INFORME DE RESULTADOS

Evaluación del impacto del uso de "*Cool Roof*" en el ahorro de energía en edificaciones no-residenciales y residenciales en México

Elaborado para:

Comisión Nacional de Uso Eficiente de Energía (CONUEE)

Av. Revolución 1877, 6° piso, Col. Loreto. Del. Álvaro Obregón, México, D.F..

Marzo 22, 2014

Autoría y colaboradores

Gabriela del Socorro Álvarez García (Autor Principal)
CENIDET
Bipin Shah
WinBuild Inc.
Francisco Rubin
Productos Químicos Industriales S.A.
Haley Gilbert
Heat Island Group-LBNL
Ignacio Martin Domínguez
CIMAV
Kurt Shickman
Global Cool Cities Alliance

INDICE	Página
Resumen	4
1. Antecedentes	4
2. Metodología	5
3. Clima de México	6
3.1 Mapeos de variables climáticas	6
3.1.1. Radiación solar anual	7
3.1.2 Temperatura ambiente promedio anual	8
3.1.3 Humedad relativa promedio anual	9
4. Ciudades seleccionadas de acuerdo a la clasificación climática INEGI	9
4.1 Clima de las ciudades seleccionadas	12
5. Descripción de las edificaciones base	15
5.1 Edificación No Residencial base	15
5.2 Edificación Residencial base	17
6. Simulación dinámica de las edificaciones base.	21
6.1. Edificación no-residencial. Caso A: no aislante en el techo.	21
6.1.1 Edificación no-residencial – Caso B: aislante en el techo.	22
6.1.2 Ahorro de energía anual de edificaciones no-residenciales por ciudad.	27
6.1.3 Emisiones de gas de invernadero por edificación no-residencial por ciudad.	28
6.1.4 Ahorros monetarios resultantes de los ahorros de energía y reducción de emisiones en edificaciones no-residenciales.	29
6.2. Edificación residencial. Caso A: no aislante en el techo.	32
6.2.1 Edificación residencial – Caso B: aislante en el techo.	33
6.2.2 Ahorro de energía anual de edificaciones Residenciales por ciudad.	38
6.2.3 Emisiones de gas de invernadero por edificación no-residencial por ciudad.	39
6.2.4 Ahorros monetarios resultantes de los ahorros de energía y reducción de emisiones en edificaciones residenciales.	41
7. Consumo energético, ahorro y y mitigación de gases de invernadero para áreas de techos de acuerdo a sus colores.	45
7.1 Metodología	45
7.2 Áreas de imágenes depuradas en las áreas de las ciudades.	47
8. Conclusiones	52
9. Referencias bibliográficas	54
ANEXO 1: 700 ciudades: nombre, Estado, latitud, longitud, temperatura ambiente, Grados-Día anuales de enfriamiento y calentamiento.	55

Resumen

El informe reporta la evaluación del impacto del uso de los techos frescos "*cool roofs*" en el consumo energético y el ahorro de energía en edificaciones no-residenciales y Residenciales en México por medio de la metodología de simulación dinámica. Se utilizaron los programas Design Builder y EnergyPlus. Se consideraron las seis zonas climáticas definidas por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) y se seleccionron 7 ciudades representativas para simular edificaciones residenciales y no residenciales. Los climas y las ciudades seleccionadas fueron: cálido húmedo (Villahermosa), cálido sub-húmedo (Mérida), muy seco (Hermosillo), seco (Monterrey), templado húmedo (Tulancingo), templado sub-húmedo (Guadalajara y Ciudad de México). Se utilizó el programa Meteonorm para obtener la información climática de estas ciudades.

Las edificaciones no-residenciales y Residenciales base fueron definidas considerando el cumplimiento de las normas mexicanas NOM-008-ENER-2001 (no-residencial) y NOM-020-ENER-2011 (residencial), incluyendo los niveles de aislamiento dados por los coeficientes de transferencia de calor globales del techo. Las cargas de enfriamiento fueron calculadas para ambas edificaciones en las 7 ciudades. En las simulaciones se cambió la reflectancia del techo con el fin de determinar el efecto de los techos frescos en las cargas de refrigeración de los edificios no-residenciales y residenciales. Los resultados indicaron que los ahorros de energía para enfriamiento fueron mayores en climas cálidos y secos. Los climas templados no muestran ahorros significativos, sin embargo la Cd. de México, por la gran extensión urbana, los ahorros para las edificaciones no residenciales resultan ser importantes. La reducción de gases de invernadero de CO_2 resultante de esos ahorros fue calculada. Los costos de los ahorros de energía, los costos de inversión debidos al cambio de reflectancia con referencia a techo rojo, y los tiempos de retorno de la inversión son calculados considerando las tarifas eléctricas de CFE actuales. Los tiempos de retorno de la inversión, en todos los casos, son considerablemente menores que el tiempo de vida útil del recubrimiento (5 años). Para los climas secos y cálidos los ahorros en costos son significativos, por lo tanto, los tiempos de recuperación de la inversión son menores que en el caso de los climas templados.

Para evaluar la penetración de productos de techos frescos, se seleccionaron 5 ciudades para determinar el área de color de los techos. Las imágenes fueron procesadas en Manifold GIS 8.0 para calcular el área de techo por color. El color del techo es un indicativo de la reflectancia. Se calculó el consumo de energía, los ahorros y la mitigación emisiones de carbono de los datos de reflectacia de techos existente. Para las ciudades de Mérida y Monterrey, ubicadas en climas cálidos, se calcularon ahorros de 1.6 TWh y se mitigaron 1,154,000 toneladas de CO_2.

1. Antecedentes

México es un miembro del grupo de trabajo de techos fríos "*Cool Roofs*" del GSEP (Global Superior Energy Performance) parte del Ministerio de Energía Limpia (CEM). CONUEE fue designada como la agencia líder para coordinar los esfuerzos del grupo de trabajo de techos fríos en México. En Febrero de 2012, CONUEE organizó una conferencia con las agrupaciones interesadas para definir un plan de acción para "*Cool Roofs*" en México. A partir de esta junta, CONUEE solicitó un estudio de factibilidad técnica y económica de la aplicación de "*Cool Roofs*" en México, para justificar la implementación de un proceso para generar una normativa oficial. El estudio, solicitado por CONUEE, fue diseñado para analizar el impacto de enfriar las superficies del techo en el ahorro energético de los edificios en México.

Para calcular el potencial de energía se emplearon dos métodos. Primero, utilizando el EnergyPLus se realizaron simulaciones dinámicas de los edificios base que fueron usados para obtener los valores de las Normas Mexicanas NOM-008-ENER-2001 y NOM-020-ENER-2011. Las simulaciones permitieron cambiar las reflectancias del techo para cuantificar el consumo energético. Segundo, se utilizan imágenes de satélite y un programa de sistema de información geográfica (Manifold 8.0), para calcular las áreas de techos y estimar los

valores de reflectancia para calcular el potencial de ahorro de energía de 5 ciudades. CONUEE aprobó la metodología para este estudio en una reunión el 30 de enero de 2013.

2. Metodología

Se recopiló la información sobre las 6 zonas climáticas definidas en México por el INEGI (INEGI, 2009). Se acceso a la base de datos del Meteonorm, para generar las variables meteorológicas de 700 ciudades de México correspondientes a las diferentes zonas climáticas. Se realizaron los mapeos de la radiación solar anual, temperaturas, humedad, velocidad de viento, índice de nubosidad promedios anuales. A partir de la información de documentos obtenida por Winbuild and Lawrence Berkeley National Labs, EE.UU., se obtuvo la información de los edificios de referencia o edificios base, es decir, los mismos modelos de construcción utilizados para la elaboración las normas mexicanas NOM-008-ENER-2001 (edificios no-residenciales) y la NOM-020-ENER-2011-ENER-2011 (edificios residenciales).

Para las simulaciones dinámicas, se utilizaron los programas Design Builder y EnergyPlus. Estos programas calculan las cargas térmicas de enfriamiento y calentamiento utilizando la información climática, arquitectónica y térmica de las edificaciones. Para la simulación, se consideraron 7 ciudades ubicadas en 6 climas de la República Mexicana. Para determinar el efecto de la carga de enfriamiento por edificio con techo fresco "*cool roof*", se varió la reflectancia del techo en el rango de 0.1-0.9. Se calcularon los consumos de energía y ahorros de energía. Adicionalmente, a partir del consumo energético, se calculó el CO_2 emitido hacia la atmósfera. Posteriormente, se realizó la recopilación de información del número de edificaciones no-residenciales y residenciales por ciudad. Con esta información se realizó una estimación del ahorro total de energía por ciudad.

El periodo de retorno de la inversión fue calculado considerando la inversión inicial del recubrimiento blanco. El periodo de retorno de la inversión máximo fue menor a un año para la edificación no residencial y de tres años para la edificación residencial.

Finalmente, la penetración del producto de recubrimientos para techos reflectivos fue evaluado usando imágenes de colores de techos de Google Earth Plus y Manifold GIS 8.0. Los resultados muestran un análisis del potencial de los ahorros de energía por el uso de los *cool roof* en esas ciudades considerando la reflectancia de techos existente.

3. Clima de México

Generalmente, el clima es el promedio de las condiciones atmosféricas durante un período prolongado de tiempo sobre una gran región. Los patrones de clima a escala pequeña, o microclimas, resultan de la influencia de la topografía, la estructura del suelo, y las formas urbanas. El clima en México es muy variado, más del 50% de las regiones son calientes o cálidas, la gente utiliza más la electricidad para el acondicionamiento de aire y esto impacta fuertemente en el consumo energético. De acuerdo con el INEGI, que se pueden clasificar por la temperatura (frío y templado) y humedad (húmeda, subhúmeda, seca y muy seca) (INEGI, 2011).

El clima seco se encuentra en la mayoría de las regiones del centro y norte de México, que comprende el 28.3% del territorio nacional. Se caracteriza por la circulación de los vientos, que causan nubosidad y lluvias escasas de 300 a 600 mm por año, las temperaturas medias de 22 a 26°C en algunas regiones, y otros de 18 a 22°C.

El clima muy seco se encuentra en el 20.8% del territorio nacional. Se caracteriza por una temperatura media de 18-22°C, con casos extremos más de 26°C, que presentan las precipitaciones medias anuales de 100 a 300 mm.

El clima cálido se divide en cálido húmedo y cálido subhúmedo. Cálido húmedo se encuentra en el 4.7% del territorio nacional. Se caracteriza por una temperatura media anual entre 22 y 26°C y la precipitación media de 2,000 a 4,000 mm anuales. Mientras tanto, un clima cálido subhúmedo se encuentra en el 23% del país. Se

caracteriza por temperaturas medias anuales entre 22 y 26°C y la precipitación media de 1,000 y 2,000 mm al año, pero en algunas regiones es más de 26°C.

El clima templado se divide en templado húmedo y templado sub-húmedo. Templado húmedo se encuentra en el 2.7% del territorio nacional. Se caracteriza por temperaturas medias entre 18 y 22°C y la precipitación media de 2000-4000 mm anuales. Mientras tanto, el clima templado sub-húmedo se encuentra en el 20.5% del territorio nacional. Se caracteriza por temperaturas medias anuales entre 10 y 18°C y 18-22°C, pero en algunas regiones es menor de 10°C, precipitación media de 600 a 1000 mm durante el año. (INEGI 2011).

Generalmente los climas de la República Mexicana son calientes y húmedos a lo largo de las costas y cálidos y secos en la mayoría del territorio mexicano. Los climas cálidos, secos y muy secos abracan el 77% del territorio nacional y los climas templados el 23%.

3.1. Mapeos de Variables Climáticas

Para visualizar el clima de la República Mexicana en detalle, se seleccionaron setecientas ciudades para llevar a cabo los mapeos de radiación solar anual, temperatura ambiente, humedad, velocidad de viento e índice de nubosidad promedios anuales. Se utilizó la base de datos del año 2005 por ser el más reciente en el programa, y debido al hecho de que no todas las ciudades tienen el año meteorológico típico.

La Figura 3.1 presenta la República Mexicana, en la cual se encuentran señaladas las 700 ciudades. Los nombres de los Estados y el número de ciudades ubicadas por Estado se muestran en la Tabla 3.1. Las coordenadas de latitud y longitud de las 700 ciudades se encuentran en el ANEXO 1.

Figura 3.1.Localización de las 700 ciudades de la República Mexicana.

Tabla 3.1. Número de ciudades por Estado.

No.	Estados		No. of Ciudades
1	Aguascalientes	AGS	13
2	Baja California Norte	BCN	20
3	Baja California Sur	BCS	20
4	Campeche	CAMP	17
5	Coahuila	COAH	28
6	Colima	COL	14
7	Chihuahua	CHIH	31
8	Chiapas	CHIS	26
9	Distrito Federal	DF	31
10	Durango	DGO	20
11	Guerrero	GRO	25
12	Guanajuato	GTO	21
13	Hidalgo	HGO	19
14	Jalisco	JAL	35
15	Edo. de México	MEX	44
16	Michoacán	MICH	28
17	Morelos	MOR	19
18	Nayarit	NAY	15
19	Nuevo León	NL	16
20	Oaxaca	OAX	33
21	Puebla	PUE	21
22	Querétaro	QRO	14
23	Quintana Roo	QROO	11
24	Sinaloa	SIN	18
25	San Luis Potosí	SLP	18
26	Sonora	SON	29
27	Tabasco	TAB	10
28	Tamaulipas	TAMS	17
29	Tlaxcala	TLAX	15
30	Veracruz	VER	36
31	Yucatán	Yuc	16
32	Zacatecas	ZAC	20

A continuación, las Figuras 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3 presentan los mapas de radiación solar media anual, la temperatura ambiente promedio anual y la humedad relativa promedio anual.

3.1.1 Radiación solar anual

La Figura 3.1.1 presenta la radiación solar incidente promedio anual (kW/m^2). La escala de la radiación solar por color va desde 4.8 kW/m^2 (azul) a 5.8 kW/m^2 (rojo). Estados con la radiación solar anual media alta 5.5-5.6 kW/m^2 y> 5.7 kW/m^2 fueron en su mayoría los Estados del lado noroeste (Sonora, Sinaloa, Baja California) y del sur del país (Guerrero). Los estados con la radiación solar incidente media de 5.0 kW/m^2 a 5.4 kW/m^2 estuvieron entre los costas del oeste y el este. La radiación solar incidente más baja <5.0 kW/m^2 se encontró en los estados ubicados cerca de la costa oriental (al este de Tamaulipas y Veracruz), esto debido a la alta humedad proveniente del Golfo de México.

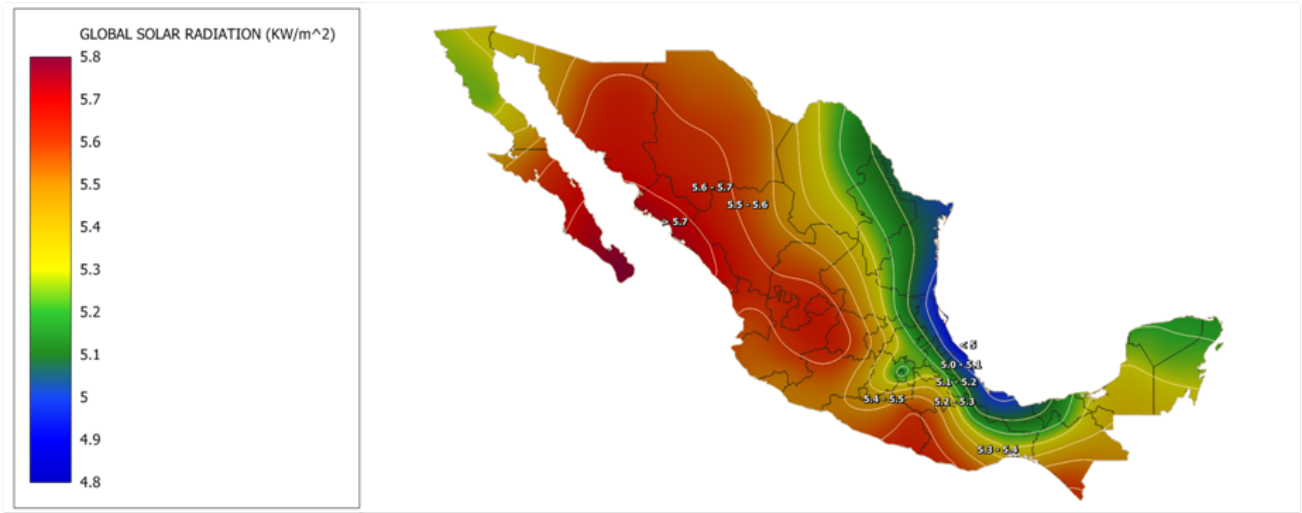


Figure 3.1.1. Distribución de la radiación solar incidente promedio anual en México

3.1.2. Temperatura ambiente promedio anual

La Figura 3.1.2 presenta las temperaturas ambiente promedios anuales. La escala de las temperaturas de color va desde 5 °C (azul) a 35 °C (rojo). Los Estados con temperaturas cálidas medias anuales del 23 al 26 °C o mayor de 26 °C estuvieron en su mayoría en las costas del noroeste, al este, sureste, sur y noroeste. Los estados con temperaturas medias anuales de 14 a 20 °C se encontraron en la parte central y los estados con temperaturas medias anuales menores a 14 °C estuvieron en la parte central de México (Ciudad de México, Estado de México, Puebla, Hidalgo).

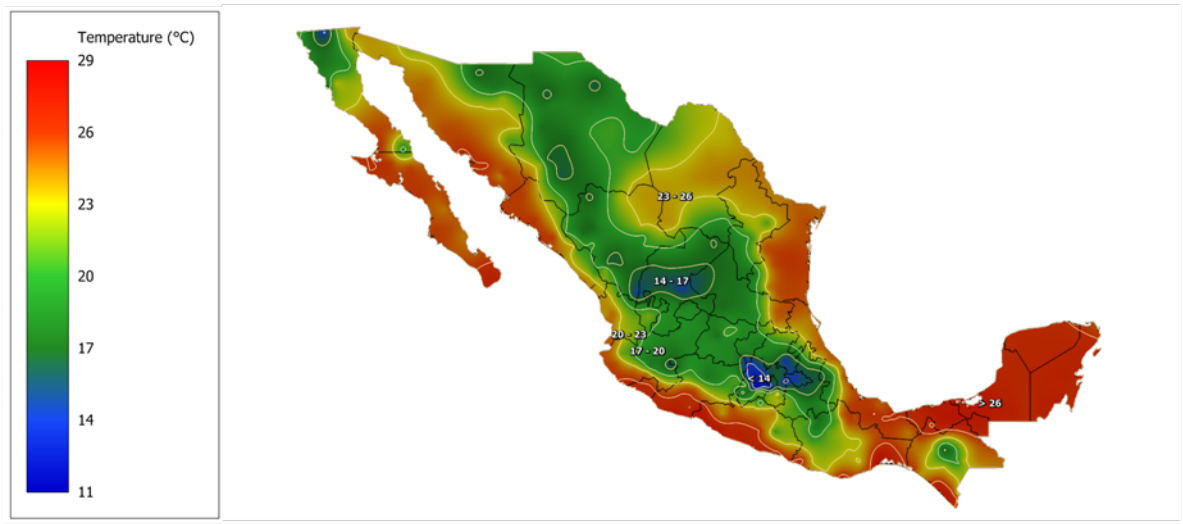


Figure 3.1.2. Distribución de la temperatura promedio anual en México.

3.1.3 Humedad relativa promedio anual

La Figura 3.1.3 presenta la humedad relativa promedio anual para el año 2005. La escala de la humedad relativa por el color va desde 0% (rojo) a 100% (azul). Estados con menor humedad relativa, <30%, entre 30 a 40% se encuentran en el noroeste de México (Sonora, Chihuahua, parte de Coahuila). La humedad relativa promedio más alta 70-80% y > 80 se encuentra principalmente en las costas de este, sudeste y sur.

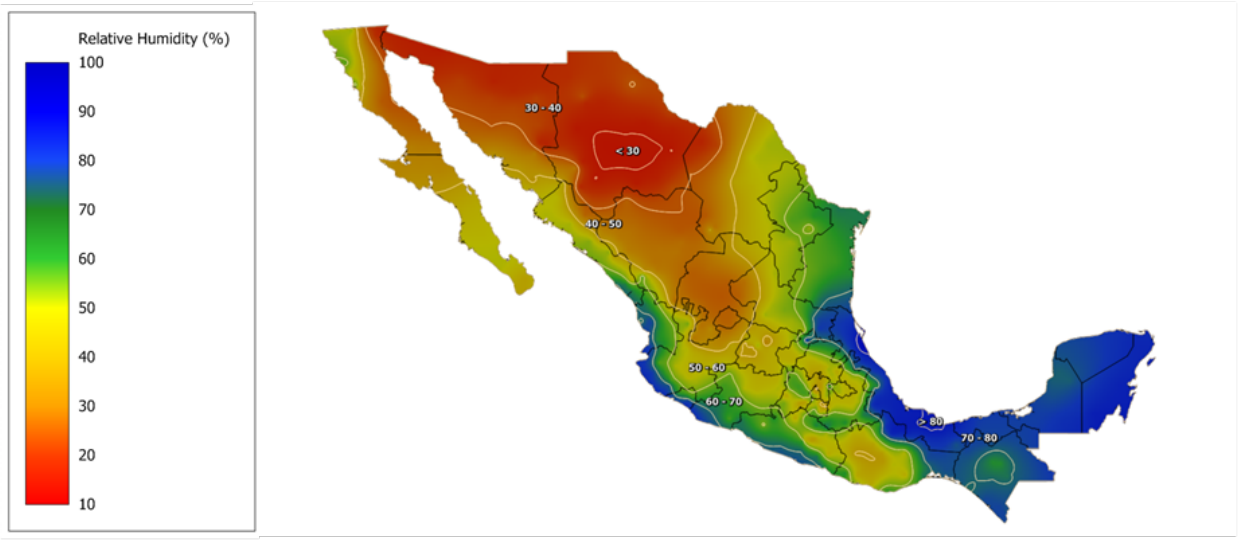


Figure 3.1.3. Distribución de la humedad relativa promedio anual.

4. Ciudades seleccionadas de acuerdo a la clasificación climática de INEGI.

Para la simulación dinámica se seleccionaron 7 ciudades, las cuales se ubican en las 6 zonas climáticas de México. La selección se realizó considerando el tamaño de la ciudad y la representatividad del clima. En la tabla 4.1 se muestran las ciudades y su tipo de clima según INEGI.

Tabla 4.1- Subgrupos de climas y ciudades seleccionadas.

Sitio	Tipo de Clima	Ciudad
a	Cálido húmedo	Villahermosa
b	Cálido sub húmedo	Mérida
c	Seco	Monterrey
d	Muy seco	Hermosillo
e	Templado húmedo	Tulancingo
f	Templado Sub húmedo b)	Cd. de México
g	Templado Sub-húmedo (a)	Guadalajara

La ciudad de México (f) y Guadalajara (g) están clasificados dentro del mismo tipo de clima, templado sub-húmedo, pero sus diferencias es que la Ciudad de México tiene veranos más calientes y Guadalajara tiene veranos más fríos.

La Figura 4.1 muestra los grupos y subgrupos de climas en México según el INEGI, 2011. El mapa indica la ubicación de las ciudades. La nomenclatura siguiente fue utilizada para identificar las ciudades:. En el sur-este

se encuentran las ciudades de: (a) Villahermosa que representa el clima cálido y húmedo, y (b) Mérida que representa clima cálido sub-húmedo. Al Norte están las ciudades de (c) Monterrey que está caracterizado por el clima seco y (d) Hermosillo que representa un clima muy seco. En el centro están (f) la Ciudad de México y (g) Guadalajara que se caracterizan por el clima templado sub-húmedo y (e) Tulancingo que representa el clima templado húmedo.

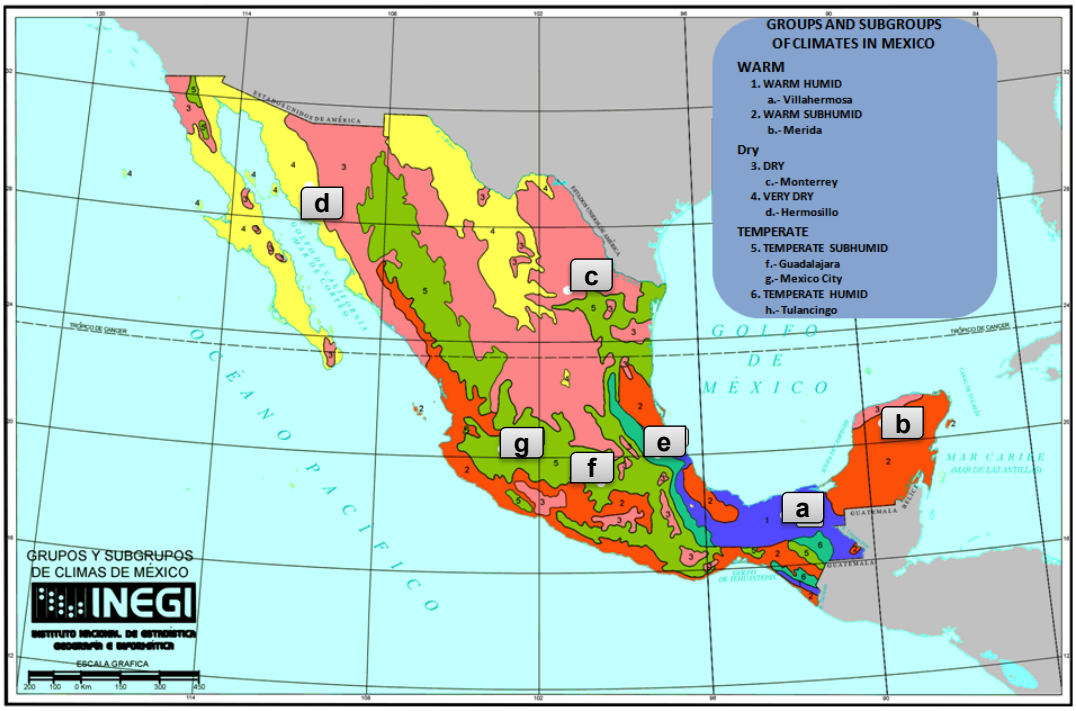


Figura 4.1 Grupos y subgrupos de climas en México

Información general de las ciudades seleccionadas.

(1) Villahermosa

El área metropolitana de Villahermosa es una región urbana resultante de la fusión de dos municipios que comparten una conurbación constante que a menudo se llama Villahermosa, ubicado en el Estado de Tabasco. Villahermosa es la vigésima segunda zona más poblada de México y la segunda más poblada en el sureste de México, después de la Zona Metropolitana de Mérida. Cuenta con una población aproximada de 756,065 habitantes, y está situado a 17° 59'N 92° 55' W, a una altura promedio de 9 metros sobre el nivel del mar. Villahermosa tiene un clima tropical monzónico, las temperaturas durante la primavera y el verano llegan arriba de 40 °C, con niveles de humedad relativa mayores al 90%. Durante su corto "invierno", el clima de Villahermosa es muy húmedo, pero las temperaturas diurnas disminuyen a unos 28 °C.

(2) Mérida

Mérida es la capital, y la mayor ciudad del estado mexicano de Yucatán, ubicado en la península del mismo nombre, con coordenadas 20° 58'N 89° 37' W. La ciudad cuenta con una altura de 8 m sobre el nivel del mar y se encuentra en una distancia de 1,307 km de la ciudad de México. Tiene una población de aproximadamente 803,920 habitantes. Limita con los estados de Quintana Roo y Campeche este a oeste. Mérida tiene un clima

tropical húmedo y seco. La temperatura máxima promedio es de 33 °C, que van desde 28 °C en enero a 36 °C en mayo, pero las temperaturas a menudo se elevan por encima de 38 °C por la tarde. Las temperaturas bajas oscilan entre 18 °C en enero a 23 °C en mayo y junio. A menudo Mérida es unos pocos grados más caliente que las zonas costeras, debido a su localización interior y baja elevación. La temporada de lluvias es de junio a octubre. Humedad relativa promedio anual marzo 66%- diciembre 89%.

(3) Monterrey

Monterrey es la capital y ciudad más grande del Estado de Nuevo León y cabecera del área urbana que lleva su nombre. El área metropolitana de Monterrey cuenta con 1,135,512 habitantes, agrupados en otros 9 municipios de Nuevo León lo que dará un total de 4,150,000 habitantes en una superficie de 6,680 km². Monterrey es la tercera ciudad más poblada de México. Se encuentra en 25.7°N 100.3°W, a una altitud de 550 m. Monterrey tiene un clima semi-árido. Su clima es templado en primavera y otoño y caliente en el verano. El promedio más alto en durante agosto de 35 °C y la mínima media es de 23 °C. Los inviernos son suaves; la media más alta en enero es 20 °C y la media mínima es de 8 °C, las temperaturas bajo cero son raras. La humedad relativa promedio es de 62%. Las precipitaciones son escasas, pero más prominentes durante el verano.

(4) Hermosillo

La ciudad de Hermosillo es la capital del Estado de Sonora, que se encuentra en la latitud 29° 05'Norte y longitud 110° 57' de longitud al oeste de Greenwich, a una altura de 282 m sobre el nivel del mar. Se encuentra en el centro del Estado de Sonora, a 270 km de la frontera con EUA. Tiene una población de 715,061 habitantes. El clima de Hermosillo es desértico, cálido y muy seco. Tiene un promedio de temperatura anual de 25 °C. Durante la mayor parte del año el clima es cálido. Las temperaturas pueden variar desde un mínimo de congelación en enero y febrero a 48°C en julio y agosto. La humedad relativa promedio es de 53%. La lluvia cae sobre todo entre junio y septiembre, con una precipitación anual de entre 75 y 300 milímetros. El invierno (Diciembre a Febrero) es agradable con noches frescas y días cálidos, sin heladas o nieve.

(5) Tulancingo

Tulancingo de Bravo, se encuentra a 90 km de la ciudad de México, es la segunda ciudad en importancia en el estado de Hidalgo. Está situada a 20° 04 'N 98° 22' W, a una altura de 2180 m el nivel del mar. Tiene una población de aproximadamente 193,638 habitantes. El área Metropolitana de Tulancingo es el resultado de la aglomeración urbana de seis ciudades en el estado de Hidalgo, por lo que es la segunda aglomeración urbana más grande del estado y una de las 50 más pobladas de México. El clima de Tulancingo es templado-frío, se registra una temperatura media anual de 14 °C y precipitaciones de entre 500 y 553 mm por año. La humedad relativa promedio es de 65%. El clima en Tulancingo es templado con lluvias en verano y el invierno seco, con heladas ocasionales.

(6) Cd. de México

La Ciudad de México es la capital y ciudad más grande de la República Mexicana. Se encuentra en el Valle de México, en una gran cuenca en el altiplano del centro de México, a los 19º 24'N, 99º 09W, a una altitud de 2,240 m y tiene una superficie de 1,485 km^2. Tiene una población (en el Área Metropolitana de México) de 20,137,152 habitantes. Es la ciudad más poblada del país. La Ciudad de México tiene un clima subtropical de montaña, con dos estaciones bien diferenciadas. La temperatura media anual varía del 12 al 16 °C, dependiendo de la altitud. Las temperaturas más bajas, por lo general registradas en enero y febrero, pueden llegar a -2 o a -5 °C. Las temperaturas máximas de finales de la primavera y el verano pueden alcanzar hasta 32 °C. Los extremos van desde -4.4 °C a 33.9 °C. La humedad relativa promedio anual es de 57%. Las precipitaciones en general se concentran en los meses de verano, e incluye granizo. El valle central de México rara vez recibe la precipitación en forma de nieve durante el invierno.

(7) Guadalajara

El área metropolitana de Guadalajara es una región urbana resultante de la fusión de la ciudad de Guadalajara y otras localidades en el estado de Jalisco. Juntos, ciudad y pueblos se conocen como la ciudad de Guadalajara. Esta zona metropolitana es la segunda ciudad más poblada de México, después de que el Área Metropolitana de México. Tiene una población de 4,364,069 habitantes. Está situada a 20 °36'N 103° 21' W, a una altitud media de 1,570 m. Guadalajara tiene un clima subtropical húmedo, las temperaturas más altas suelen ser en mayo un promedio de 33 °C, aunque puede llegar hasta 39 °C justo antes del inicio de la temporada de lluvias. La humedad relativa promedio anual es de 59%. Marzo suele ser el mes más seco y julio el más húmedo, con una media de 273 mm de lluvia, más de una cuarta parte de la media anual de alrededor de 1,002 mm. Los inviernos son relativamente calientes a pesar de la altitud de la ciudad, con temperaturas diurnas enero llegando a alrededor de 25 °C y temperaturas nocturnas alrededor de 10 °C.

4.1 Clima de las ciudades seleccionadas.

De acuerdo a los registros de clima de Meteonorm, la Figura 4.1.1 muestra las temperaturas mínima, media y máxima promedio anuales de cada una de las 7 ciudades seleccionadas. La temperatura media anual en las ciudades es de entre 16.8°C y 27.5°C. La temperatura media anual más alta fue de 27.5°C en Villahermosa seguido de Mérida (26.7°C), Hermosillo (24.2°C), Monterrey (23.2°C), la ciudad de México (18.8°C), Tulancingo y Guadalajara (16.8°C) . La temperatura máxima promedio anual más alta fue de 44.1°C en Hermosillo, seguida de Mérida (41.2°C), Monterrey (40.1°C), Villahermosa (38.7°C), Ciudad de México (34.6°C), Guadalajara (32.2°C) y Tulancingo (30.8°C). La temperatura mínima promedio anual más alta fue de 16.1°C en Villahermosa seguido de Mérida (11.3°C), Hermosillo (3.9°C), Guadalajara (2.3°C), Monterrey (1.8°C), Tulancingo (0.7°C) y la ciudad de México (0.5°C). La mayor oscilación de la temperatura promedio anual fue 40.2 ° C para Hermosillo seguido de Monterrey (38.3°C), la ciudad de México (34.1°C), Tulancingo (30.1°C), Mérida (29.9°C) y Villahermosa (22.6°C).

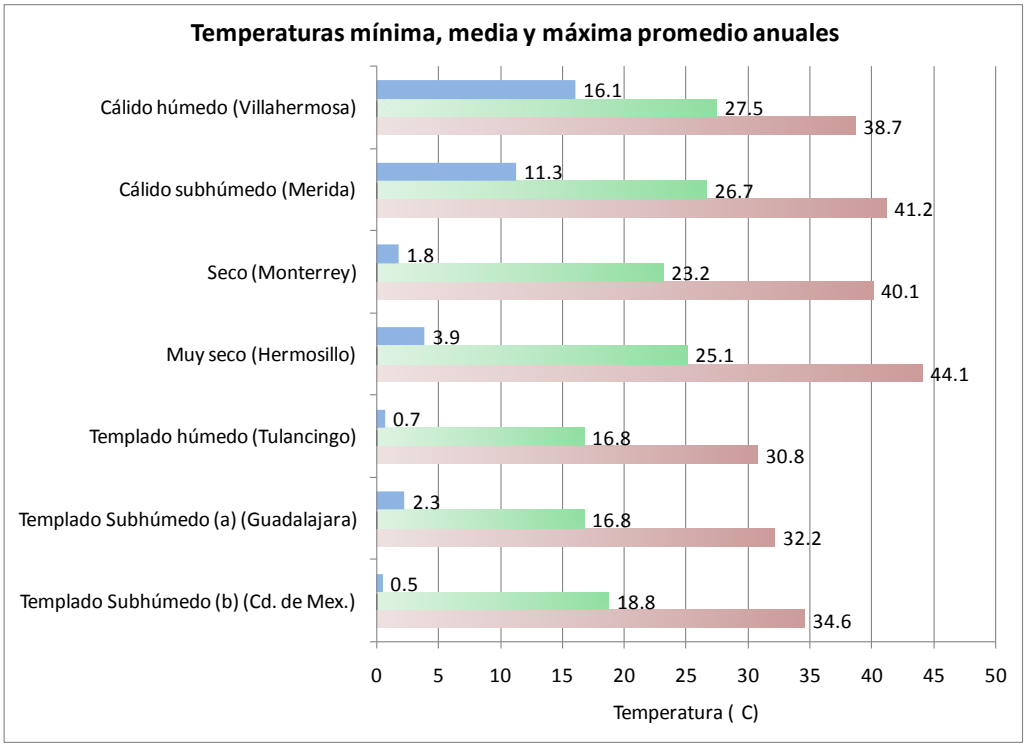


Figura4.1.1.-Temperaturas mínimas, medias y máximas promedios anuales.

La figura 4.1.2 muestra la radiación solar incidente anual sobre las siete ciudades. Como se puede observar Hermosillo recibe la mayor cantidad de energía solar (2,104 kWh/m^2), seguido de Tulancingo (2,048 kWh/ m^2), Guadalajara (2,046 kWh/ m^2), Mérida (1,920 kWh/ m^2), Monterrey (1,863 kWh/ m^2), ciudad de México (1,798 kWh/ m^2) y Villahermosa (1,791 kWh/ m^2).

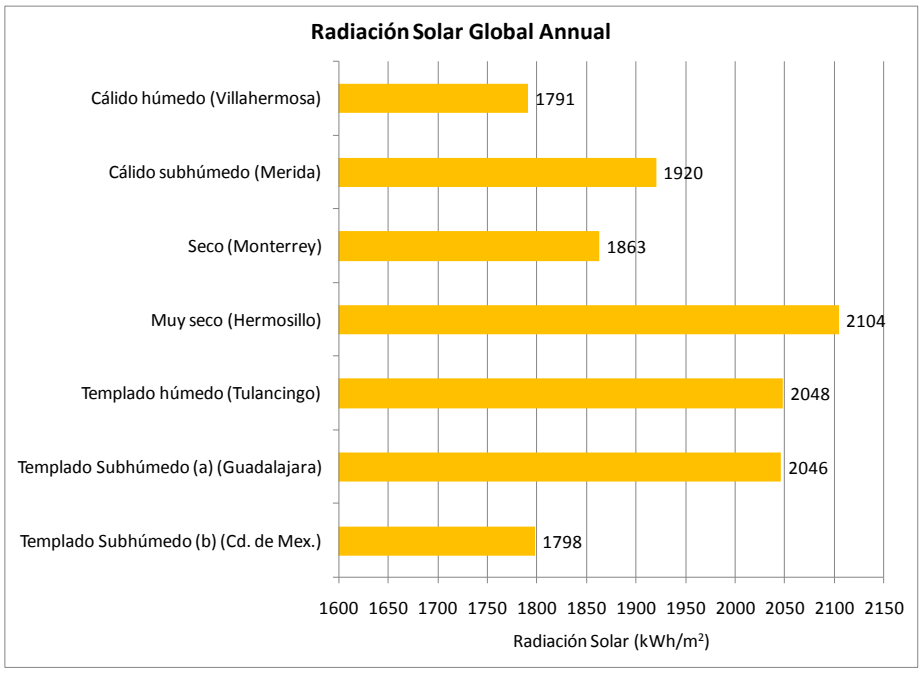


Figura 4.1.2.- Radiación solar incidente anual.

La Figura 4.1.3 presenta la humedad relativa promedio anual de las ciudades seleccionadas. La humedad relativa promedio mayor fue de Villahermosa (74%) seguido de Mérida (73%), Monterrey (60%), Guadalajara (53%), México (52%), Tulancingo (51%) y Hermosillo (39%).

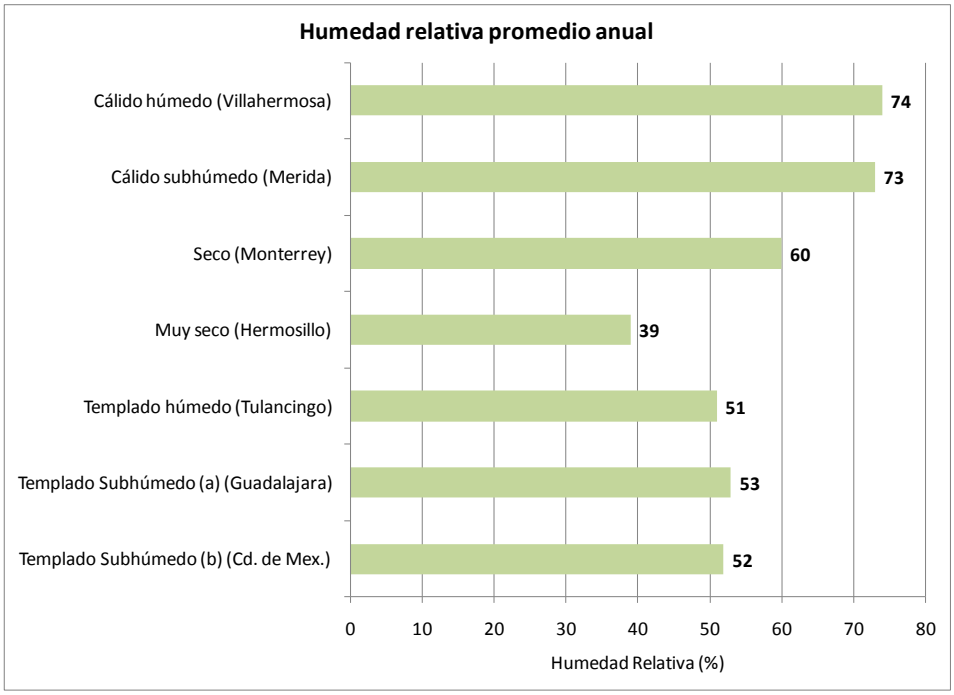


Figura4.1.3.- Humedad relativa promedio anual

La Figura 4.1.4 presenta la velocidad media anual del viento de las ciudades seleccionadas. La velocidad media del viento más alta fue para Mérida (3.4 m/s), seguida de la ciudad de México y Tulancingo (2.9 m/s), Monterrey (2.3m/s), Hermosillo (1.9 m/s) y Guadalajara (1.8 m/s).

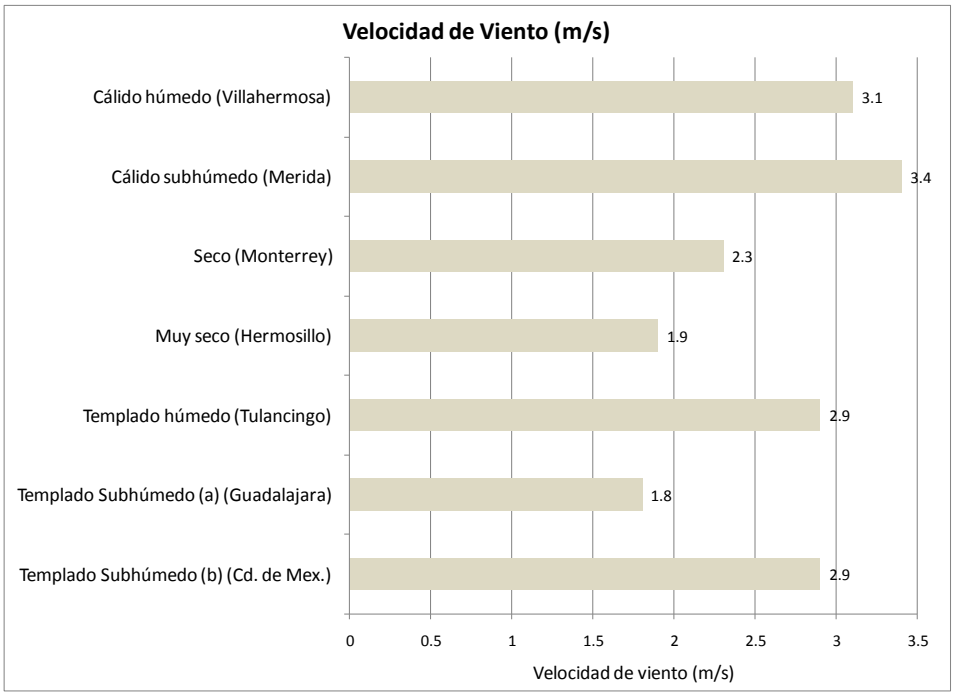


Figure 4.1.4.- Velocidad del viento promedio anual.

La figura 4.1.5 muestra el índice de nubosidad promedio anual de las ciudades seleccionadas. El menor índice de nubosidad fue para el clima muy seco (Hermosillo) y el índice de nubosidad alta fue para el clima cálido húmedo (Villahermosa), y ciudades templadas como se esperaba.

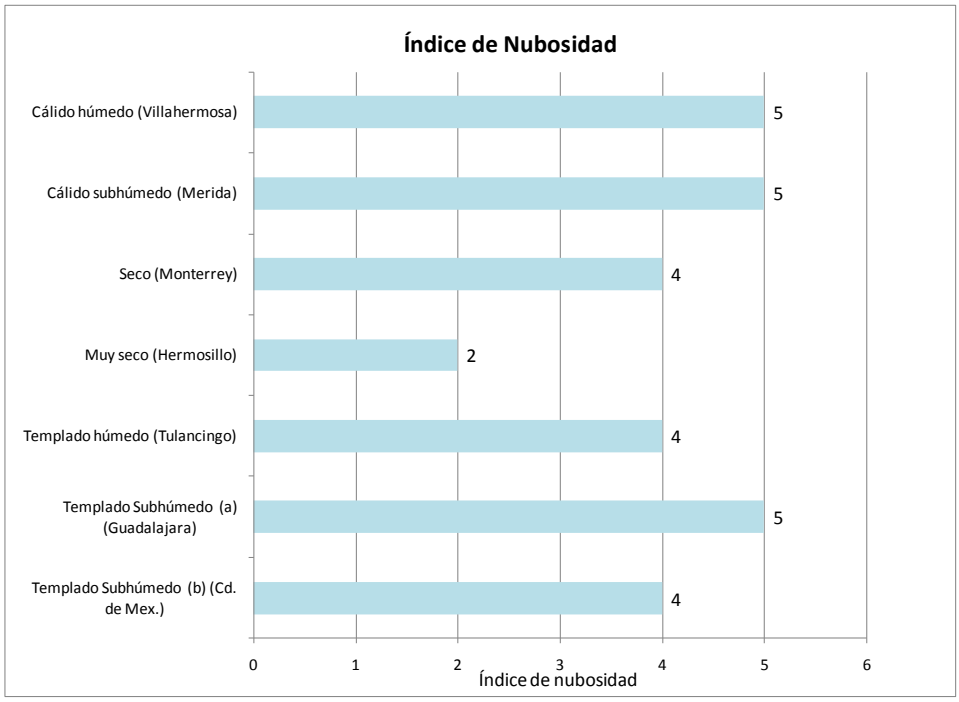


Figure 4.1.5.- Índice de nubosidad promedio anual.

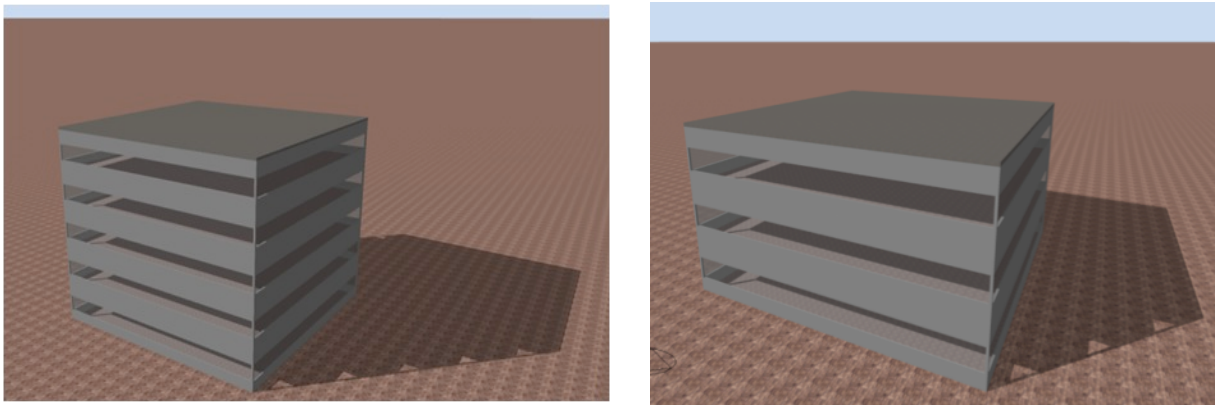
5. Descripción de las Edificaciones Base

Los estándares mexicanos NOM-008-ENER-2001 (no residencial) y NOM-020-ENER-2011 (residencial) fueron elaborados considerando los diseños de prototipos de edificaciones base o de referencia mexicanas. Estos mismos prototipos descritos en las siguientes tres referencias bibliográficas, fueron usados por este estudio. Los prototipos reportan la configuración de las edificaciones, los materiales de construcción ón, las propiedades térmicas y ópticas y las zonas en que fueron divididas las edificaciones para las simulaciones.

1. Energy Effective and cost effective building energy conservation measures from Mexico. M.A. Halverson, D.J. Stucky, M. Fredrich, P. Godoy-Kain, J.M. Keller, S. Somasundaran. Pacific NW Laboratory, Richland, Washington. June 1994.
2. A Commercial Building energy standard for Mexico. J. Huang, J.L. Warner, S. Wiel. Berkeley California. A. Rivas, RAMPA, O. de Buen. CONAE, México.
3. Notes on the typical house description as used with SUNCODE. C. Heard, 1993.

5.1 Edificación No-Residencial Base

Por la información de las referencias 1 y 2 se determina la configuración y otros parámetros de la edificación no-residencial base. Las Figuras 5.1.1 (a)-(b) muestran esquemáticamente la edificación no-residencial considerada para elaborar NOM-008-ENER-2001. La Figura 5.1.1 (a) presenta un edificio de planta cuadrada de cinco pisos para la ciudad de México y la Figura 5.1.1 (b) presenta un edificio de tres pisos para otras ciudades diferentes a la Ciudad de México. La relación de aspecto de la edificación no-residencial fue 01:01, con 25 m de cada lado. Cada piso tiene una superficie de 625 m^2 y una relación ventana-pared (RVP) de 40%. El sistema de climatización se supone que funciona durante las horas de ocupación de 08:00 a 22:00 horas de lunes a viernes. La temperatura de referencia (*set point*) es de 25°C. El albedo de las paredes exteriores y el techo fue de 0.25.



(a) (b)

Figura 5.1.1(a) Edificio no-residencial de cinco pisos para la Ciudad de México y (b) Edificio no-residencial de tres pisos para otras ciudades.

La Tabla 5.1.1 muestra las características de la edificación no-residencial. Los parámetros de entrada que se introducen en la simulación en el EnergyPlus son los mismos que los reportados en las referencias.

Tabla 5.1.1 Descripción de la edificación base no-residencial.

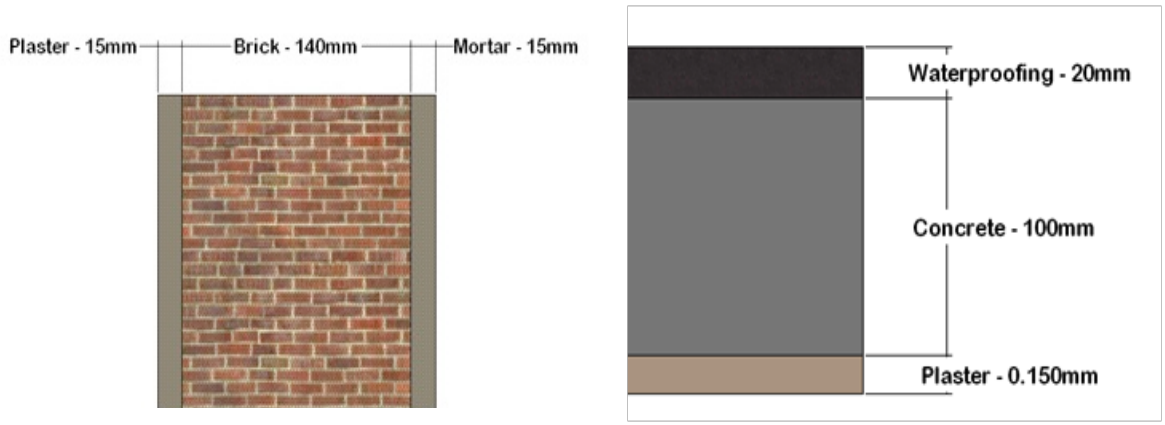
Edificio No-residencial	
Descripción	**Valor**
Número de pisos	Ciudad de México - 5
	Otros - 3
Área del edificio	Cd. de México: 3125 m^2
Altura entre pisos	4 m
Área por piso	669 m2
Altura entre pisos	4 m
Relación de aspecto	01:01
Nivel de Iluminación	16 W/m2
Contactos	8 W/m2
Densidad ocupacional	9 m^2por persona
Índice de ventilación	0.46 m3/min-m2
Índice de infiltración	1 ACH
Albedo Pared	0.25
Albedo Techo	0.25
Horas de ocupación y operación	8:00-22:00 (Lu-Vie)
Set point de Temperatura	25 °C
Relación ventana/pared (WWR)	40%

La Tabla 5.1.2 presenta los materiales de construcción, dimensiones y propiedades termofísicas de la envolvente del edificio. Los materiales de construcción son los mismos para las edificaciones no-residenciales y Residenciales. El material principal utilizado para las paredes es el tabique rojo (ladrillo). El techo es hecho de hormigón con recubrimiento de color impermeable en el exterior. Los pisos son de losa de hormigón y cubierta de azulejos. Las ventanas son de marco de aluminio y vidrios transparente de 4 mm.

Tabla 5.1.2 Materiales de construcción, dimensiones y propiedades termofísicas

Elementos de la construcción	Material Name	ℓ [mm]	*Cp* [J/kg*K]	λ [W/m*K]	*ρ* [kg/m3]
Piso nivel del suelo	Mosaico	10	795	1.136	2600
	Concreto	100	840	1.740	2300
Pisos superiores	Mosaico	10	795	1.136	2600
	Concreto	100	840	1.740	2300
	Yeso	15	1000	0.372	800
Pared	Yeso	15	1000	0.372	800
	Ladrillo	140	800	0.81	1600
	Mortero	15	837	0.72	1890
Techo	Yeso	15	1000	0.372	800
	Concreto	100	840	1.740	2300
	Impermeabilizante	20	800	0.17	1127
Ventanas	Vidrio Claro	4	-	-	-

La Figura 5.1.2 (a) - (b) muestra el detalle de la configuración de la pared y el techo de los dos edificios base; no-residencial y residencial. Las paredes son de ladrillo de 14 cm recubierto en el exterior por 15 mm de mortero y en el interior 15 mm de capa de yeso. Los techos son de 10 cm de hormigón revestido en el interior de 15 mm de yeso y en el exterior de 20 mm de recubrimiento de color resistente al agua. La reflectancia del techo es de 0.25 para la edificación base no-residencial y de 0.1 para la edificación base residencial.



(a) (b)

Figura5.1.2 (a) Configuración de la pared y (b) configuración del techo.

La Tabla 5.1.3 presenta el área y los coeficientes de transferencia de calor global y la conductancia térmica total de la envolvente de la edificación no-residencial de 3 pisos, que es de 6,432 W/K.

Tabla 5.1.3. Conductancia térmica total de la envolvente de la edificación no-residencial de 3 pisos.

Componente	Área (m^2) A	Coef. De transf. De calor global, K (W/m^2*K)	Conductancia térmica total, 1/R (W/K)
Techo	625	2.481	1550.625
Paredes	720	2.813	2025.36
Ventanas	480	5.95	2856
Puertas	0	2.04	0
		Σ=	**6,431.99**

La conductancia térmica total por ventilación de la edificación no-residencial de 3 pisos se presenta en la Tabla 5.1.4. Para el cálculo se considera la capacidad volumétrica y la densidad del aire, los cambios de aire por hora y el volumen de la edificación no residencial [Athnienitis y Santamouris, 2002].

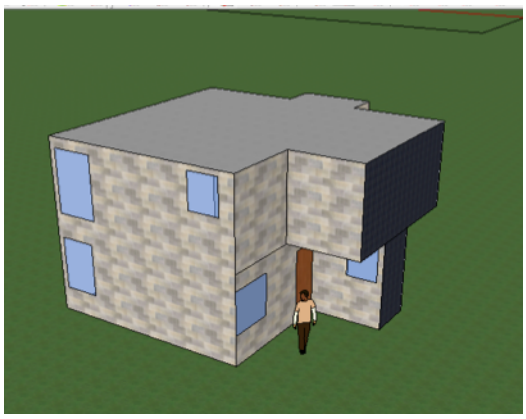
Tabla 5.1.4. Conductancia térmica total por ventilación de la edificación no-residencial de 3 pisos.

Capacidad volumétrica del aire húmedo (J/m^3°C)	Cambios de aire/hr N	Volumen V (m^3)	Conductancia térmica total por ventilación, 1/R (W/K)
1200	2	7500	**5,000.00**

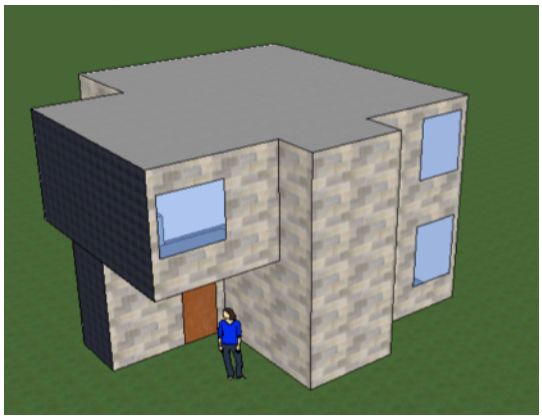
La conductancia total de la edificacion no-residencial es 6,431.99 W/K + 5,000.00 W/K = 11,431.98 W/K.

5.2 Edificación Residencial Base

La edificación residencial base que se considera para elaborar la NOM-020-ENER-2011 esta reportada en la referencia (3) por C. Heard (1993). Esta edificación es una casa típica de dos pisos que pertenece a un conjunto horizontal. La Figura 5.2.1 muestra la vista frontal y posterior de esta edificación. La fachada principal se orienta al norte. Edificios de las mismas características se unen por las paredes este y oeste, como se muestra en la Figura 5.2.2.

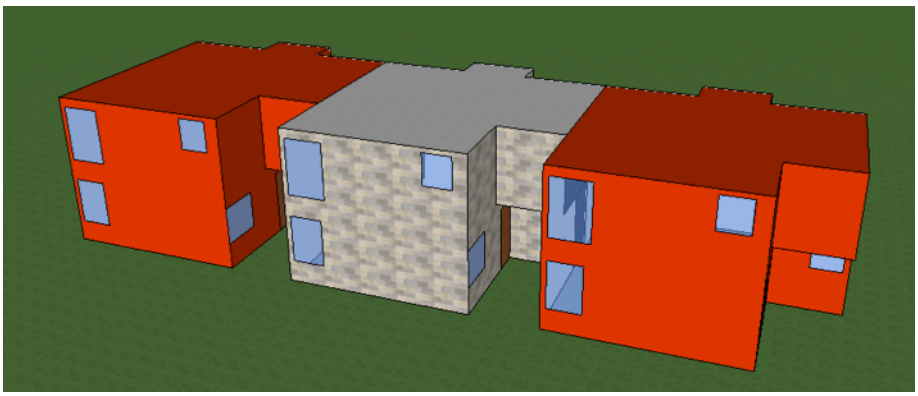


Vista frontal.

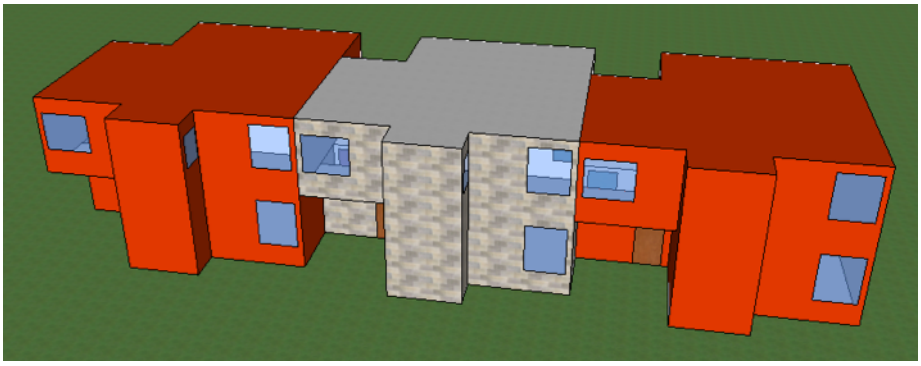


Vista posterior

Figura5.2.1. Edificación base residencial, vistas frontal y posterior.



Vista frontal



Vista posterior

Figura5.2.2. Conjunto de edificaciones base Residenciales, vistas frontal y posterior.

El área total de la edificación residencial fue de 88 m^2. El albedo considerado para las paredes exteriores y el techo es de 0.1. La temperatura de referencia es de 25°C. La ocupación de la casa es de 4 personas. Se consideran las ganancias internas para aparatos de cocina. El sistema de aire acondicionado central y opera todo el año de Lunes a Viernes de 1:00 a 9:00 hrs y de 15:00 a 24 hrs, Sábados y Domingos de 1:00 a 24:00 horas. En el programa de SUNCODE, reportado por C. Heard, las cargas de calor para los aparatos y las personas se dan en términos de cargas de calor sensible. EnergyPlus calcula estas cargas mediante el uso de una función polinomial y en el programa EnergyPlus se define por la actividad de las personas. En esta edificación las paredes pueden tener más de una ventana, y sus dimensiones son diferentes entre sí. La Tabla 5.2.1 presenta una descripción de la construcción residencial, sus parámetros y valores.

Tabla 5.2.1. Descripción de la edificación residencial, parámetros y valores.

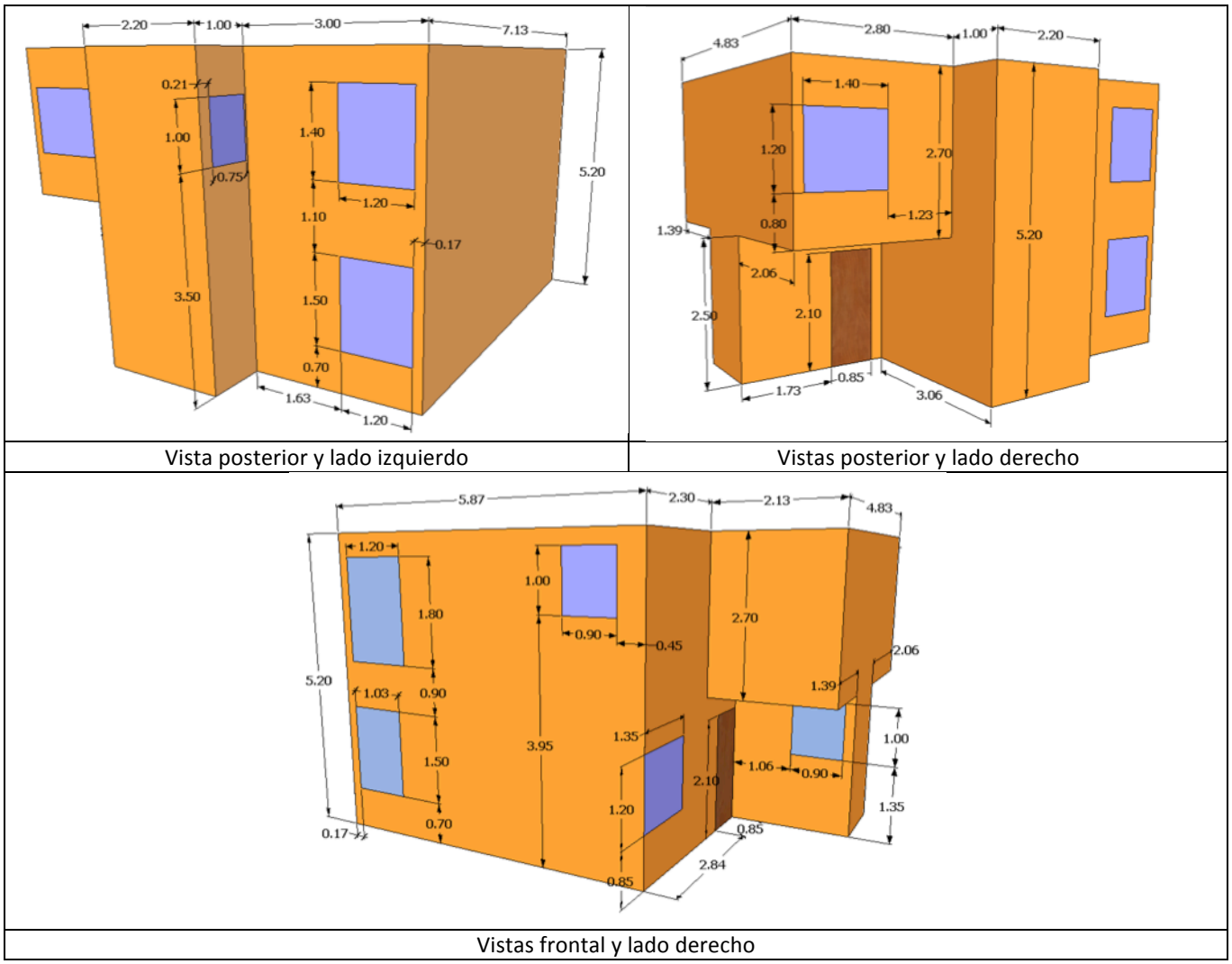
Descripción	Valor
Número de Pisos	2
Ciudad	Ciudad de México
Área total	88 m^2
Altura entre piso y piso	2.5 m
Relación ventana/pared (WWR)	Diferente para cada muro
Relación de aspecto	No aplica
Índice de ventilación	Sin ventilación
Índice de infiltración	2 ACH
Albedo pared	0.1
Albedo techo	0.1 – 0.9 (Variable del estudio)
Horas de ocupación y operación	Definidas
Setpoint de temperatura	25 °C
Contactos	Consumo de aparatos domésticos
Densidad ocupacional	Dado por cargas de calor sensible y latente por actividad
Cargas de aire acondicionado (HVAC)	Lu-Vie (1-9)hrs y de (15-24)hrs Sa-Do (1-24)hrs

La edificación residencial no tiene una relación pared-ventana definida como en la edificación no-residencial. Cada una de las orientaciones tiene un diseño de la ventana diferente. La Tabla 5.2.2 describe la distribución de las aberturas y sus dimensiones. La fachada frontal tiene cuatro ventanas. La fachada posterior tiene tres ventanas y una puerta de madera. Los lados derecho e izquierdo tienen una ventana. Las puertas principales y la trasera son de madera con U de 2.04 W/m^2 K.

Tabla 5.2.2. Descripción de las aperturas de fachada.

Fachada	Descripción	Material	Área	U
Frente	Puerta principal	Madera	1.78	2.04
	Ventana 1	Vidrio	1.54	5.95
	Ventana 2	Vidrio	2.16	5.95
	Ventana 3	Vidrio	0.9	5.95
	Ventana 4	Vidrio	0.9	5.95
Trasera	Puerta trasera	Madera	1.78	2.04
	Puerta trasera	Vidrio	1.8	5.95
	Ventana 4	Vidrio	1.68	5.95
	Ventana 5	Vidrio	1.68	5.95
Lado derecho	Ventana 6	Vidrio	1.62	5.95

La Figura 5.2.3 muestra las dimensiones en detalle. Las dimensiones del espesor de las paredes es de 0.17 m, el espesor de techo de 0.135 m y la altura de cada piso es de 2.5 m.



Vista posterior y lado izquierdo | Vistas posterior y lado derecho

Vistas frontal y lado derecho

Figura5.2.3.3 Dimensiones de la edificación base residencial (dimensiones en metros).

La Tabla 5.2.3 presenta el área de las componentes de la envolvente, los coeficientes de transferencia de calor global por componente y la conductancia térmica total de la envolvente de la edificación residencial, de acuerdo a la NOM-020-ENER-2011, que es de 691.45 W/K.

Tabla 5.2.3. Conductancia térmica total de la envolvente de la edificación residencial.

Componente	Área (m^2) A	Coef. De transf. De calor global, K (W/m^2*K)	Conductancia térmica total, 1/R (W/K)
Techo	54.341	2.481	134.8200
Paredes	167.735	2.813	471.8385
Ventanas	13.03	5.95	77.5285
Puertas	3.56	2.04	7.2624
		Σ=	**691.45**

De igual manera que la edificación no-residencial, la conductancia térmica total por ventilación de la edificación residencial se presenta en la Tabla 5.2.4 [Athnienitis y Santamouris, 2002].

Tabla 5.2.4. Conductancia térmica total por ventilación de la envolvente de la edificación residencial.

Capacidad volumétrica del aire húmedo ($J/m^3°C$)	Cambios de aire/hr N	Volumen V (m^3)	Conductancia térmica total por ventilación, 1/R (W/K)
1,200	2	252.26	**168.17**

La conductancia térmica total de la edificacion residencial es **691.45** W/K **+168.17** W/K =**859.62 W/K.**

6. Simulación dinámica de las edificaciones base

El cálculo de las cargas de enfriamiento anuales en función de la reflectancia del techo para las edificaciones base se llevó a cabo para dos casos: Caso A: sin aislamiento en el techo y Caso B: con aislamiento en el techo. La reflectancia se modificó dentro del rango de 0.1-0.9. Se presentan los resultados de las cargas de enfriamiento anuales y el ahorro de energía por el uso de techos reflectivos de las 7 ciudades en diferentes climas.

6.1 Edificación no-residencial – Caso A: no aislante en el techo.

La figura 6.1.1 muestra el consumo anual de energía de la edificación no-residencial como función de reflectancia del techo (0.1-0.9) para el Caso A, para todos los climas: Cálido húmedo (Villahermosa), cálido subhúmedo (Mérida), Seco (Monterrey), muy seco (Hermosillo), húmedo templado (Tulancingo) y templado subhúmedo (ciudad de México y Guadalajara). En todos los casos, a medida que aumenta la reflectancia del techo, va disminuyendo el consumo de energía para enfriamiento. Las cargas de energía para enfriamiento más altas son las de Villahermosa y Mérida, seguida de Hermosillo, Monterrey. Las ciudades de Guadalajara y Ciudad de México presentan cargas de enfriamiento muy similares, y la más baja es para Tulancingo, el cual tiene un clima húmedo y templado. En la Tabla 6.1.1 se muestran los valores de las cargas de enfriamiento.

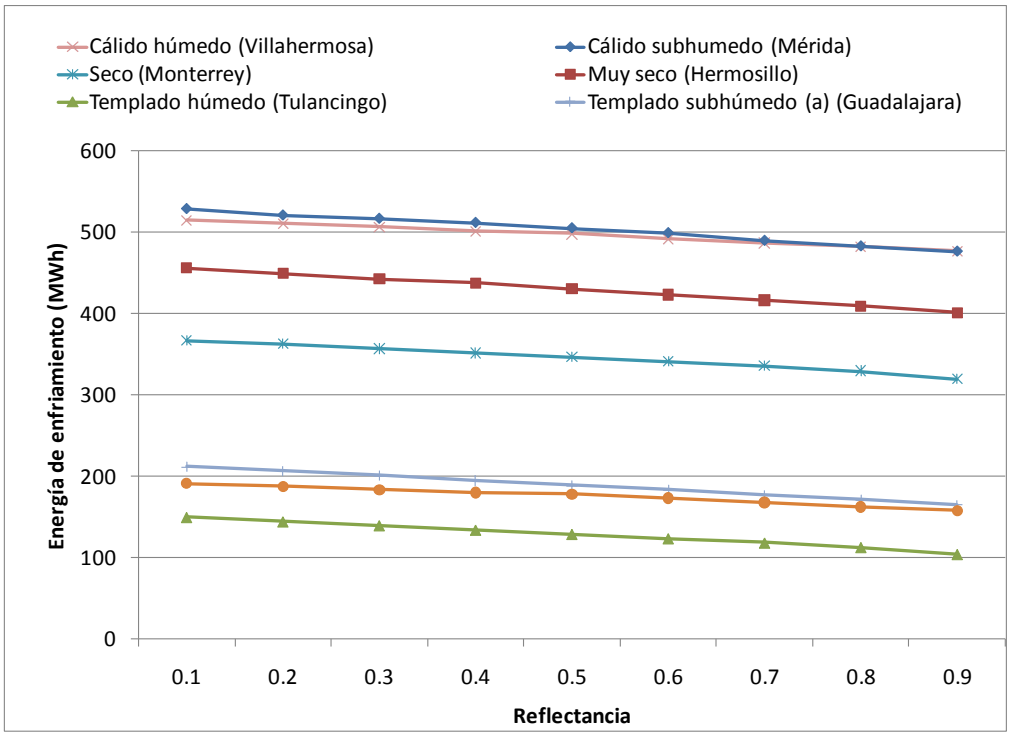


Figura6.1.1Cargas de energía de enfriamiento anuales por edificación no-residencial como función de la reflectancia para 7 ciudades en las 6 zonas climáticas.

Tabla 6.1.1 Valores de las cargas de energía para enfriamiento anuales (MWh) para la edificación no-residencial como función de la reflectancia para 7 ciudades en las 6 zonas climáticas

	Energía de enfriamiento (MWh) –Edificación no-residencial						
Reflectan. del techo	**Cálido húmedo (Villahermosa)**	**Cálido subhúmedo (Mérida)**	**Seco (Monterrey)**	**Muy seco (Hermosillo)**	**Húmedo Templado (Tulancingo)**	**Subhúmedo Templado (a) (Guadalajara)**	**Subhúmedo Templado (b) (Mex. City)**
0.1	514.8	529.0	367.0	456.3	150.0	212.1	191.1
0.2	510.8	521.1	362.7	449.5	144.6	207.1	187.7
0.3	507.0	517.0	357.1	442.8	139.9	201.3	183.6
0.4	501.7	511.9	351.5	437.9	134.5	195.2	180.2
0.5	498.0	505.3	346.9	430.5	129.2	189.1	178.3
0.6	492.2	499.2	341.1	423.5	123.9	183.3	173.2
0.7	487.2	489.8	336.1	416.6	118.6	177.3	168.0
0.8	481.9	482.9	329.7	408.8	113.0	171.4	162.6
0.9	477.1	476.4	319.7	401.1	104.5	165.2	158.2

Como es de observar, las cargas de energía por enfriamiento son muy próximas entre sí para las ciudades de Villahermosa y Mérida, así como para la Cd. de México y Guadalajara, es por esto que en el siguiente análisis se considerarán solo 5 de las 7 ciudades seleccionadas.

6.1.1 Edificación no-residencial – Caso B: aislante en el techo.

Las simulaciones fueron llevadas a cabo considerando aislamiento en el techo, considerando los límites de ganancia de calor que están incluidos en la NOM-008-ENER-2001. Esta NOM limita la ganancia de calor a través de la envolvente de la edificación no-residencial con el objeto de alcanzar condiciones de confort y evite o racionalice el uso de energía en los sistemas de acondicionamiento de aire. El cálculo de la ganancia de calor en la edificación proyectada deberá ser igual o menor al de una edificación de referencia con las mismas dimensiones. Cabe señalar que la contribución de las ganancias de calor dependen del tipo de la envolvente y pueden controlarse por medio de arbolado, vegetación, sombreadores, propiedades ópticas de vidrios, materiales de baja emisividad, materiales con alta resistencia térmica, aislamiento térmico. La tabla A del apéndice normativo de la NOM-008-ENER-2001 establece los valores del coeficiente global de transferencia de calor (K) para paredes y techos de un edificio no residencial en una variedad de ciudades en México. Los modelos del edificio de referencia deben ser diseñados teniendo en cuenta el coeficiente de transmisión térmica global (K) deba ser igual o inferior a los establecidos en la NOM-008-ENER-2001.

El techo de la edificación de referencia es un techo típico formado por una loza de concreto, yeso en el interior e impermeabilizante en el exterior. Para este componente se calcula el valor del coeficiente de transferencia de calor global (K).

En la Tabla 6.1.1 se muestra el procedimiento del cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (K) del techo de la edificación no-residencial (sin aislante). De las propiedades termofísicas del techo, Tabla 5.1.2, se realiza el cálculo de la resistencia térmica del techo de la edificación no-residencial base por $R = \frac{1}{ho} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{hi}$, y por lo tanto, el valor de K es 1/R.

Tabla 6.1.1.1 Resistencia térmica y el coeficiente de transferencia de calor global (K) del techo de la edificación no-residencial.

Material	Espesor	
Aire	-	ho= 13 W/m^2K
Impermeabilizante de membrana asfáltica	0.02 m	λ= 0.17 [W/m*K]
Concreto	0.10 m	λ= 1.740
Yeso	0.01 m	λ=0.372
Aire	-	hi= 6.6 W/m^2K
	R=	**0.335 m^2K/W**
	K=	**2.98W/m^2K**

El coeficiente de transferencia de calor global (K) del techo para el Caso A es de 2.98 W/m^2K, este valor es mayor que el que se especifica en NOM-008-ENER-2001. Por lo tanto, para cumplir con los valores establecidos de (K) en la norma, se puede incluirse aislamiento térmico en el techo. En este estudio, se considera el panel de aislante de poliestireno extruido (EPS) de propiedades de λ=0.028 W/mK, Cp=1470 J/kgK y ρ=30 kg/m^3. Así, el espesor del aislante del techo de EPS es calculado para las ciudades listadas en la NOM-008-ENER-2001 y se reportan en la Tabla 6.1.1.2.

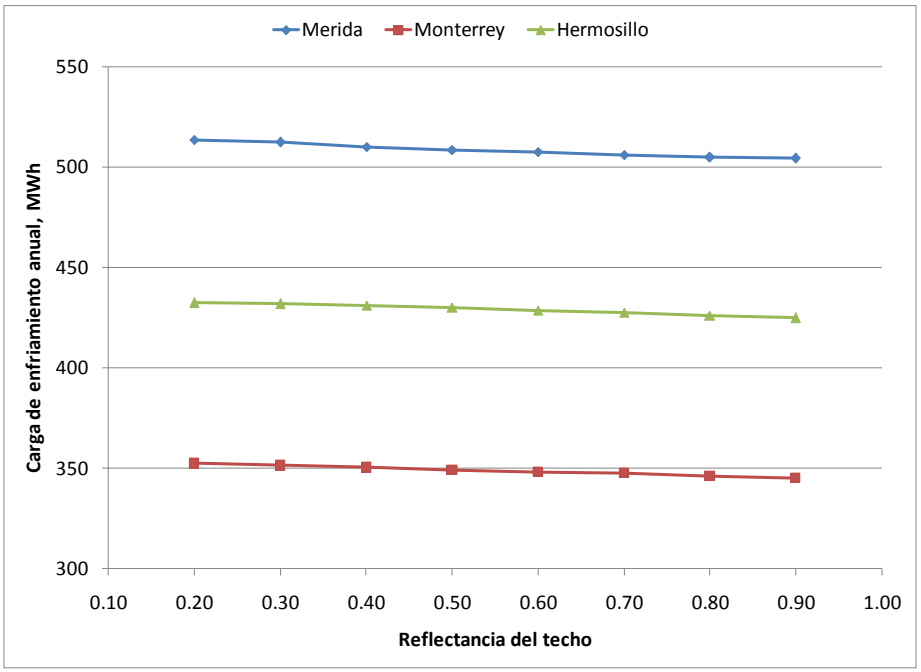
Tabla 6.1.1.2. Coeficiente global de transferencia de calor (k) y el espesor de aislante para la edificación no-residencial.

Estado	Ciudad	K_{techo} (W/m^2K)	Espesor (m)	Espesor (pulg.)
AGUASCALIENTES	Aguascalientes	0.391	0.060	**2.380**
BAJA CAL. SUR	La Paz	0.358	0.067	**2.640**
	Cabo S. Lucas	0.360	0.067	**2.623**
BAJA CALIFORNIA	Ensenada	0.391	0.060	**2.380**
	Mexicali	0.354	0.068	**2.674**
	Tijuana	0.391	0.060	**2.380**
CAMPECHE	Campeche	0.357	0.067	**2.648**
	Cd. Carmen	0.356	0.067	**2.657**
COAHUILA	Monclova	0.357	0.067	**2.648**
	Piedras Negras	0.356	0.067	**2.657**
	Saltillo	0.391	0.060	**2.380**
	Torreón	0.360	0.067	**2.623**
COLIMA	Colima	0.362	0.066	**2.606**
	Manzanillo	0.358	0.067	**2.640**
CHIAPAS	Arriaga	0.357	0.067	**2.648**
	Comitán	0.391	0.060	**2.380**
	San Cristóbal	0.391	0.060	**2.380**
	Tapachula	0.361	0.066	**2.614**
	Tuxtla Gutiérrez	0.362	0.066	**2.606**
CHIHUAHUA	N. Casas Grandes	0.391	0.060	**2.380**
	Chihuahua	0.365	0.066	**2.581**
	Cd. Juárez	0.363	0.066	**2.597**
	Hidalgo del Parral	0.391	0.060	**2.380**
D.F.	México	0.391	0.060	**2.380**
DURANGO	Durango	0.391	0.060	**2.380**
	Lerdo	0.360	0.067	**2.623**
GUANAJUATO	Guanajuato	0.391	0.060	**2.380**
	León (b)	0.391	0.060	**2.380**
GUERRERO	Acapulco	0.356	0.067	**2.657**
	Chilpancingo	0.391	0.060	**2.380**
	Zihuatanejo	0.362	0.066	**2.606**
HIDALGO	Pachuca	0.391	0.060	**2.380**
	Tulancingo	0.391	0.060	**2.380**
JALISCO	Guadalajara (c)	0.391	0.060	**2.380**
	Huejucar	0.391	0.060	**2.380**
	Lagos de Morelos	0.391	0.060	**2.380**
	Ocotlán	0.391	0.060	**2.380**

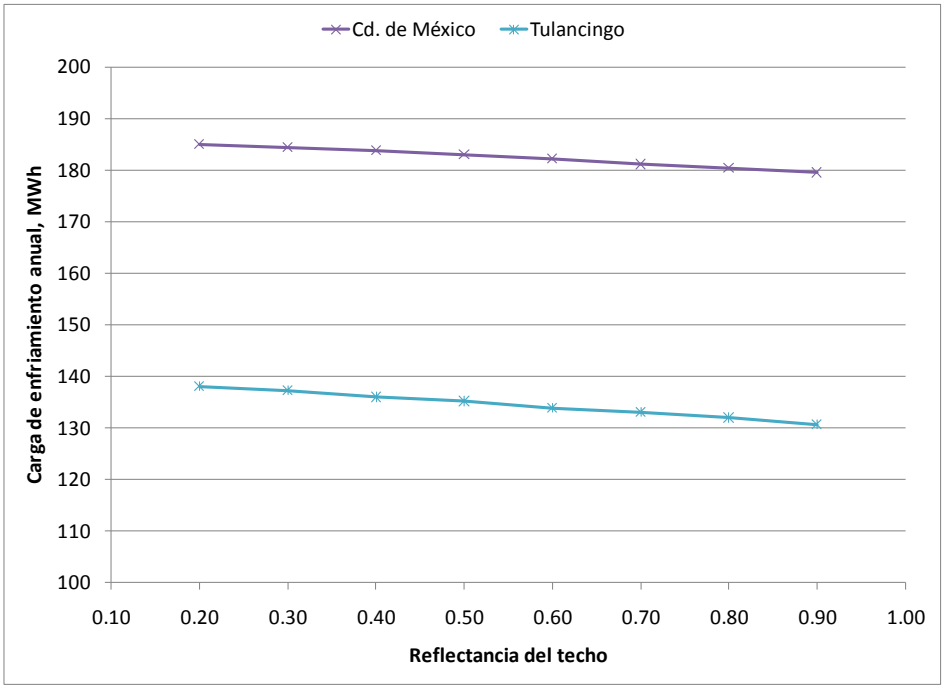
	Puerto Vallarta	0.357	0.067	**2.648**
MÉXICO	Chapingo	0.391	0.060	**2.380**
	Toluca	0.391	0.060	**2.380**
MICHOACÁN	Morelia	0.391	0.060	**2.380**
	Lázaro Cárdenas	0.358	0.067	**2.640**
	Uruapan	0.391	0.060	**2.380**
MORELOS	Cuernavaca	0.391	0.060	**2.380**
	Cuautla	0.391	0.060	**2.380**
NAYARIT	Tepic	0.391	0.060	**2.380**
NUEVO LEÓN	Monterrey	0.359	0.067	**2.631**
OAXACA	Oaxaca	0.391	0.060	**2.380**
	Salina Cruz	0.355	0.068	**2.666**
PUEBLA	Puebla	0.391	0.060	**2.380**
	Atlixco	0.391	0.060	**2.380**
	Tehuacán	0.391	0.060	**2.380**
QUERÉTARO	Querétaro	0.391	0.060	**2.380**
	San Juan del Rio.	0.391	0.060	**2.380**
QUINTANA ROO	Cozumel	0.359	0.067	**2.631**
	Chetumal	0.358	0.067	**2.640**
	Cancún	0.355	0.068	**2.666**
	Playa del Carmen	0.356	0.067	**2.657**
SAN LUIS POTOSÍ	Río Verde	0.391	0.060	**2.380**
	San Luis Potosí	0.391	0.060	**2.380**
	Cd. Valles	0.356	0.067	**2.657**
	Matehuala	0.391	0.060	**2.380**
SINALOA	Culiacán	0.355	0.068	**2.666**
	Mazatlán	0.358	0.067	**2.640**
	Guasave	0.355	0.068	**2.666**
	Los Mochis	0.357	0.067	**2.648**
SONORA	Guaymas	0.354	0.068	**2.674**
	Hermosillo	0.352	0.068	**2.692**
	Cd. Obregón	0.357	0.067	**2.648**
	Navojoa	0.348	0.069	**2.728**
	Nogales	0.391	0.060	**2.380**
TABASCO	Villahermosa	0.354	0.068	**2.674**
	Comalcalco	0.356	0.067	**2.657**
TAMAULIPAS	Cd. Victoria	0.357	0.067	**2.648**
	Tampico	0.358	0.067	**2.640**
	Matamoros	0.364	0.066	**2.589**
	Reynosa	0.355	0.068	**2.666**
	Nuevo Laredo	0.354	0.068	**2.674**
TLAXCALA	Tlaxcala	0.391	0.060	**2.380**
VERACRUZ	Coatzacoalcos	0.358	0.067	**2.640**
	Córdoba	0.391	0.060	**2.380**
	Jalapa	0.391	0.060	**2.380**
	Orizaba	0.391	0.060	**2.380**
	Tuxpan	0.360	0.067	**2.623**
	Poza Rica	0.357	0.067	**2.648**
	Veracruz	0.358	0.067	**2.640**
YUCATÁN	Mérida	0.358	0.067	**2.640**
	Progreso	0.359	0.067	**2.631**
	Valladolid	0.360	0.067	**2.623**
ZACATECAS	Fresnillo	0.391	0.060	**2.380**
	Zacatecas	0.391	0.060	**2.380**

El rango de valores de K es de 0.348-0.391 W/m^2K que corresponde espesores de 2.38-2.73 pulgadas. Los espesores de los aislantes son comercializados en espesores de 1”, 1.5”, 2.0”, 2.5” o 3”, por lo tanto, el espesor de 2.5 pulgadas se considera para la simulación, que corresponde a un coeficiente de transferencia de calor global (K) de 0.384 W/m^2K. Las simulaciones de las edificaciones son realizadas para las ciudades de Mérida, Monterrey, Hermosillo, Cd. de México y Tulancingo, las cuales corresponden a 5 zonas climáticas.

La Figura 6.1.1.2 (a)-(b) presenta la carga de enfriamiento por edificación no-residencial base con techo con aislamiento de 2.5” en función de la variación de la reflectancia del techo. Para cada ciudad, se observa disminución del consumo de energía de enfriamiento anual al incrementar la reflectancia en los techos. Los valores se presentan en la Tabla 6.1.1.3. El mayor ahorro de energía de enfriamiento anual por el cambio de reflectancia de 0.2 a 0.9 fue para la Cd. de Mérida (9.36 MWh) y el menor ahorro es para la Ciudad de México (5.44 MWh).



(a)



(b)

ura 6.1.1.2 Consumo de energía para enfriamiento anual por edificación no-residencial con techos de 2.5” de espesor de aislante y reflectancias de 0.20 a 0.90. (a) Mérida, Monterrey Hermosillo y (b) Cd. de México y Tulancingo

Tabla 6.1.1.3 Valores del consumo de energía de enfriamiento anual por edificación no-residencial con techos de 2.5" de espesor de aislante y reflectancias de 0.20 a 0.90 para cada ciudad.

Energía de enfriamiento (MWh) – Edificación no-residencial					
Reflectancia del techo	**Cálido subhúmedo (Merida)**	**Seco (Monterrey)**	**Muy seco (Hermosillo)**	**Templado Subhúmedo (Cd. de Mex.)**	**Templado Húmedo (Tulancingo)**
0.20	513.63	352.40	432.34	185.01	137.98
0.30	512.37	351.31	431.83	184.41	137.19
0.40	510.21	350.42	431.16	183.77	135.97
0.50	508.65	349.21	429.96	182.98	135.12
0.60	507.47	348.14	428.54	182.21	133.86
0.70	506.05	347.49	427.74	181.15	133.01
0.80	504.90	346.10	426.12	180.38	131.96
0.90	504.27	345.11	424.84	179.57	130.66

Para el cálculo del ahorro de energía anual, se considera como referencia un techo rojo que tiene una reflectancia de 0.3. Modificando el techo de referencia a techo blanco con reflectividades de 0.6, 0.7 y 0.8 (blancos), se generan ahorros de energía anuales en edificaciones no-residenciales para cada ciudad como se muestran en la Figura 6.1.1.3. Los resultados indican que los mayores ahorros de energía anuales se obtienen para los techos de reflectancia de 0.8 para todos los casos. En términos de ciudad y tipo de clima, los mayores ahorros son para la ciudad de Mérida (clima cálido semihúmedo), seguido de la Cd. de Hermosillo (muy seco), Monterrey (seco), Tulancingo (templado húmedo) y Cd. de México (templado semi-húmedo).

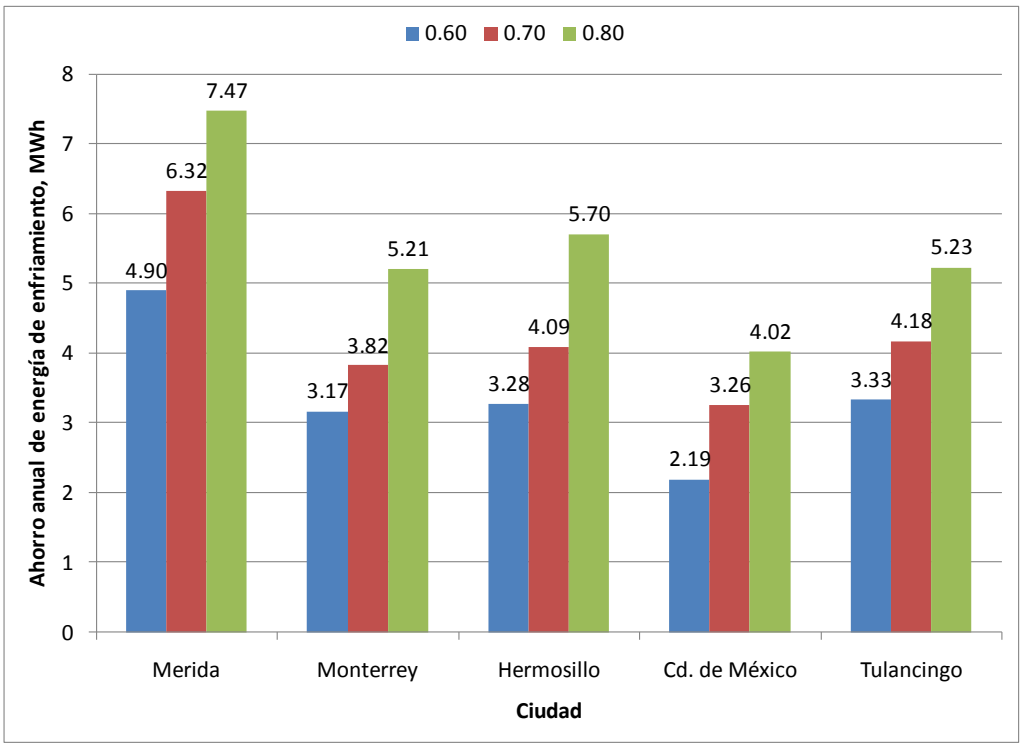


Figura 6.1.1.3. Ahorros de energía de enfriamiento anuales por edificación no-residencial por ciudad con techos de 2.5" de espesor de aislante y reflectancias de 0.6, 0.7 y 0.8.

6.1.2 Ahorro de energía anual de edificaciones no-residenciales por ciudad.

El Censo del 2009 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI de 2009) reporta el número de industrias pequeñas, medianas y grandes por Estado. En este reporte, las industrias que se consideran son mercados públicos, centros comerciales, terminales de transporte, complejos industriales y otros edificios comerciales; en 2009 se tenían 10,969 de esos edificios en la República Mexicana. El ahorro anual de energía por enfriamiento se calculó suponiendo que todas las industrias se encuentran en las ciudades, y que las edificaciones industriales y comerciales sean similares a la edificación no-residencial base de 3 pisos. La Tabla 6.1.2 presenta la cantidad de edificaciones comerciales no-residenciales por ciudad.

Tabla 6.1.2.1.Cantidad de edificaciones no-residenciales por ciudad.

Ciudad	No. de Edificaciones no-residenciales
Mérida	309
Monterrey	493
Hermosillo	258
Cd. de México	2566
Tulancingo	195

La Figura 6.1.2.1.presenta el ahorro anual de energía en GWh de enfriamiento considerando el número de edificaciones no-residenciales por ciudad cambiando la reflectancia base de 0.3 (rojo) a 0.6, 0.7 y 0.8. Para los climas templados, como el de la Cd. de México y Tulancingo, se considera que el 50% de las edificaciones no residenciales utilizan el aire acondicionado y el otro 50% no lo utilizan. Se observa que por el cambio de techo convencional rojo a techo blanco, los ahorros de energía en la Cd. de México, aun considerando que el 50% de las edificaciones no residenciales cuentan con aire acondicionado, son mayores que en las otras ciudades.

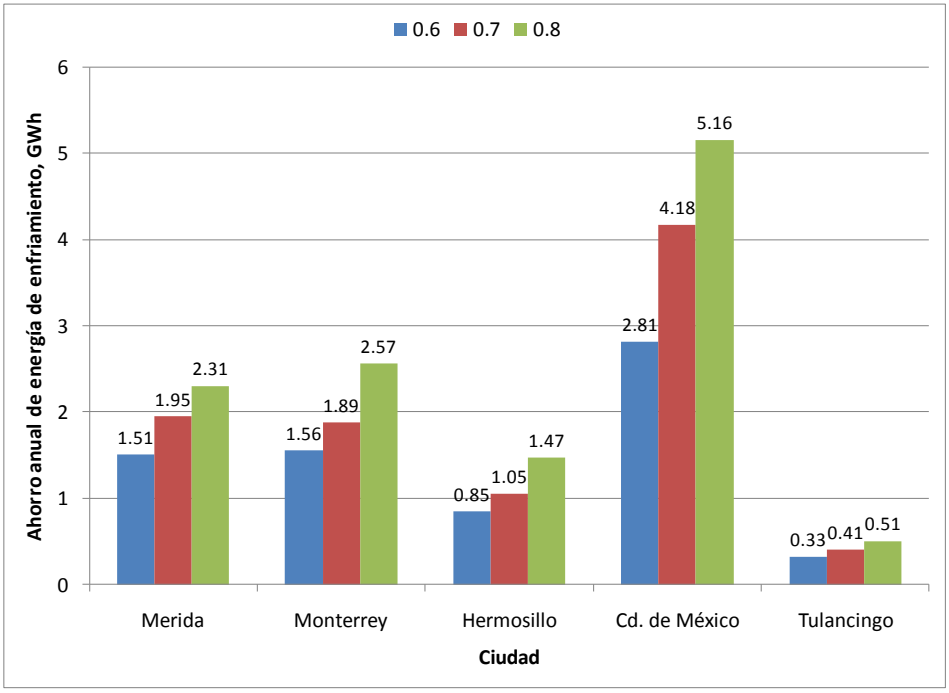


Figura 6.1.2.1. Ahorros de energía de enfriamiento anuales por cantidad de edificaciones no-residenciales por ciudad con techos de 2.5" de espesor de aislante y reflectancias de 0.6, 0.7 y 0.8.

La Figura 6.1.2.2 presenta el porcentaje de ahorro de energía para enfriamiento cambiando la reflectancia del techo de 0.3 (rojo) a 0.8 (blanco) de edificación no-residenvial por ciudad. El 43% de los ahorros totales pueden atribuirse a la implementación de cool roof en la ciudad de México, mientras que el ahorro por la implementación de cool roof en Tulancingo es mínimo.

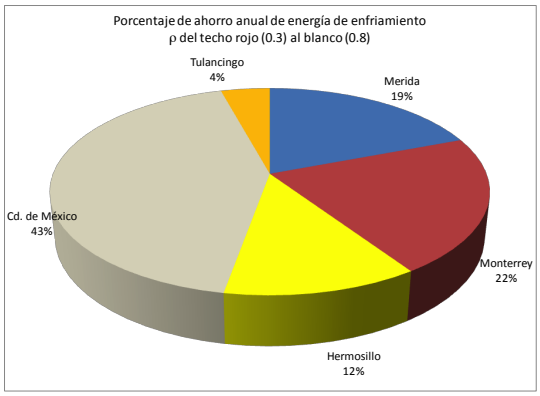


Figura 6.1.2.2 Porcentaje de ahorro de energía de enfriamiento anual por cantidad de edificaciones no-residenciales por ciudad con techos de 2.5" de espesor de aislante y reflectancias de 0.8.

6.1.3 Potencial de emisiones de gases de invernadero por el ahorro de energía de la edificación no-residencial por ciudad

Los cálculos de la contribución de los gases de efecto invernadero a la atmósfera por el consumo de energía de enfriamiento se realizaron con base en las equivalencias que proporciona la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2012). La EPA indica que 1 MWh de electricidad es equivalente a 0.706 Tons de CO_2.

Los cálculos de las emisiones de CO_2 que pueden ser mitigadas por el uso de cool roof con reflectancias de 0.6, 0.7 y 0.8 son calculadas usando los resultados de los ahorros de energía de enfriamiento para edificaciones no-residenciales.

La Figura 6.1.3.1 presenta la mitigación de CO_2 de cambiar el techo rojo (0.3) a blanco de reflectancias 0.6, 0.7 y 0.8 en edificación no-residencial. Se observa que al incrementar la reflectancia de techos la reducción de gases de CO_2 aumenta en todos los casos. Es de notar que para la Cd. de Mérida se ahorran 5.27 Tons de CO_2.

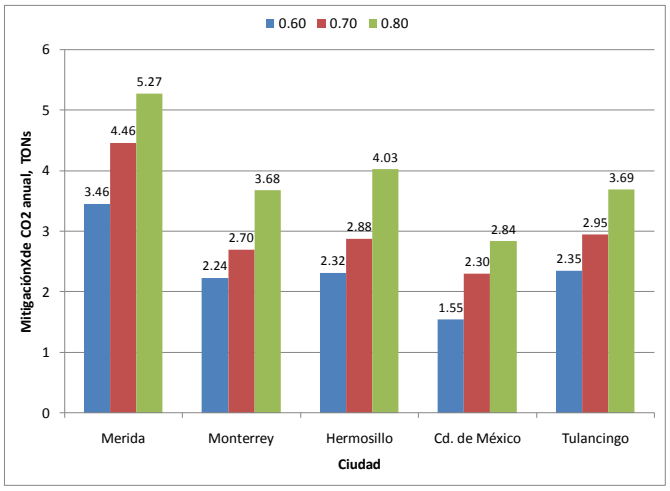


Figura 6.1.3.1 Mitigación de gases de CO_2anuales por edificación no-residencial por ciudad con techos de 2.5" de espesor de aislante y reflectancias de 0.6, 0.7 y 0.8.

La Figura 6.1.3.2 presenta la mitigación de CO_2 de cambiar el techo rojo (0.3) a blanco de reflectancias 0.6, 0.7 y 0.8 dependiendo de la cantidad de edificaciones no-residenciales por ciudad. De igual manera, en los climas templados como el de la Cd. de México y Tulancingo, se considera que el 50% de las edificaciones no - residenciales utilizan el aire acondicionado. Los resultados muestran que aun cuando se considera el 50% de las edificaciones no residenciales no utilicen AC en la Cd. de México, la implementación de techos frescos ayudará a mitigar de 2.0 a 3.6 kTONs de CO_2. Las ciudades ubicadas en climas cálidos contribuirían a mitigar alrededor de 1.0 a 1.8 kTons de CO_2.

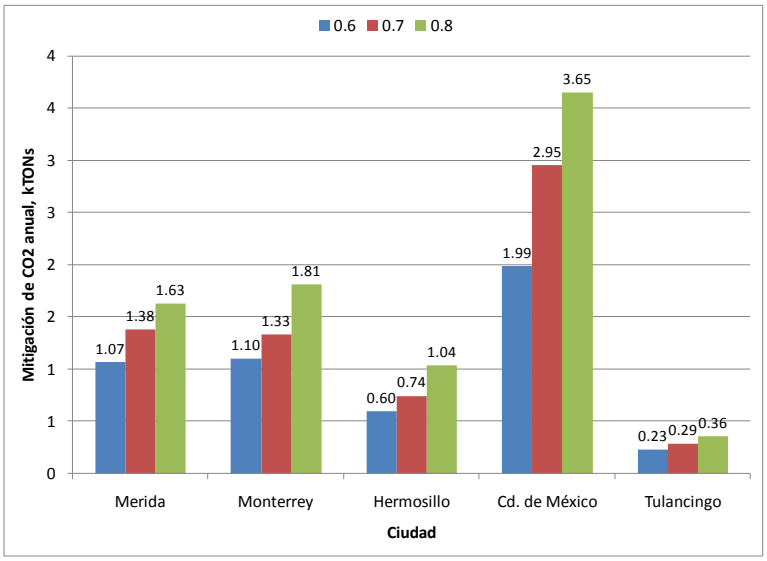


Figura 6.1.3.2 Mitigación de gases de CO_2anuales por cantidad de edificaciones no-residenciales por ciudad con techos de 2.5" de espesor de aislante y reflectancias de 0.6, 0.7 y 0.8.

6.1.4 Ahorros monetarios resultantes de los ahorros de energía y reducción de emisiones en edificaciones no-residenciales.

El ahorro en el consumo de energía debido al uso de los techos frescos, reducen las necesidades de producción de energía y reducen las emisiones de gases de efecto invernadero. Suponiendo que el 50% de los edificios no residenciales, tienen aire acondicionado en Ciudad de México, esto es 1,286 edificaciones, el ahorro en la producción de energía y la reducción de las emisiones de CO_2/año debido al aumento de la reflectancia solar 0.3 a 0.6, 0.7 y 0.8 puede ser estimado. Los ahorros monetarios en la producción de energía se calculan teniendo en cuenta que el costo promedio de la producción de energía es de 1.08 pesos/kWh, según reporta CFE en 2011. La mitigación de las emisiones de CO_2 se calcula en términos de vehículos retirados de la vía suponiendo que un vehículo emite 5 toneladas de CO_2/año (EPA, 2012).

En la tabla 6.1.4.1 se presentan los resultados del impacto anualizado de los ahorros en gasto de producción de energía y reducción de CO_2/año por el cambio de la reflectancia solar de los techos de 0.3, 0.6, 0.7 y 0.8 en los edificios no-residenciales de la Ciudad de México.

Tabla 6.1.4.1. Ahorro de energía y reducción de emisiones de CO_2 /año para la Ciudad de México por incrementar la reflectancia del techo de 0.3 a 0.8 en edificios no-residenciales

Reflectancia	0.6	0.7	0.8	
Concepto	**Cantidad**	**Cantidad**	**Cantidad**	**Unidades**
Ahorro en el consumo de energía	2.81	4.18	5.16	GWh
Ahorro en gasto de producción de energía	3,034,800	4,515,400	5,572,800	Pesos
Reducción de emisiones de CO2:	1,990	2,950	3,650	Toneladas
Equivalencia en vehículos automotores	398	590	730	Vehículos

Ahorros monetarios por edificación

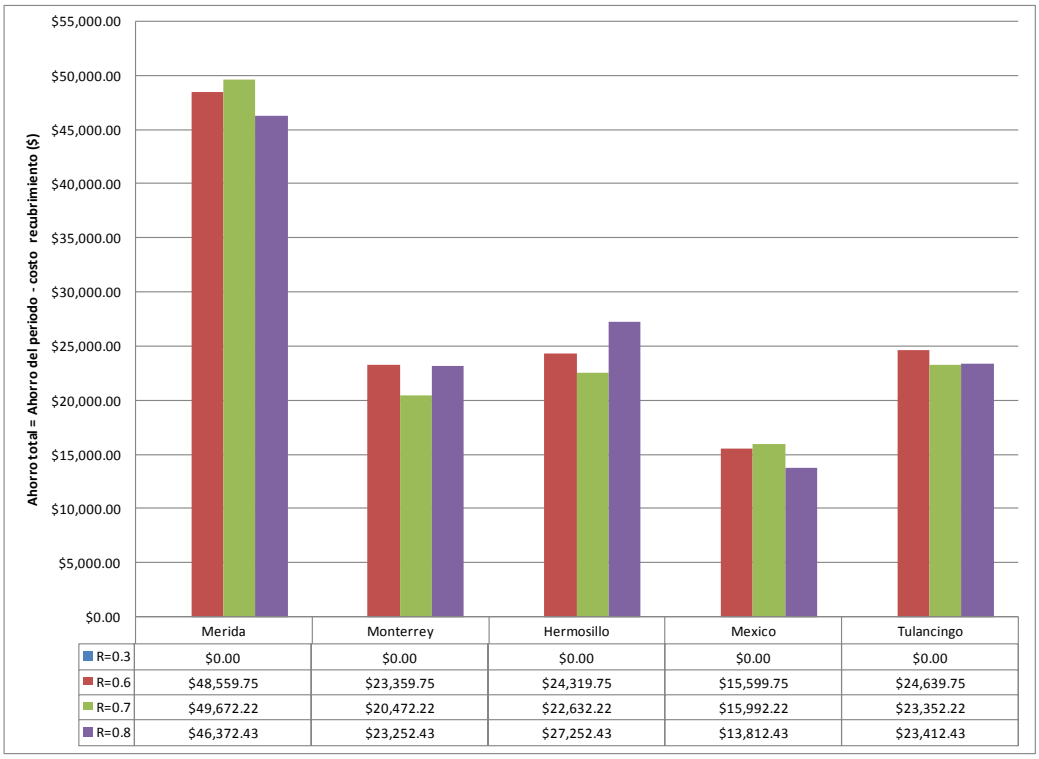
Los ahorros de energía durante el periodo de vida de 5 años del *Cool Roof* por edificación no-residencial sonr calculados considerando el costo típico por metro cuadrado de un recubrimiento para techos de reflectividades 0.3, 0.6, 0.7 y 0.8. Estos costos se presentan en la tabla 6.1.4.2, junto con los metros cuadrados de techo de la edificación no-residencial y el costo total. Se observa que la diferencia en costos del producto de reflectancia de 0.3 a 0.6 es de $2,000.25, de 0.3 a 0.7 es de $10,087.78 y de 0.3 a 0.8 es de $18,427.57.

Tabla 6.1.4.2 Costos del producto de recubrimientos reflectivos actuales por m^2 en el mercado con reflectancias de 0.3, 0.6, 0.7 y 0.8, área del edificio no-residencial y costo total.

Reflectancia	Costo ($/$m^2$)	Área (m^2)	Costo total ($)
0.3 (Rojo)	$ 26.17	669	$ 17,506.93
0.6	$ 29.16	669	$ 19,507.18
0.7	$ 41.25	669	$ 27,594.72
0.8	$ 53.71	669	$ 35,934.51

El costo por kilowatt fue calculado por la tarifa ordinaria de media tensión (OM) de electricidad de CFE. Este costo aplica a servicios que destinen una demanda menor a 100 kW para edificaciones no-residenciales, que es de $162.66 por kilowatt de demanda máxima medida y $1.394 por kWh de energía consumida. Por ejemplo: suponiendo 80 kWh como la demanda máxima promedio, el costo por demanda es de $13,012.00 ($162.66 x 80kWh) y para un consumo promedio de 54 MWh bimensuales, el costo del consumo es de $75,276(1.394 x 54,000 kWh). Sumando el costo de la demanda máxima promedio y el costo del consumo de energía promedio, se tiene que el costo bimestral de $ 88,288 MX. Dividiendo por los 54,000 kWh se obtiene $1.63 que es el costo por kWh para las edificaciones no-residenciales.

Considerando el costo de $1.63/kWh por los ahorros de energía de enfriamiento anuales para cada ciudad de la Fig. 6.1.2.1, se obtiene el costo de la energía de enfriamiento ahorrado en el periodo de 5 años y restando el costo del recubrimiento por cambiar la reflectancia del techo de 0.3 a 0.6, 0.7 o 0.8 se obtiene el ahorro total anual por edificio no-residencial. Estos resultados se presentan en la Figura 6.1.4.1, se observa que considerando la tarifa de CFE, el mayor ahorro por edificación no-residencial sería para la Cd. de Mérida. Debido a las diferencias entre los costos de los recubrimientos de alta reflectancia con relación al recubrimiento de reflectancia de 0.3, los ahorros varían dependiendo de la ciudad. Por ejemplo para la Cd. de Mérida y la Cd. de México se obtiene que existe ligeramente un mayor ahorro en costos con un recubrimiento de reflectividad de 0.7 en lugar de uno de 0.8, no así para la Cd. de Hermosillo donde el recubrimiento de reflectividad de 0.8 es preferible.



	Merida	Monterrey	Hermosillo	Mexico	Tulancingo
R=0.3	$0.00	$0.00	$0.00	$0.00	$0.00
R=0.6	$48,559.75	$23,359.75	$24,319.75	$15,599.75	$24,639.75
R=0.7	$49,672.22	$20,472.22	$22,632.22	$15,992.22	$23,352.22
R=0.8	$46,372.43	$23,252.43	$27,252.43	$13,812.43	$23,412.43

Figura 6.1.4.1. Ahorro total en la vida útil del Cool Roof al incrementar la reflectancia del techo de 0.3 a 0.6, 0.7 y 0.8 en edificios no residenciales.

En la Tabla 6.1.4.3 se presentan los periodos de recuperación de la inversión por bimestre y por año, así como el ahorro que se obtiene durante el tiempo de vida de los recubrimientos que es de 5 años para edificaciones no residenciales. Las inversiones en recubrimientos reflectivos de reflectancias de 0.6 indican que los periodos de recuperación de la inversión oscilan entre 2 y 4 bimestres. Para reflectancias de 0.7, los tiempos de recuperación oscilan entre 6 y 12 bimestres (1 a 2 años) y para reflectancias de 0.8, los tiempos de recuperación de la inversión son de 9 a 18 bimestres (1.5 a 3 años). Es de observar que Mérida es el que indica el menor tiempo de recuperación de la inversión, seguido por Hermosillo, Monterrey, Tulancingo y Cd. de México. Es de notar que en todos los casos los tiempos de recuperación son menores de los 5 años que es el tiempo de vida del recubrimiento reflectivo.

Tabla 6.1.4.3. Periodos de recuperación de la inversión al incrementar la reflectancia del techo de 0.3 a 0.6, 0.7 y 0.8 en edificios no residenciales.

Inversión	$2,000.25 (R=0.6)	$10,087.78 (R=0.7)	$18,427.57 (R=0.8)
Reflectancia R	Tiempo de retorno de inversión /Bimestral	Tiempo de retorno de inversión /anual	Ahorros totales Tiempo de vida de 5 años
Mérida (Cálido sub-humedo)			
0.6	2.0	0.3	$48,559.75
0.7	6.0	1.0	$49,672.22
0.8	9.0	1.5	$46,372.43
Monterrey (Seco)			
0.6	3	0.5	$23,39.75
0.7	10	1.7	$20,472.22
0.8	14	2.3	$23,252.43
Hermosillo (Muy seco)			
0.6	3	0.5	$24,319.75
0.7	10	1.7	$22,632.22
0.8	13	2.2	$27,252.43
Cd. de México (Templado sub-húmedo)			
0.6	4	0.7	$15,599.75
0.7	12	2.0	$15,992.22
0.8	18	3.0	$13,812.43
Tulancingo (Templado húmedo)			
0.6	3	0.5	$24,639.75
0.7	10	1.7	$23,352.22
0.8	14	2.3	$23,412.43

6.2 Edificación residencial – Case A: no aislante en el techo.

La figura 6.2.1 presenta el consumo anual de energía de la edificación residencial como función de reflectancia del techo (0.1-0.9) para el caso A: sin aislante en el techo para los climas: Cálido húmedo (Villahermosa), cálido subhúmedo (Mérida), Seco (Monterrey), muy seco (Hermosillo), húmedo templado (Tulancingo) y templado subhúmedo (ciudad de México y Guadalajara). En todos los casos, a medida que aumenta la reflectancia del techo, es notoria la disminución del consumo energético para enfriamiento. Las cargas de enfriamiento más altas son las de Villahermosa y Mérida, seguido de Hermosillo y Monterrey. Las ciudades de Guadalajara y Tulancingo y Ciudad de México presentan las cargas de enfriamiento más bajas, las cuales se ubican en climas templados. En la Tabla 6.2.1 se muestran los valores de las cargas de refrigeración para la edificación residencial.

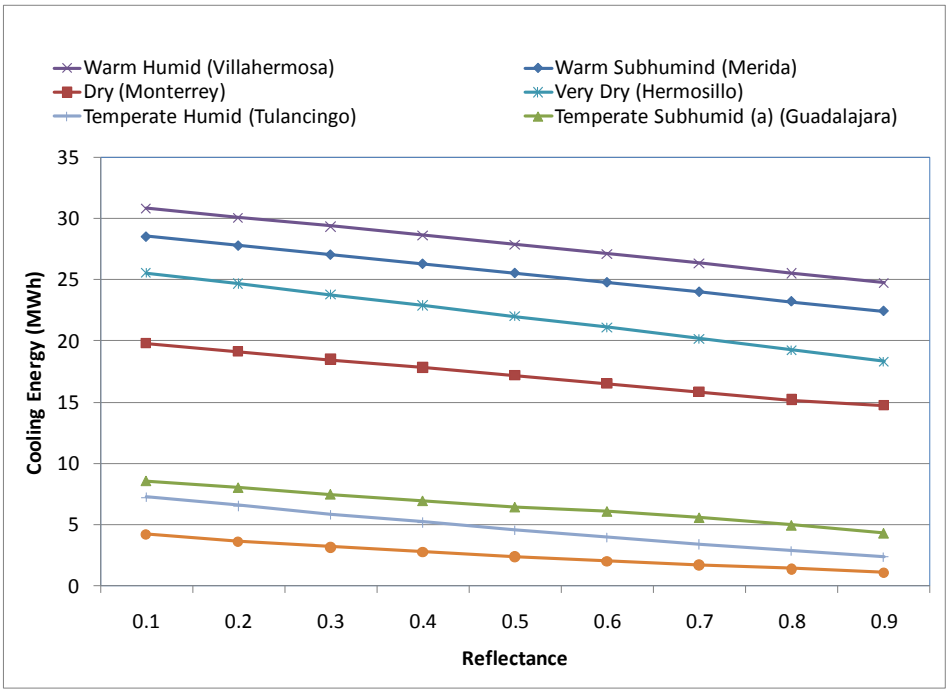


Figura 6.2.1. Cargas de energía de enfriamiento anuales por edificación residencial como función de la reflectancia para 7 ciudades en las 6 zonas climáticas.

Tabla 6.2.1.Cargas de energía de enfriamiento anuales por edificación residencial como función de la reflectancia para 7 ciudades en las 6 zonas climáticas.

Energía de enfriamiento (MWh) –Edificación residencial							
Reflectancia del techo	**Cálido húmedo (Villahermosa)**	**Cálido subhúmedo (Merida)**	**Seco (Monterrey)**	**Muy seco (Hermosillo)**	**Húmedo Templado (Tulancingo)**	**Subhúmedo Templado (a) Guadalajara**	**Subhúmedo Templado (b) Cd. de Mex.**
0.1	30.8	28.6	19.8	25.6	7.3	8.6	4.2
0.2	30.1	27.8	19.2	24.7	6.6	8.0	3.6
0.3	29.4	27.1	18.5	23.8	5.9	7.5	3.2
0.4	28.6	26.3	17.8	22.9	5.2	6.9	2.8
0.5	27.9	25.6	17.2	22.0	4.6	6.4	2.4
0.6	27.1	24.8	16.5	21.1	4.0	6.1	2.1
0.7	26.3	24.0	15.8	20.2	3.4	5.6	1.7
0.8	25.5	23.2	15.2	19.3	2.9	4.9	1.4
0.9	24.7	22.4	14.8	18.3	2.4	4.3	1.1

6.2.1 Edificación residencial – Caso B: aislante en el techo.

Las simulaciones se llevaron a cabo teniendo en cuenta el aislamiento del techo de la edificación residencial, a raíz de los límites de la ganancia de calor que se incluyen en la NOM-020-ENER-2011. Al igual que en la edificación no residencial, esta NOM limita el aumento de la ganancia de calor a través de la envoltura con el fin de lograr las condiciones de confort y para evitar o reducir al mínimo la demanda de energía de los sistemas de aire acondicionado. Para cumplir con este límite, un cálculo similar fue realizado al igual que en la edificación no residencial Caso B. La Tabla 6.2.1.1 presenta el listado del coeficiente global de transferencia de calor (K) de las ciudades mencionadas en la NOM-020-ENER-2011. También incluye el espesor del aislante EPS para cumplir con los valores del coeficiente de transferencia de calor de la NOM.

Tabla 6.2.1.1. Coeficiente de transferencia de calor global (K) y el espesor de aislante correspondiente de edificación residencial.

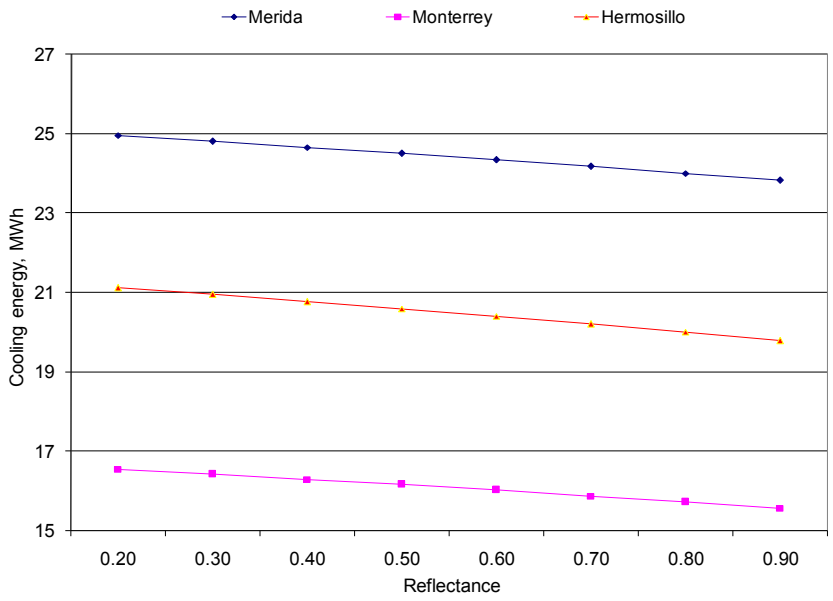
Estado	Ciudad	Techo (W/m^2K)	Espesor (pulg)
AGUASCALIENTES	Aguascalientes	0.833	**0.884**
BAJA CAL. SUR	La Paz	0.526	**1.656**
	Cabo S. Lucas	0.526	**1.656**
BAJA CALIFORNIA	Ensenada	0.909	**0.773**
	Mexicali	0.476	**1.876**
	Tijuana	0.714	**1.104**
CAMPECHE	Campeche	0.526	**1.656**
	Cd. Cármen	0.526	**1.656**
COAHUILA	Monclova	0.526	**1.656**
	PiedrasNegras	0.526	**1.656**
	Saltillo	0.633	**1.302**
	Torreón	0.526	**1.656**
COLIMA	Colima	0.556	**1.543**
	Manzanillo	0.526	**1.656**
CHIAPAS	Arriaga	0.526	**1.656**
	Comitán	0.833	**0.884**
	San Cristóbal	0.909	**0.773**
	Tapachula	0.526	**1.656**
	Tuxtla Gutiérrez	0.556	**1.543**
CHIHUAHUA	N. Casas Grandes	0.714	**1.104**
	Chihuahua	0.625	**1.324**
	Cd. Juárez	0.625	**1.324**
	Hidalgo del Parral	0.833	**0.884**
D.F.	México	0.909	**0.773**
DURANGO	Durango	0.633	**1.302**
	Lerdo	0.556	**1.543**
GUANAJUATO	Guanajuato	0.714	**1.104**
	León (b)	0.714	**1.104**
GUERRERO	Acapulco	0.526	**1.656**
	Chilpancingo	0.714	**1.104**
	Zihuatanejo	0.556	**1.543**
HIDALGO	Pachuca	0.909	**0.773**
	Tulancingo	0.909	**0.773**
JALISCO	Guadalajara (c)	0.714	**1.104**
	Huejucar	0.714	**1.104**
	Lagos de Morelos	0.833	**0.884**
	Ocotlán	0.714	**1.104**
	Puerto Vallarta	0.526	**1.656**
MÉXICO	Chapingo	0.633	**1.302**
	Toluca	0.909	**0.773**

MICHOACÁN	Morelia	0.633	**1.302**
	Lázaro Cardenas	0.526	**1.656**
	Uruapan	0.633	**1.302**
MORELOS	Cuernavaca	0.714	**1.104**
	Cuautla	0.556	**1.543**
NAYARIT	Tepic	0.714	**1.104**
NUEVO LEÓN	Monterrey	0.556	**1.543**
OAXACA	Oaxaca	0.714	**1.104**
	Salina Cruz	0.526	**1.656**
PUEBLA	Puebla	0.833	**0.884**
	Atlixco	0.714	**1.104**
	Tehuacán	0.714	**1.104**
QUERÉTARO	Querétaro	0.833	**0.884**
	San Juan del Rio.	0.833	**0.884**
QUINTANA ROO	Cozumel	0.526	**1.656**
	Chetumal	0.526	**1.656**
	Cancun	0.526	**1.656**
	Playa del Carmen	0.526	**1.656**
SAN LUIS POTOSÍ	Río Verde	0.556	**1.543**
	San Luis Potosí	0.633	**1.302**
	Cd. Valles	0.526	**1.656**
	Matehuala	0.833	**0.884**
SINALOA	Culiacán	0.526	**1.656**
	Mazatlán	0.526	**1.656**
	Guasave	0.526	**1.656**
	Los Mochis	0.526	**1.656**
SONORA	Guaymas	0.476	**1.876**
	Hermosillo	0.476	**1.876**
	Cd. Obregón	0.476	**1.876**
	Navojoa	0.626	**1.321**
	Nogales	0.626	**1.321**
TABASCO	Villahermosa	0.714	**1.104**
	Comalcalco	0.526	**1.656**
TAMAULIPAS	Cd. Victoria	0.526	**1.656**
	Tampico	0.526	**1.656**
	Matamoros	0.556	**1.543**
	Reynosa	0.556	**1.543**
	Nuevo Laredo	0.526	**1.656**
TLAXCALA	Tlaxcala	0.909	**0.773**
VERACRUZ	Coatzacoalcos	0.526	**1.656**
	Córdoba	0.714	**1.104**
	Jalapa	0.714	**1.104**
	Orizaba	0.714	**1.104**

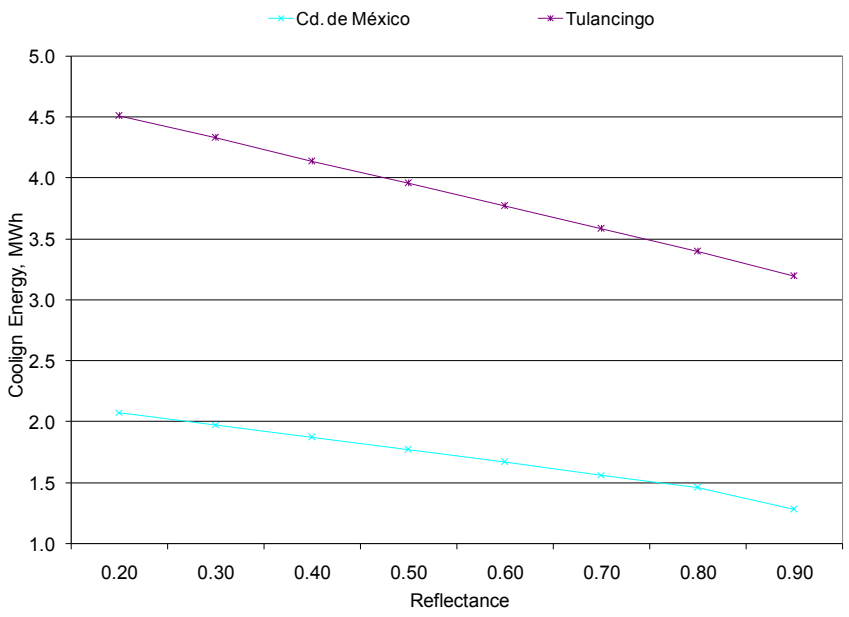
	Tuxpan	0.526	**1.656**
	Poza Rica	0.526	**1.656**
	Veracruz	0.526	**1.656**
YUCATÁN	Mérida	0.526	**1.656**
	Progreso	0.526	**1.656**
	Valladolid	0.526	**1.656**
ZACATECAS	Fresnillo	0.833	**0.884**
	Zacatecas	0.909	**0.773**

Para edificaciones Residenciales, los coeficientes de transferencia de calor globales (K) están en el rango de 0.476-0.909 W/m^2K que corresponde a espesores de aislante de 0.77-1.87 pulgadas. Por lo tanto, para las simulaciones en EnergyPlus de la edificación residencial, se consideran dos espesores de aislantes: 1) 1 pulgada (K=0.805 W/m^2k) para la Ciudad de México y Tulancingo, y 2) 2 pulgadas (K=0.465 W/m^2K) para las ciudades de Mérida, Monterrey y Hermosillo.

La Figura 6.2.1.1. (a-b) presenta las cargas de enfriamiento en función de la reflectancias del techo de la edificación residencial con techo con espesores de aislantes de 1" (Cd. de México y Tulancingo) y 2" (Mérida, Monterrey y Hermosillo). Para cada ciudad hay una disminución del consumo de energía de enfriamiento. Los valores se presentan en la Tabla 6.2.1.2. De las diferencias del consumo energético, se observa que el mayor ahorro de energía por enfriamiento por el cambio de reflectancia de 0.2 a 0.9 se presenta para la Cd. de Mérida (1.14 MWh), el menor ahorro es en la Cd. de México (0.8 MWh).



(a)



(b)

Figura 6.2.1.1 Consumos de energía de enfriamiento anuales por edificación residencial por ciudad para espesores de aislantes de a) 2" (Mérida, Monterrey y Hermosillo) y b) 1" (Cd. de México y Tulancingo) para reflectancias de 0.2 a 0.9.

Tabla 6.2.1.2 Valores del consumo de energía de enfriamiento anuales por edificación residencial por ciudad para techos con espesores de aislantes de 2" (Mérida, Monterrey y Hermosillo) y 1" (Cd. de México y Tulancingo) por ciudad para reflectancias de 0.2 a 0.9.

Energía de enfriamiento anual (MWh) – Edificación residencial Aislante de 1" (K=0.805 W/m^{2}K) y 2" (K=0.465 W/m^{2}K)					
Reflectancia del techo	**Cálido subhumedo (Merida)**	**Seco (Monterrey)**	**Muyseco (Hermosillo)**	**Subhumedo Templado (Cd. de Mex.)**	**Humedo Templado (Tulancingo)**
0.20	24.96	16.55	21.65	2.08	4.51
0.30	24.81	16.42	21.36	1.97	4.33
0.40	24.66	16.29	21.07	1.87	4.14
0.50	24.50	16.15	20.77	1.77	3.96
0.60	24.34	16.01	20.46	1.67	3.77
0.70	24.17	15.87	20.14	1.56	3.59
0.80	24.00	15.72	19.80	1.46	3.40
0.90	23.82	15.56	19.45	1.28	3.20

Tomando como referencia un techo con reflectancia de 0.3 correspondiente a un techo convencional rojo y aumentando la reflectividad del techo a 0.6, 0.7 y 0.8 (blancos) se calcula el ahorro de energía por la carga de enfriamiento por edificación residencial por ciudad, los resultados se muestran en la Figura 6.2.1.3. Los mayores ahorros se obtienen para los techos de reflectancia de 0.8 en todos los casos. En términos de ciudad para edificaciones con aislante de 2" y tipo de clima, los mayores ahorros fueron para la ciudad de Hermosillo (clima muy seco), seguida de la Cd. de Mérida (cálido subhúmedo) y Monterrey (seco). Para las edificaciones con techos con aislante de 1", el mayor ahorro fue para la ciudad de Tulancingo (húmedo templado) seguido de la Cd. de México (subhúmedo templado). Es de observar que los ahorros son similares para Hermosillo y Tulancingo, esto se debe a que tienen diferente espesor de aislante.

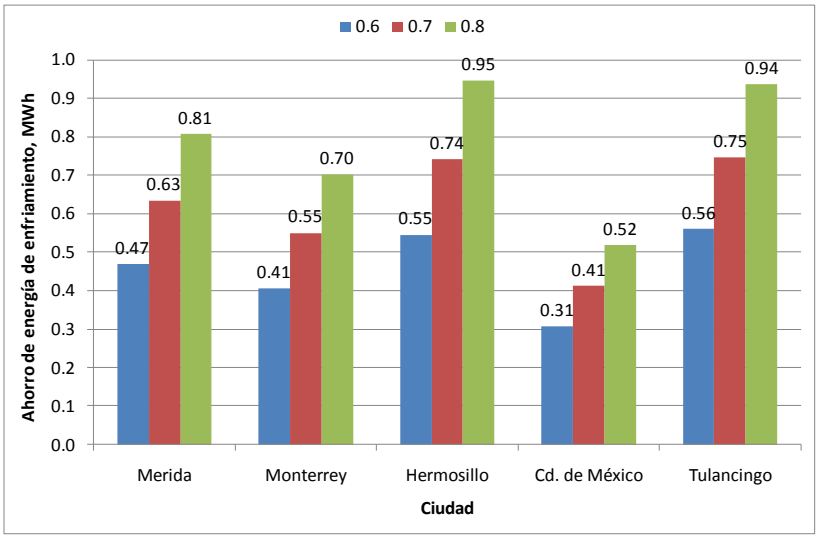


Figura 6.2.1.3 Ahorros de energía de enfriamiento anuales por edificación residencial por ciudad con techos con espesor de aislante de 2" (Mérida, Monterrey y Hermosillo) y de 1" (Cd. de México y Tulancingo) y reflectancias de 0.6, 0.7 y 0.8.

6.2.2 Ahorro de energía de edificaciones residenciales por ciudad.

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía reporta el número total de edificaciones Residenciales que son viviendas es de 28,138,556 (INEGI, 2012). El número de edificaciones Residenciales por Estado en donde se encuentran las ciudades seleccionadas se muestran en la Tabla 6.2.2.1.

Tabla 6.2.2.1 Cantidad de edificaciones Residenciales por Estado

Estado (Ciudad)	No. de edificaciones Residenciales
Yucatán (Mérida)	502,948
Nuevo León (Monterrey)	1,190,804
Sonora (Hermosillo)	703,956
Cd. de México	6,073,798
Hidalgo (Tulancingo)	662,341

Con esta información, se calcula el ahorro de energía de enfriamiento anual por número de edificaciones Residenciales con techo aislado por Estado considerando el cambio de superficie de techo rojo (0.3) a blanco de reflectancias 0.6, 0.7 y 0.8. Para los climas templados tales como la Cd. de México y Tulancingo se considera que solo el 10% de las edificaciones Residenciales tienen aire acondicionado y el 90% no lo tienen. En la Figura 6.2.2.1 se presentan los resultados. Se observa que los mayores ahorros son para las ciudades en climas secos y cálidos, en particular, por el número de edificaciones existentes en la Cd. de Monterrey se obtiene el mayor ahorro energético (840 GWh).

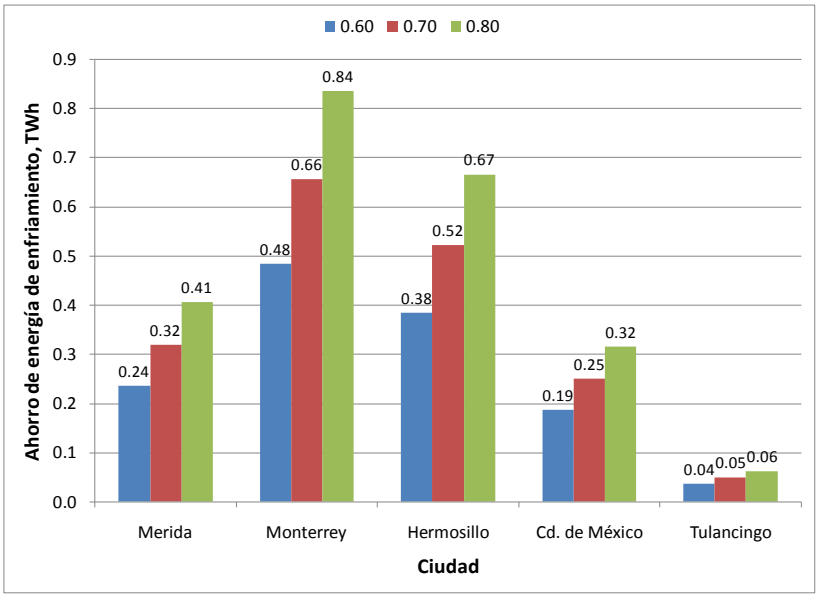


Figura 6.2.2.1. Ahorros de energía de enfriamiento anuales por cantidad de edificaciones Residenciales por ciudad con techos de 1" (Cd. de México y Tulancingo) y 2" (Mérida, Monterrey y Hermosillo) de espesor de aislante y reflectancias de 0.6, 0.7 y 0.8.

La Figura 6.2.2.2 presenta los porcentajes de ahorro de energía anual por el cambio de techo de reflectancia de 0.3 (rojo) a 0.8 (blanco) de edificaciones residenciales por ciudad. Se observa que el 36% de los ahorros totales se atribuyen a la implementación de cool roof en Monterrey mientras en Tulancingo es mínimo. .

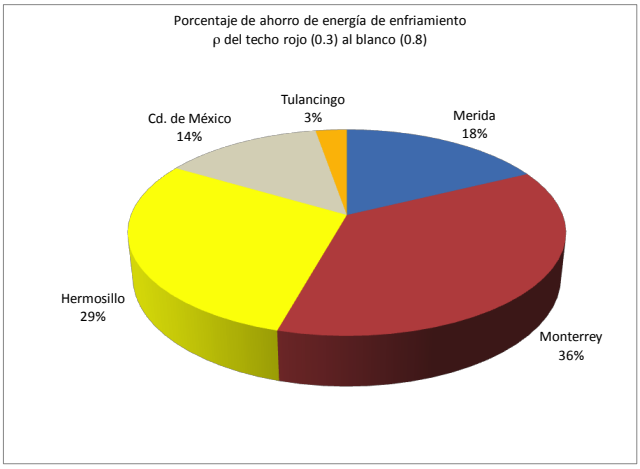


Figura 6.2.2.2. Porcentajes de ahorro de energía de enfriamiento anuales de 0.3 a 0.8 para 5 ciudades, para el caso B: techos de espesor de aislante de 1" (Cd. de México y Tulancingo) y 2" (Mérida, Monterrey y Hermosillo).

6.2.3 Emisiones de gas de invernadero por edificaciones Residenciales por ciudad.

Al igual que para la edificación no-residencial, se realizaron los cálculos de la mitigación de los gases de efecto invernadero con base en las equivalencias que proporciona la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2012). La EPA indica que 1 MWh de electricidad es equivalente a 0.706 Tons de CO_2.

Considerando los resultados del ahorro de energía de enfriamiento para la edificación residencial con aislante de techo de 1" y 2" se realiza el cálculo de las emisiones de gases de CO_2anuales que se mitigarían por el uso de *cool roof* para techo con reflectancias de 0.6, 0.7 y 0.8. La Figura 6.2.3.1 presenta la reducción de gases de CO_2

anuales por edificación residencial considerando aislante en el techo de 2” (Mérida, Monterrey y Hermosillo) y de 1” (Cd. de México y Tulancingo) y cambiando el techo rojo a techo blanco de reflectividades 0.6, 0.7 y 0.8.

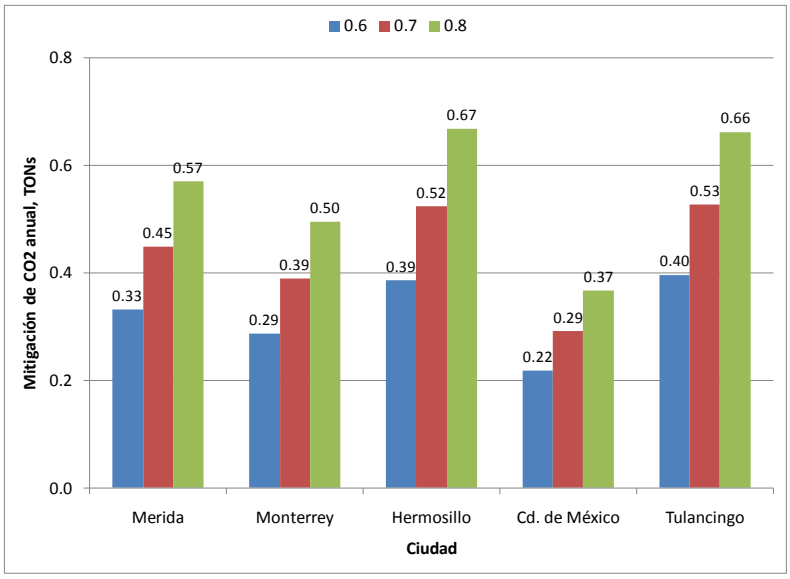


Figura 6.2.3.1 Mitigación de gases de CO_2anuales por edificación residencial por Estado para techos con aislante de 2” (Mérida, Monterrey y Hermosillo) y de 1” (Cd. de México y Tulancingo) y reflectancias de techos de 0.6, 0.7 y 0.8.

La Figura 6.2.3.2 presenta la mitigación de CO_2 anual de edificaciones Residenciales por ciudad considerando aislantes de techo de 2” (Mérida, Monterrey y Hermosillo) y de 1” (Cd. de México y Tulancingo) y cambiando el techo rojo a techo blanco de reflectividades 0.6, 0.7 y 0.8. Para este tipo de edificación en clima templado tales como la Cd. de México y Tulancingo se considera que sólo el 10% de las edificaciones Residenciales tienen aire acondicionado y el 90% no lo tienen. Se observa, que la Cd. de Monterrey, por el gran número de edificaciones Residenciales con aislante en los techos, puede mitigar 590 kTons de CO_2 anual. Las ciudades templadas no representan un gran ahorro energético en cuanto a edificaciones residenciales suponiendo que solamente el 10% tengan aire acondicionado.

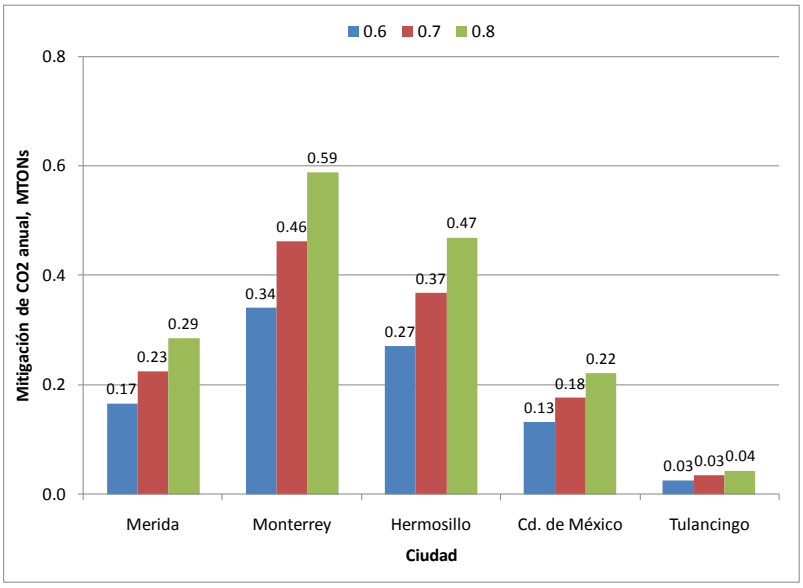


Figura 6.2.3.2 Mitigación de gases de CO_2 anuales por cantidad de edificaciones Residenciales por Estado para techos con 1” (Cd. de México y Tulancingo) y 2” (Mérida, Monterrey y Hermosillo) de aislante y reflectancias de techos de 0.6, 0.7 y 0.8.

6.2.4 Ahorros monetarios resultantes de los ahorros de energía y reducción de emisiones en edificaciones residenciales.

El ahorro del consumo de energía por el uso de *cool roofs* representa ahorros en la producción de energía, en reducción de gases de invernadero y lo que equivaldría en vehículos automotores. De acuerdo con Informe de Rendición de Cuentas 2006-2012 de CFE, durante 2011 el costo promedio de producción fue de 1.08 pesos/kWh y de acuerdo con la EPA, un vehículo automotor en promedio emite 5 Ton de CO_2/año. Por lo cual el impacto anualizado de ahorro en producción de energía y de emisiones calculado por este estudio de cambiar la reflectancia solar de los techos de 0.3 a 0.8 en los edificios Residenciales de la Ciudad de Monterrey se muestra en la tabla 6.2.4.1.

Tabla 6.2.4.1. Ahorro de energía y reducción de emisiones de CO_2/año para la Ciudad de Monterrey por incrementar la reflectancia del techo de 0.3 a 0.8 en edificios residenciales

Reflectancia	0.6	0.7	0.8	
Concepto	Cantidad	Cantidad	Cantidad	Unidades
Ahorro en el consumo de energía	0.48	0.66	0.84	TWh
Ahorro en gasto de producción de energía	51,840,000	71,280,000	90,720,000	Pesos
Reducción de emisiones de CO_2:	340,000	460,000	590,000	Toneladas
Equivalencia en vehículos automotores	68,000	92,000	118,000	Vehículos

Según FIMEVIC el parque vehicular de la Ciudad de Monterrey asciende a 1,800,000 autos aproximadamente. Por lo cual el impacto potencial en reducción de emisiones de CO_2 por la aplicación de "*CoolRoofs*" en edificios Residenciales sería equivalente a quitar de circulación el 6.55 % del total de los vehículos automotores que circulan en la zona metropolitana de Monterrey.

Ahorros en costos por edificación

Calculando el ahorro de energía durante un tiempo de vida del Cool Roof de 5 años por edificio Residencial. El costo típico por metro cuadrado de un recubrimiento para techos de reflectividades 0.3, 0.6, 0.7 y 0.8 se presenta en la tabla 6.1.4.2, junto con los metros cuadrados de techo de la edificación Residencial y el costo total. Se observa que la diferencia en costos del cambio de reflectancia de 0.3 a 0.6 es sólo de $ 162.95, de 0.3 a 0.7 es de $821.80 y de 0.3 a 0.8 es de $1,501.20.

Tabla 6.2.4.2 Costos del producto de recubrimientos reflectivos actuales por m^2 en el mercado con reflectancias de 0.3, 0.6, 0.7 y 0.8, área del edificio Residencial y costo total.

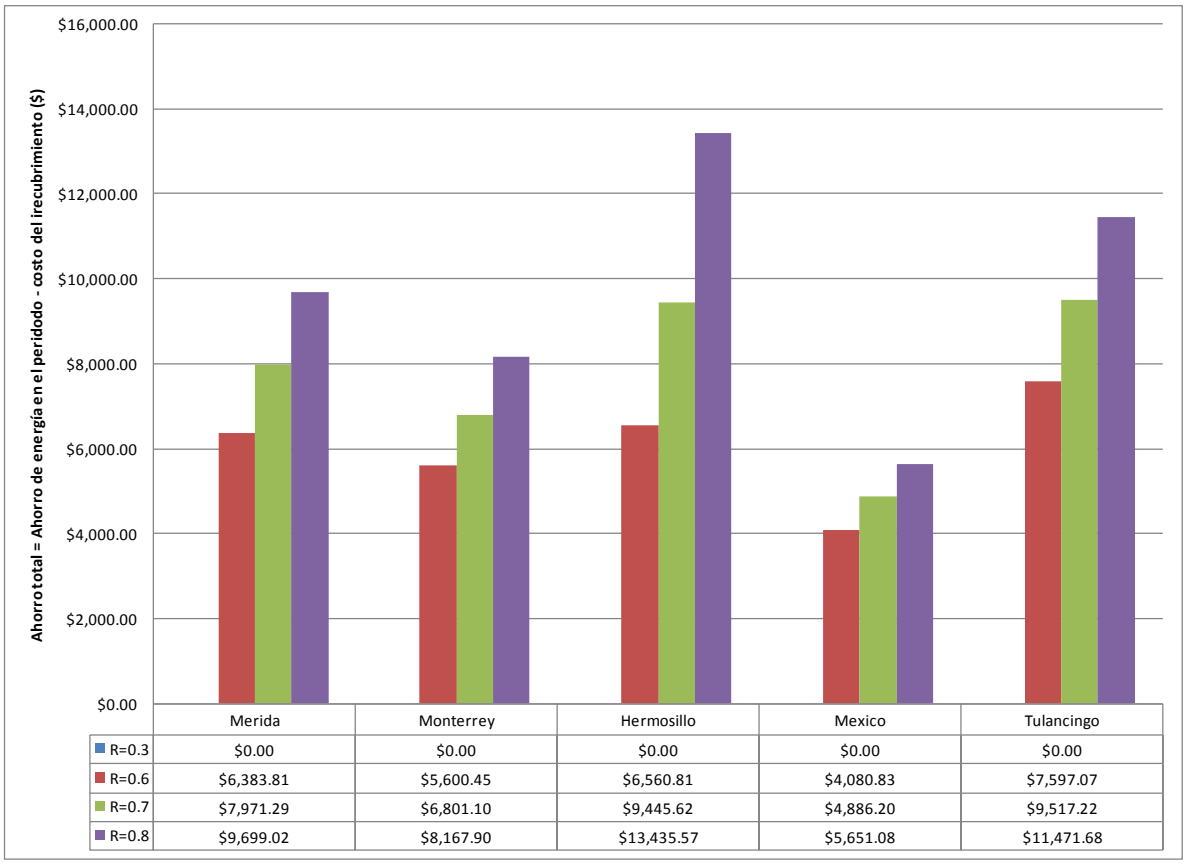
Reflectancia	Costo ($/$m^2$)	Área (m^2)	Costo total ($)
0.3	$ 26.17	54.5	$ 1,426.20
0.6	$ 29.16	54.5	$ 1,589.15
0.7	$ 41.25	54.5	$ 2,248.00
0.8	$ 53.71	54.5	$ 2,927.40

Para el cálculo del costo de la energía de enfriamiento anual, se consideran las tarifas de CFE para la edificación Residencial, las cuales varían según la época del año y la zona geográfica. La Tabla 6.2.4.3 presenta las tarifas de las 5 ciudades. Se observa que, para las ciudades de México y Tulancingo las tarifas son las mismas durante todo el año. Sin embargo, para las regiones calientes y cálidas las tarifas varían. Por ejemplo, en Hermosillo el costo de la electricidad es más alto en invierno que en verano debido al subsidio gubernamental. Los costos se incrementan dependiendo del consumo.

Tabla 6.2.4.3. Tarifas de la CFE para edificaciones residenciales por zona y por época del año.

Mérida y Monterrey Tarifa 1B		Hermosillo Tarifa 1F		Cd de México y Tulancingo Tarifa 1	
Invierno					
Límite	**800kWh**	**Límite**	**5000kWh**	**Límite**	**500kWh**
75 kWh	$ 0.77	75 kWh	$ 0.77	75 kWh	$ 0.777
100kWh	$ 0.948	125kWh	$ 0.948	65kWh	$ 0.948
Resto	$ 2.77	Resto	$ 2.77	Resto	$ 2.77
Verano					
Límite	**800kWh**	**Límite**	**5000kWh**	**Límite**	**500kWh**
125 kWh	$ 0.693	300 kWh	$ 0.575	75 kWh	$ 0.777
100kWh	$ 0.808	900kWh	$ 0.724	65kWh	$ 0.948
Resto	$ 2.77	1300kWh	$ 1.74	Resto	$ 2.77
		Resto	$ 2.77		

Considerando el ahorro en el consumo energético mensual por edificación residencial por ciudad y multiplicando por la tarifa actual de CFE correspondiente, se calcula el ahorro total anual en costos por edificio residencial, el cual se calcula considerando los costos de la energía de enfriamiento ahorrada en el periodo de 5 años menos los costos del recubrimiento que se tendría en el periodo de 5 años por cambiar la reflectancia del techo de 0.3 a 0.6, 0.7 o 0.8. Estos resultados se presentan en la Figura 6.2.4.1, el mayor ahorro en costos de energía de enfriamiento por edificación Residencial, sería para la Cd. de Hermosillo. Los menores ahorros son para la Cd. de México. Para la edificación Residencial, las diferencias entre los costos de los recubrimientos de alta reflectancia con relación al recubrimiento de reflectancia de 0.3 no son significativas para esta área de techo de la edificación residencial, por lo tanto para las cinco ciudades los recubrimientos de reflectancia de 0.8 indican los mayores ahorros en costos para los climas cálidos húmedos y muy secos, y menores ahorros en climas templados.



	Merida	Monterrey	Hermosillo	Mexico	Tulancingo
R=0.3	$0.00	$0.00	$0.00	$0.00	$0.00
R=0.6	$6,383.81	$5,600.45	$6,560.81	$4,080.83	$7,597.07
R=0.7	$7,971.29	$6,801.10	$9,445.62	$4,886.20	$9,517.22
R=0.8	$9,699.02	$8,167.90	$13,435.57	$5,651.08	$11,471.68

Figura 6.2.4.1. Ahorro total de energía del periodo de 5 años menos el costo del impermeabilizante para las 5 ciudades.

En la Tabla 6.2.4.4 se presentan los periodos de recuperación de la inversión por bimestre y por año, así como el ahorro que se obtiene durante el tiempo de vida de los recubrimientos que es de 5 años para edificaciones residenciales. Las inversiones iniciales en recubrimientos reflectivos de reflectancias de 0.6 indican que los periodos de recuperación son de dos bimestres para las ciudades de Mérida, Monterrey, Hermosillo y Cd. de México y de 1 bimestre para la Cd. de Tulancingo. Para reflectancias de 0.7, los tiempos de recuperación oscilan entre 3 y 4 bimestres y para reflectancias de 0.8, los tiempos de recuperación de la inversión son de 4 a 7 bimestres (0.7 a 1.2 años). Es de observar que Mérida, Hermosillo y Tulancingo tienen tiempos de recuperación de 3 y 4 bimestres para reflectancias de 0.7 y de 0.8 respectivamente. El mayor tiempo de recuperación de la inversión es de 7 bimestres que corresponde a la Cd. de México, lo anterior debido al clima templado. En todos los casos los tiempos de recuperación son menores de los 5 años que es el tiempo de vida del recubrimiento reflectivo.

Tabla 6.2.4.4. Periodos de recuperación de la inversión al incrementar la reflectancia del techo de 0.3 a 0.6, 0.7 y 0.8 en edificios residenciales.

Inversión	$2,000.25 (R=0.6)	$10,087.78 (R=0.7)	$18,427.57 (R=0.8)
Reflectancia R	Tiempo de retorno de inversión /Bimestral	Tiempo de retorno de inversión	Ahorros totales Tiempo de
Mérida (Cálido sub-humedo)			
0.6	2	0.3	$6,383.81
0.7	3	0.5	$7,971.29
0.8	4	0.7	$9,699.02
Monterrey (Seco)			
0.6	2	0.3	$5,600.4
0.7	4	0.7	$6,801.10
0.8	5	0.8	$8,167.90
Hermosillo (Muy seco)			
0.6	2	0.3	$6,560.81
0.7	3	0.5	$9,445.62
0.8	4	0.7	$13,435.57
Cd. de México (Templado sub-humedo)			
0.6	2	0.3	$4,080.83
0.7	4	0.7	$4,886.20
0.8	7	1.2	$5,651.08
Tulancingo (Templado húmedo)			
0.6	1	0.2	$7,597.07
0.7	3	0.5	$9,517.22
0.8	4	0.7	$11,471.68

7. Consumo energético, ahorros y mitigación de gases de invernadero por áreas de colores de superficies de techos.

Para investigar el tipo de superficies de techos en México con el objetivo de calcular el potencial de penetración de los *cool roof*, se realizó un estudio usando imágenes de satélite y por medio de un sistema de información geográfica (Manifold GIS 8.0) se realizó el conteo de las superficies de techos por color en cinco ciudades de la República Mexicana: Acapulco, Ciudad de México, Guadalajara, Mérida y Monterrey.

7.1 Metodología

Para delimitar el área de estudio se genera un marco geográfico de referencia para comparar las ciudades entre sí. Se definie la extensión del área de estudio, que fue de aproximadamente 2,500 hectáreas en un polígono aproximado de 7.5 x 5 kilómetros. Dicho polígono se ubicó en el centro histórico de las ciudades por considerar el área urbana más consolidada y que mejor caracteriza a la localidad. Sin embargo, en el caso de Acapulco, debido a que su mancha urbana se extiende a lo largo de la bahía fue necesario adaptar el polígono a las áreas más densamente pobladas (ver Figura 7.1).

Figura 7.1. Áreas de estudio en (1) Acapulco, (2) Ciudad de México, (3) Guadalajara, (4) Mérida y (5) Monterrey.

Las 3,500 hectáreas del área de estudio por ciudad fueron distribuidas en un polígono de proporciones 1:1.5 (7.5 x 5 kilómetros aproximadamente), que corresponden a un mosaico de 16 imágenes obtenidas a una altura de la visual del navegador de 1.7 km (ver Figura 7.2). Las fotografías exportadas desde la versión Plus del *Google Earth* conservan las referencias geográficas, por lo cual las imágenes son importadas con la resolución y proyección de origen, cónica de Lambert, la cual fue transformada al sistema de coordenadas empleado para armar el SIG: WGS84, zona UTM 14 norte.

Para identificar y seleccionar los pixeles de los colores solicitados se definen los límites de cada color en el modelo de color RGB, en el cual se establece un valor de intensidad de los pixeles que fluctúa entre 0 (negro) y 255 (blanco) para cada uno de los colores que lo componen: rojo (R), verde (G) y azul (B). El rojo más brillante tiene los valores R: 255, G: 0, B: 0. Si los valores de los tres colores son idénticos se obtiene el gris. Cuando los tres colores tienen un valor de 255, el resultado es blanco puro y cuando el valor sea 0, el color será negro puro.

Figura 7.2. Ejemplo de mosaico fotográfico

Definido el modelo de color RGB, se utiliza el programa de SIG Manifold Systems 8.0 con la siguiente ventana de selección (Figura 7.3):

Figura 7.3. Representación del modelo de color RGB en Manifold Systems 8.0.

Para el color blanco se definie como valor mínimo de intensidad el R: 240, G:240, B: 240 y como límites de intensidad para el gris se considera como mínimo R: 240 G: 240 B: 240 y máximo R: 70 G: 70 B: 70. Para identificar las cubiertas de color rojo se seleccionan los pixeles cuyos valores se encontraron dentro de los vértices a) R: 255, G: 000, B: 070; b) R: 255, G: 070, B: 000; c) R: 170, G: 085, B: 085 de la zona representada en la figura 7.4.

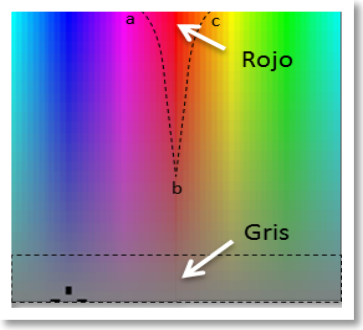


Figura 7.4. Zonas del modelo RGB seleccionadas para el color rojo y gris

Para conocer la superficie de los pixeles seleccionados, se procede a separar la imagen en capas por color. A cada capa le fueron eliminados los pixeles al interior de las calles y se dividen en 48 cuadrantes para facilitar su procesamiento (ver Figura 7.5).

Los pixeles depurados de las capas son sometidos a un proceso conocido como vectorización, mediante el cual el programa genera puntos, líneas y áreas transformando la información compuesta por pixeles, conocida como raster, en vectores que se pueden categorizar y medir.

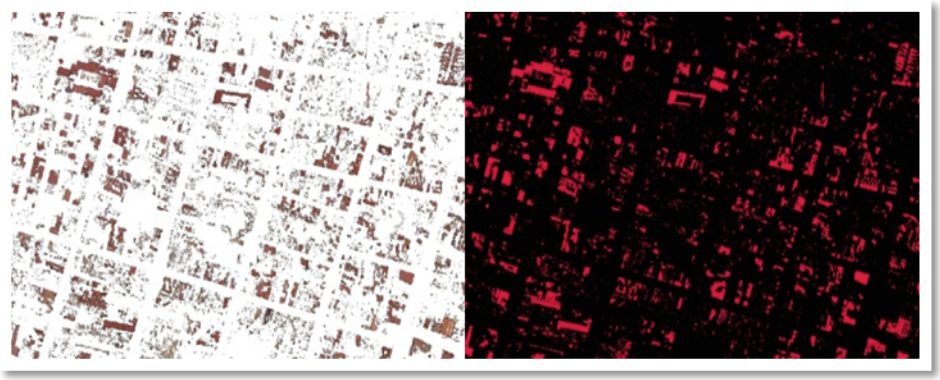


Figura 7.5. Obtención de áreas a partir de pixeles.

7.2 Áreas de las imágenes depuradas por color de las áreas de las ciudades

La Figura 7.6 presenta las imágenes GIS de las áreas depuradas por color blanco, gris y rojo para las ciudades de Acapulco, Ciudad de México, Guadalajara, Mérida y Monterrey. Se observa que la mayor distribución es de color gris en todas las ciudades. En la Tabla 7.1 se presentan estos resultados.

El área de estudio, o total, se compone, por un lado, por las calles, canales e infraestructura diversa que no presenta superficie de techos. Por el otro, las manzanas son las áreas que contienen las edificaciones cuyas superficies de techos se contabilizaron, desglosando el dato en techos rojos, grises y blancos. La categoría de "otros colores" se compone por cubiertas distintas y las frondas de los árboles

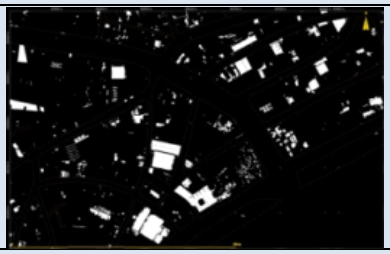
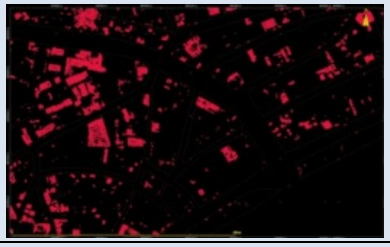
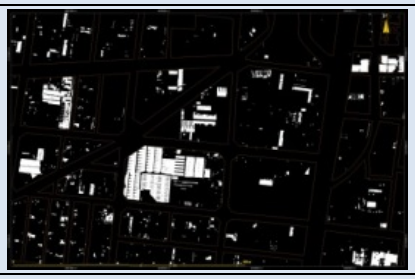
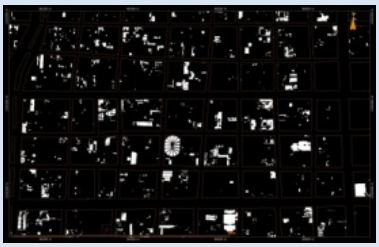
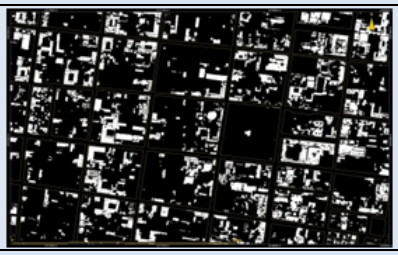
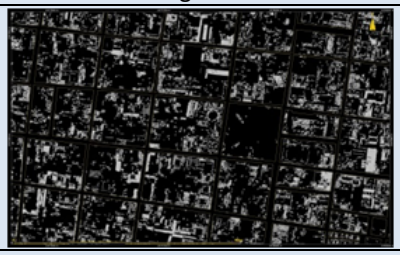
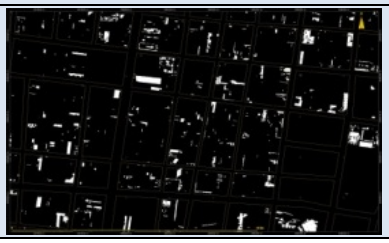
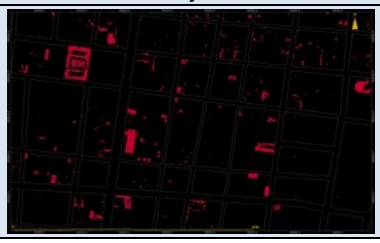
Acapulco blanco	gris	rojo
		
Mexico City blanco	gris	rojo
		
Guadalajara blanco	gris	rojo
		
Merida blanco	gris	rojo
		
Monterrey blanco	gris	rojo
		

Figura 7.6 Depuración de imágenes SIG por color.

.

Tabla 7.1 Áreas y porcentajes de áreas por ciudad de calles, manzanas y techos.

Concepto	Acapulco, Guerrero		Guadalajara, Jalisco		México D.F.		Mérida, Yucatán		Monterrey, Nuevo León	
Área de estudio por ciudad (m^2)	**36,724,610.56**	**100%**	**39,862,806.66**	**100%**	**39,882,162.81**	**100%**	**39,788,003.75**	**100%**	**38,811,950.69**	**100%**
• **Calles, canales, infraestructura**	5,594,854.15	**15%**	10,415,380.90	**26%**	11,512,747.65	**29%**	6,444,685.11	**16%**	8,864,807.68	**23%**
• **Manzanas**	31,129,756.41	**85%**	29,447,425.76	**74%**	28,369,415.16	**71%**	33,343,318.64	**84%**	29,947,143.01	**77%**
		100%		*100%*		*100%*		100%		100%
○ Techos Blancos	1,582,439.38	5%	2,331,319.11	8%	1,873,186.90	7%	3,730,136.76	11%	1,793,193.38	6%
○ Techos Grises	3,518,058.14	11%	7,030,545.86	24%	4,107,150.46	14%	5,528,183.60	17%	6,356,934.81	21%
○ Techos Rojos	1,311,907.16	4%	3,967,189.28	13%	4,120,271.16	15%	610,880.99	2%	845,153.76	3%
○ Otros colores	24,717,351.73	79%	16,118,371.51	55%	18,268,806.64	64%	23,474,117.29	70%	20,951,861.06	70%

Tomando en cuenta con la información del consumo energético simulado con el EnergyPlus de la edificación residencial y no residencial para las ciudades de Mérida, Monterrey y Cd. de México, considerando 10% de área de techos de edificaciones no-residenciales y 90% de área de techo de edificaciones residenciales. Con el área de techo de la edificación residencial de 53.71 m^2 y no-residencial de 669 m^2 se calcula el número de edificaciones residenciales por área y el consumo energético por techo de color blanco (ρ=0.7), gris (ρ=0.50) y rojo (ρ=0.3). La Tabla 7.2 presenta los resultados de las cargas de enfriamiento, ahorros de energía y la reducción de gases de invernadero por el efecto de cambiar los techos de grises (0.5) y rojos (0.3) a blancos (0.7); se encontró que los mayores ahorros fueron para Mérida y Monterrey, 63.7 y 65.2 GWh; en la Cd. de México se puede ahorrar 46.1 GWh, aun cuando el clima es templado subhúmedo.

También en la Tabla 7.2 se muestra un estimando de la reducción de gases de invernadero basado en las equivalencias de la EPA, 2012. La reducción de emisiones fue de 45, 46 y 32.6 kTons de CO_2 para las ciudades de Mérida, Monterrey y Cd. de México respectivamente. Se observa que si los techos de las edificaciones se substituyen por techos con reflectancias de 0.7 en las tres ciudades, se pueden tener ahorros por el consumo de energía de enfriamiento de 175 GWh en edificaciones residenciales y una mitigación de CO_2 de 123 kTons de CO_2.

La Tabla 7.3 presenta una extrapolación para estimar los ahorros de energía para cada ciudad por el cambio de techo gris y rojo. Aquí se supone que cada la ciudad cuenta con 90 % de edificaciones residenciales y 10% de edificaciones no-residenciales climatizadas por cambio de color rojo y gris de techo a techo con reflectancia de 0.7. También se estiman los ahorros de energía y mitigación de gases de CO_2.

La Cd. de Mérida tiene un área total de 421 km^2, el número de áreas de imágenes de GIS (39.8 km^2) es de 10.6 cuadros, cada cuadro genera un ahorro de 63.7 MWh, de tal manera que el ahorro total de la Cd. de Mérida sería de 673.8 GWh con mitigación de gases de invernadero de 475.7 kTons de CO_2. Similarmente para las otras

ciudades. Es de notar que debido a que Monterrey tiene menos techos blancos que Mérida los consumos son mayores, y por lo tanto, los ahorros son mayores, aunque el tamaño de la mancha urbana es más o menos similar.

Con respecto a la Cd. de México por tener una superficie urbana mayor, y por tanto, mayor superficie de techos, el ahorro es mayor que el de las ciudades de Mérida y Monterrey. Así mismo, la mitigación de gases de invernadero de CO_2 será mayor. El total de ahorro de energía de enfriamiento de las tres ciudades será de 3,325.5 GWh (3.3 TWh) con una mitigación de emisiones de gases de invernadero de 2,347 kTons de CO_2.