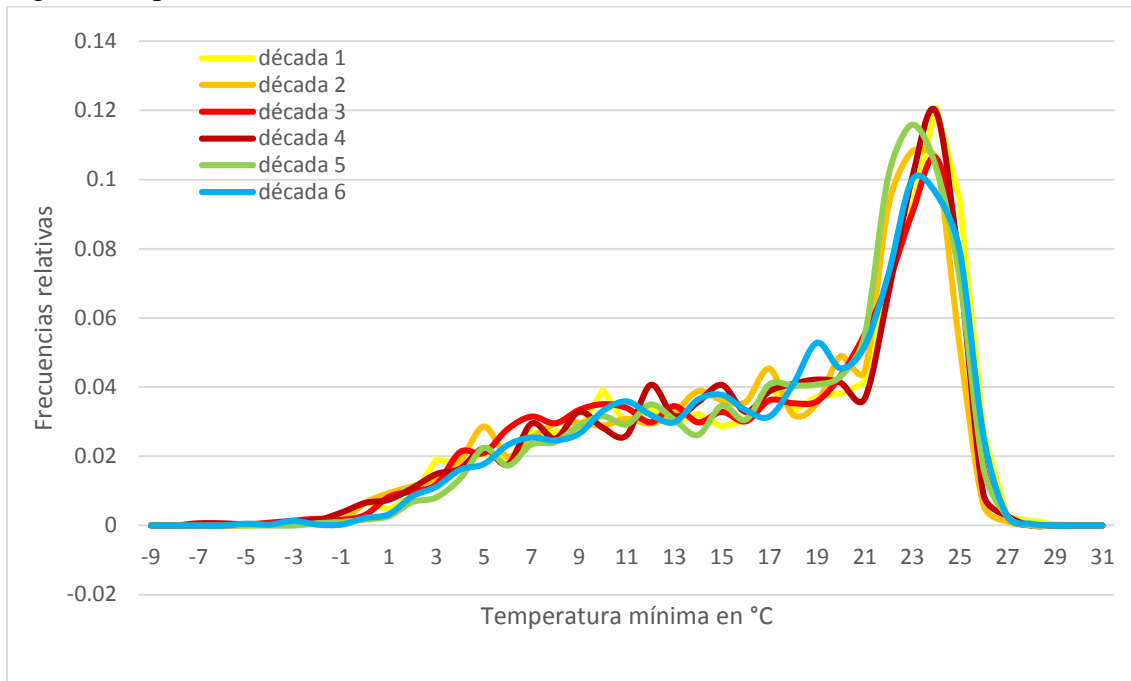


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional.

En el área rural El Cuchillo, Gráfico 12, no logra observarse el desplazamiento visto para el área urbana, por el contrario, parece que no ha habido cambios significativos a lo largo de las décadas, no obstante, se destaca la menor concentración de los registros (menor abultamiento) durante la última década, entre los 21°C y los 26°C.

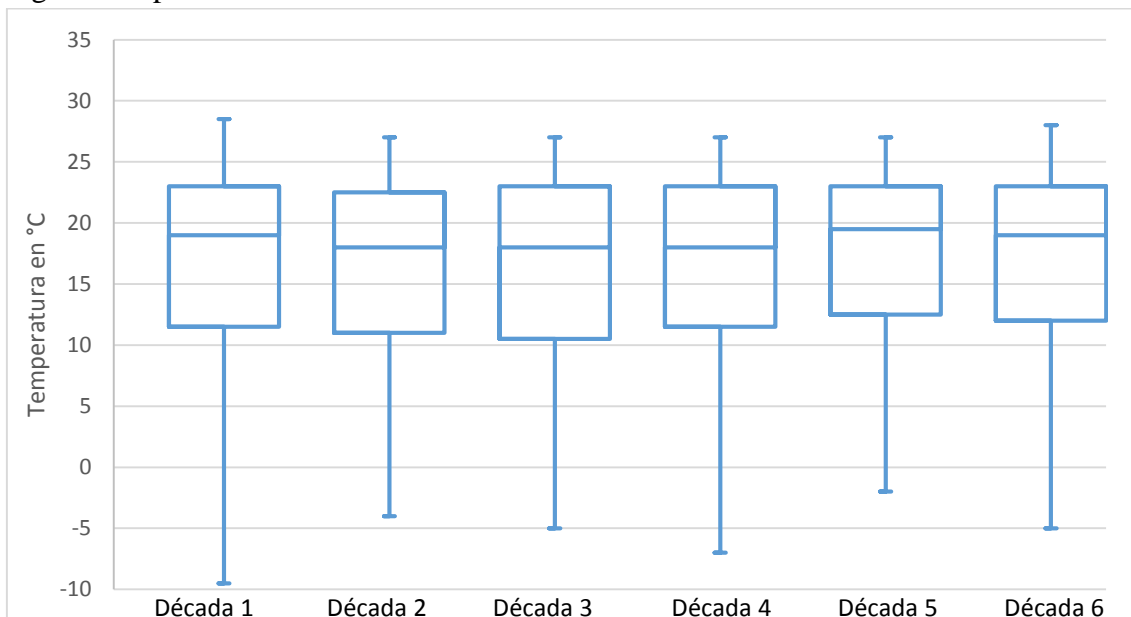
En el Gráfico 13, se presenta el diagrama de caja y bigotes correspondiente. Se observa que las distribuciones no son simétricas y contrario al área urbana, no se observan muchas variaciones entre una década y otra. Se resalta que el valor más mínimo se registró en la década 1 y que el cuartil 1 presentó un incremento de 0.5°C entre la década 1 y la década 6, pero disminuyó entre la década 5 y la década 6, también en 0.5°C. Por otro lado, el cuartil 3 ha permanecido invariable a lo largo de las décadas, sólo en la década 2 descendió 0.5°C y en la mediana no se observa ninguna tendencia. Esto permite sugerir que las temperaturas mínimas en el área rural El Cuchillo han sido bastantes estables.

Gráfico 12 Área rural El Cuchillo. Distribución de frecuencias de temperaturas mínimas registradas por década



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional.

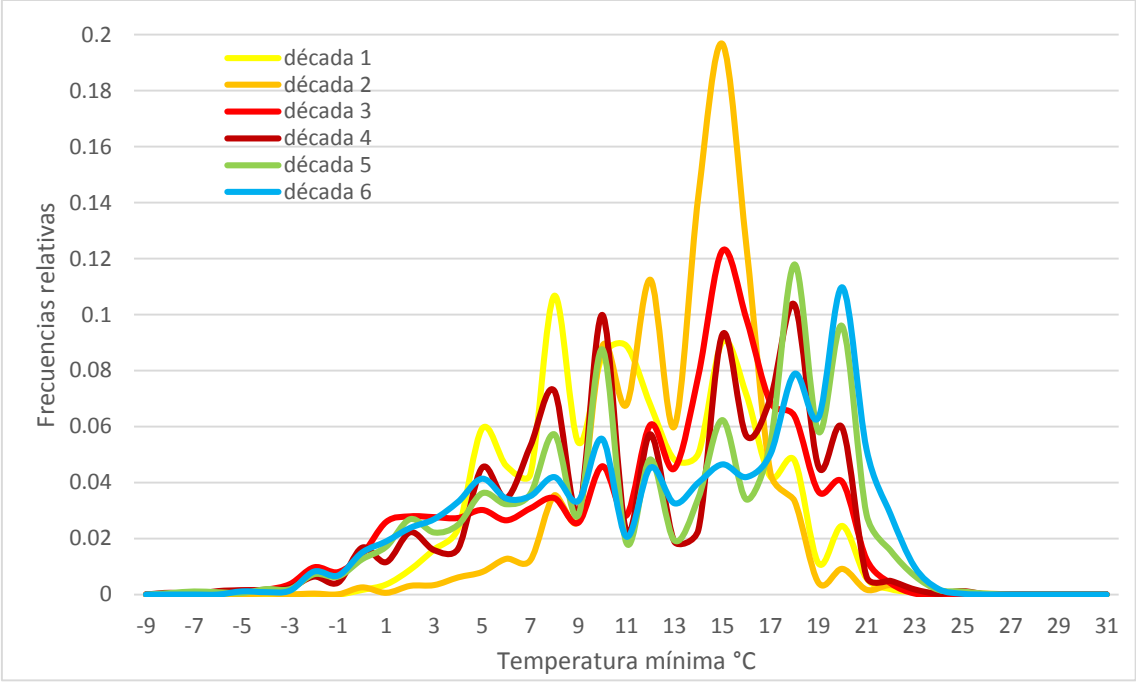
Gráfico 13 Área rural El Cuchillo. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas mínimas registradas por década



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional.

En el área rural La Rinconada, Gráfico 14, el comportamiento de las temperaturas parece más errático que en las otras dos ubicaciones, debido a la mayor concentración de las frecuencias (principalmente la década 2), sin embargo, la frecuencia más alta para la última década si resulta similar para todas las estaciones, alrededor del 10%. También se destaca que las temperaturas mínimas registradas han sido menores, en comparación con las otras dos zonas. Se observa, al igual que en el área urbana, un desplazamiento en décadas recientes de las frecuencias hacia temperaturas mínimas superiores, pero de manera más dispersa.

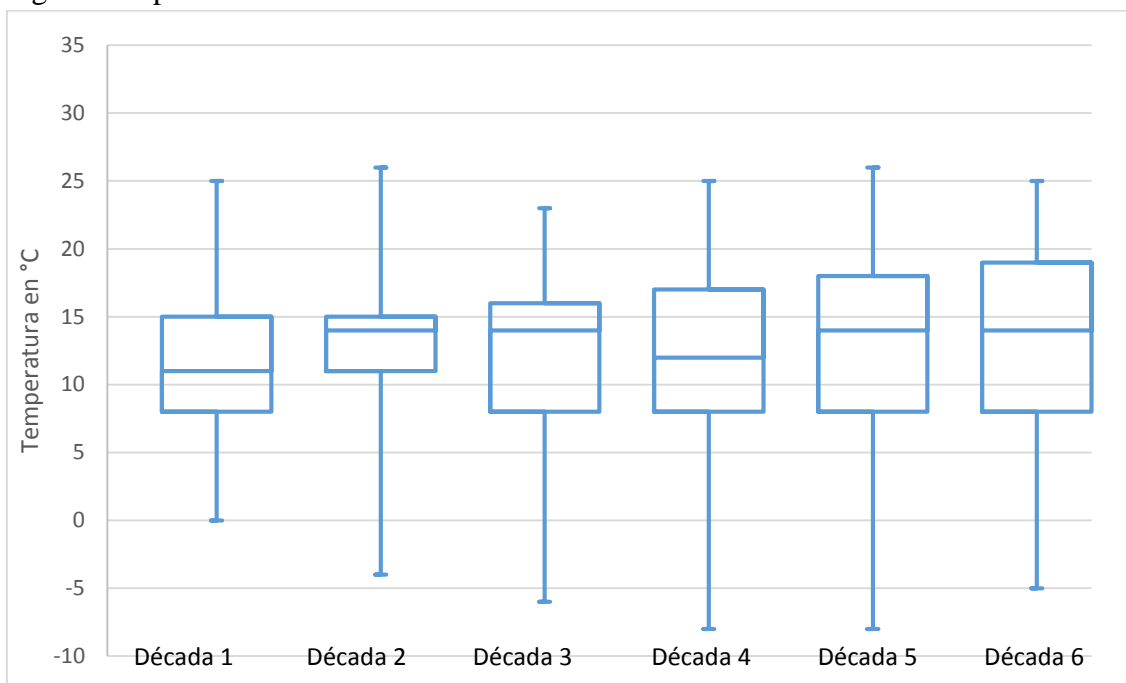
Gráfico 14 Área rural La Rinconada. Distribución de frecuencias de temperaturas mínimas registradas por década



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

En el diagrama de caja y bigotes, Gráfico 15 se observa una mayor variabilidad entre décadas (distintos tamaños de las cajas) que en los casos anteriores, presentando una distribución casi simétrica en la última década. Se destaca una mayor dispersión en los registros a partir de la década 2, que ha aumentado gradualmente hasta la última década, y también un incremento progresivo de las temperaturas correspondientes al cuartil 3, pasando de 15°C en la década 1 a 19°C en la década 6, a pesar de esto no es posible observar alguna tendencia en la mediana de las distribuciones, el mayor cambio se dio entre las décadas 4 y 5, con un incremento de 2°C. En cuanto al cuartil 1, ha permanecido invariable desde la década 3. El comportamiento descrito, indica que las temperaturas mínimas del área rural La Rinconada han presentado un crecimiento.

Gráfico 15 Área rural La Rinconada. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas mínimas registradas por década



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

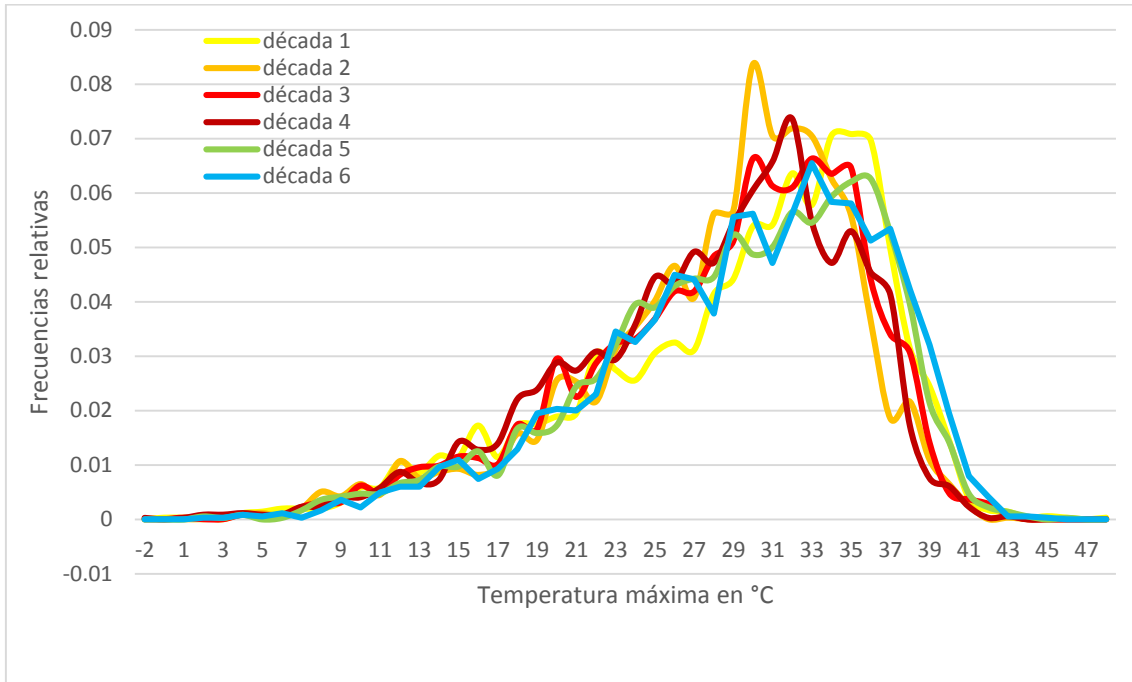
Temperaturas máximas

Al igual que para las temperaturas mínimas, se realizó una distribución de frecuencias de las temperaturas máximas registradas para las décadas en cada uno de los casos. Para el área urbana, Gráfico 16, en relación a las dos décadas más recientes se observa un desplazamiento hacia la derecha, es decir, hacia temperaturas máximas superiores, similar al detectado en las temperaturas mínimas. Además, una menor concentración de las frecuencias.

En el Gráfico 17 se presentan los diagramas de caja y bigotes. Es posible distinguir dos comportamientos: de la década 1 a la 4 y las dos últimas décadas. En las primeras, parece que las temperaturas experimentan un decrecimiento, pasando la mediana de 30.5°C a 29 °C y los cuartiles también ubicándose en temperaturas inferiores (el cuartil 1, 0.5°C menos y el cuartil 3, 1.5°C menos). Las dos últimas décadas son muy similares, se trata de distribuciones simétricas que concentran el 50% de los registros entre los 25°C y los 35°C. Comparando estas últimas con la década 4, parecen experimentar un calentamiento, que ubica el cuartil 1, 1.5°C por encima, la mediana, 1°C y el cuartil 3, 2°C más caliente.

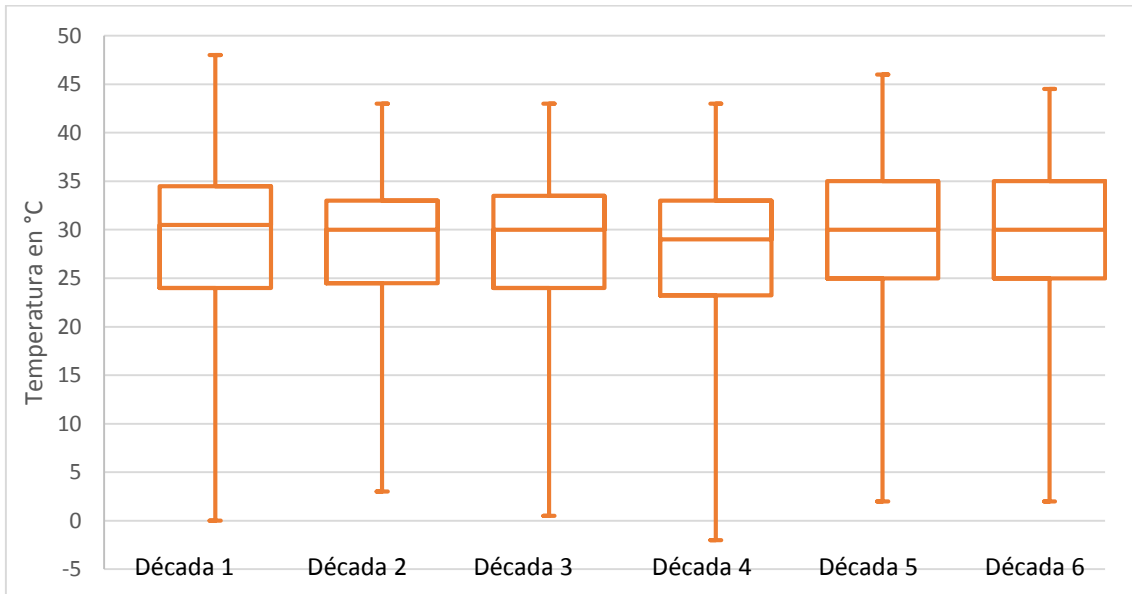
Lo anterior, abona evidencia a que el área urbana ha experimentado un crecimiento de su temperatura en las últimas décadas.

Gráfico 16 Área urbana de Monterrey. Distribución de frecuencias de temperaturas máximas registradas por década.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional.

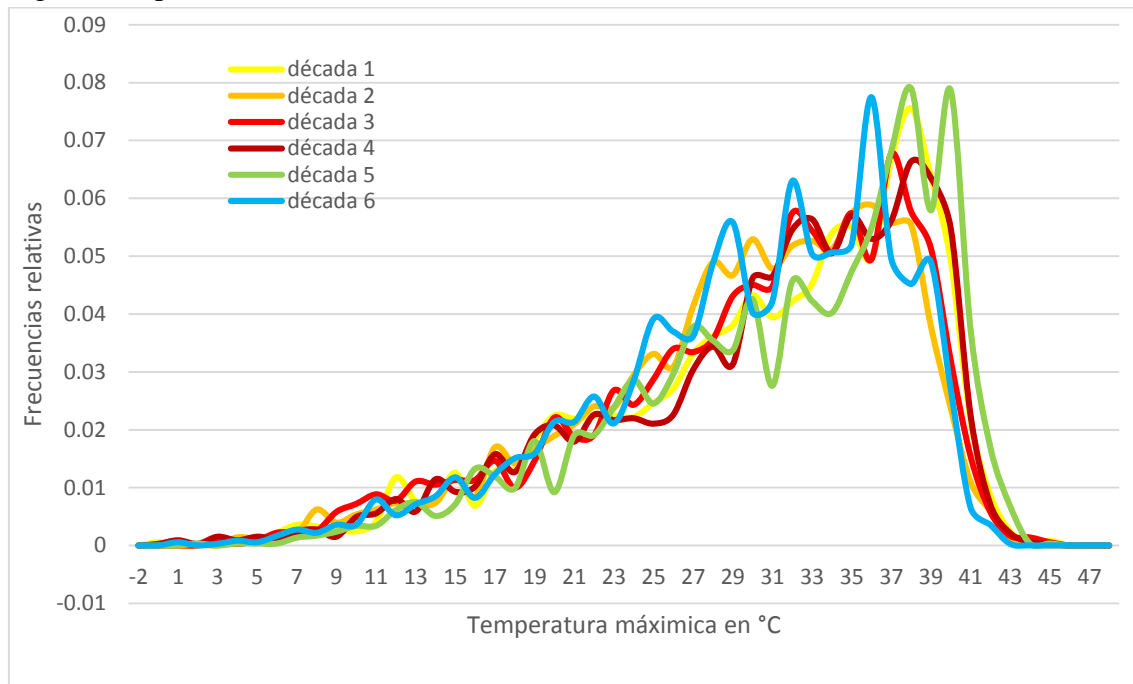
Gráfico 17 Área urbana de Monterrey. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas máximas registradas por década.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional.

En el área rural El Cuchillo, Gráfico 18, contrario a lo visto para el área urbana, la década más reciente parece moverse hacia la izquierda, a temperaturas inferiores, comparada con las otras décadas. Se destacan los mayores picos en 29°C, 32°C y 36°C. Cuando se experimentaron las temperaturas máximas más altas fue en la década 5, de 1983 a 1993, que se observa más desplazada a la derecha.

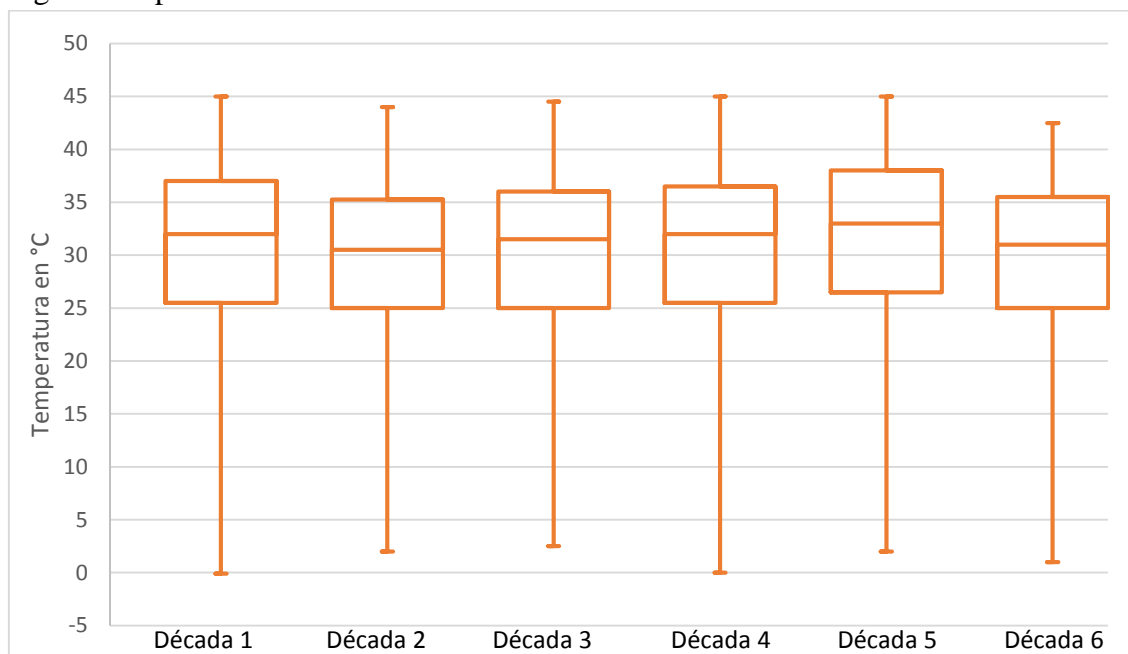
Gráfico 18 Área rural El Cuchillo. Distribución de frecuencias de temperaturas máximas registradas por década.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

En el Gráfico 19, se presenta el diagrama de caja y bigotes. La ubicación de la mediana en todas cajas parece indicar que se trata de distribuciones casi simétricas, en la mayoría de los casos. El cuartil 1 ha permanecido en los 25°C y 25.5°C en la mayoría de las décadas, sólo en la década 5 se incrementó a 26.5°C. En la mediana no se observa ninguna tendencia en las últimas décadas, pero la registrada en la década 6 es la más baja, después de la registrada en la década 2. En el cuartil 3, parece haber un crecimiento en las temperaturas entre las décadas 2 a 5, pero en la década 6 la temperatura desciende 2.5°C ubicándose como la segunda más baja después de la registrada en la década 2. También se destaca que el valor máximo registrado durante la última década ha sido el más bajo (2.5 °C menos comparada con la década anterior). Este comportamiento sugiere que durante la última década El Cuchillo ha experimentado temperaturas máximas menos severas que en décadas anteriores.

Gráfico 19 Área rural El Cuchillo. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas máximas registradas por década.

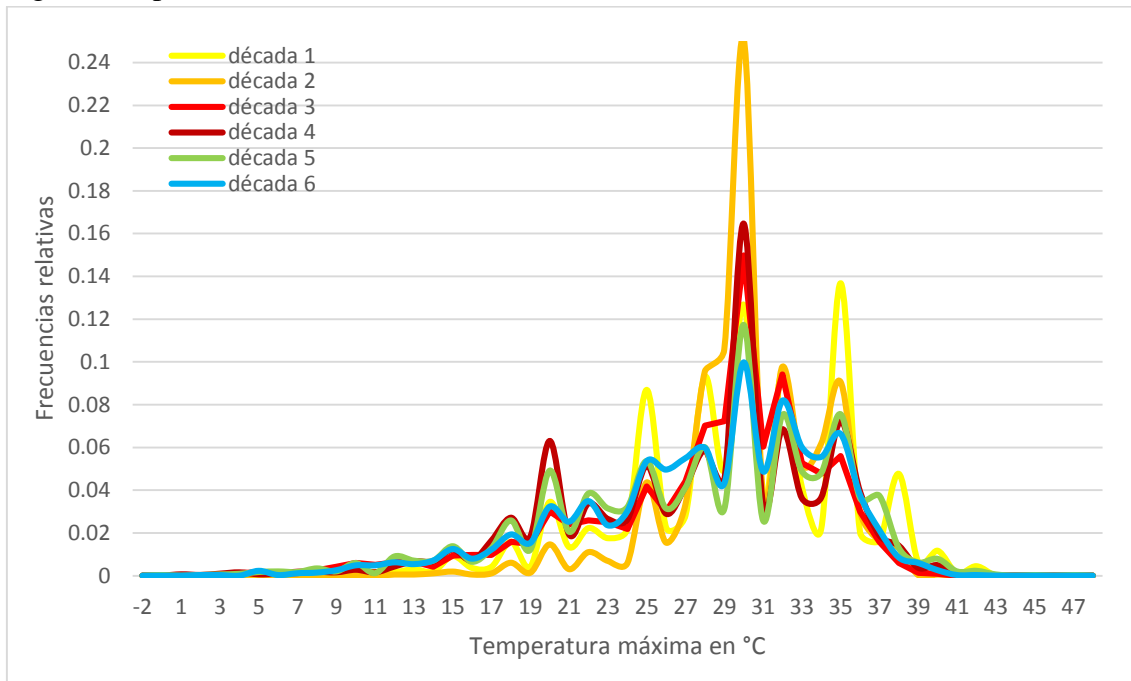


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional.

En el área rural La Rinconada, Gráfico 20, se observa al igual que en las temperaturas mínimas, altas concentraciones de frecuencias (o picos) en determinadas temperaturas, siendo también la más destacada durante la década 2. No se evidencia ningún desplazamiento en las temperaturas registradas, pero si picos menos pronunciados en la última década, lo que puede indicar una mayor concentración de las temperaturas en años recientes. El diagrama de caja y bigotes, Gráfico 21, muestra diferencias importantes entre las distribuciones. Las décadas más similares fueron la 1 y la 6, con distribuciones casi simétricas e iguales valores máximos, difieren en que la década más reciente presenta temperaturas máximas inferiores, concentrando el 50% entre 25°C y 33°C, mientras que en la década 1, este porcentaje se concentró entre 26°C y 34°C. La década 2 parece ser la más disímil, con una muy baja dispersión, y por el contrario la década con mayor dispersión fue la 5, también con los valores máximo y mínimo más extremos. El cuartil 1 no muestra ninguna tendencia, se resalta que durante la última década se ubicó 2°C por encima de las dos décadas anteriores. La mediana ha permanecido bastante estable, a pesar de los cambios visibles entre los cuartiles, ubicándose en 29°C durante las tres últimas décadas. El cuartil 3 entre las décadas 4 a 5, se incrementó 1°C situándose en 33°C en las décadas 5 y 6.

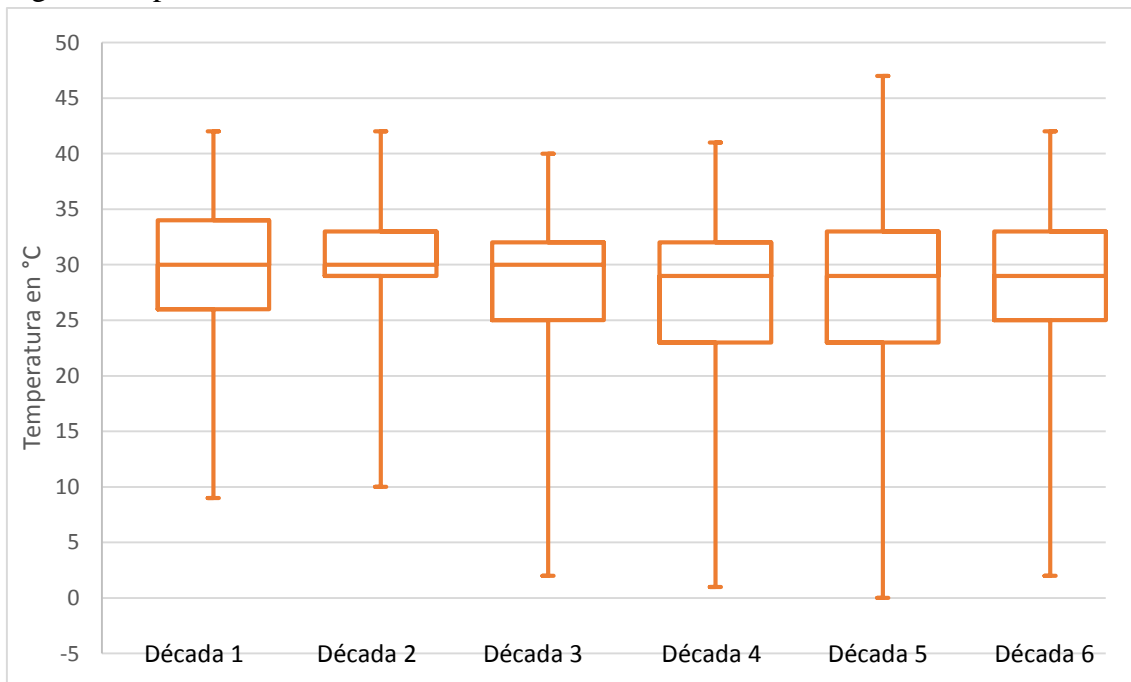
De lo anterior, se puede apuntar a que en las dos últimas décadas en La Rinconada las temperaturas máximas han experimentado una menor dispersión y han permanecido estables.

Gráfico 20 Área rural La Rinconada. Distribución de frecuencias de temperaturas máximas registradas por década.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Gráfico 21 Área rural La Rinconada. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas máximas registradas por década

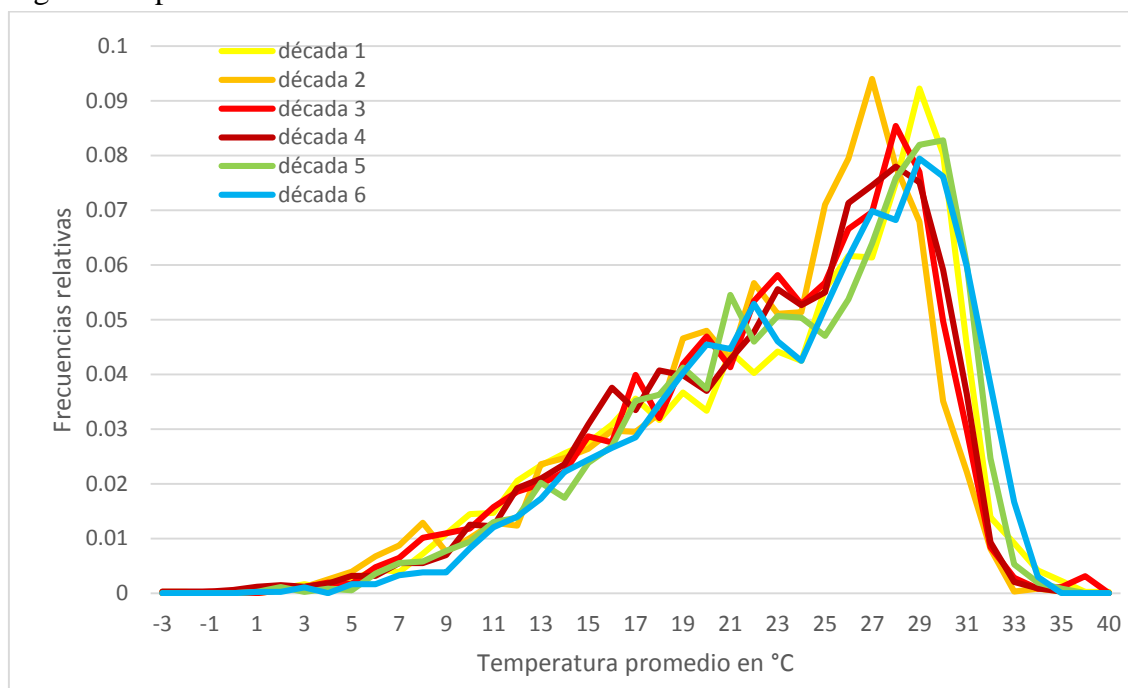


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional.

Temperaturas promedio

Se presenta la distribución de frecuencias de las temperaturas promedio registradas para las décadas en cada uno de los casos. Para el área urbana, Gráfico 22, se observa el desplazamiento hacia la derecha en décadas recientes, detectado antes tanto en las temperaturas máximas como mínimas.

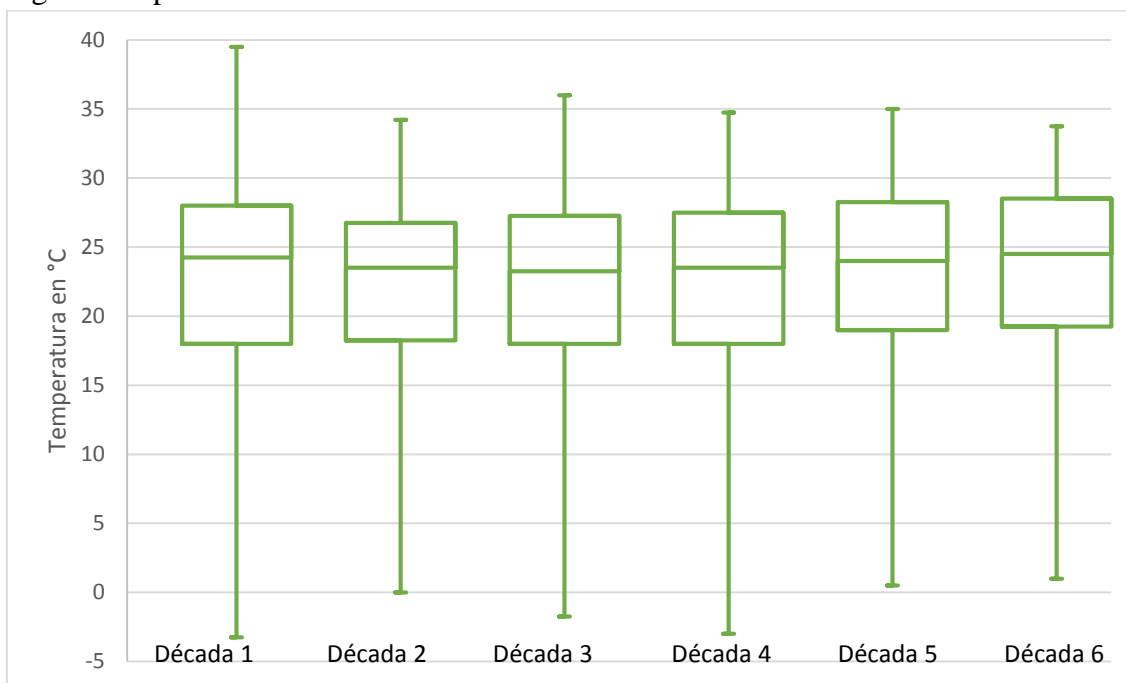
Gráfico 22 Área urbana de Monterrey. Distribución de frecuencias de temperaturas promedio registradas por década.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Del diagrama de caja y bigotes, Gráfico 23, el desplazamiento observado en la última década ha ocurrido por un incremento en los cuartiles 1 y 3, que ubican el 50% de la información en temperaturas promedio superiores. Se observa también una disminución en el valor máximo, que es el más bajo registrado en todas las décadas, al igual que un ligero incremento en el valor mínimo, que es el más alto registrado. La mediana muestra una tendencia creciente que comienza en la década 3, y la ubica de 23.25°C a 24.5°C en la década 6. Lo anterior, apoya la hipótesis de que el área urbana ha experimentado un crecimiento en su temperatura, principalmente en años recientes.

Gráfico 23 Área urbana de Monterrey. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas promedio registradas por década.



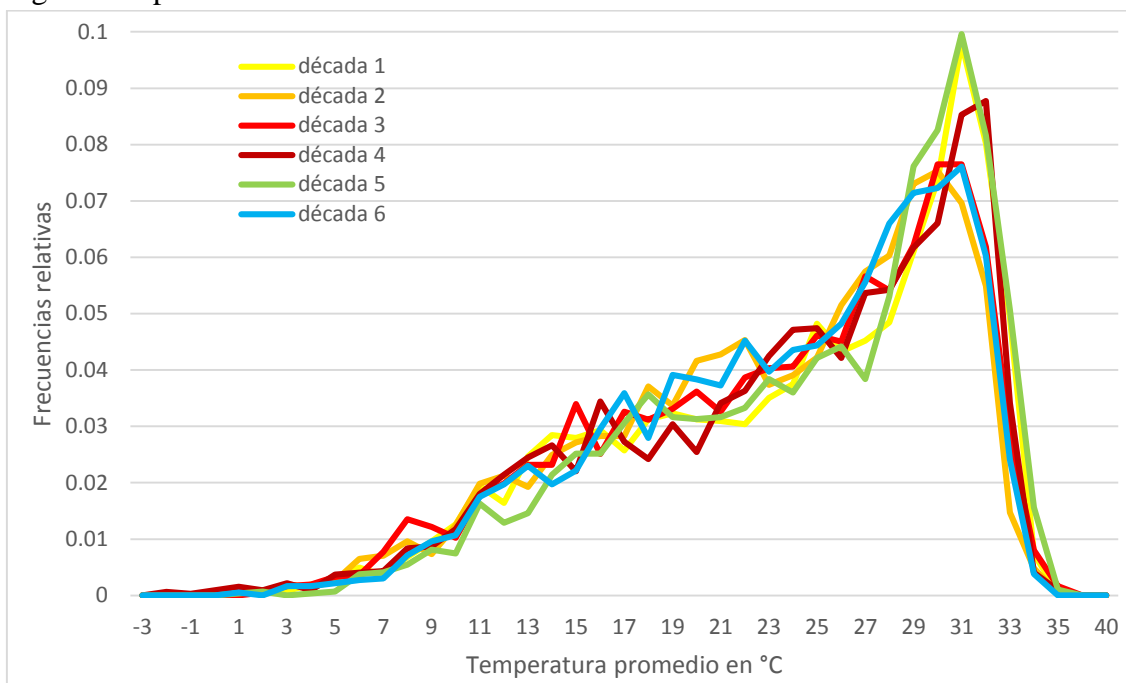
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

En el área rural El Cuchillo, Gráfico 24, la década más reciente parece moverse hacia temperaturas inferiores, comparada con las otras décadas, al igual que lo visto en las temperaturas mínimas; se destacan las décadas 5 y 1 como las de mayores temperaturas promedio registradas.

El Gráfico 25, presenta el diagrama de caja y bigotes. Entre las décadas 2 a 5, se destaca una tendencia creciente en la mediana, que se rompe en la última década, cuando experimenta una caída de 1.5°C, también en esta década, los cuartiles 1 y 3 se ubican en temperaturas inferiores, concentrando el 50% de los registros entre los 18.5°C y los 29°C. En esta década se registra el valor máximo más bajo y la menor dispersión. Por otro lado, las décadas 1 y 5, son las que registran el cuartil 3 más alto, lo que explica el que en el Gráfico 24 se destacan como los picos más altos.

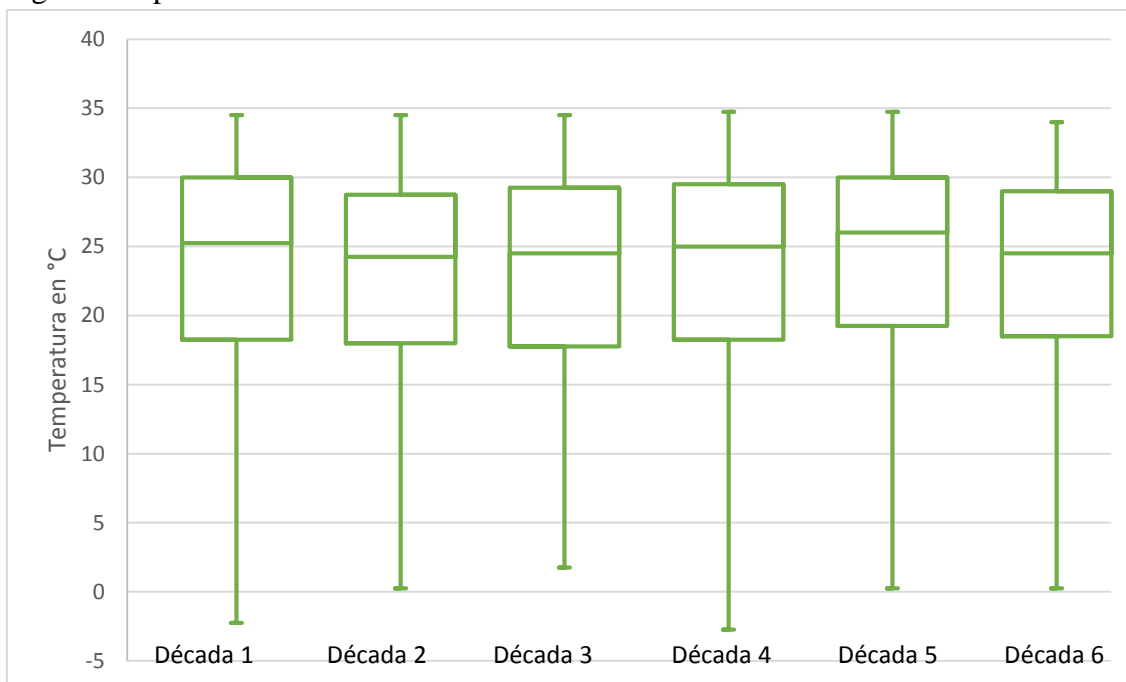
De aquí, se puede derivar que El Cuchillo ha experimentado durante la última década una disminución en las temperaturas promedio registradas.

Gráfico 24 Área rural El Cuchillo. Distribución de frecuencias de temperaturas promedio registradas por década.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

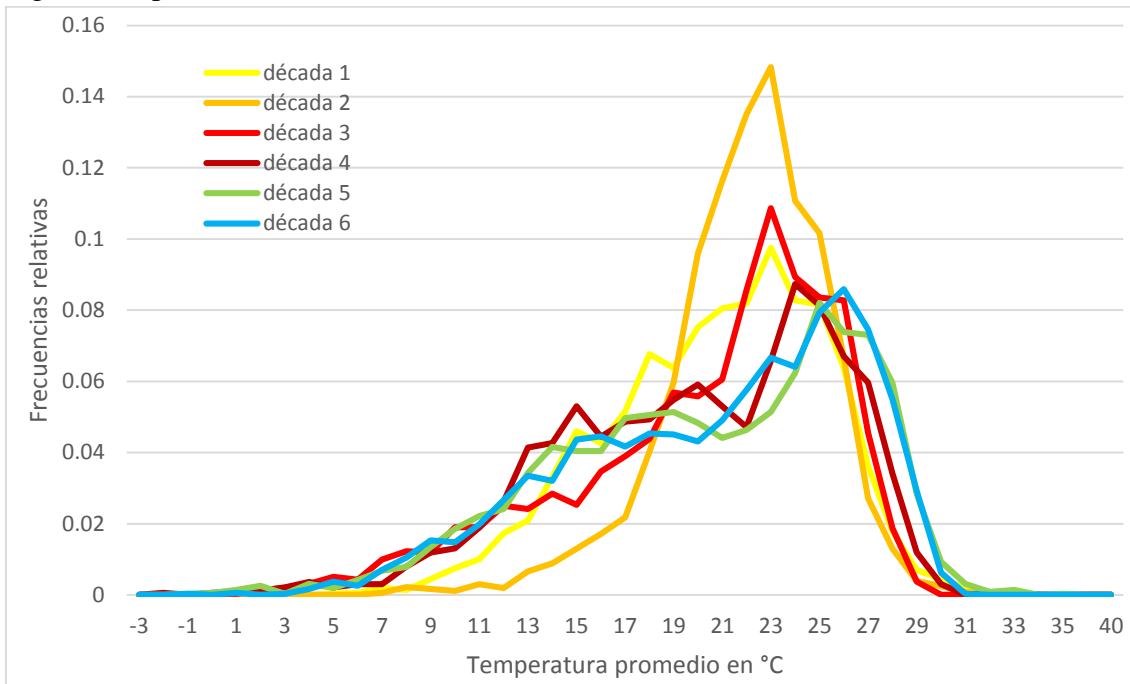
Gráfico 25 Área rural El Cuchillo. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas promedio registradas por década.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

En el área rural La Rinconada, Gráfico 26, al igual que en el área urbana, se observa un desplazamiento de las temperaturas promedio hacia temperaturas superiores, que podría explicarse como se vio anteriormente, por las mayores temperaturas mínimas registradas.

Gráfico 26 Área rural La Rinconada. Distribución de frecuencias de temperaturas promedio registradas por década.

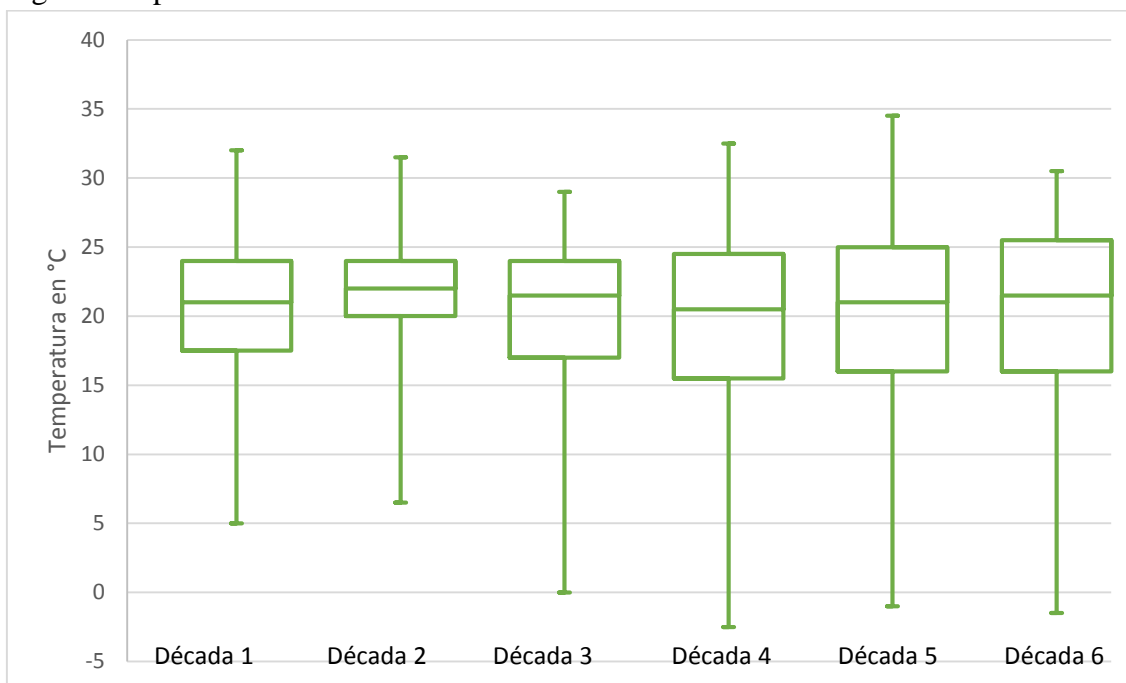


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

En el Gráfico 27, se presenta el diagrama de caja y bigotes donde se observa un incremento gradual en el cuartil 3 y en la mediana a partir de la década 4 que alcanza su valor más alto en la última década, lo que explica el desplazamiento observado en el Gráfico 26. El cuartil 1 se incrementa de la década 4 a la 5 y permanece sin cambios entre las décadas 5 y 6. El comportamiento de la década 2 es muy diferente al observado en las otras décadas, con una muy baja dispersión, una distribución simétrica y la mediana más alta registrada, razón por la que su distribución sobresale en el Gráfico 26.

Lo anterior sugiere, que las temperaturas promedio en La Rinconada han experimentado un crecimiento, especialmente en la última década.

Gráfico 27 Área rural La Rinconada. Diagrama de caja y bigotes de temperaturas promedio registradas por década.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

En la Tabla 6, se presentan de manera sintética los principales hallazgos en cada una de las ubicaciones. Durante el periodo analizado, en las temperaturas mínimas tanto en el área urbana como en la zona de La Rinconada, se dio un proceso de calentamiento, mientras que, en El Cuchillo se experimentó una relativa estabilidad. En las temperaturas máximas, la zona urbana se observó la misma tendencia creciente, contraria a la tendencia decreciente experimentada por El Cuchillo. En este caso, en La Rinconada se detectó estabilidad.

Tabla 6 Resumen hallazgos temperaturas mínimas, máximas y promedio

Ubicación	Temp. Mínima 1953-2013	Temp. Máxima 1953-2013	Temp. Promedio 1953-2013
Monterrey	Incremento	Incremento	Incremento
El Cuchillo	Estabilidad	Disminución	Disminución
La Rinconada	Incremento	Estabilidad	Incremento

Fuente: Elaboración propia

Estos hallazgos se explican tanto por aspectos climáticos locales como por aspectos globales. En Monterrey, al ser un área urbana son muchos los factores que inciden en el clima local, unos naturales: viento, humedad, nubosidad, altitud, lluvias, etc.; y otros antropogénicos: densidad urbana, contaminación, pavimentación, etc., que se relacionan de manera directa con la isla de calor, que se combinan, configurando el clima de manera particular, sin olvidar por supuesto, el papel que juega el calentamiento global.

En el caso de las áreas rurales, se observan tendencias o comportamientos distintos que pueden explicarse por factores naturales, pues como ya se mencionó, en estos lugares no existen concentraciones urbanas que puedan ejercer algún tipo de influencia. Dentro de estos factores naturales hay diferencias importantes, una es la altitud: El Cuchillo se ubica en una planicie a 145msn, mientras que La Rinconada en la montaña a 1000 msn; otra es que en El Cuchillo existe un embalse que puede albergar 1,123 hectómetros cúbicos de agua, lo que puede tener efectos sobre el clima del lugar, en La Rinconada no existe algo similar. Y dentro de los factores globales, nuevamente hay que tener en cuenta al fenómeno de calentamiento, que, dadas las diferencias locales se manifiesta de forma distinta en cada una de las ubicaciones.

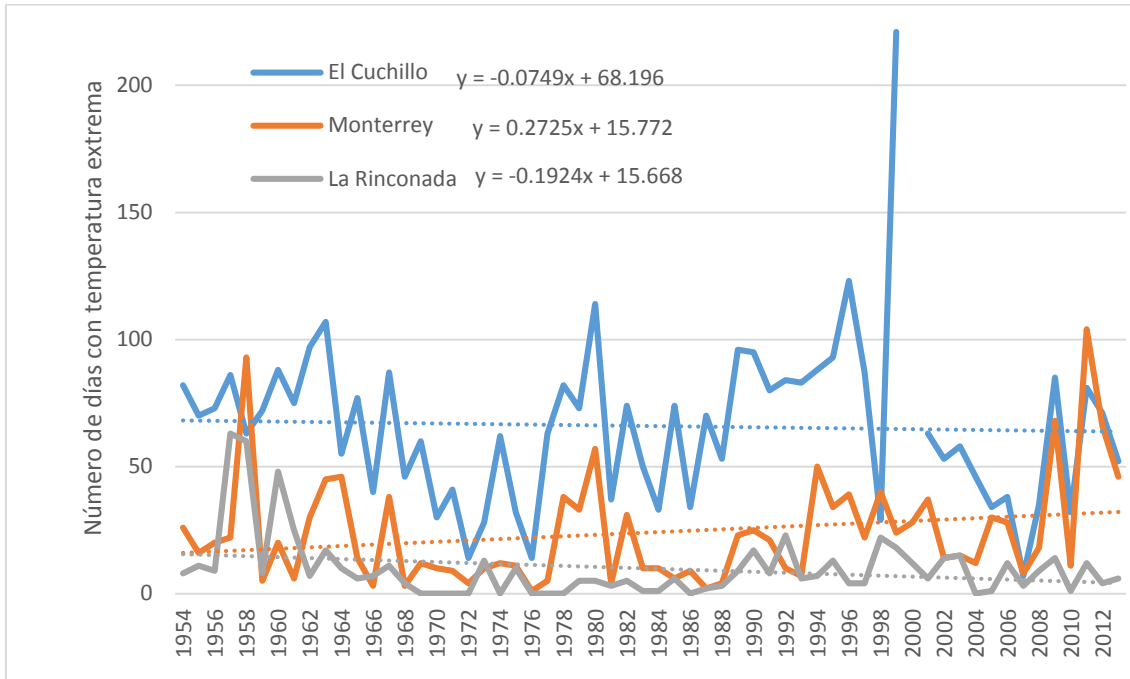
Días extremadamente calurosos

Anteriormente, se definieron estos eventos como aquellos días cuya temperatura sea igual o superior a los 38°C¹² (100°F), estableciendo que temperaturas superiores a este umbral ejercen presión adicional sobre el uso de electricidad.

En el Gráfico 28 se muestra el número de días extremadamente calurosos por año para las tres ubicaciones entre 1953 y 2013. A pesar de que la lectura no es de manera totalmente continua, es clara la tendencia creciente en el número de días extremadamente calientes para la estación de Monterrey, a diferencia de las otras dos estaciones que presentan tendencias negativas. Se destaca que en la ubicación de la estación El Cuchillo, este tipo de eventos han sido mucho más frecuentes que en las otras dos localizaciones, alcanzado su punto máximo en 1999 y donde menos se han presentado es La Rinconada, sin embargo, esto puede tener explicación en las diferencias de altitud que hacen “natural” que a menor altitud haya más alta temperatura. Por otro lado, llama la atención que en los años más recientes, desde el 2007, la frecuencia de las temperaturas extremas de la ubicación Monterrey están más cercanas a las frecuencias de la ubicación El Cuchillo, superándolas en 2011 y antes, solamente en 1958 y 1998, esto, sugiere que el área urbana se ha dado un incremento atípico en este tipo de eventos en los últimos años.

¹² Cabe mencionar que el percentil 90 para las ubicaciones rurales no corresponde con los 38°C definidos para la estación Monterrey, siendo para El Cuchillo de 39°C y para La Rinconada de 35°C, por lo que se podría estar subestimando y sobreestimando los días extremadamente calurosos en estas ubicaciones, sin embargo, dado que el interés de la investigación es determinar la presión adicional sobre el uso de electricidad, se decide considerar un único umbral por las razones ya mencionadas anteriormente. No obstante, también se realizó el mismo análisis considerando umbrales distintos para cada ubicación y se obtuvieron resultados similares.

Gráfico 28 Estaciones El Cuchillo, Monterrey y La Rinconada. Número de días por año con temperatura igual o superior a 38°C.



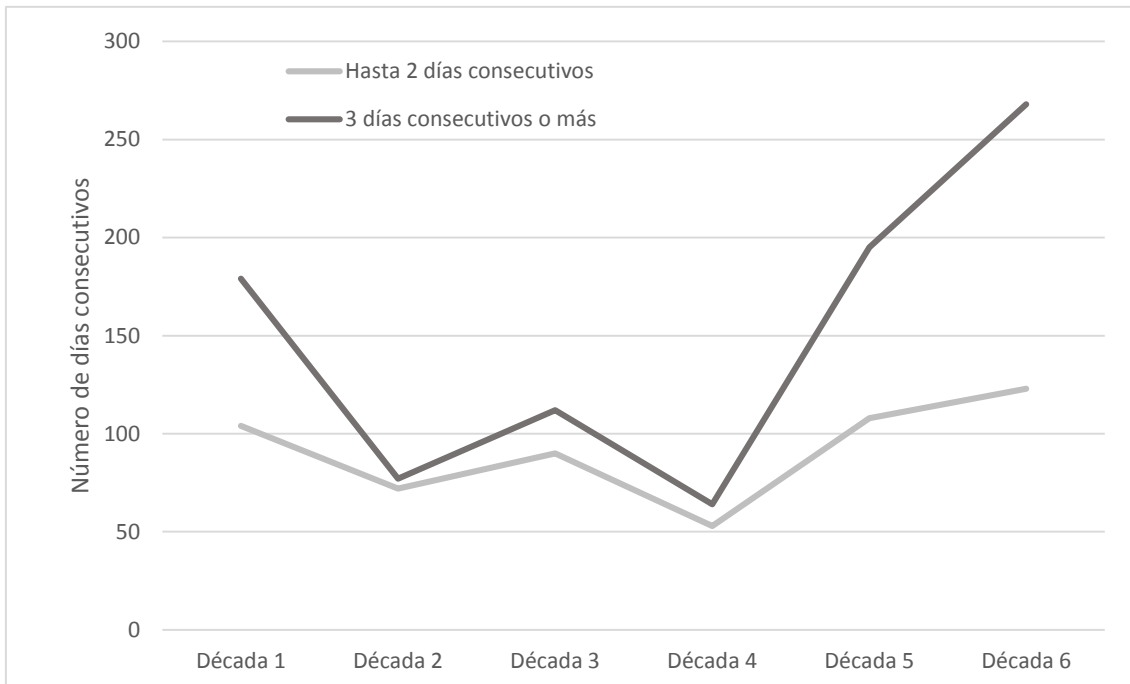
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional.

Olas de calor

Las olas de calor, se entienden como periodos prolongados de calor excesivo. En este documento se definen como periodos de 3 o más días con temperaturas extremas, es decir, con temperaturas iguales o superiores a 38°C (100°F). Para el área urbana de Monterrey, Gráfico 29, estos eventos a lo largo de las décadas han presentado importantes variaciones, con registros más bajos en las décadas 2 y 4. Llama la atención que sea más frecuente el evento: 3 días consecutivos o más que el de hasta 2 días consecutivos, en todas las décadas. En las dos últimas décadas, se observa un gran aumento en el nivel de ocurrencia de estos eventos, mucho más marcado para 3 días consecutivos o más. Es posible identificar una tendencia creciente en la ocurrencia de ambos eventos.

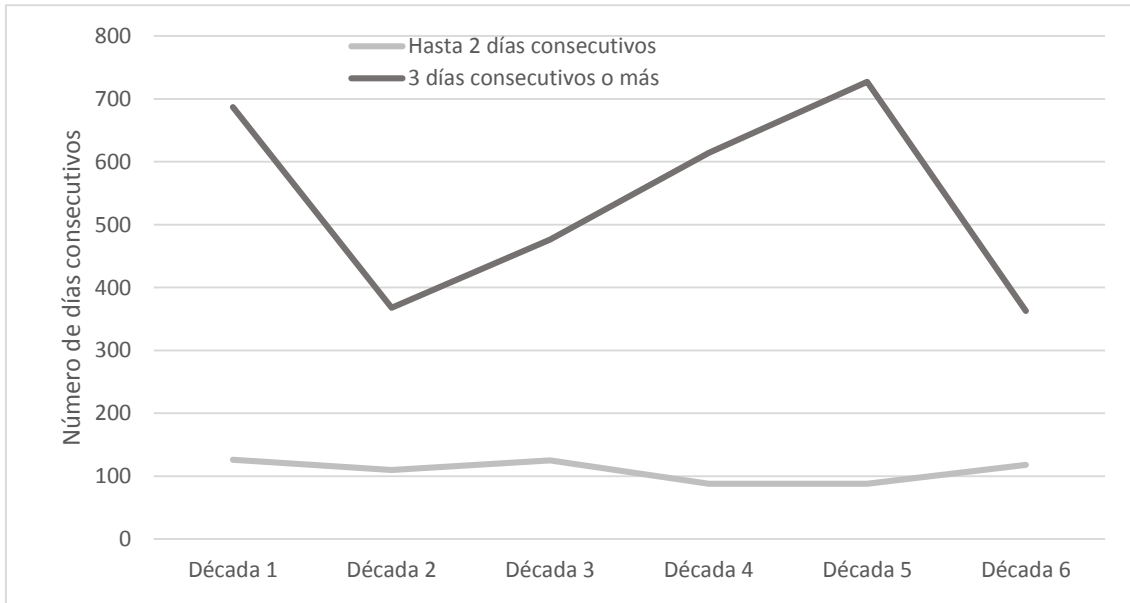
Para el área rural El Cuchillo, Gráfico 30, se destaca que el nivel de ocurrencia de estos eventos es cerca de 3 veces superior al del área urbana. Al igual que en Monterrey, el evento: hasta 2 días consecutivos, tiene menos ocurrencia que el de 3 días o más. Los primeros permanecen casi invariables a través de las décadas, en cambio, los segundos presentan dos caídas, en la década 2 y 6 con niveles muy similares, y un crecimiento a lo largo de las décadas 3 a 5. No es posible identificar ninguna tendencia en su comportamiento.

Gráfico 29 Onda de calor, Área urbana de Monterrey. Número de eventos: 2 días consecutivos, 3 días o más consecutivos con temperatura igual o superior a 38°C (100°F) por década.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

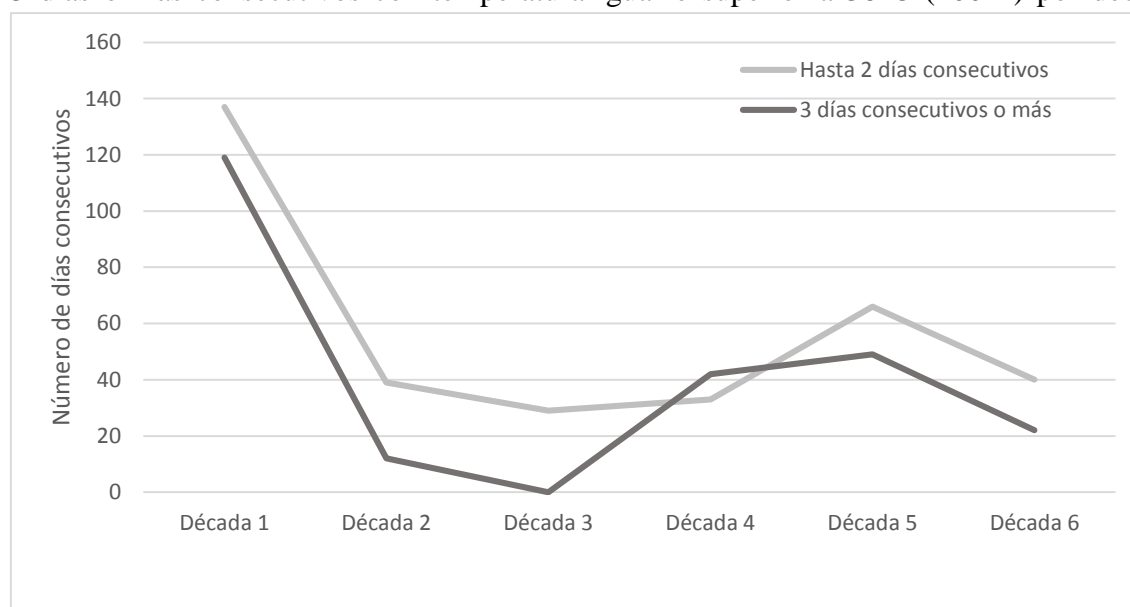
Gráfico 30 Onda de calor Área rural El Cuchillo. Número de eventos: 2 días consecutivos, 3 días o más consecutivos con temperatura igual o superior a 38°C (100°F) por década.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

En el área rural La Rinconada, Gráfico 31, el nivel de ocurrencia de este tipo de eventos es mucho menor que en las otras dos zonas, siendo cerca de un tercio de la frecuencia del área urbana, y por ende cerca de una sexta parte de El Cuchillo. Contrario a las otras áreas, en la mayoría de las décadas, el evento: hasta 2 días consecutivos fue más frecuente que el de 3 días o más, siendo la única excepción la década 4. Durante la primera década, se presentaron los niveles más altos, experimentando posteriormente una fuerte caída que alcanza su mínimo en la década 3, para después crecer nuevamente hasta la década 5 (con niveles cerca de la mitad a los registrados en la década 1), y finalmente en la última década desciende. A lo largo de las décadas, se evidencia una tendencia decreciente en la ocurrencia de este tipo de eventos.

Gráfico 31 Onda de calor Área rural La Rinconada. Número de eventos: 2 días consecutivos, 3 días o más consecutivos con temperatura igual o superior a 38°C (100°F) por década.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Para las tres zonas, destaca especialmente los altos registros de olas de calor de la primera década. Este hecho puede encontrar explicación en las sequías en 1957, 1960 y 1962, que entran dentro de la categorización aquí establecida para la década 1: 1953-1963. Estas sequías de acuerdo con Florescano, Sancho, & Perez (1980) fueron extremadamente graves. Estos autores plantean que en general las sequías no presentan un patrón de comportamiento definido, pudiendo afectar cualquier parte del país, pero las regiones con mayor riesgo son los estados de Baja California, Coahuila, Nuevo León y San Luis Potosí y Guerrero y los estados que registraron mayores eventos de este tipo entre 1910 a 1977 fueron Coahuila, con 22 sequías; Nuevo León, con 18; Chihuahua, con 13, y Sonora y Tamaulipas con 12.

Otro registro que llama la atención es el año 1998 en el Gráfico 28, cuando en Monterrey se registraron mayores días con temperatura extrema que en El Cuchillo. De acuerdo con

García, Fuentes, & Matías (2007) este año fue crítico en casi todo el país: sequías, ondas de calor, e incendios forestales. Menciona como dato de referencia, que durante este año en el mes de mayo ocurrió la temperatura más alta registrada para la ciudad de México 34.7°C, que rebasó en más de 1°C la máxima histórica. Algunas cifras para Nuevo León: en el mes de abril, 9000 ejidatarios se vieron afectados dándose ventas de pánico de ganado; en mayo, 300 mil cabezas de ganado murieron y dejaron de sembrarse 80 mil hectáreas de cultivos básicos; en junio, 500 mil campesinos se vieron afectados perdiendo más de 33 mil hectáreas de maíz, además se registraron 7 mil casos de deshidratación y 65 mil de diarrea; y para el mes de julio, las presas de agua se encontraron al 30% de su capacidad.

De lo analizado hasta este punto es posible inferir que el clima del área urbana ha tenido un comportamiento particular, con tendencias crecientes tanto en temperaturas mínimas y máximas como en eventos extremos: días extremadamente calurosos y las olas de calor. Por el contrario, en las zonas rurales, se identificaron varios tipos de comportamientos: estabilidad, crecimiento y decrecimiento en las temperaturas y en cuanto a los eventos extremos, tendencias decrecientes para las dos zonas en días extremadamente calurosos y ninguna tendencia en las olas de calor en El Cuchillo y tendencia decreciente para La Rinconada.

Estos distintos resultados para las zonas rurales pueden ser consecuencia como ya se dijo, de sus diferencias geográficas, pero lo importante hasta este punto es que el proceso de calentamiento ocurrido en el área urbana de Monterrey se ha manifestado en todas las variables analizadas y dado que no se ha encontrado lo mismo para las zonas rurales parece corresponder a un fenómeno local y no global, como lo es el efecto de isla de calor.

4. ANÁLISIS DE LA ISLA DE CALOR EN LA ZMM

De acuerdo con las investigaciones climatológicas, una manera de determinar la existencia del fenómeno de isla de calor y detallar sus características en cualquier momento, es tomar simultáneamente la diferencia de temperatura entre una zona urbana y una zona rural cercana con similar geografía y analizar su tendencia. (Como en Magee, et al., 1999; Sarricolea, et al., 2008). Como se dijo anteriormente, las tres estaciones climatológicas están ubicadas a diferentes altitudes, y por lo tanto su geografía no es similar. No obstante, al contar con las tres para realizar las comparaciones, sin perder de vista esta diferencia, es posible contrastar los resultados y dar mayor robustez a los mismos. A continuación se presentan los diferenciales de temperatura por década entre los registros tomados en las áreas rurales y el área urbana de Monterrey.

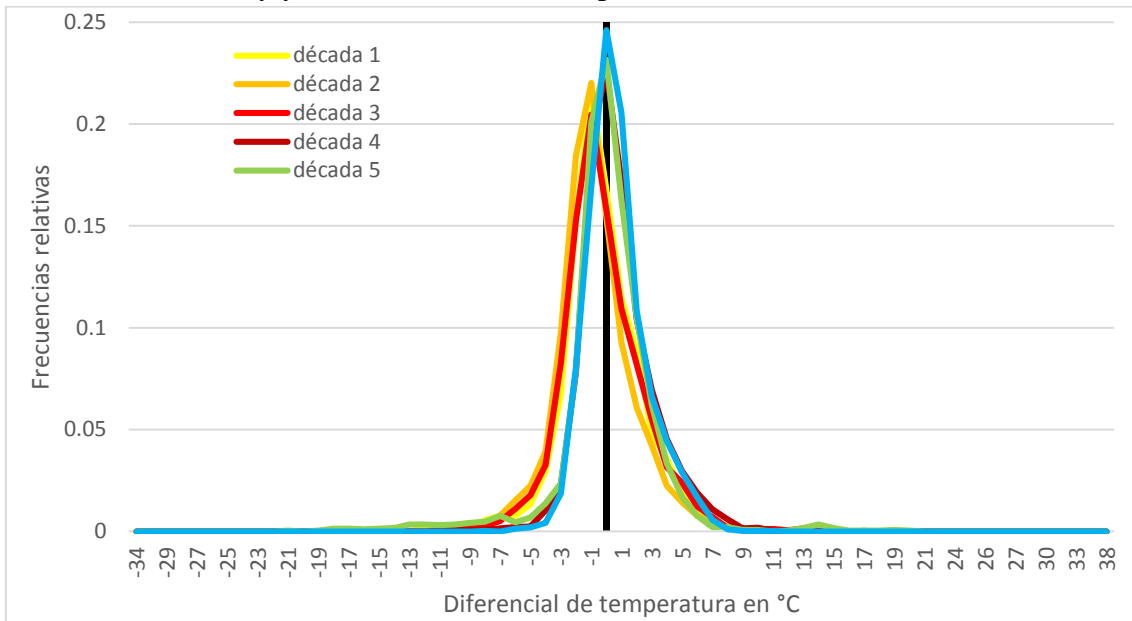
4.1. Diferencial temperaturas mínimas

Área urbana de Monterrey-Área rural El Cuchillo

En el Gráfico 32, se presentan las diferencias de temperatura mínima entre el área urbana y el área rural El Cuchillo. Durante las primeras décadas, el área urbana registró temperaturas mínimas inferiores a las del área rural, por lo que la distribución de frecuencias se concentraba en -1°C de diferencia. En las últimas décadas, la concentración está en 0°C de diferencia (señalado con la línea vertical negra), lo que muestra lo mencionado anteriormente, un incremento en las temperaturas mínimas del área urbana frente a temperaturas mínimas del área El Cuchillo que no evidenciaron cambios importantes.

El Gráfico 33 muestra el diagrama de caja y bigotes de las distribuciones anteriores. Se observa que la dispersión fue disminuyendo, siendo la más baja la registrada en la década 5, y en la década 6 registra la misma amplitud que en la década 4. Los valores máximo y mínimo menos extremos fueron los registrados en la última década, lo que indica que las colas se redujeron manera importante en la última década. La mediana se ubica en 0°C en las tres últimas décadas, luego registrar -2°C en la década 3, lo que muestra la reducción en el diferencial a consecuencia del crecimiento de las temperaturas mínimas urbanas. Durante las tres últimas décadas, la mediana ha permanecido sin cambios, pero de la década 5 a la 6, el cuartil 3 se incrementó en 0.5°C , indicando que para los últimos años fue más frecuente que antes que el área urbana registrara temperaturas superiores a las rurales. Lo anterior, indica que el diferencial se ha incrementado.

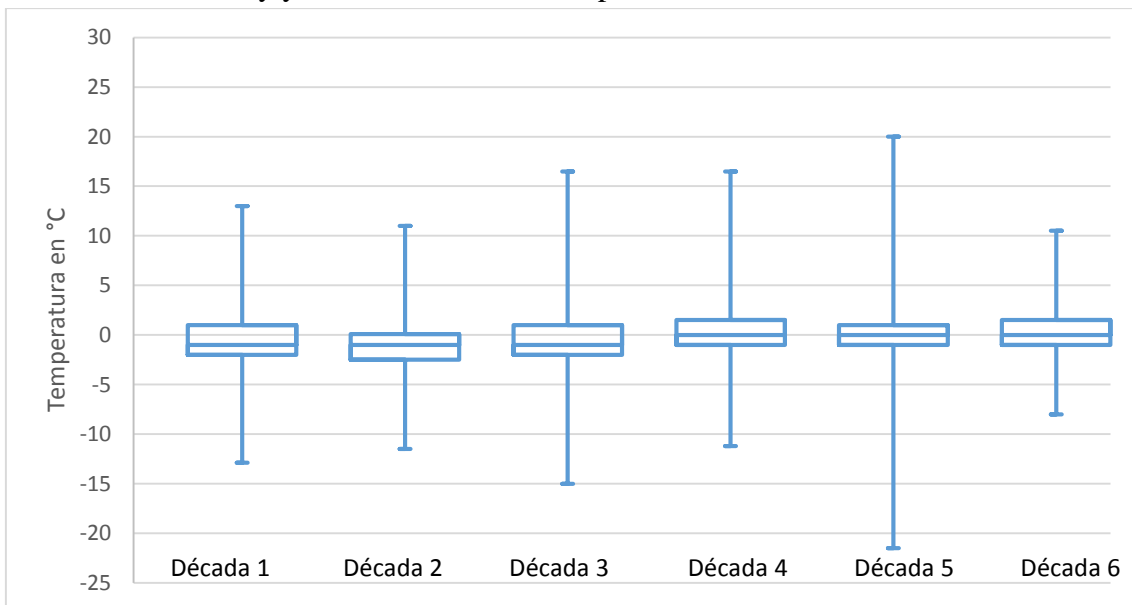
Gráfico 32 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura mínima entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, por década



La línea vertical negra señala los 0°C.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Gráfico 33 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura mínima entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, por década

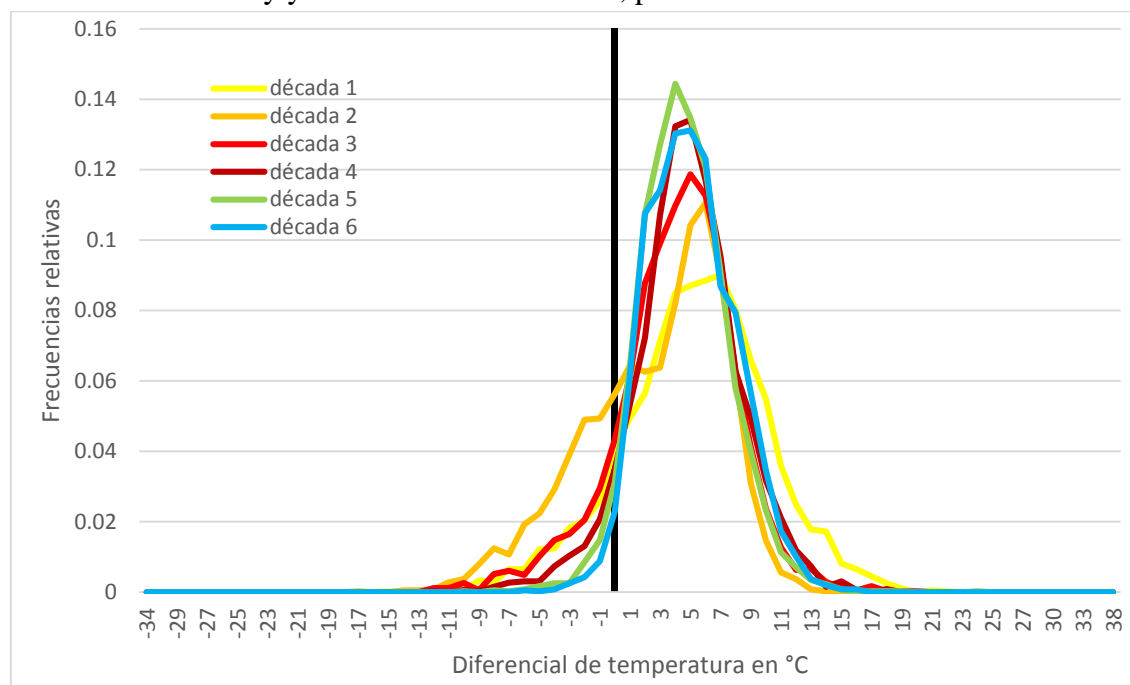


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Área urbana de Monterrey-Área rural La Rinconada

El Gráfico 34, presenta el diferencial de temperaturas mínimas entre el área urbana y el área rural La Rinconada. La distribución de frecuencias muestra que históricamente el área urbana ha sido más cálida que el área rural, por lo que la línea vertical que señala los 0°C de diferencia está a la izquierda de la distribución. La década 1, es la que muestra mayores diferencias, y en las décadas posteriores estas diferencias parecen haberse mantenido, mostrando sólo ligeros cambios, principalmente en las colas de las distribuciones, que parecen menos abultadas.

Gráfico 34 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura mínima entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, por década

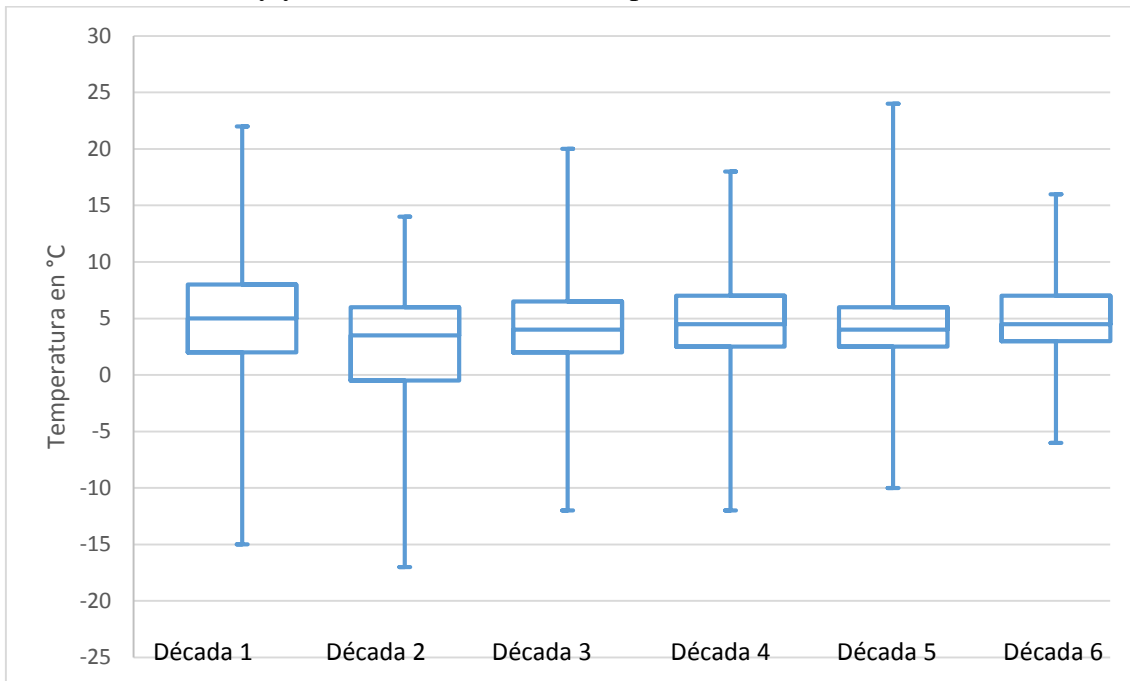


La línea vertical negra señala los 0°C.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

En el diagrama de caja y bigotes, Gráfico 35, se observan cambios importantes de la década 1 a la 2, cuando el diferencial se redujo de manera importante, pasando la mediana de 5°C a 3.5°C. Se resalta la tendencia creciente durante las últimas tres décadas en el valor mínimo lo que indica que las diferencias en estos valores extremos se han reducido, lo que se reflejó en el Gráfico 34 como una cola izquierda menos abultada. Se destaca también que en comparación con la década 5 en la década 6, el cuartil 1 y el cuartil 3 se incrementaron en 0.5°C y 1°C, respectivamente, igualmente, la mediana experimentó un desplazamiento pasando de 4°C a 4.5°C. Lo que sugiere que en los últimos años el área urbana experimentó temperaturas mínimas más altas que La Rinconada, esto a pesar de que esta última también se registró un crecimiento en sus temperaturas mínimas, lo que indica que el crecimiento observado en Monterrey fue mayor.

Gráfico 35 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura mínima entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, por década

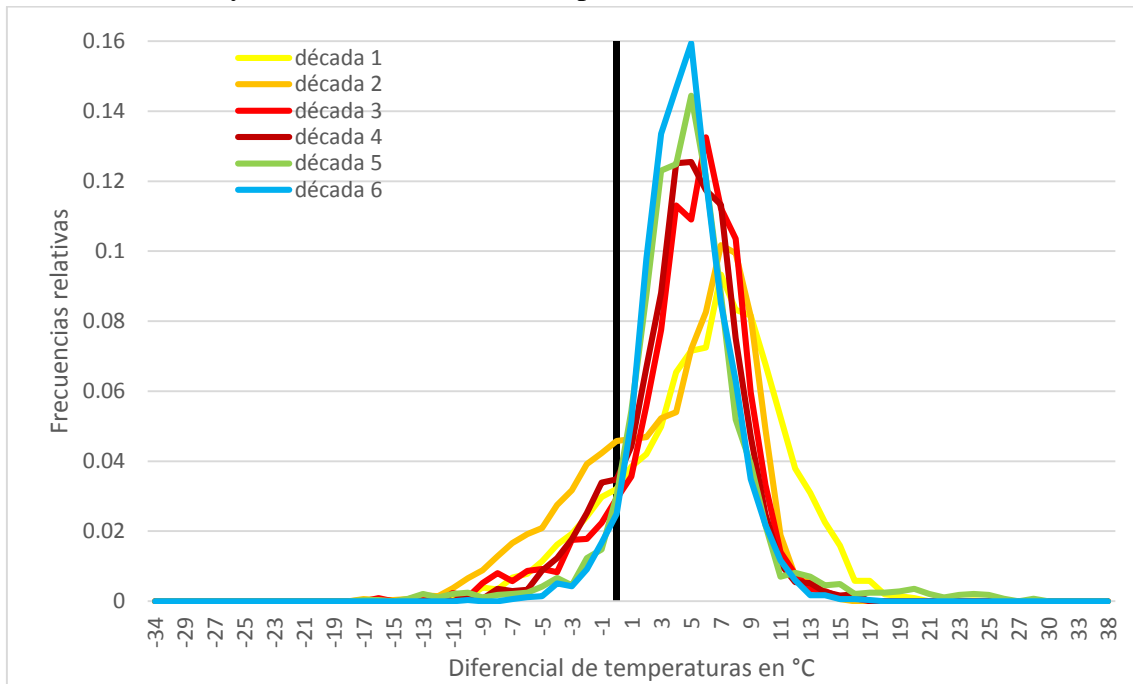


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Área rural El Cuchillo-Área rural La Rinconada

El Gráfico 36, muestra la distribución de frecuencias de las diferencias entre la temperatura mínima en la zona El Cuchillo y la zona La Rinconada. Históricamente la zona del Cuchillo ha presentado temperaturas mínimas superiores a las de La Rinconada, razón por la cual, la línea que marca los 0°C de diferencia está al lado izquierdo de la distribución. Se muestra que la mayor concentración de frecuencias de las últimas décadas se ha desplazado hacia la izquierda, indicando menores diferencias entre las temperaturas registradas en las dos zonas, que puede explicarse en mayor medida, como se mostró antes, por las mayores temperaturas mínimas registradas en La Rinconada y la relativa estabilidad en las temperaturas del Cuchillo.

Gráfico 36 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura mínima entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, por década

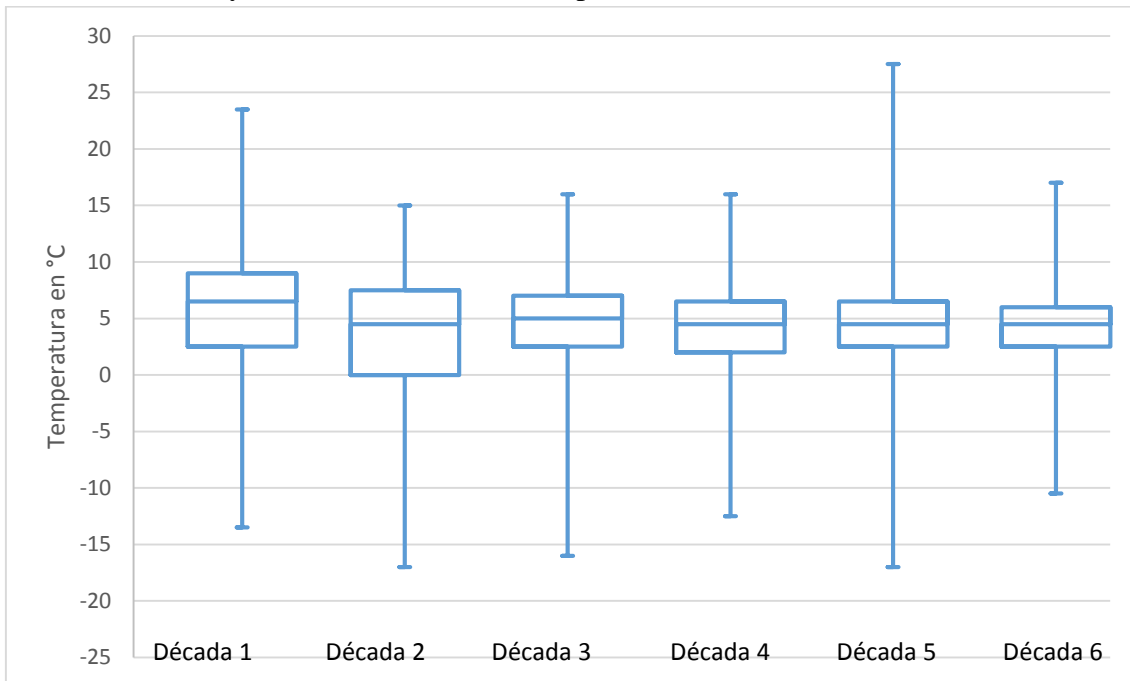


La línea vertical negra señala los 0°C.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

El Gráfico 37 presenta el diagrama de caja y bigotes, muestra una progresiva disminución en la dispersión de las diferencias. Se ve también un cambio importante entre los valores extremos de la década 5 y 6, el valor máximo registrado experimentó una disminución de 10.5°C, mientras que el valor mínimo se incrementó en 6.5°C, lo que sugiere una reducción en el diferencial de temperatura. A partir de la década 4, la mediana ha permanecido en 4.5°C. El cuartil 1 se ha mantenido en 2.5°C en las dos últimas décadas, mientras que el cuartil 3 se redujo de 6.5°C a 6°C, resultado de las mayores temperaturas mínimas en La Rinconada, que se evidencia en el Gráfico 36, como un ligero desplazamiento hacia la izquierda.

Gráfico 37 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura mínima entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, por década



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

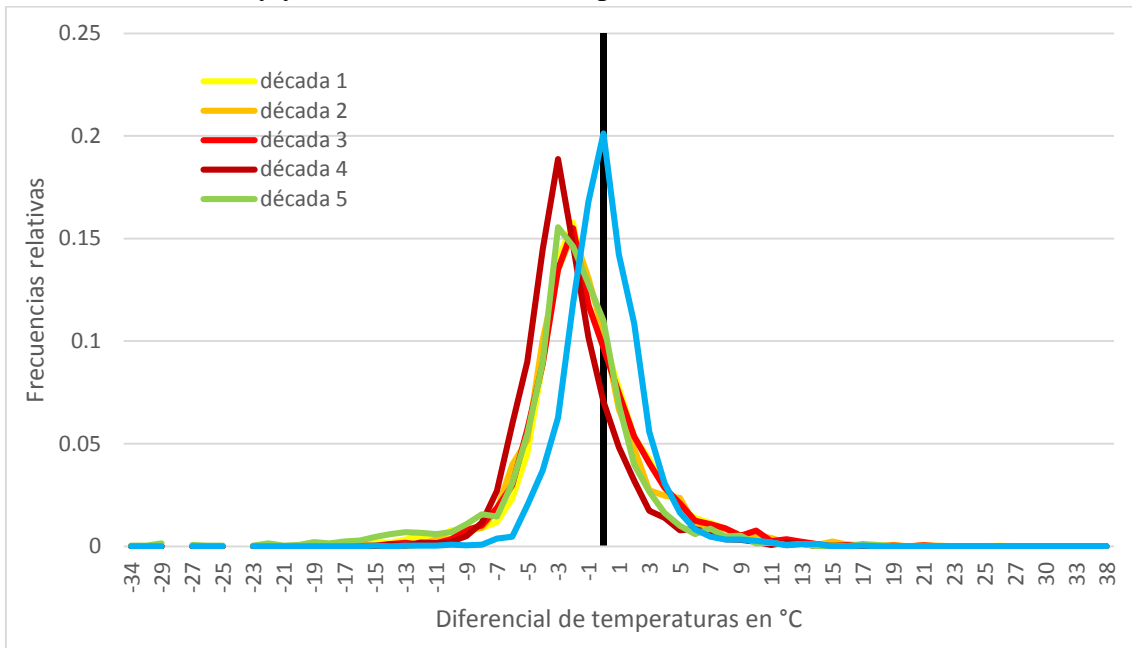
4.2. Diferencial temperaturas máximas

Área urbana de Monterrey-Área rural El Cuchillo

El Gráfico 38, muestra la distribución de frecuencias de las diferencias entre la temperatura máxima registrada en el área urbana y la registrada en el área rural El Cuchillo. Históricamente, El Cuchillo experimentó temperaturas máximas superiores a las de la zona urbana, pero durante la última década, se observa un claro desplazamiento que ubica el punto más alto de la distribución en los 0°C (línea vertical negra) lo que indica que en estos últimos años este diferencial desapareció, explicado por las mayores temperaturas máximas registradas en la zona urbana y las menores temperaturas registradas en la zona rural.

El diagrama de caja y bigotes, Gráfico 39, muestra también este desplazamiento en la última década, donde los cuartiles 1 y 3 se incrementaron en 2.5°C y 1°C respectivamente. Se presenta una tendencia decreciente en las diferencias que inició en la década 4, con la mediana en -3°C, luego a -2°C y finalmente en -0.5°C en la década 6. Los valores máximos muestran una tendencia decreciente a lo largo de las décadas, mientras que los valores mínimos no muestran un comportamiento claro, alcanzando su mínimo en la década 5. Se destaca además que en la última década la dispersión es menor que en las demás.

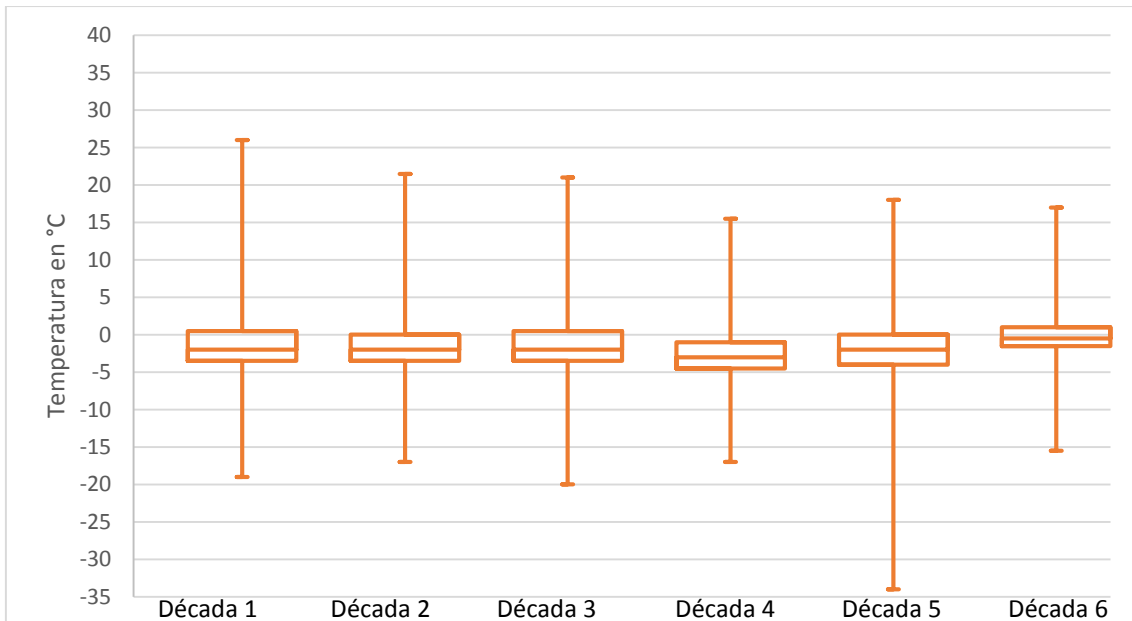
Gráfico 38 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura máxima entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, por década



La línea vertical negra señala los 0°C.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Gráfico 39 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura máxima entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, por década

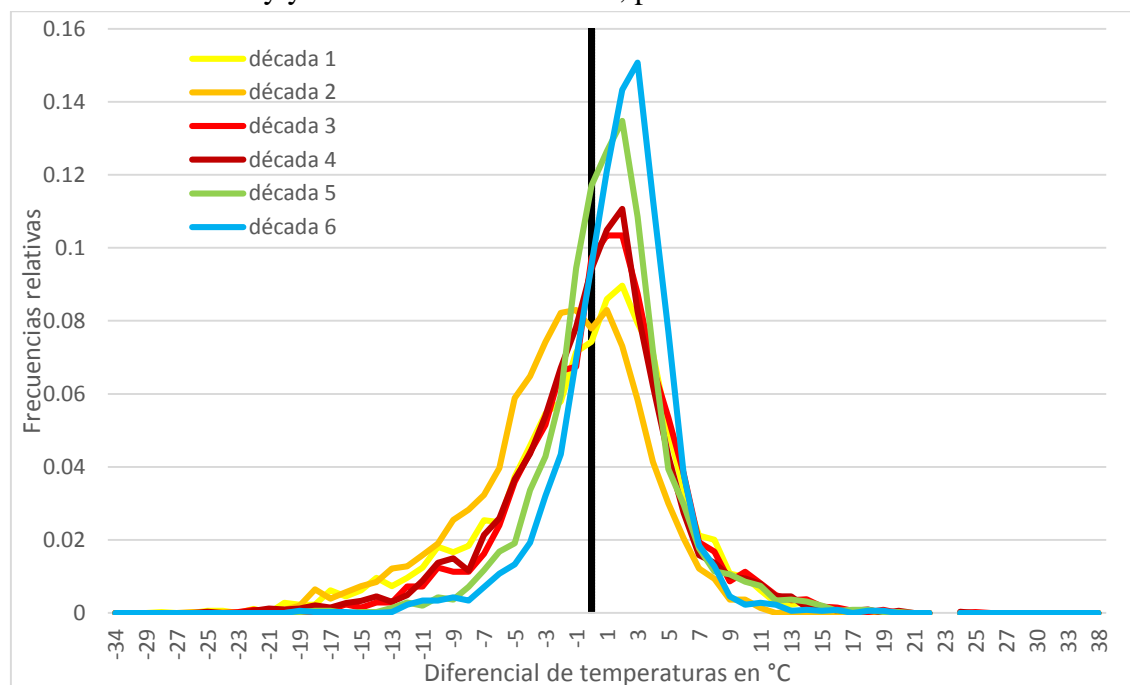


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Área urbana de Monterrey-Área rural La Rinconada

En el Gráfico 40, se presenta el diferencial entre las temperaturas máximas del área urbana de Monterrey y el área rural La Rinconada. A lo largo de las décadas, la zona urbana ha experimentado temperaturas máximas superiores a las del área rural, sin embargo, se hace visible el desplazamiento del punto más alto de la distribución a través de las décadas, situándose la década 6, más hacia la derecha que las otras, lo que indica que el diferencial se ha incrementado en el tiempo, debido al aumento de las temperaturas máximas del área urbana, frente a la estabilidad de las temperaturas en el área rural.

Gráfico 40 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura máxima entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, por década

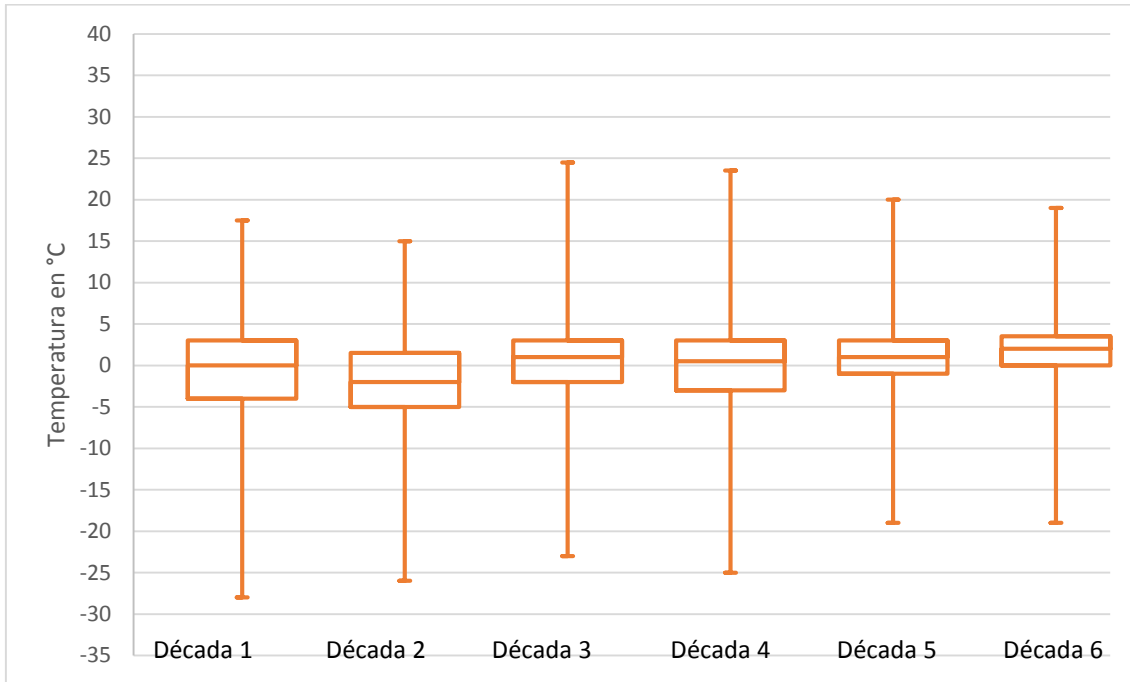


La línea vertical negra señala los 0°C.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

En el Gráfico 41, se presenta el diagrama de caja y bigotes, y es posible observar el desplazamiento ocurrido en el 50% de la distribución hacia un diferencial positivo desde la década 4, pasando de una mediana 0.5°C a 2°C en la última década; el cuartil 1 pasó de -3°C a 0°C y el cuartil 3 de 3°C a 3.5°C. Se observa también una tendencia creciente en los valores mínimos registrados, es decir, que la diferencia se ha reducido en valores extremos, lo que se hace visible en el Gráfico 40, en las colas menos abultadas. Se confirma entonces que las temperaturas máximas del área urbana se han incrementado, lo que ha elevado el diferencial con las temperaturas del área rural La Rinconada.

Gráfico 41 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura máxima entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, por década



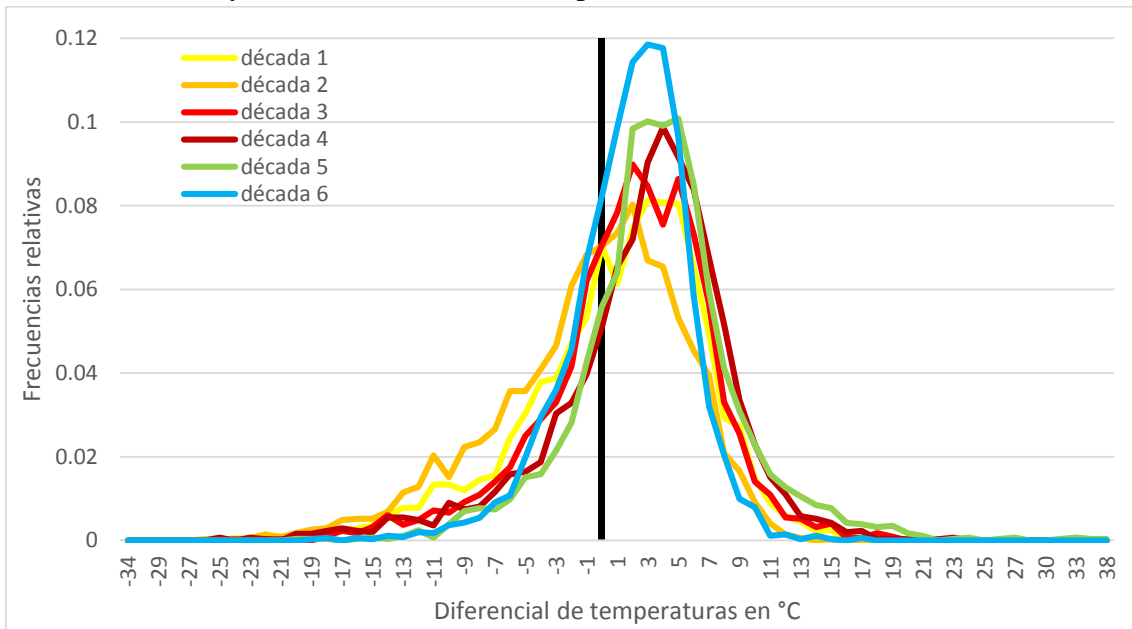
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Área rural El Cuchillo-Área rural La Rinconada

El Gráfico 42 muestra el diferencial de las temperaturas máximas entre las áreas rurales, tomando la temperatura registrada en la zona El Cuchillo y restándole la registrada en La Rinconada. Se observa cierta estabilidad en este diferencial, se destaca la mayor concentración (y colas menos abultadas) durante la última década, que puede explicarse por las menores temperaturas registradas en el Cuchillo. Una gran parte de la distribución ubica las temperaturas máximas de El Cuchillo, por debajo de las registradas en La Rinconada.

En el Gráfico 43 se presenta el diagrama de caja y bigotes, se destaca la disminución progresiva en la dispersión. Desde la década 2 hasta la década 5, se había registrado un incremento en el diferencial de las temperaturas máximas, pues la mediana pasó de 0°C a 3.5°C, de igual manera los cuartiles 1 y 3 registraron incrementos, de -4°C a 1°C y de 3.5°C a 6°C. Durante las primeras décadas, la temperatura máxima entre las zonas era muy parecida, incluso, posteriormente, las temperaturas de El Cuchillo se hicieron mucho más altas, lo que incrementó el diferencial. De aquí se concluye que el diferencial entre las dos zonas se ha reducido a consecuencia del comportamiento de las temperaturas experimentado en El Cuchillo.

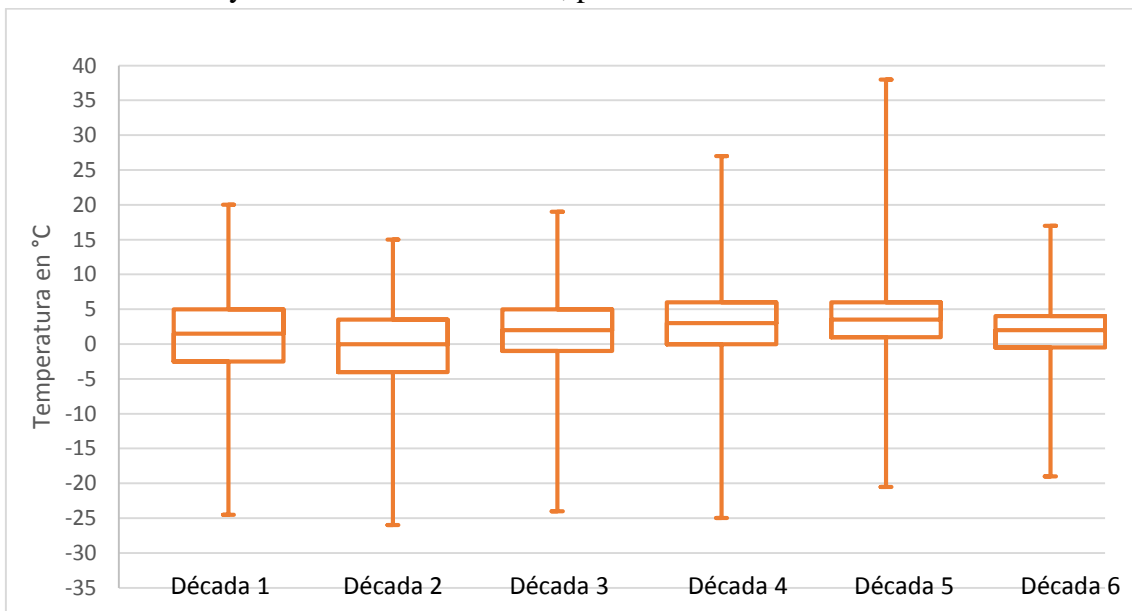
Gráfico 42 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura máxima entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, por década



La línea vertical negra señala los 0°C.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Gráfico 43 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura máxima entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, por década



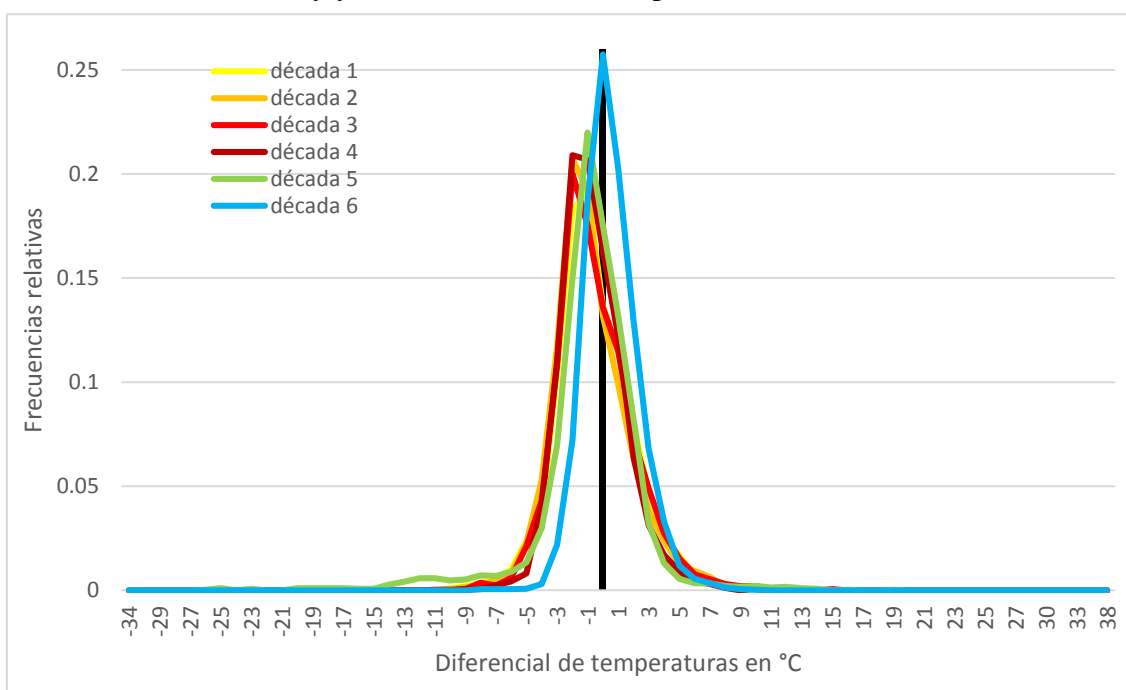
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

4.3.Diferencial temperatura promedio

Área urbana de Monterrey-Área rural El Cuchillo

Se presenta en el Gráfico 44, la distribución de frecuencias del diferencial de las temperaturas promedio entre el área urbana y el área rural El Cuchillo. Como es de esperarse, al tratarse de temperaturas promedio, la distribución se muestra mucho menos dispersa y es claro el desplazamiento del diferencial de la década 6 hacia los 0°C. Esto indica que la temperatura promedio experimentada en ambas zonas ha sido la misma en años recientes, por un lado, debido al incremento de la temperatura promedio del área urbana, y por el otro, por la disminución de las del área rural.

Gráfico 44 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura promedio entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, por década

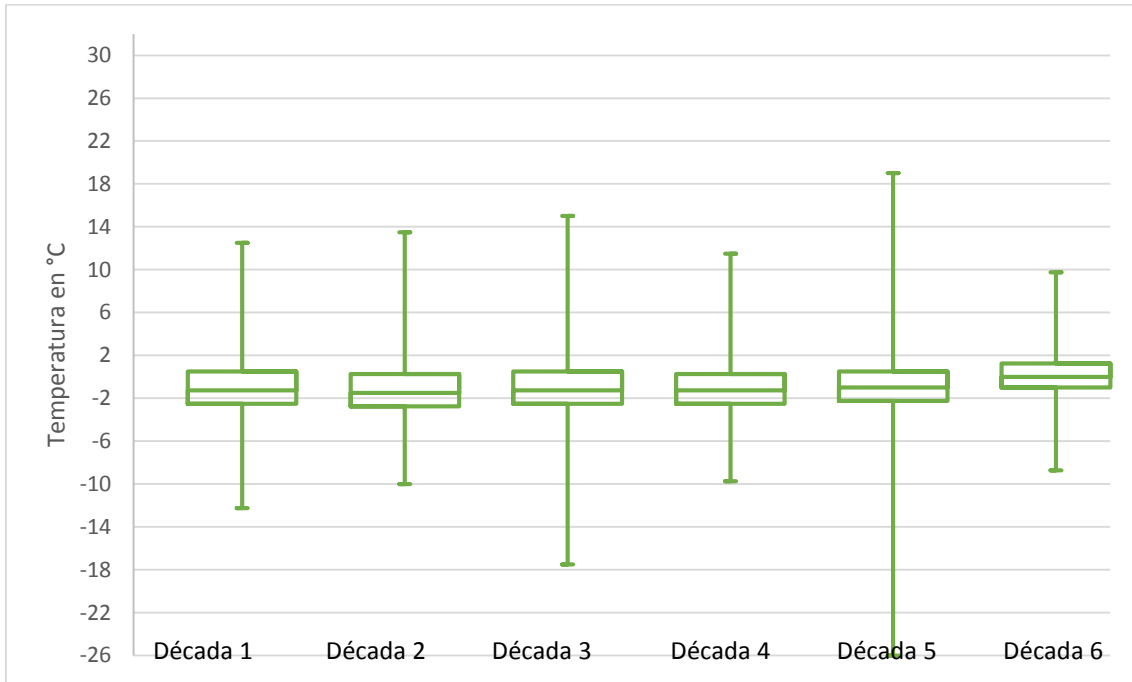


La línea vertical negra señala los 0°C.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

En el diagrama de caja y bigotes, Gráfico 45, sobresale el desplazamiento progresivo hacia un menor diferencial que inició la década 2, con una mediana de -1.5°C y termina en la última década con una mediana de 0°C. Para esta última, la caja se ubica entre -1°C y 1.25°C, mientras que para la década 2, este 50% se ubicó entre -2.75°C y 0.25°C. En general se observa poca dispersión en las distribuciones.

Gráfico 45 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura promedio entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, por década



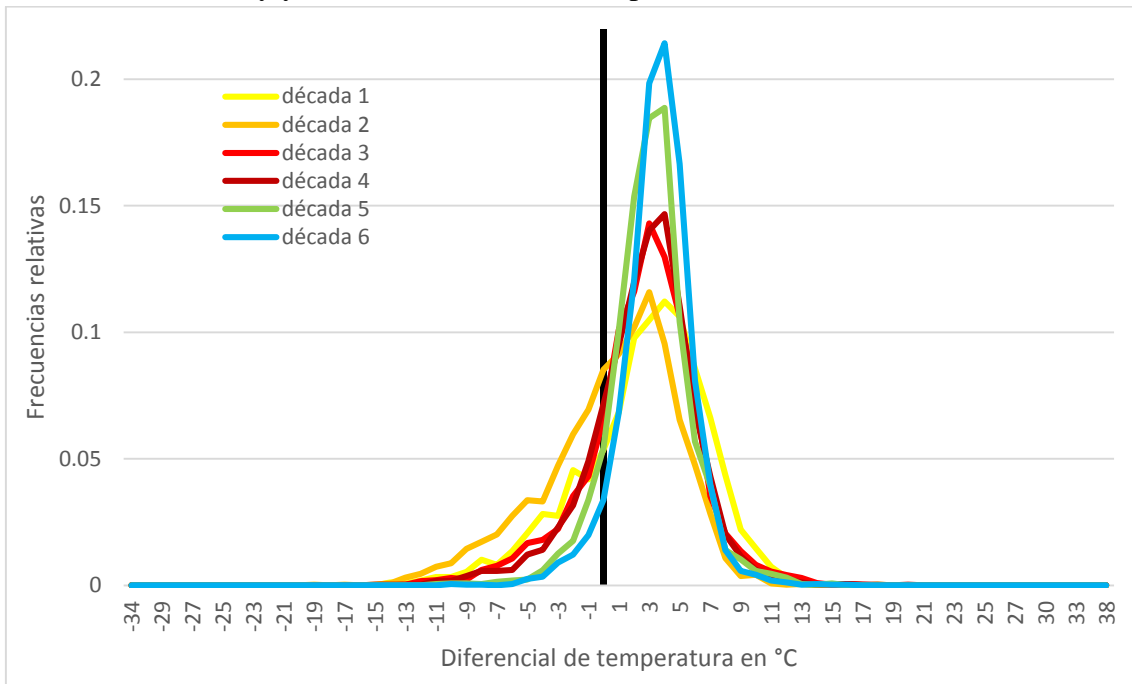
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Área urbana de Monterrey-Área rural La Rinconada

El Gráfico 46, presenta la distribución de frecuencias de las diferencias en las temperaturas promedio experimentadas por el área urbana y el área rural La Rinconada. Históricamente las temperaturas promedio del área urbana han sido superiores a las de La Rinconada. El diferencial parece haberse mantenido a lo largo del tiempo, pero se resalta como en el caso anterior, la menor dispersión expresada aquí como una mayor concentración de las frecuencias y menor abultamiento de las colas a través de las décadas.

En el Gráfico 47, se presenta el diagrama de caja y bigotes. A partir de la década 3, las diferencias calculadas fueron positivas y se han incrementado en el tiempo pasando de 2.5°C a 3.25° en la última década. Se muestra además una progresiva reducción en la dispersión de las distribuciones. Lo anterior se explica por las mayores temperaturas registradas tanto en el área rural como urbana, y a que las experimentadas por esta última han sido cada vez mayores.

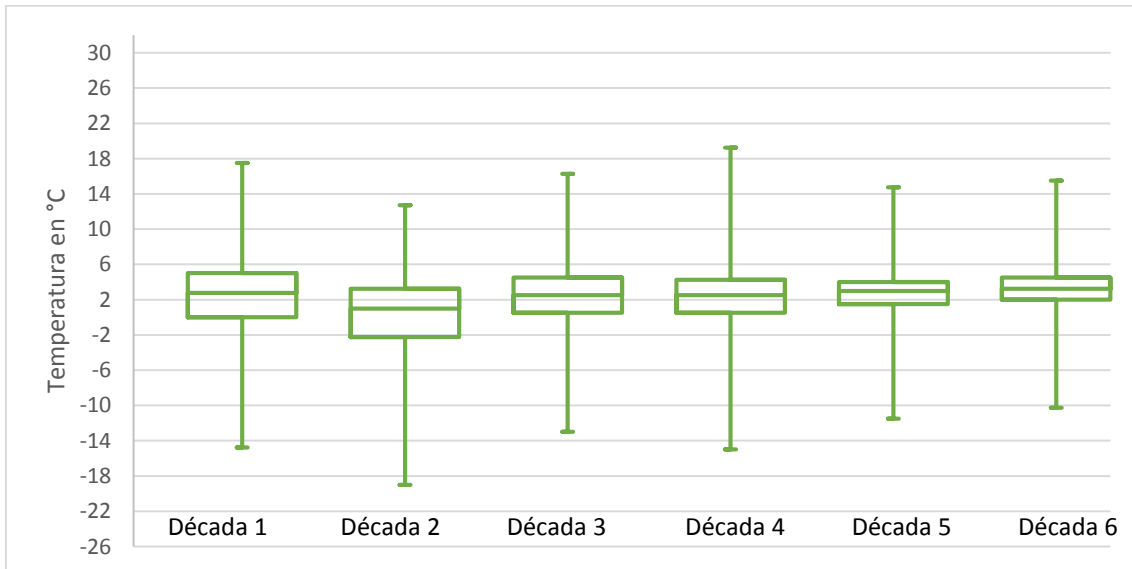
Gráfico 46 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura promedio entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, por década



La línea vertical negra señala los 0°C.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Gráfico 47 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura promedio entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, por década

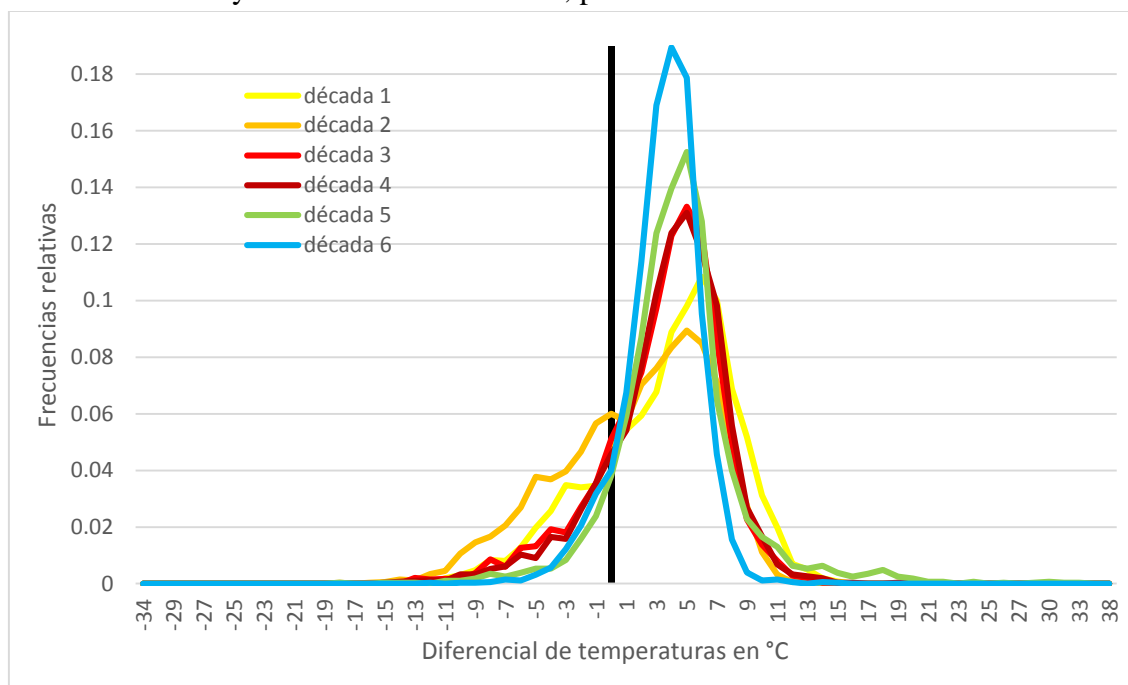


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Área rural El Cuchillo-Área rural La Rinconada

En el Gráfico 48, se presenta el diferencial de las temperaturas promedio entre las áreas rurales. Se destaca, que a lo largo de todas las décadas El Cuchillo ha experimentado con mayor frecuencia temperaturas promedio superiores a La Rinconada. No obstante, es posible observar un desplazamiento de estas frecuencias hacia un diferencial menor, que se explica por el incremento en el tiempo de la temperatura promedio en La Rinconada y la disminución experimentada por El Cuchillo.

Gráfico 48 Distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura promedio entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, por década

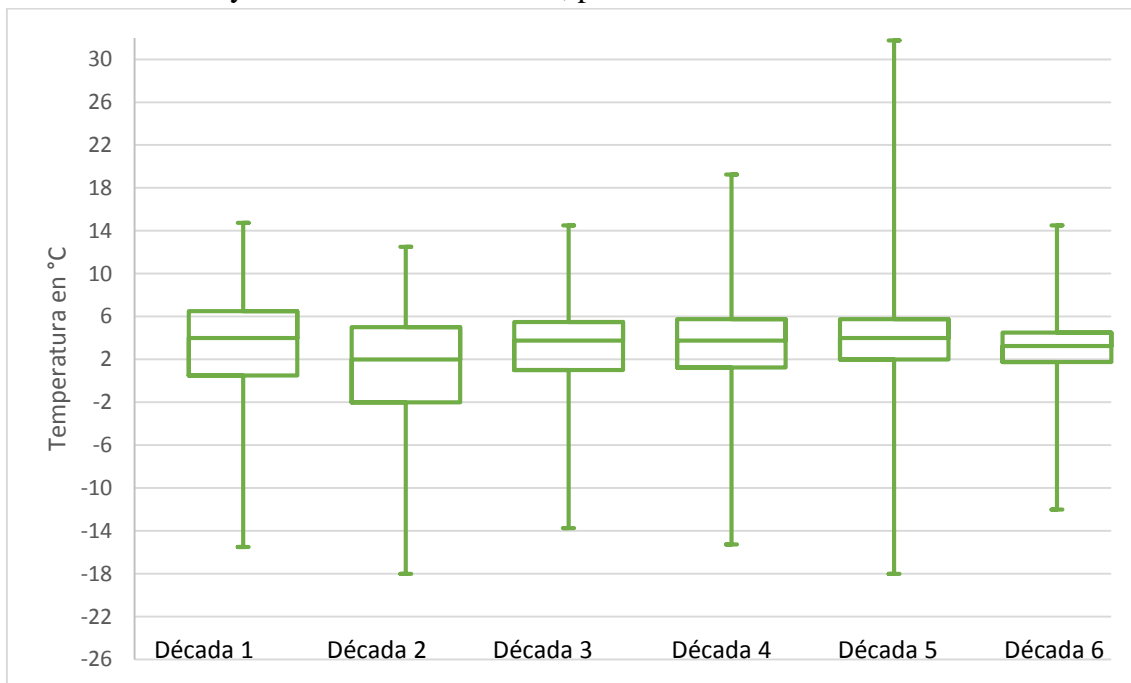


La línea vertical negra señala los 0°C.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

El Gráfico 49, presenta el diagrama de caja y bigotes. Se observa en la década 6 un claro desplazamiento del cuartil 3, hacia un diferencial menor y la mediana también se reduce de manera importante pasando de 4°C a 3.25°C en la década 6. Durante esta última década ocurre una significativa reducción en los valores extremos y dispersión en comparación con las décadas precedentes.

Gráfico 49 Diagrama de caja y bigotes de las diferencias de temperatura promedio entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, por década



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

5. ANÁLISIS DE TENDENCIAS

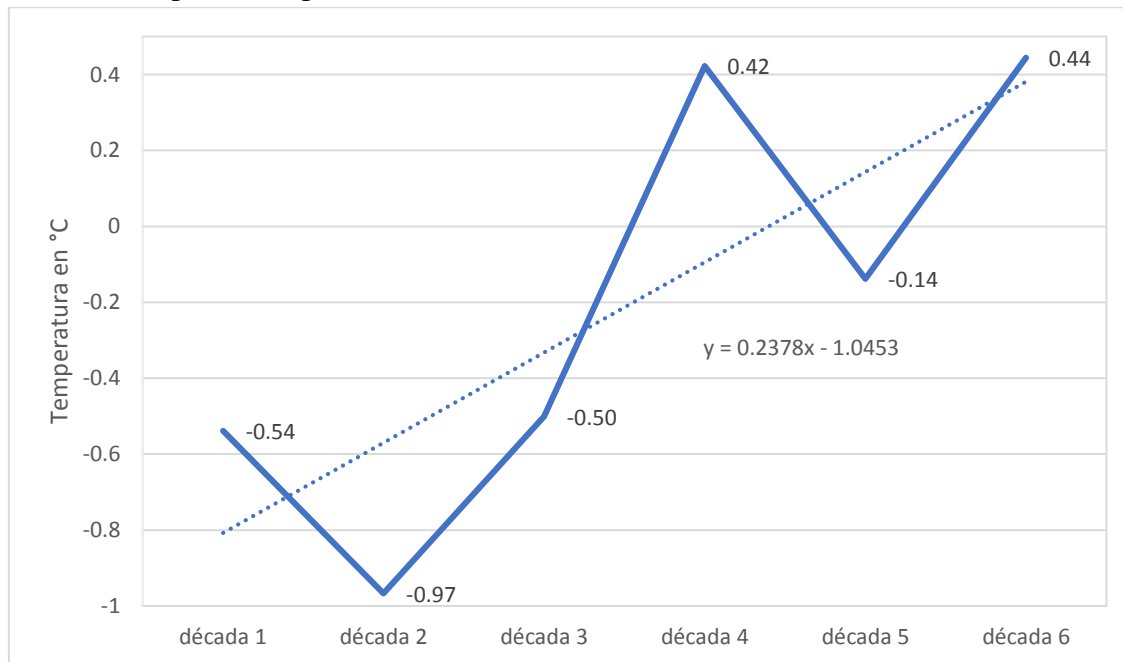
A continuación, se realiza un análisis de la tendencia en cada uno de los diferenciales antes mencionados, por medio de un ajuste lineal.

5.1. Diferenciales temperaturas mínimas

Área urbana de Monterrey-Área rural El Cuchillo

En el Gráfico 50, se presenta el promedio por década de las diferencias entre las temperaturas mínimas registradas en el área urbana de Monterrey y las registradas en el área El Cuchillo. Se destaca la tendencia creciente en este diferencial para la totalidad del periodo. Hacia la primera década, las temperaturas mínimas en El Cuchillo fueron 0.6°C más calientes que las registradas en Monterrey, hacia la década 2, este diferencial se incrementó llegando a 1°C. Durante las décadas 3 y 4, el diferencial experimentó un cambio muy importante, llegando el área urbana de Monterrey a registrar en promedio temperaturas mínimas 0.4°C más calientes que las de El Cuchillo. Posteriormente ocurre una disminución en el diferencial, pasando nuevamente el área rural a ser más caliente que la urbana en 0.14°C. Finalmente, en la última década se observa un incremento en el diferencial, similar al experimentado durante la década 4, y de acuerdo con este, Monterrey ha sido en promedio 0.4°C más caliente que El Cuchillo en los últimos diez años, 2003-2013, lo que se explica por lo encontrado en el análisis histórico, al incremento en las temperaturas mínimas en Monterrey frente a la relativa estabilidad en las temperaturas mínimas de El Cuchillo.

Gráfico 50 Diferencial de temperaturas mínimas entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, promedio por década

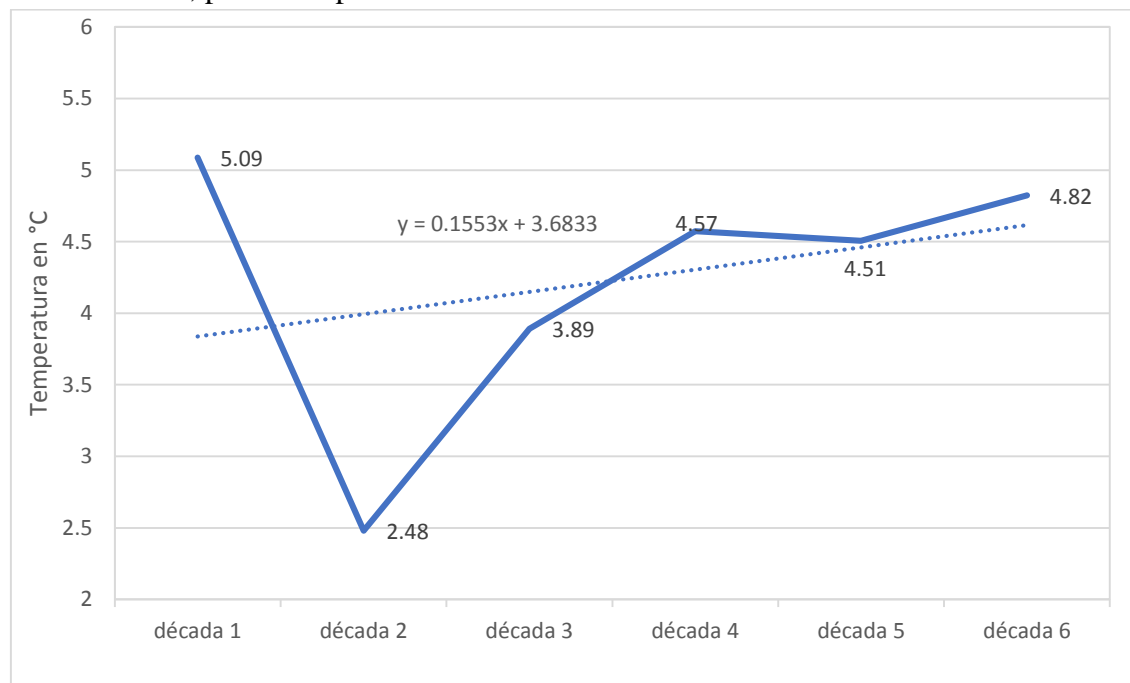


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Área urbana de Monterrey- Área rural La Rinconada

Como se mencionó antes, el área urbana ha sido históricamente más cálida que el área rural La Rinconada, cuestión relacionada principalmente a la geografía de los lugares. Se muestra en el Gráfico 51, que las diferencias a lo largo de las décadas han presentado una tendencia creciente, a partir de la década 2 a la última, pasando de 2.48°C a 4.8°C, es decir, que el área urbana ha experimentado un crecimiento superior en las temperaturas mínimas al registrado en La Rinconada. La década 1, exhibe la diferencia más grande, la temperatura promedio de Monterrey estuvo 5°C por encima de La Rinconada, niveles bastante cercanos a los registrados durante la última década. Este comportamiento particular en la década 1, como se mencionó antes se relaciona con las graves sequías experimentadas en el país que pudieron golpear de forma más severa la zona urbana que a la rural. Cabe resaltar también, que durante los últimos 10 años se evidencia una tendencia creciente en el diferencial, es decir, que el crecimiento en las temperaturas mínimas experimentado en Monterrey ha sido más fuerte al sucedido en La Rinconada en años recientes lo que ha hecho que a pesar de tener la misma tendencia, la diferencia haya aumentado.

Gráfico 51 Diferencial de temperaturas mínimas entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, promedio por década



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

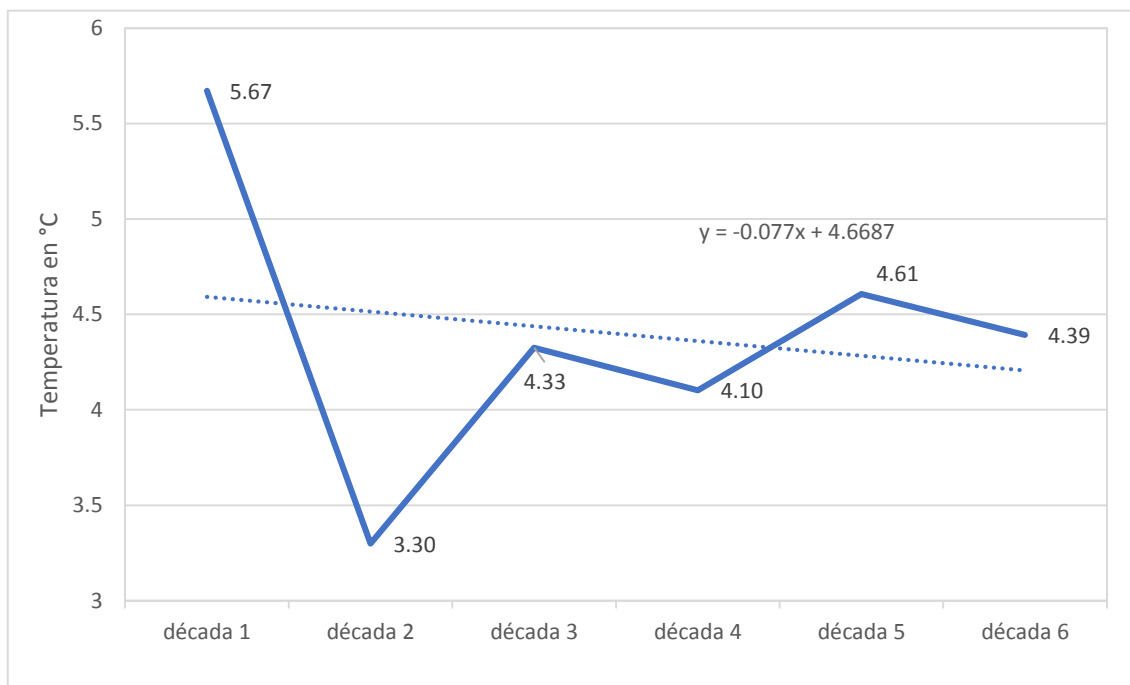
Área rural El Cuchillo- Área rural La Rinconada

Entre las zonas rurales se observa un comportamiento distinto en las temperaturas mínimas, siendo la tendencia decreciente entre la primera y última década. Durante la década 1, El Cuchillo fue en promedio 5.7°C más caliente que La Rinconada, pero en la siguiente década este diferencial experimentó una disminución importante, pasando a 3.3°C. En las décadas

siguientes, de la 3 a la 6, es posible identificar una tendencia creciente de las diferencias, siendo significativo el incremento en 1°C entre la década 2 y 3. Posteriormente, las diferencias se han mantenido más o menos estables.

También se destaca la tendencia decreciente durante la última década, lo que significa que las temperaturas mínimas en La Rinconada han estado más cercanas a las de El Cuchillo en los últimos años, lo que concuerda con los resultados anteriores, pues se explica por la relativa estabilidad de las temperaturas mínimas en El Cuchillo, y el crecimiento experimentado en La Rinconada.

Gráfico 52 Diferencial de temperaturas mínimas entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, promedio por década



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

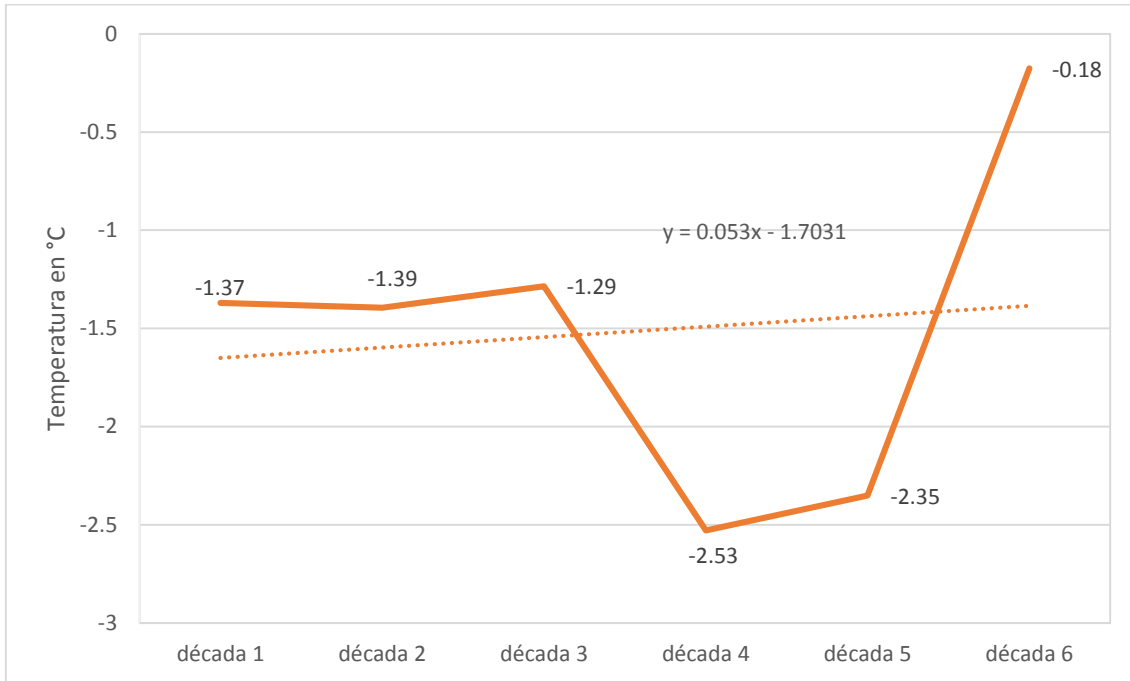
5.2. Diferenciales temperaturas máximas

Área urbana de Monterrey-Área rural El Cuchillo

Para las temperaturas máximas, se presenta el diferencial en el Gráfico 53, se evidencia un comportamiento estable durante las tres primeras décadas. En las décadas 4 y 5, ocurre un incremento del diferencial de -1.3°C a -2.3°C, es decir, que El Cuchillo se tornó más caliente que Monterrey durante esos años. Por el contrario, durante la última década el diferencial disminuyó 2°C, lo que significa que Monterrey experimentó temperaturas máximas 2°C superiores que se acercaron a las temperaturas registradas en El Cuchillo en los mismos años. Lo anterior, es coincidente con el comportamiento de las temperaturas máximas ya analizado, pues en Monterrey se presentó un incremento mientras que en El Cuchillo se redujeron lo que resultó en un menor diferencial en las temperaturas registradas. Se destaca, que la

diferencia registrada en la última década es la más bajo de todo el periodo entre las dos ubicaciones.

Gráfico 53 Diferencial de temperaturas máximas entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, promedio por década

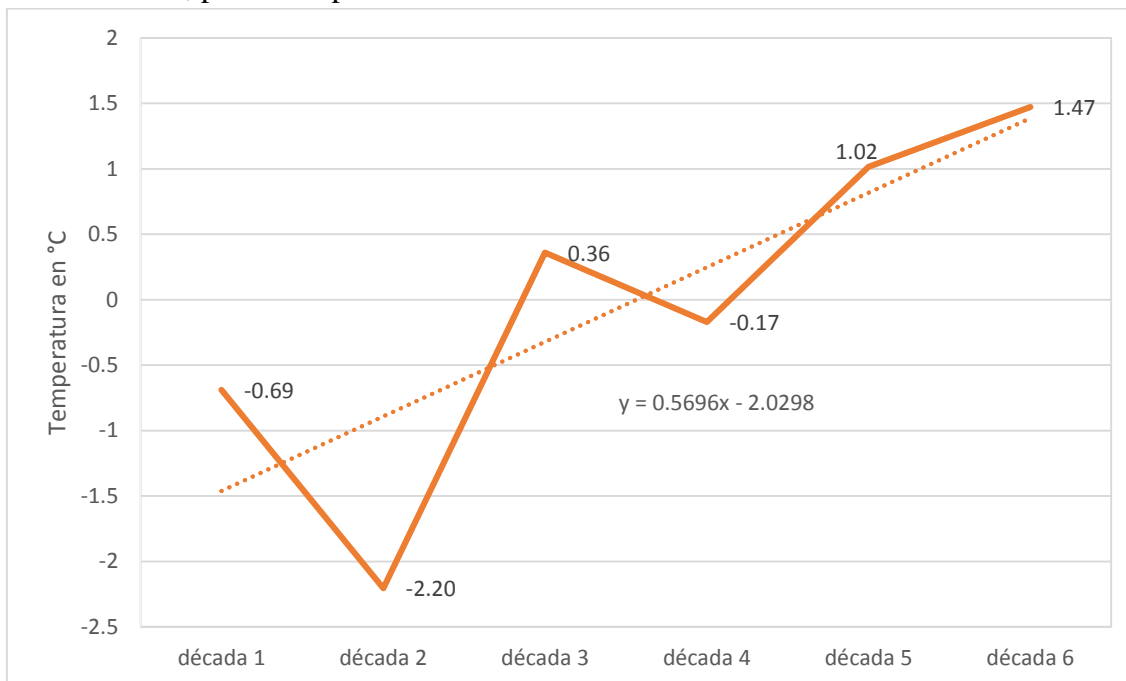


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Área urbana de Monterrey- Área rural La Rinconada

Las diferencias en las temperaturas máximas entre Monterrey y la zona de La Rinconada, Gráfico 54, muestran una tendencia creciente a lo largo de las décadas. Durante las dos primeras décadas la temperatura máxima promedio en La Rinconada fue mayor a la registrada en Monterrey, razón por la cual la diferencia fue negativa, alcanzando su punto más alto en la década 2, cuando La Rinconada fue 2.2°C más caliente que Monterrey. Posteriormente el diferencial se redujo, pasando Monterrey a registrar temperaturas máximas 0.35°C superiores, luego volvió La Rinconada a ser más cálida, pero con una diferencia de tan solo 0.17°C. Resalta el crecimiento en el diferencial experimentado en las dos décadas más recientes, en las que el área urbana de Monterrey se hizo cada vez más cálida, registrando para la última década 1.47°C más que el área rural. Hay que considerar, que en el área urbana se experimentó un crecimiento en las temperaturas máximas, mientras que en La Rinconada una relativa estabilidad, lo que explica el incremento en el diferencial.

Gráfico 54 Diferencial de temperaturas máximas entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, promedio por década

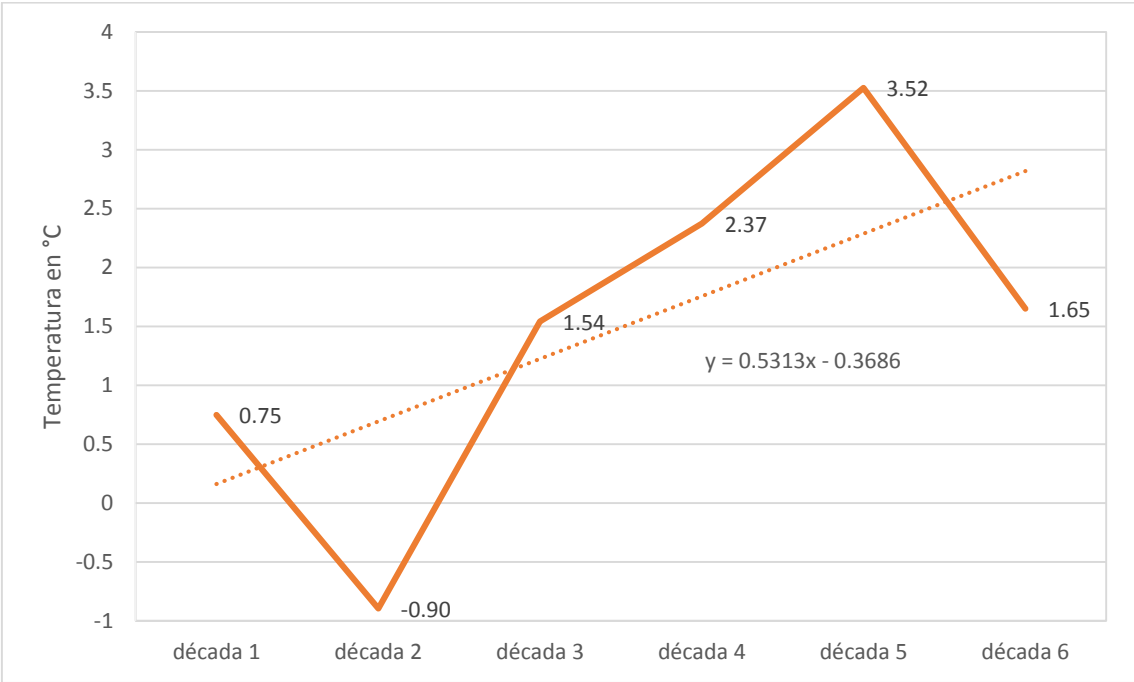


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Área rural El Cuchillo- Área rural La Rinconada

Entre las zonas rurales, Gráfico 55 el diferencial de temperaturas máximas exhibe una tendencia creciente a lo largo de todo el periodo. Se destacan tres momentos, el primero es el incremento ocurrido en el diferencial entre la década 1 y 2, donde El Cuchillo pasó de 0.75°C más cálido a ser 0.89°C más fresco en relación a La Rinconada. Segundo, el diferencial experimenta un crecimiento sostenido de las décadas 3 a 5, en las que El Cuchillo registró temperaturas máximas superiores y alcanzó su punto más alto en la década 5 cuando en promedio fue 3.5°C más caliente que La Rinconada. Tercero, en la última década se dio una disminución en el diferencial de 1.87°C que lo ubica en 1.65°C, esta reducción del diferencial resulta como se mencionó antes, de la disminución en las temperaturas máximas en El Cuchillo en años recientes.

Gráfico 55 Diferencial de temperaturas máximas entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, promedio por década



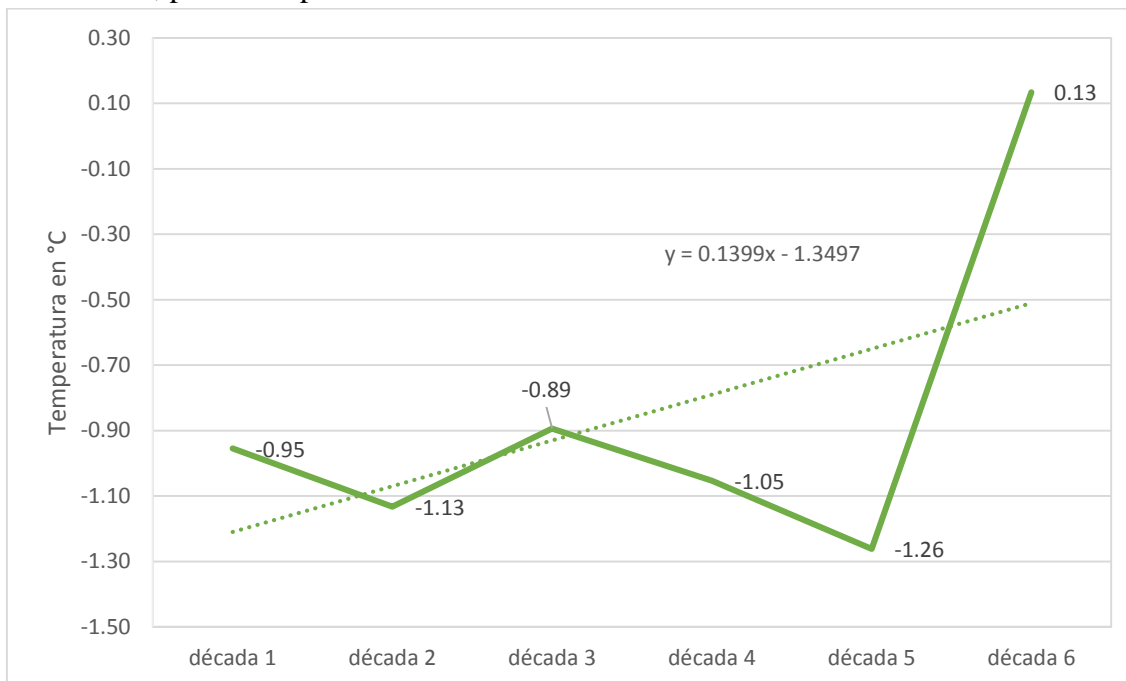
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

5.3. Diferencial temperaturas promedio

Área urbana de Monterrey-Área rural El Cuchillo

El diferencial de las temperaturas promedio, Gráfico 56, muestra una tendencia positiva para todo el periodo, explicada por el fuerte cambio del diferencial ocurrido durante la última década, donde el área urbana pasó a ser en promedio 0.13°C más caliente que el área rural, después de que durante todas las décadas anteriores fue siempre más fresca entre 0.89°C a 1.26°C. Esto sugiere que las temperaturas promedio del área urbana se han incrementado, especialmente en años recientes, respecto a las registradas en El Cuchillo.

Gráfico 56 Diferencial de temperaturas promedio entre área urbana de Monterrey y área rural El Cuchillo, promedio por década

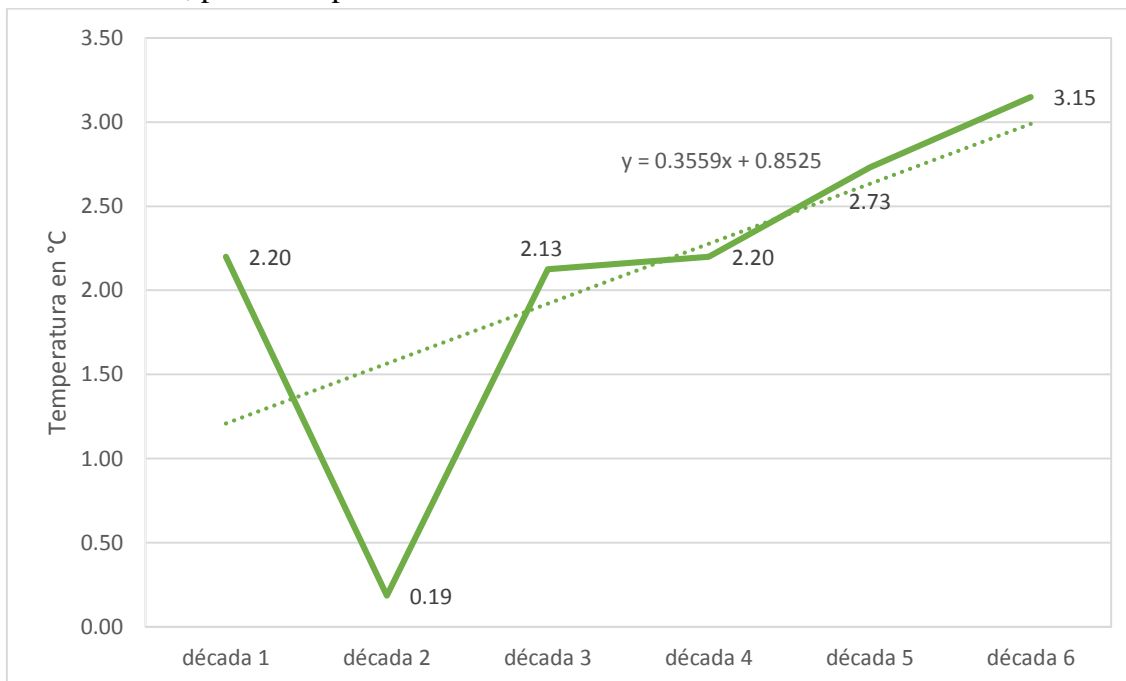


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Área urbana de Monterrey-Área rural La Rinconada

Las diferencias entre Monterrey y La Rinconada exhiben también una pendiente positiva para todo el periodo. Se destaca la fuerte reducción en el diferencial ocurrido en la década 2, cuando pasó de 2.2°C a 0.19°C. Posteriormente, la diferencia se incrementó cerca de los niveles de la década 1 para seguir creciendo hasta la última década que registra el valor más alto de todo el periodo. En años recientes, Monterrey ha sido en promedio 3.15°C más caliente que La Rinconada, lo que sugiere que ha ocurrido un calentamiento en el área urbana, respecto del área rural.

Gráfico 57 Diferencial de temperaturas promedio entre área urbana de Monterrey y área rural La Rinconada, promedio por década

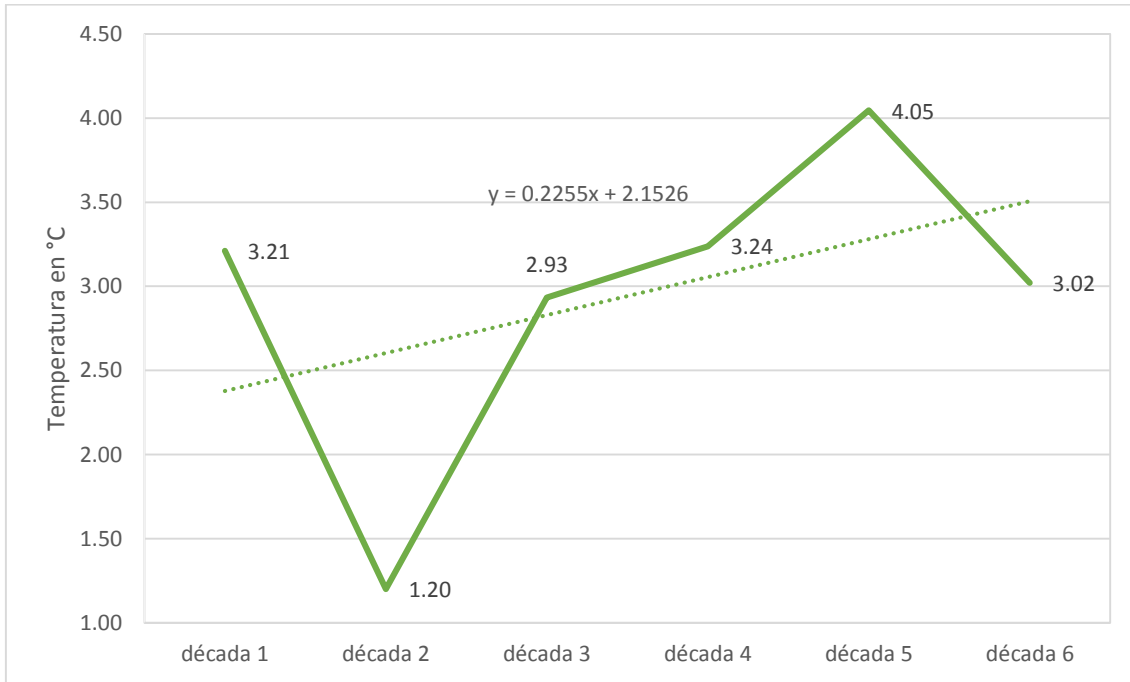


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Área rural El Cuchillo-Área rural La Rinconada

En promedio, El Cuchillo ha sido cada vez más cálido que La Rinconada, capturado por la tendencia positiva de todo el periodo. Se destaca la disminución ocurrida en la década 2, cuando la diferencia entre las temperaturas promedio fue la más baja, posteriormente, el diferencial crece pasando a ser El Cuchillo de 1.20°C a 4.05°C más caliente. Durante la última década, contrario a lo visto en los dos casos anteriores, se observa una tendencia negativa, reduciéndose el diferencial a 3.02°C, que se explica por el calentamiento experimentado en las temperaturas promedio de La Rinconada frente descenso de la temperatura promedio registrado en El Cuchillo.

Gráfico 58 Diferencial de temperaturas promedio entre área rural El Cuchillo y área rural La Rinconada, promedio por década



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

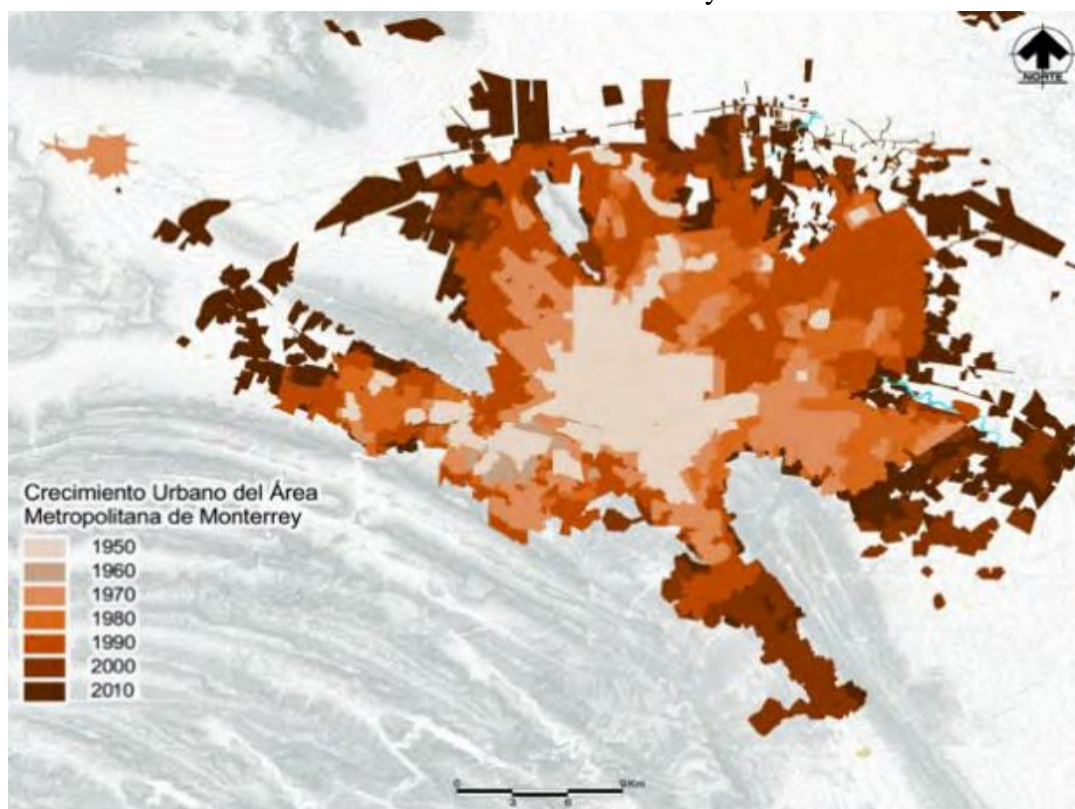
Resumiendo, los diferenciales de la zona urbana respecto a las rurales muestran la tendencia esperada, especialmente durante la última década, lo que abona evidencia de la existencia del fenómeno de isla de calor en el área urbana de Monterrey, potenciado por el fuerte crecimiento de la ciudad en las últimas décadas. Por otro lado, las diferencias entre las áreas rurales permiten observar cómo la evolución natural del clima se manifiesta de manera dispar dependiendo de las características geográficas particulares y que contraria a la tendencia creciente observada en los diferenciales urbano-rurales en la última década, se presentó una pendiente negativa en las diferencias entre zonas rurales. Esto apunta a que las temperaturas en estos lugares parecen responder a ciclos climáticos “naturales” que no son considerados en esta investigación y en los que la acción antropogénica no tiene injerencia, al menos no de manera directa, como si ocurre en las zonas urbanizadas de allí las marcadas diferencias de comportamiento en relación a Monterrey.

6. ISLA DE CALOR

El fenómeno de la isla de calor en Monterrey, como se plantea en la literatura, tiene relación directa con el crecimiento de la ciudad. De acuerdo con Flores (2009), a partir de 1940 se inició en la ciudad de Monterrey la concentración de población y de actividades económicas que la convirtieron en una de las principales ciudades industriales y zonas metropolitanas del país. El dinamismo industrial que caracteriza a la región y el considerable crecimiento económico que experimentó desde esa época hicieron que la ciudad creciera de manera muy importante a través de los años.

En la Ilustración 2 Crecimiento del área urbana de Monterrey 1950-2010 se muestra la gran expansión de la mancha urbana entre 1950 y 2010, que de acuerdo con cifras censales que pasó de 4,200 a 71,971 hectáreas, lo que significa un incremento de más de 16 veces.

Ilustración 2 Crecimiento del área urbana de Monterrey 1950-2010



Fuente: Cartografía censal urbana INEGI 2010. Tomado de Diagnóstico Social del Área Metropolitana de Monterrey, por Javier García Justicia. Fundación Comundar. Marzo 2013.

El crecimiento poblacional experimentado por la zona metropolitana entre 1950 y 2010 fue de 935.5%, bastante acelerado comparado con el promedio nacional estimado en 335.5% y con el promedio del estado 528.7%. Este gran crecimiento fue impulsado como ya se mencionó, por el desarrollo y éxito de las grandes industrias que generaron oportunidades de trabajo y motivaron la migración de gran cantidad de personas de otros estados. Con el crecimiento poblacional, el número de viviendas también creció cerca de 10 veces durante el

mismo periodo, pasando de 75,750 a 877,983 viviendas. Flores (2009) menciona que durante 1950 a 1980 la tasa anual de crecimiento del consumo de energía eléctrica fue la más alta de todo el país, 12.5%.

Tabla 7 Crecimiento de la Población, superficie urbana y viviendas particulares. 1950-2010

Zona	Población		Tasa de Crecimiento
	1950	2010	
Total Nacional	25,791,017	112,336,538	335.5%
Total Nuevo León	740,191	4,653,458	528.7%
Total ZMM	396,694	4,106,054	935.1%
% en el estado	53.6%	88.2%	
Superficie urbana (ha)	4,200	71,871	1,611%
Viviendas particulares	75,750	877,983	1,060%

Fuente: Elaboración propia a partir de Séptimo censo general de población, 6 de junio de 1950, Secretaría de Economía, Dirección General de Estadística y el Censo de Población y Vivienda 2010,

El acelerado crecimiento del área urbana puede evidenciarse en otros hechos:

- De acuerdo con el informe¹³ sobre calidad del aire en la ZMM hecho por la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), el número de vehículos totales pasó de 370,000 vehículos en 1987 a 1,890,000 en 2012, de los cuales más del 70% son particulares, de acuerdo con cifras de Sistema de Bases de Datos Municipales del INEGI, lo que significa un incremento del 410%. Se ha establecido a nivel global que los vehículos automotores son una de las principales causas de la contaminación del aire en las grandes ciudades.
- La prensa divulgó en el mes de mayo de este año los resultados del estudio: Global Urban Ambient Air Pollution Database hecho por la OMS, revelando que la ciudad de Monterrey fue la más contaminada del país durante el 2011, arriba incluso de la Ciudad de México.
- El dinámico crecimiento de la zona urbana y la insuficiencia de normas urbanísticas y de construcción dieron como resultado una mezcla desordenada de usos del suelo, lo que conllevó a una excesiva concentración de actividades comerciales y de servicios, que se tradujo en: contaminación, congestión vial y en un general deterioro de la calidad de vida urbana. Entre estos aspectos, la relación promedio de áreas verdes (m²) por habitante para la zona metropolitana en 2002 estaba alrededor de 3.91m², cifra muy lejana a los 9m² por habitante recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para las ciudades y aún más del óptimo que se ubica entre 10 y 15 m².

Se puede afirmar, que el crecimiento del área metropolitana gestó efectos negativos sobre el medio ambiente que fueron acentuándose con el tiempo, dentro de los que se destacan la

¹³ <http://sds.uanl.mx/el-deterioro-de-la-calidad-del-aire-del-area-metropolitana-de-monterrey-es-responsabilidad-de-todos/>

contaminación ambiental y la isla de calor, que se ha reforzado en años recientes, como se señaló en la sección anterior con la pendiente positiva de las diferencias de temperatura en la última década. En la Tabla 8 se muestra el cambio absoluto en el diferencial ocurrido en la totalidad del periodo, diciembre 1953-diciembre 2013.

Tabla 8 Isla de Calor en el área urbana de Monterrey. Temperaturas mínimas, máximas y promedio.

Concepto	Décadas	Monterrey-Cuchillo	Monterrey-Rinconada
Temp. Mín	1: 1953-1963	-0.54	5.09
	6: 2003-2013	0.44	4.82
	ΔDiferencial	0.98	-0.26
Temp. Máx	1: 1953-1963	-1.37	-0.69
	6: 2003-2013	-0.18	1.47
	ΔDiferencial	1.19	2.16
Temp. Prom	1: 1953-1963	-0.95	2.20
	6: 2003-2013	0.13	3.15
	ΔDiferencial	1.09	0.95

ΔDiferencial refleja el comportamiento de la isla de calor entre 1953 y 2013.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA- Servicio Meteorológico Nacional

Considerando que se parte de una comparación del área urbana de Monterrey con dos áreas rurales, se propone como medida de la isla de calor tomar el promedio de las magnitudes calculadas con respecto a cada ubicación.

En las temperaturas mínimas se encontró que, del calentamiento experimentado en Monterrey, en relación a El Cuchillo, 0.98°C es atribuible al fenómeno de isla de calor; por el contrario, en relación a La Rinconada se encontró una isla fresca de 0.26°C. Por lo tanto, tomando el promedio entre estas medidas, se concluye que de la evolución a lo largo de todo el periodo de las temperaturas mínimas +0.36°C es imputable al fenómeno de isla de calor.

Para las temperaturas máximas, con respecto a El Cuchillo la isla de calor en Monterrey se cuantificó en 1.19°C. En relación a La Rinconada, esta magnitud fue de 2.16°C. Se plantea que del crecimiento observado en las temperaturas máximas en Monterrey +1.68°C puede atribuirse a la isla de calor.

En las temperaturas promedio, la isla de calor asociada a la comparación entre Monterrey y El Cuchillo fue de 1.09°C, mientras que la calculada con respecto a La Rinconada fue de 0.95°C, por lo tanto, del calentamiento experimentado en las temperaturas promedio, +1.02°C es imputable a la isla de calor.

6.1.Efecto de la isla de calor sobre el uso de energía eléctrica

Del análisis del uso de electricidad hecho anteriormente se obtuvo que las variables climáticas son una influencia importante. Retomando estos resultados y considerando la magnitud de la isla de calor aquí encontrada, es posible determinar que:

- Dado que la temperatura mínima promedio en el área urbana de Monterrey entre 1993-2013 fue de 17.4°C y la magnitud de la isla de calor se estimó en 0.36°C, que corresponde al 2.1% del incremento total experimentado es posible afirmar, dado que la elasticidad estimada fue de 0.2%, el efecto de isla de calor ejerció una presión al alza del 0.5% en el uso de energía eléctrica para el mismo periodo.
- Recordando que para el caso de las temperaturas máximas la elasticidad estimada fue de 0.4%, y teniendo en cuenta que el promedio de temperatura para los mismos años fue de 29.1°C, de los cuales 1.68°C fueron derivados de la isla de calor que corresponde a 5.8% de temperatura adicional, que se traducen en 2.2% de mayor uso de electricidad.
- Y, las temperaturas promedio en los mismos años se ubicaron en 23.3°C, de los cuales 1.02°C son atribuidos a la isla de calor que corresponden al 4.4% del incremento. La elasticidad estimada para esta temperatura fue de 0.35% que en términos de uso de electricidad se reflejaron en un aumento del 1.5%.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE POLÍTICA

Se detectó un claro proceso de calentamiento urbano durante el periodo 1953-2013 y en todas las variables climáticas analizadas: temperatura ambiental (máxima, mínima, promedio), días con calor extremos y olas de calor; a diferencia de las zonas rurales, que presentaron comportamientos no tan claros, lo que confirmó la presencia de una isla de calor en la ZMM, calculada en promedio en 1.02°C.

Este hallazgo no sorprende, pues como se menciona en la literatura, la isla de calor es una respuesta natural de la transformación topográfica de los desarrollos urbanos al medio natural: pavimentación, construcciones, cantidad de superficie verde, actividad industrial, tráfico, densidad poblacional, etc. El resultado que se destaca es que del análisis que relaciona la isla de calor con el uso de energía eléctrica se confirmó la hipótesis planteada en esta investigación: este fenómeno mostró tener incidencia sobre el uso de energía eléctrica, presionándolo más allá de lo normal entre 0.5% y 2.2%.

Lo encontrado para las áreas rurales da cuenta de las manifestaciones heterogéneas al proceso de calentamiento global relacionadas con las diferentes características geográficas entre las dos zonas, como son la altitud y la distancia al mar, entre otras, que parecen ser factores determinantes en la respuesta al cambio climático.

Dentro de las limitaciones de estos resultados, es la no incorporación de factores climáticos adicionales como la nubosidad, vientos, etc., que la EPA señala tienen influencia directa sobre el efecto ICU. Otra importante limitación es, como se menciona en la literatura, que dentro de las mismas ciudades se registran microclimas que son resultado directo de la forma y usos del suelo de las mismas, así, zonas de las ciudades densamente pobladas, con alto nivel de actividad o tráfico registrarán temperaturas superiores a zonas puramente residenciales. Por tanto, dado que se cuenta con una sola medición para la ciudad, la medida de la isla de calor aquí estimada puede no ser válida para todas las zonas de ciudad. Igualmente, la variable que se utilizó para capturar el uso de electricidad, está a nivel estatal, por lo que no captura las diferencias en la intensidad del uso que pueden darle, por ejemplo, personas de distinto nivel socioeconómico. Ahondar en estos temas, configuran por sí mismos nuevas líneas de investigación. Otro aspecto que puede resultar interesante, dado que el clima es un elemento multicausal y la ciudad es un concepto que evoluciona, es explorar modelos de dinámica de sistemas que permitan la incorporación de múltiples factores que cambian en el tiempo y que se relacionan unos a otros, pudiendo así capturar de manera más directa el efecto de cambios en cada una de estas variables sobre el uso de la electricidad. Como propuesta metodológica, resultaría interesante realizar el análisis de tendencias de los diferenciales por medio de otras herramientas estadísticas e ir más allá de la tendencial lineal aquí explorada, como pueden ser los test de Spearman, de Sen y de Mann-Kendall ampliamente usados en los estudios climatológicos debido a que permiten dar un mejor tratamiento a los datos perdidos, bastante comunes en largas series de datos.

Como recomendación de política, se propone implementar una estrategia de mitigación de la isla de calor por medio del mejoramiento e incremento de las áreas verdes en la ciudad, estas han mostrado tener múltiples beneficios. Dentro de las funciones y servicios ambientales, Alanís (2005) destaca:

- Forman barreras contra la acción del viento y amortiguan ruidos.
- Interceptan la radiación solar favoreciendo la humedad ambiental, las precipitaciones y el microclima regulando la temperatura.
- Previenen inundaciones y evitan la erosión del suelo, favorecen la infiltración del agua de lluvia a los mantos freáticos.
- Proveen abrigo y alimentación a la fauna silvestre.
- Fungen como filtros de agentes contaminantes y partículas suspendidas del aire, absorben dióxido de carbono y otros contaminantes atmosféricos y producen oxígeno.
- Los espacios arbolados sirven de descanso y esparcimiento, debido a que son atractivos visualmente y forman un entorno del paisaje agradable.

Este tipo de políticas deben considerar la inequidad que existe en la distribución de áreas verdes dentro de la ciudad. Este hecho fue reportado por el Estudio de “Áreas Verdes del Municipio de Monterrey”, realizado por la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) en 2013. Dentro del área urbana, el mayor déficit de áreas verdes están en la zona centro y norte, pero en la primera especialmente, no existen áreas con potencial para convertirse en áreas verdes por lo que en este caso proponen medidas de mejoramiento de las ya existentes; y en zonas de desarrollo inmobiliario existe la oportunidad de crear espacios verdes que brinden beneficios tanto ecológicos como sociales, permitiendo una mejor adaptación al crecimiento de la ciudad. Otras medidas contra el recalentamiento urbano pueden ser azoteas y muros verdes, estructuras con mayor albedo, etc. Todas estas medidas pueden lograr reducir la cantidad de energía solar que entra en contacto directo con las edificaciones lo que tendrá un efecto directo sobre la intensidad de la ICU que se traduce en menores temperaturas, trayendo como consecuencia la reducción del uso necesario de aparatos de climatización para enfriar los espacios interiores lo que significa un menor uso de electricidad que conlleva a una reducción de la contaminación y a una mejora en la calidad del aire. Este tipo de acciones como lo señala la OECD (2010) pueden generar un círculo virtuoso de mitigación y adaptación que finalmente mejoren la calidad de vida en las ciudades.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alanís, G. J. (2005). El arbolado urbano en el área metropolitana de Monterrey. *Ciencia UANL enero-marzo, Vol VIII, número 001*, 20-32.
- Ali, M., Jawed, M., & Sharif, M. (2013). Relationship between extreme temperature and electricity demand in Pakistan. *International Journal of Energy and Enviromental Engineering*, 4-36.
- Al-Zayer, J., & Al-Ibrahim, A. (1996). Modelling the impact of Temperature on Electricity Consumption in the Eastern Province of Saudi Arabia. *Journal of Forecasting, Vol 15*, 97-106.
- Austria, & Bandala. (2016). Maximum Temperatures and Heat Waves in Mexicali, México: Trends and Thershold Analysis. *Air, Soil and Water Research*, 21-28.
- Badri, M. A. (1992). Analysis of demand for electricity in the United States. *Energy Vol 17*, 725-733.
- Bessec, M., & Fouquau, J. (2008). The non-linear link between electricity consumption and temperature in Europe: A threshold panel approach. *Energy Economics*, 2705-2721.
- Bhattacharyya, S., & Timilsina, G. (2009). Energy Demand Models for Policy Formulation. A comparative Study of Energy Demans Models. *Policy Research Working Paper. The World Bank*, 1-150.
- Bouchama, A., & Knochel, J. (2002). Heat Stroke. *N Engl J Med* 346, 1978-1988.
- Chandler, T. J. (1965). Temperature. En *The Climate of London* (págs. 126-184). Londres: Hutchinson of London.
- Corral, J. S. (2010). *Factores que influyen en la producción de vivienda en México*. Ciudad de México: Vivienda Social.
- Do, L. P., Lin, K.-H., & Molnár, P. (2016). Electricity consumption modelling: A case of Germany. *Economic Modelling* 55, 92-101.
- Evans, J., & Schiller, S. d. (2005). La isla de calor en ciudades con clima cálido-húmedo: el caso de Tampico, México. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9, 11.37-11.42.
- Facultad de Ciencias Forestales UANL. (2013). *Áreas verdes del Municipio de Monterrey*. Monterrey: Gobierno Municipal de Monterrey 2012-2015.
- Flores, O. (2009). *Monterrey origen y destino: Monterrey, ciudad internacional 1910-1980*. Monterrey, México: Municipio de Monterrey.
- Florescano, E., Sancho, J., & Perez, D. (1980). Las sequías en México: historia, características y efectos. *Comercio Exterior, vol 30, num 7*, 747-757.

- García, F., Fuentes, O., & Matías, L. (2007). Sequías. *Serie Fascículos. Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED*.
- García, R., Tejeda, A., & Jáuregui, E. (2008). Downscaling estadístico aplicado a las ondas de calor. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología AEC Serie A, n°6*, 531-541.
- García-Cueto, R., Jáuregui, E., Toudert, D., & Tejeda-Martínez, A. (2007). Detection of the urban heat island in Mexicali B.C, México and ist relationship with land use. *Atmósfera*, 2(20), 111-131.
- Georgii, H.-W. (1968). The effects of air pollution on urban climates. *Notes*, 624-635.
- Guhathakurta, S., & Gober, P. (2007). The impact of the Phoenix urban heat island on residential water use. *Journal of the american planning association*, 317-329.
- Henley, A., & Peirson, J. (1997). Non-linearities in electricity demand and temperature: parametric versus non-parametric methods. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics* 59, 149-167.
- Jáuregui, E. (1979). La isla de calor en Toluca, Mex. *Investigaciones geográficas*(9), 27-37.
- Jáuregui, E. (1986). Desarrollo del a isla urbana de calor en grandes ciudades de México. *Revista de Geografía*, 1(1), 45-.
- Jáuregui, E. (1992). La isla de calor urbano en la ciudad de México a finales del siglo XIX. 31-39.
- Kratzer, A. (1956). Temperature. En *The Climate of cities* (págs. 64-85). Massachusetts: American Meteorological society.
- Lee, C.-C., & Chiu, Y.-B. (2013). Modeling OECD energy demand: An international panel smooth transition error-correction model. *International Review of Economis and Finance*, 372-383.
- Luber, G., Sánchez, C., & Conklin, L. (28 de 07 de 2006). *Heat-Related Deaths- United States, 1999-2003*. Recuperado el 06 de 11 de 2015, de <http://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm5529a2.htm>
- Magaña, V. O. (2013). *Servicio para la asistencia técnica para el desarrollo de escenarios de cambio climático para el análisis de impactos en el sector salud*. Ciudad de México: Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios COFEPRIS.
- Magee, N., Curtis, J., & Wendler, G. (1999). The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska. *Theoretical and Applied Climatolgy*(64), 39-47.
- Maqueda, M., & Sánchez, L. (2011). Curvas de demanda de energía eléctrica en el sector doméstico de dos regiones de México. *Boletín IIE*, 172-180.

- Martínez, J. M. (2014). Estudio de la isla de calor de la ciudad de Alicante. *Investigaciones Geográficas. Instituto Interuniversitario de geografía. Universidad de Alicante*(62), 83-99.
- Martínez-Austria, P. F., Bandala, E., & Patiño-Gómez, C. (2015). Temperature and heat wave trends in northwest Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1-7.
- Martín-Rodríguez, G., & Cáceres-Hernández, J. J. (2005). Modelling the hourly Spanish electricity demand. *Economic Modelling* 22, 551-569.
- Meehl, G., & Tebaldi, C. (2004). More intense, More frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science*, 305, 994-997.
- Miller, N., Hayhoe, K., Jin, J., & Auffhammer, M. (2007). Climate, Extreme Heat, and Electricity Demand in California. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1834-1844.
- Moral-Carcedo, J., & Vicéns-Otero, J. (2005). Modelling the non-linear response of Spanish electricity demand to temperature variations. *Energy Economics* 27, 477-494.
- Morales, C., Madrigal, D., & González, L. (2007). Isla de calor en Toluca, México. *Ciencia Ergo Sum*(Enero-Noviembre), 307-316.
- Morales-Ramírez, D., & Alvarado-Lagunas, E. (2014). Análisis del Consumo de Energía Eléctrica Domiciliaria en Tampico, Tamaulipas. *Ciencia UAT* 8(2), 62-67.
- OECD. (2010). *Cities and Climate Change*. OECD Publishing.
- Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment Pergamon press*, 7, 769-779.
- Peña, O. (1980). Información climatológica para la planificación urbana. *Revista geográfica*(91/92), 27-40.
- Pérez, J., & Acosta, C. (1980-1989). Modelos de demanda residencial e industrial de electricidad para Colombia y estimaciones de elasticidades precio. *Desarrollo y Sociedad N.19*, 69-93.
- Psiloglou, B., Giannakopoulos, C., Majithia, S., & Petrakis, M. (2009). Factors affecting electricity demand in Athens, Greece and London, UK: A comparative assessment. *Energy* 34, 1855-1863.
- Ramírez, D., Cuevas, J., & Curiel, D. (2012). Determinantes del consumo de energía eléctrica residencial en la zona metropolitana de Monterrey. *Universidad y Empresa*, 79-98.
- Ramos, G., Fiscal, R., Maqueda, M., Sada, J., & Buitrón, H. (1999). Variables que influyen en el consumo de energía eléctrica. *Boletín IIE*, 11-18.

- Romero-Jordán, D., Peñasco, C., & Río, P. d. (2014). Analysis the determinants of household electricity demand in Spain: An econometric study. *Electrical Power and Energy Systems* 63, 950-961.
- Rosenfeld, A., Akbari, H., & Joseph Romm, M. P. (1998). Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings*(28), 51-62.
- Ruddell, D., Harlan, S., Grossman-Clarke, S., & Buyantuyev, A. (2010). Risk and Exposure to Extreme Heat in Microclimates of Phoenix, AZ. En P. S. Showalter, & Y. Lu (Edits.), *Geospatial techniques in urban hazard and disaster analysis* (págs. 179-202). Heidelberg: Springer.
- Salisu, A. A., & Ayinde, T. O. (2016). Modelling energy demand: Some emerging issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, 1470-1480.
- Sarricolea, P., Aliste, E., Castro, P., & Escobedo, C. (2008). Analizar la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología*, 8, 71-84.
- Sherwood, S., & Huber, M. (2010). An adaptability limit to climate change due to heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 9552-9555.
- Stanton, K., & Gupta, P. (1969). Forecasting annual or seasonal peak demand in electric utility systems'. *IEEE paper 69TP 648-PWR. Summer Power Meeting*, 22-27.
- Thompson, R. (1976). Weather sensitive electric demand and energy analysis on a large geographically diverse power system-Application to short term hourly electric demand forecasting. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*.
- Trejo Nieto, A. (2013). Las economías de las zonas metropolitanas de México en los albores del siglo xxi. *Estudios Demográficos y Urbanos Vol 28*, 545-591.
- United States Environmental Protection Agency. (s.f.). EPA. Recuperado el 17 de 10 de 2015, de <http://www2.epa.gov/heat-islands>
- US. EPA. (2006). *Excessive Heat Events Guidebook*. Washington: Environmental Protection Agency.
- Valor, E., Meneu, V., & Caselles, V. (2001). Daily Air Temperature and Electricity Load in Spain. *American Meteorological Society*, 1413-1421.