

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**“ESTUDIO COMPARATIVO DEL BALANCE RADIOMÉTRICO
EN TRES COMPLEJOS HABITACIONALES DE MEXICALI, B.C.,
MÉXICO”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA**

PRESENTA

GABRIELA PEÑUELAS GARCÍA

DIRECTOR

DR. NÉSTOR SANTILLÁN SOTO

CODIRECTOR

DR. ONOFRE RAFAEL GARCÍA CUETO

MEXICALI, B.C.

DICIEMBRE 2016

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación.....	3
1.2 Hipótesis.....	3
1.3 Objetivo general	3
1.4 Objetivos particulares.....	3
2. ANTECEDENTES	4
2.1 Balance radiativo.....	4
2.2 Balance de energía.....	7
2.3 Islas de calor urbano.....	9
2.4 Exploración de estrategias de mitigación del balance radiativo.....	12
3. MARCO CONCEPTUAL	17
3.1 Balance de radiación.....	18
3.1.1 Radiación solar.....	18
3.1.2 Emisión de radiación solar	18
3.1.3 Distancia entre el sol y la tierra.....	20
3.1.4 Altitud del sol.....	20
3.1.5 Longitud del día.....	20
3.1.6 Radiación terrestre.....	21
3.1.6 Absorción y dispersión de la radiación solar.....	21
3.1.7 Espectros de absorción y emisión de gases atmosféricos.....	22
3.2 Climatología urbana.....	22
3.2.1. Escalas.....	23
3.2.2. Modificación del clima urbano debido a la urbanización.....	24
3.2.3. Albedo.....	26
3.3. Desarrollo urbano de Mexicali.....	28
3.3.1. Clima.....	29
3.3.2. Uso de suelo.....	30
3.4. Coberturas de suelo y sus propiedades.....	31
3.4.1. Coberturas de suelo en Mexicali.....	33
3.5. Mitigación.....	35
4. METODOLOGÍA.....	39
4.1 Arreglo experimental.....	39

4.2 Primera Etapa: Campaña de Mediciones Radiométricas	40
4.2.1 Área de análisis y campo de visión del equipo radiométrico	41
4.3 Segunda etapa: Campaña de Mediciones Radiométricas	42
4.3.1 Área de análisis y campo de visión del equipo radiométrico.	44
4.4 Equipo utilizado.....	45
4.4.1 Datalogger CR3000.....	45
4.4.2 Radiómetro NR01.....	45
4.4.1 Cuantificación de materiales de cobertura.....	47
4.5 Prueba estadística de diferencia de medias.....	48
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	49
5.1 Primera campaña de mediciones. Sevilla y Toledo Residencial.....	49
5.1.1 Comparativo de la componente de radiación solar de onda corta que sale de la superficie ($K\uparrow$).....	51
5.1.2 Comparativo de la componente de radiación infrarroja de onda larga que sale de la superficie ($L\uparrow$)....	52
5.1.3 Comparativo de Q^* neta, energía disponible como resultado del balance radiativo.	54
5.1.4 Comparativo del albedo entre Sevilla y Toledo.	56
5.1.5. Análisis comparativo de resultados de componentes de balance radiativo entre fraccionamiento Sevilla vs fraccionamiento Toledo	56
5.2 Segunda Campaña de mediciones. Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza.	58
5.2.1 Comparativo de la componente de radiación solar de onda corta que sale de la superficie ($K\uparrow$).....	60
5.2.2 Comparativo de la componente radiación infrarroja de onda larga que sale de la superficie ($L\uparrow$).....	61
5.2.3 Comparativo de Q^* neta, energía disponible como resultado del balance radiativo.	63
5.2.4 Comparativo de albedo entre Conjunto Urbano Esperanza y Sevilla.....	65
5.3. Cuantificación de materiales de cobertura.....	68
5.4 Prueba de diferencia de medias.	69
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
6.1 Conclusiones.	71
6.2 Recomendaciones.	72
7. REFERENCIAS.	73
ANEXOS	90
ANEXO 1. Registro de recorrido por calle Toledo lado norte.	90
ANEXO 2. Registro de recorrido por calle Toledo lado sur.	91
ANEXO 3. Registro de recorrido por calle Pamplona lado norte.	92
ANEXO 4. Registro de recorrido por calle Pamplona lado sur.....	93
ANEXO 5. Registro de recorrido por calle Gerona lado norte.....	94
ANEXO 6. Registro de recorrido por calle Gerona lado sur.....	95

ANEXO 7. Registro de recorrido por calle Cáceres lado norte.....	96
ANEXO 8. Registro de recorrido por calle Cáceres lado sur.....	97
ANEXO 9. Registro de recorrido por calle Burgos lado norte.....	98
ANEXO 10. Registro de recorrido por calle Burgos lado sur.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Balance radiativo	4
Figura 2.2 Balance energético de la atmósfera baja	7
Figura 2.3 Islas de calor urbanas	9
Figura 2.4 Exploración de antecedentes sobre estrategias de mitigación	12
Figura 3.1 Espectro electromagnético solar en el tope de la atmósfera	19
Figura 3.2 Absorción de radiación solar por la atmósfera y por la superficie terrestre	21
Figura 3.3 Estructuras de capa límite en una zona urbana	24
Figura 3.4 Distintos albedos en el medio urbano	26
Figura 3.5 Principios básicos de los materiales fríos	36
Figura 4.1 Ubicación de las áreas de estudio: Sevilla Residencial, Toledo Residencial y Conjunto Urbano Esperanza.....	39
Figura 4.2 Ubicación del equipo en Sevilla y Toledo Residencial	40
Figura 4.3 Ubicación de los dos complejos habitacionales: Sevilla y Toledo Residencial	40
Figura 4.4 Área de análisis en Sevilla y Toledo Residencial	41
Figura 4.5 Ubicación de equipo en Sevilla Residencial y en Conjunto Urbano Esperanza	43
Figura 4.6 Ubicación de los dos complejos habitacionales: Sevilla Residencial y Conjunto Urbano Esperanza	43
Figura 4.7 Área de análisis en Sevilla Residencial y Conjuntno Urbano Esperanza	44
Figura 4.8 Datalogger CR3000, Campbell Scientific	45
Figura 4.9 Radiómetro NR01, Campbell Scientific	45
Figura 4.10 Componentes del radiómetro NR01	46
Figura 4.11 Planos de fraccionamientos Sevilla y Toledo Residencial	47
Figura 5.1 Comportamiento de las 4 componentes del balance radiativo en Sevilla Residencial en un periodo de 20 días	49
Figura 5.2 Comportamiento de las 4 componentes del balance radiativo en Toledo Residencial en un periodo de 20 días	49
Figura 5.3 Comparativo de la componente $K\uparrow$ = Radiación solar de onda corta que sale de la Superficie, entre Sevilla y Toledo Residencial en un periodo de 20 días	51
Figura 5.4 Comparativo de la componente $K\uparrow$ = Radiación solar de onda corta que sale de la Superficie, entre Sevilla y Toledo Residencial	51
Figura 5.5 Comparativo de la componente $L\uparrow$ = Radiación infrarroja de onda larga que sale de la Superficie, entre Sevilla y Toledo Residencial en un periodo de 20 días.....	52
Figura 5.6 Comparativo de la componente $L\uparrow$ = Radiación infrarroja de onda larga que sale de la Superficie, entre Sevilla y Toledo Residencial	52
Figura 5.7 Comparativo de la componente $L\uparrow$ = Radiación infrarroja de onda larga que sale de la Superficie, durante el periodo diurno entre Sevilla y Toledo Residencial	53
Figura 5.8 Comparativo de la componente $L\uparrow$ = Radiación infrarroja de onda larga que sale de la	

Superficie, durante el periodo nocturno entre Sevilla y Toledo Residencial	53
Figura 5.9 Comparativo de Q^*_{neta} = Energía disponible como resultado del balance radiativo entre Sevilla y Toledo Residencial en un periodo de 20 días	54
Figura 5.10 Comparativo de Q^*_{neta} = Energía disponible como resultado del balance radiativo entre Sevilla y Toledo Residencial	54
Figura 5.11 Comparativo de Q^*_{neta} = Energía disponible como resultado del balance radiativo Para el periodo diurno, entre Sevilla y Toledo Residencial	55
Figura 5.12 Comparativo de Q^*_{neta} = Energía disponible como resultado del balance radiativo Para el periodo nocturno, entre Sevilla y Toledo Residencial	55
Figura 5.13 Comparativo de albedo, entre Sevilla y Toledo Residencial	56
Figura 5.14 Comportamiento de las 4 componentes del balance radiativo en Sevilla Residencial en un periodo de 26 días	58
Figura 5.15 Comportamiento de las 4 componentes del balance radiativo en Conjunto Urbano Esperanza en un periodo de 26 días	58
Figura 5.16 Comparativo de la componente K_{\uparrow} = Radiación solar de onda corta que sale de la superficie, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza en un periodo de 26 días	60
Figura 5.17 Comparativo de la componente K_{\uparrow} = Radiación solar de onda corta que sale de la superficie, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza	60
Figura 5.18 Comparativo de la componente L_{\uparrow} = Radiación solar infrarroja de onda larga que sale de la superficie, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza en un periodo de 26 días	61
Figura 5.19 Comparativo de la componente L_{\uparrow} = Radiación solar infrarroja de onda larga que sale de la superficie, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza	61
Figura 5.20 Comparativo de la componente L_{\uparrow} = Radiación solar infrarroja de onda larga que sale de la superficie durante el periodo diurno, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza	62
Figura 5.21 Comparativo de la componente L_{\uparrow} = Radiación solar infrarroja de onda larga que sale de la superficie durante el periodo nocturno, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza	62
Figura 5.22 Comparativo de Q^*_{neta} = Energía disponible como resultado del balance radiativo, entre Sevilla Residencial y Conjunto Urbano Esperanza en un periodo de 26 días	63
Figura 5.23 Comparativo de Q^*_{neta} = Energía disponible como resultado del balance radiativo, entre Sevilla Residencial y Conjunto Urbano Esperanza	63
Figura 5.24 Comparativo de Q^*_{neta} = Energía disponible como resultado del balance radiativo, para el periodo diurno, entre Sevilla Residencial y Conjunto Urbano Esperanza	64
Figura 5.25 Comparativo de Q^*_{neta} = Energía disponible como resultado del balance radiativo, para el periodo nocturno, entre Sevilla Residencial y Conjunto Urbano Esperanza	64
Figura 5.26 Comparativo de albedo, entre Sevilla Residencial y Conjunto Urbano Esperanza	65
Figura 5.27 Cuantificación de materiales de cobertura en los fraccionamientos Sevilla y Toledo Residencial y en l Colonia Conjunto Urbano Esperanza	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Propiedades radiativas de materiales naturales	32
Tabla 3.2 Propiedades térmicas de los materiales utilizado en la construcción urbana	33
Tabla 4.1 Resultados del cálculo del campo de visión del sensor NR01 para los fraccionamientos Sevilla y Toledo Residencial.....	42
Tabla 4.2 Resultados del cálculo del campo de visión del sensor NR01 para el fraccionamiento Sevilla y colonia Conjunto Urbano Esperanza.....	44
Tabla 5.1 Promedios de las componentes del balance radiativo para los fraccionamientos Sevilla y Toledo residencial.....	50
Tabla 5.2 Tabla comparativa de $L\uparrow$ entre Sevilla y Toledo durante los periodos diurno y nocturno.....	53
Tabla 5.3 Tabla comparativa de Q^* entre Sevilla y Toledo durante los periodos diurno y nocturno.....	55
Tabla 5.4 Tabla comparativa de albedo entre Sevilla y Toledo.....	56
Tabla 5.5 Comparación de los resultados de las componentes entre Sevilla y Toledo Residencial.....	57
Tabla 5.6 Porcentajes de techos blancos y pavimentos en Sevilla y Toledo Residencial.....	57
Tabla 5.7 Promedios de las componentes del balance radiativo para el fraccionamiento Sevilla y para Conjunto Urbano Esperanza.....	59
Tabla 5.8 Tabla comparativa de $L\uparrow$ entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza durante los periodos diurno y nocturno.....	62
Tabla 5.9 Tabla comparativa de Q^* entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza durante los periodos diurno y nocturno.....	64
Tabla 5.10 Tabla comparativa de albedo entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza.....	65
Tabla 5.11 Comparación de los resultados de las componentes entre Sevilla Residencial y Conjunto Urbano Esperanza.....	67
Tabla 5.12 Comparación de porcentajes de materiales de cobertura en Sevilla Residencial y Conjunto Urbano Esperanza	67
Tabla 5.13 Resultados del análisis de diferencia de medias para ambas campañas.....	69
Tabla 5.14 Resultados del análisis de diferencia de medias para ambas campañas para el periodo nocturno.....	70

RESUMEN

La creciente urbanización tiene un impacto térmico en las ciudades. La baja reflectividad de las superficies urbanas combinada con una alta densidad de construcción, resulta en una acumulación de calor en el ambiente urbano. En el proceso de urbanización, los cambios de cobertura de la tierra y las superficies naturales se sustituyen por el tejido urbano que se caracteriza por temperaturas más altas que el entorno rural circundante, patrón descrito como calentamiento urbano. Como consecuencia, las altas temperaturas en las zonas urbanas afectan a la salud, al consumo energético, la economía, las actividades cotidianas y el bienestar de los habitantes.

El objetivo de este estudio fue medir, analizar y discutir el balance radiativo en tres complejos habitacionales en la ciudad de Mexicali, B.C., conformados con diferentes materiales de cobertura de suelo. Para ello se realizaron dos campañas de mediciones radiométricas de manera simultánea, aproximadamente de un mes cada una: octubre del 2014 y marzo-abril de 2015. También, se realizó una cuantificación de materiales en las zonas de estudio ya que se ha documentado en investigaciones anteriores que las diferentes proporciones impactan al microclima local.

Se llevaron a cabo balances radiativos en la capa de dosel urbano, que es la capa de aire existente por debajo de la capa límite urbana, extendiéndose desde el nivel del suelo hasta la altura promedio de los techos de las construcciones.

En los fraccionamientos Sevilla y Toledo Residencial, donde se llevó a cabo la primera campaña en 2014, se observó que el fraccionamiento Sevilla presenta en promedio una radiación solar de onda corta que sale de la superficie ($K\uparrow$) de 141.77 W/m^2 y radiación neta (Q^*) de 376.17 W/m^2 siendo mayores que en el fraccionamiento Toledo en el cual se encontró un promedio de $K\uparrow=136.26 \text{ W/m}^2$ y $Q^*=368.42 \text{ W/m}^2$, por otra parte se encontró en promedio una radiación solar de onda larga que sale de la superficie ($L\uparrow$) de 513.56 W/m^2 para el fraccionamiento Sevilla, siendo mayor en el fraccionamiento Toledo con $L\uparrow=519.42 \text{ W/m}^2$.

Para la segunda campaña en 2015, que se situó en el fraccionamiento Sevilla y colonia Conjunto Urbano Esperanza, se observa para el fraccionamiento Sevilla que $K\uparrow=166.47 \text{ W/m}^2$, $Q^*=519.11 \text{ W/m}^2$ y $L\uparrow=521.46 \text{ W/m}^2$, siendo menor $K\uparrow=150.20 \text{ W/m}^2$ en la colonia Conjunto Urbano Esperanza de igual manera la componente $L\uparrow$ con 509.41 W/m^2 y por otro lado la componente Q^* es mayor en colonia Conjunto Urbano Esperanza con 551.97 W/m^2 . De los resultados se concluye

que el fraccionamiento Sevilla presenta un esquema de construcción homogéneo en el que la afectación al balance radiativo es menor respecto a los otros sitios de experimentación. Se discuten además la influencia térmica de los diferentes materiales de cobertura horizontal y sus porcentajes respecto al comportamiento del balance radiativo, donde se encontró mayor presencia de pavimento en el fraccionamiento Toledo con 34.83% que en fraccionamiento Sevilla y CUE (Conjunto Urbano Esperanza) con 24.67% y 16.67% respectivamente. Por otra parte, se encontró que el fraccionamiento Sevilla cuenta con más área de construcción y techos claros con 33.16% y 32.75%, en contraste con el fraccionamiento Toledo que presenta 31.67% de área construída y un 21.23% para CUE, para los techos claros, el fraccionamiento Toledo solo abarca un 25.24% y CUE 14.20%. Estos porcentajes son tomando en cuenta el área de visión del sensor que se describe en el capítulo 4 de metodología. Finalmente, se mencionan algunas estrategias de mitigación del balance radiativo, entre las que destacan: pintar las azoteas de color blanco e integración de espacios verdes, es decir, colocar vegetación en los espacios no urbanizados de la ciudad. Estas estrategias están enfocadas a la optimización de materiales que se utilizan para la cobertura de suelo producto de la urbanización, como son, concreto, madera, pavimentos, lámina, pintura, teja, entre otros.

1. INTRODUCCIÓN

La rápida urbanización es un excelente ejemplo de un fenómeno inducido por el hombre que puede tener importantes impactos sobre las personas, el medio ambiente y los recursos regionales. A medida que crecen las ciudades, la expansión crea desafíos únicos relacionados con la planificación del uso del suelo, la estructura ecológica y la contaminación, la biodiversidad, el agua, los flujos de nutrientes y energía dentro de las ciudades y sus alrededores (Hualou Long et al., 2014). Por lo tanto, el cambio de uso del suelo y de cubierta vegetal en los alrededores de las principales áreas metropolitanas, se reconoce como un factor importante que conduce a climas urbanos distintos. Los efectos del clima urbano se deben a diferencias en el intercambio de calor, la masa y momentum entre la ciudad y su paisaje preexistente. Así que, la comprensión, la predicción y mitigación del clima urbano son efectos que están estrechamente ligados al conocimiento de superficie-atmósfera e interacciones en entornos urbanos (Grimmond et al. 2004a).

En el caso de las superficies que cubren a la ciudad de Mexicali, éstas han cambiado totalmente en los últimos años, pasando de una cobertura natural de suelo de características semi-desérticas a un uso de suelo urbano heterogéneo debido a las actividades productivas y de asentamientos humanos, que conlleva un desarrollo urbano. Se aprecia que la cobertura natural de suelo se ha ido reemplazando por materiales como: asfalto, concretos, edificaciones con materiales múltiples, áreas deportivas, jardines, etc., por lo que ahora se tiene un clima urbano el cual ha impactado directamente a sus habitantes. Esta afectación a los pobladores puede derivarse de acuerdo a lo que comenta Zhou W. et al. (2011) y es que los cambios en el uso del suelo/cubierta de tierra causados por la urbanización suelen afectar en gran medida la estructura y función de los ecosistemas.

Dentro del cambio que sufren los entornos se encuentra el término Isla de Calor Urbana (ICU) se refiere a un área urbana con temperaturas que se elevan en relación con su entorno de menor desarrollo. La ICU incluye el cambio de la cubierta de nubes, los patrones de precipitación, velocidad del viento, la radiación solar, y el aumento de las temperaturas del aire (Oke et al., 1991; Santamouris, 2001). Si bien los mecanismos físicos que causan la ICU están bien documentados (Oke, 1987), siguen siendo el fenómeno más estudiado en climatología urbana (Johnson et al., 1991; Oke, 1973; Stewart, 2011).

Considerando que este fenómeno surge por la afectación del balance radiativo (ICU) debido a la urbanización en las ciudades, en esta investigación se considerarán materiales como asfalto, concreto, suelo desnudo, césped, lámina, pinturas, teja, cartón arenado, etc. Estas nuevas superficies van modificando la mancha urbana, modificando así el medio ambiente, contribuyendo al aumento de las temperaturas mínimas en los últimos 30 años en la ciudad de Mexicali, B.C. (García-Cueto et. al., 2009b).

Es importante entender como el clima de una ciudad semi-desértica mexicana, en este caso Mexicali, ubicada en el noroeste del país, se ha modificado por el desarrollo urbano acelerado que ha tenido, particularmente en lo que se refiere a la relación con la dinámica de cambio en el uso del suelo.

Para conocer las modificaciones a dicho balance, se realizó este estudio en el que se instalaron estaciones radiométricas para medir las componentes radiativas. Se plantea tomar en cuenta el efecto de los materiales mencionados en el balance radiativo considerando como variables de análisis la radiación neta y las cuatro componentes del balance radiativo.

Los estudios que se han realizado en la región han sido pocos (Villanueva et. al., 2012, García-Cueto et al., 2013), es por esto que esta investigación aborda esta problemática climática urbana con el fin de que, a partir del conocimiento generado, los estrategias de desarrollo urbano planeen la expansión de la ciudad en términos de sustentabilidad ambiental, es decir, utilizando materiales que bioclimáticamente no degraden al medio circundante.

Este estudio, del cual no se tiene precedente en la región proporcionará información esencial para el balance radiativo en tres zonas de la ciudad de Mexicali, B.C., y las propuestas de algunas medidas estratégicas para mitigar el efecto negativo hacia el medio ambiente.

1.1 Justificación.

Es necesario realizar un estudio de esta magnitud ya que permitirá fortalecer la planeación del crecimiento de la ciudad, mediante una metodología que utiliza una escala reducida de análisis que permite conocer más a fondo el comportamiento de los materiales de coberturas y su interacción con la baja atmósfera. Esto aportará información sobre el impacto al clima urbano a causa de los diferentes materiales de cobertura de suelo producto de la urbanización.

En la ciudad de Mexicali son pocos los estudios que se han realizado (Haro, 2014; Villanueva et. al., 2012) que proporcionen información acerca de cómo los materiales que comúnmente se utilizan para urbanizar la ciudad (block, asfalto, lámina, teja, madera, etc.) causa un impacto negativo al microclima de la ciudad.

Este estudio aportará información importante, que permitirá conocer como la creciente urbanización ha modificado en forma negativa el balance radiativo y realizar propuestas de mitigación de carácter preventivo y correctivo que contribuyan a la mejora de la problemática.

1.2 Hipótesis

El balance radiativo se ha modificado por causa de la urbanización creciente en la ciudad de Mexicali, B.C.

1.3 Objetivo general

Cuantificar el balance radiativo en complejos habitacionales en la ciudad de Mexicali, B.C.

1.4 Objetivos particulares

- 1.- Realizar mediciones de las componentes de radiación solar (onda corta) y terrestre (onda larga) en complejos habitacionales de Mexicali, B.C.
- 2.- Analizar el comportamiento del balance radiativo durante las campañas de mediciones.
- 3.- Determinar los materiales de cobertura en las zonas de estudio.
- 4.- Comparar las proporciones de cobertura de suelo de cada una de las zonas de estudio a los resultados del balance.
- 5.- Análisis preliminar de propuestas de mitigación mediante la optimización de uso en los materiales para cubrimiento de suelo basándose en los resultados obtenidos.

2. ANTECEDENTES

2.1 Balance radiativo.

El estudio del balance radiativo en la superficie de la tierra es de primordial importancia para muchas disciplinas como: ciencias de la atmósfera, hidrología, meteorología agrícola, y la climatología (O.O. Jegede, 1997).

El sol es la fuente primaria del forzamiento para los procesos atmosféricos. Una proporción significativa de la radiación solar entrante no llega a la superficie ya que pasa a través de la atmósfera, por procesos tales como: dispersión y absorción por las nubes (Figura2.1). (Iqbal, 1983; Kyle, 1991).

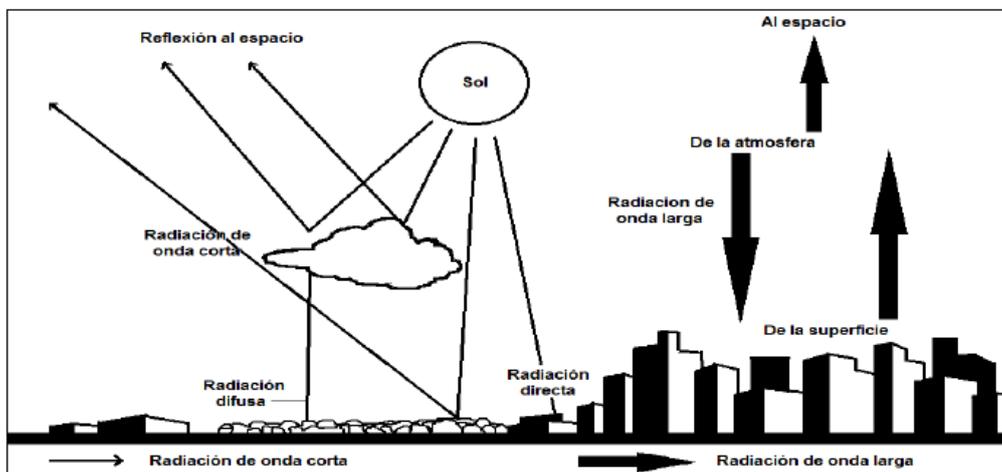


Figura 2.1. Balance radiativo. (Casillas, 2013)

Una porción de la radiación solar llega directamente al suelo y dependiendo de la naturaleza de la superficie (albedo) se refleja en parte y el resto es absorbida por la misma superficie. La tierra a su vez la transforma en energía térmica, y la emite como radiación infrarroja (entre 3 y 100 μm del espectro electromagnético) (radiación de onda larga) (O.O. Jegede, 1997, Ramanathan et al. 1989, Harrison et al. 1998).

Componentes atmosféricos como el vapor de agua y nubes absorben esa energía infrarroja y reemiten la misma hacia la parte baja de superficie, nuevamente en forma de radiación de onda larga.

La radiación neta representa la suma aritmética de los flujos de radiación solar de onda corta entrante y saliente, y radiación infrarroja de onda larga entrante y saliente (Nielsen, et al. 1981, O.O. Jegede, 1997). En general, la radiación neta en la superficie puede ser representada por la ecuación 1

$$Q^* = K\downarrow - K\uparrow + L\downarrow - L\uparrow \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$K\downarrow$, es la radiación solar de onda corta entrante,

$K\uparrow$ es la radiación solar de onda corta saliente (reflejada),

$L\downarrow$ es la radiación infrarroja de onda larga entrante de la atmósfera, y

$L\uparrow$, es la radiación infrarroja de onda larga (terrestre) saliente.

De la radiación entrante de onda larga, $L\downarrow$ depende principalmente de la falta de homogeneidad de temperatura en la capa límite debido a las altas concentraciones de vapor de agua y dióxido de carbono, que son fuertes emisores de radiación infrarroja (térmica) (Viudez -Mora, 2011).

Ambos componentes de la radiación de onda larga, $L\uparrow$ y $L\downarrow$, son casi de la misma magnitud; por lo tanto, los valores de balance de radiación de onda larga en la superficie son generalmente pequeños (Smith y Rutan, 2003).

Por otra parte, la radiación neta (Q^*) es la energía disponible en la superficie de la tierra en cualquier instante (Monteith and Unsworth, 1990).

Por las noches este resultado es negativo ya que las superficies irradian hacia la atmósfera la energía absorbida durante el día. Son los materiales los que almacenarán o reflejarán los rayos del sol, y según sea el tipo, contribuirán a la alteración de la temperatura en la capa límite superficial.

Específicamente, el conocimiento de la radiación neta proporciona información importante de su contribución a la energía disponible en la superficie.. Su importancia se debe a que es la energía disponible en la superficie de la tierra que conduce los procesos de evaporación, el aire y el calentamiento del suelo, así como otros procesos consumidores de energía más pequeños, como la fotosíntesis (Muritala, 2014, O.O. Jegede, 1997).

Al igual que la radiación neta, los elementos de balance radiativo ($L\uparrow, L\downarrow, K\uparrow, K\downarrow$) de la atmósfera, y la superficie subyacente juegan un papel importante en el tiempo y formación del clima local. Las nubes generalmente reducen la emisión de radiación de onda larga al espacio y por lo tanto resulta en calentamiento del planeta, mientras que al mismo tiempo las nubes reducen la radiación solar absorbida, a causa de un albedo generalmente más alto que el subyacente de la superficie, y, por lo tanto, se produce el enfriamiento del planeta (O.O. Jegede et al., 2006, Arnfield, 1975).

Una contribución significativa al estudio de estas características, relacionado con el balance de calor de la superficie de la tierra, fue hecho por Budyko (1969), donde describió los modelos climáticos de balance.

En años recientes se han realizado diversos estudios en el tema de balance radiativo. En la ciudad de Basilea en Suiza, por ejemplo, a partir de una red de medición en siete sitios se indica que, a causa del aumento de los espacios verdes, los flujos de calor latente se convirtieron en los más dominantes, mientras que el almacenamiento de calor sensible disminuyó. Además, la división del flujo de calor almacenado durante el día mostró variaciones entre los sitios, con flujos de calor liberados durante la noche en los densos sitios urbanos. La cantidad de energía que se almacena es variada durante el día, particularmente en los sitios urbanos. En este estudio, se analizaron las cuatro componentes del balance radiativo (Christen y Voogt, 2004).

Grimmond et al. (1996) también encontró que una cubierta vegetal superior acrecentó el flujo de calor latente, mientras que la partición de la energía en flujo de calor sensible disminuyó. Sin embargo, el flujo de calor almacenado, y la magnitud absoluta de flujos aumentaron como resultado del incremento de la radiación neta, resultando ligeramente mayores las temperaturas por encima del dosel.

En los estudios realizados se tuvieron problemas logísticos y metodológicos, debido a las pocas campañas de balance radiométrico dirigidas en centros urbanos densos. En los últimos años, se ha hecho un esfuerzo mayor para investigar el intercambio de energía en ciudades mediante diferentes campañas (Oke et al, 1999; Feigenwinter et al., 1999; Kanda et al, 2002).

Con respecto a la ciudad de Mexicali, se llevó a cabo un estudio sobre balance radiativo donde se cuantificó ese balance en diferentes coberturas horizontales para varios días del mes

de agosto de 2011. Las superficies en las que se realizó el experimento fueron asfalto, concreto, poliestireno con pintura elastomérica blanca (PPEB), arcilla y césped. Se encontró que, para un ciclo de 24 horas de medición, el mayor valor promedio de radiación neta fue para el asfalto, y el menor valor promedio para el PPEB. A partir de las mediciones se propusieron modelos estadísticos de la radiación neta en función de la radiación solar entrante y la radiación neta de onda corta (García-Cueto et al., 2013).

2.2 Balance de energía

El primer estudio de balance de energía en México fue realizado por Oke (et al. 1992), en una zona residencial / comercial / industrial mixta en el distrito de Tacubaya de la Ciudad de México.

Los resultados mostraron una considerable similitud con las de las zonas residenciales en ciudades con climas templados, incluyendo la razón de Bowen ($\beta = Q_H / Q_E$). Una debilidad subyacente en el estudio Tacubaya fue el hecho de que sólo la radiación neta (Q^*) y el flujo de calor turbulento y el calor sensible (Q_H) se midieron directamente, dejando el flujo de calor latente (Q_E) como el residual en el balance energético.

A continuación se muestra la ecuación del balance de energía:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde Q^* es la radiación neta, Q_F es el flujo de calor antropogénico, Q_H es el calor sensible, Q_E es el calor latente, ΔQ_S es el flujo de calor de almacenamiento y ΔQ_A es el flujo de calor advectivo.

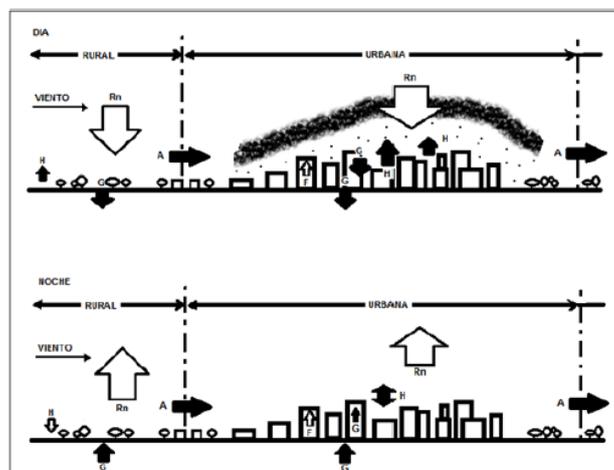


Figura 2.2 Balance energético de la atmósfera baja (Chandler, 1976).

El balance de energía (Ecuación 2) es influenciado por el aumento de área superficial y la rugosidad de la forma urbana: el tamaño, la forma y la densidad de edificios y carreteras, la geometría del cañón urbano, el factor de vista del cielo, la distribución de los espacios verdes, el calor antropogénico y la contaminación del aire (figura 2.2) (Christen and Vogt, 2004; Harman and Belcher, 2006; Stone and Norman, 2006; Hart and Sailor, 2009).

Por lo que se han realizado investigaciones de intercambio de energía de la superficie y la atmósfera, donde las variaciones de microescala en la estructura del dosel son pequeñas en comparación con el área de la fuente que contribuye a flujos de energía medidos (Anthoni et al., 2000).

Diferencias sustanciales en el balance de energía superficial entre los paisajes urbanos y rurales han sido bien documentadas, de cómo superficies rurales con vegetación son sustituidos por hormigón, asfalto, y otras superficies impermeables (Cleugh y Oke 1986). En un estudio realizado en Vancouver, Columbia Británica, Canadá, se investigó el temporal de variabilidad de flujo y se encontró que la partición de la energía en escalas espaciales varía en cientos de metros debido a la heterogeneidad de la superficie urbana (Schmid et al., 1991).

Otros estudios se han realizado en zonas urbanas en las últimas décadas, los cuales investigan el balance energético de superficie, sobre todo en los suburbios, aunque pocos han empleado el uso de sitios múltiples, sobre todo dentro de una sola ciudad. Las comparaciones entre los tipos de uso del suelo urbano (residencial, comercial, industrial) a menudo, muestran grandes diferencias en el flujo de partición (Oke et al 1999; Grimmond y Oke 1999).

En la década de 1990, los estudios experimentales a gran escala aumentaron significativamente en el conocimiento en este campo (Arnfield, 2003). La mayoría éstos, investigaron el equilibrio de energía en áreas residenciales suburbanas, debido a que cubren extensiones más grandes que las ciudades de hoy en día. Una impresionante serie de experimentos realizados al comienzo esta década, se realizó sobre superficies suburbanas norteamericanas, que produjo que se introdujeran diversas características específicas de partición de energía superficial urbana (Grimmond y Oke, 1995, 1999, 2002).

Además, se llevó a cabo un estudio en el área urbana de Phoenix, Arizona y Portland, Oregón, ciudades con climas distintos, pero ambas con veranos cálidos y secos. Se analizaron

las contribuciones relativas del clima local y las variaciones de cobertura del suelo en el balance de energía en el medio urbano. La radiación neta, los flujos de calor sensible y latente, así como almacenamiento de calor se investigaron durante un mes en época de verano en las dos ciudades (Middel et al. 2012).

La ejecución de las investigaciones mencionadas anteriormente, han indicado que el almacenamiento de calor es más significativo para el balance energético de las zonas urbanas que de otros tipos de suelo, como el suelo desnudo o paisajes agrícolas; y que este flujo determina la importancia de las características distintivas de los climas urbanos (Grimmond y Oke, 1999, Wilson et al., 2002).

2.3 Islas de calor urbano

En esta sección se hace mención de la Isla de Calor Urbano (ICU) ya que la afectación del balance radiativo debido a la urbanización, da lugar a dicho fenómeno.

La isla de calor urbana describe la diferencia de temperatura ambiente del aire entre la zona urbana y la zona rural, que está directamente relacionada con la cobertura del suelo y el uso de energía humana (Oke, 1995). Estas diferencias se deben a las modificaciones de la superficie provocadas por la urbanización que, por lo general, incluye la sustitución de los suelos y la vegetación con superficies impermeables como el concreto y el asfalto, y con estructuras urbanas tales como edificios de varias alturas y densidades (figura 2.3) (Akbari et al., 2001; Voogt y Oke, 2003).

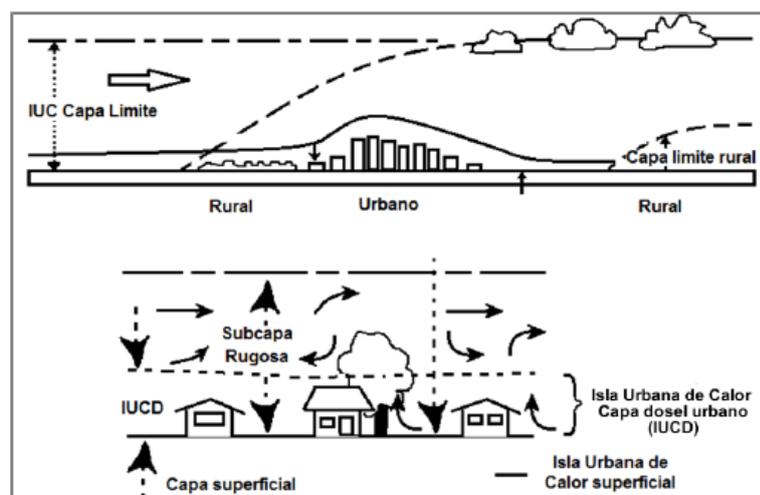


Figura 2.3 Islas de Calor Urbanas (Oke, 1982)

Estas modificaciones cambian las características del albedo, la capacidad térmica y conductividad del calor sobre las zonas urbanas, que, a su vez, encaminan a un clima térmico modificado que es más caliente que el que rodea a las zonas no urbanas (Voogt y Oke, 2003).

Oke (1982) sugirió dos principales causas para la existencia de la ICU: controles de superficie y controles atmosféricos. Los controles de superficie primarias son la geometría de la superficie, como el factor de vista de cielo, y las propiedades térmicas de las superficies, especialmente admisión térmica, mientras que los controles atmosféricos primarios son el viento y las nubes. Se observan las ICUs más fuertes ocurren cuando en la zona predominan cielos despejados y los vientos están en calma.

El calor antropogénico ha sido identificado por Oke (1982) para contribuir a la modificación del clima urbano a escala dosel, la escala local (barrio) y la mesoescala (escala de aglomeración). Se ha demostrado que tomarlo en cuenta en las simulaciones numéricas atmosféricas, podría resultar en un aumento de temperatura en unos pocos grados en ciertas condiciones (Kimura y Takahashi, 1991; Ichinose et al., 1999; Kikegawa et al., 2006).

La isla de calor, como se ha mencionado en párrafos anteriores, se presenta en situaciones de aire en calma y cielos despejados, condiciones que en las ciudades mexicanas se producen generalmente durante las madrugadas de la época invernal. Su intensidad es mayor en el área urbana y la población que contiene (Jáuregui, 2004).

Los factores que influyen en la ICU incluyen (pero no se limita a) una reducción de la evaporación y la evapotranspiración debido a las superficies pavimentadas y vegetación reducida, menor albedo (reflectividad), calentamiento de las superficies urbanas; la generación de calor de la infraestructura local (por ejemplo, zonas industriales, comerciales y edificios residenciales, y los vehículos), y el exceso de calor atrapado por la contaminación urbana, en especial los aerosoles (Oke, 1978).

Una combinación de estos factores altera el intercambio de radiación solar entrante y saliente, por lo tanto, afecta al balance radiativo e influye en un aumento de las temperaturas locales. Este equilibrio comienza con energía radiante solar que entra en la superficie y que se distribuye para ser almacenada y a su vez, dar lugar a la evapotranspiración. En entornos urbanos típicos, más energía entra para calentar la superficie y menos en la evaporación,

aumentando así el almacenamiento de calor y temperatura de la superficie. Por otra parte, los edificios altos crean una geometría compleja que atrapa la energía y altera el flujo de aire, aumentando la cantidad de energía disponible para calentar la superficie urbana. El almacenamiento de calor y la superficie de calentamiento en las zonas rurales, se ha mitigado por el efecto de enfriamiento de mayor cobertura de área de espacios verdes y por lo general una mayor abundancia de superficies de agua (Benita et al., 2015).

Hay una serie de estudios previos sobre el efecto de la ICU alrededor del mundo, los cuales se remontan a la investigación de Luke Howard en Londres a principios de 1800, el término ICU apareció por primera vez en la literatura meteorológica en la década de 1940 (Stewart y Oke, 2012).

Por otro lado, se llevó a cabo un estudio empírico sobre los patrones de isla de calor urbano en horario de verano en tres residenciales de gran altura en Shanghai, China (Yang et al., 2010). Se encontró que las características del sitio, la densidad y el verdor, tenían diferentes impactos en ICU (de día y de noche). Los factores durante el día están estrechamente relacionados con los factores de sombreado del sitio.

En cuanto a la ciudad de Mexicali, se realizó un estudio (Casillas, 2009) en el que se localizaron dos islas de calor urbano, al oriente y poniente de la ciudad de 10°C y 12°C de diferencia respecto al área rural, respectivamente.

Además, se llevó a cabo otro estudio donde se localizó la isla urbana de calor mediante modelado dinámico donde se analizaron diferencias térmicas horarias entre temperaturas urbanas y suburbanas de cuatro estaciones climatológicas durante el periodo 2002 a 2005. En tres estudios de caso se detectó el desarrollo de la isla urbana de calor con intensidades máximas promedio de 5.4°C, 5.2°C y 5.3°C (Casillas et al., 2014).

También se realizó un estudio similar donde se analizó la diferencia térmica entre temperaturas urbanas con suburbanas de cinco estaciones fijas de calidad del aire durante el período 2002-2007. En el período se presentaron 2,071 días con isla urbana de calor, es decir, durante el transcurso de 7 años la ciudad ha sido más caliente que sus alrededores por 5 años y 8 meses (Casillas et al., 2011).

2.4 Exploración de estrategias de mitigación del balance radiativo.

Como parte de los objetivos de este estudio, se llevó a cabo una investigación sobre las estrategias de mitigación que se han realizado a lo largo de los años en diferentes partes del mundo, ya que se han hecho un sin número de estudios en los cuales se estudia el resultado de reemplazar (por medio de simulaciones) los materiales existentes en la mayoría de las ciudades por materiales y pavimentos claros, así como la adición de vegetación en el entorno urbano, con el objetivo de mitigar el impacto negativo hacia el balance radiativo. En los resultados obtenidos en estos estudios, se muestra una clara disminución de temperatura de los sitios estudiados (Villanueva et. al., 2012, Solecki et al., 2005, Oliveira, 2011).



Figura 2.4 Exploración de antecedentes sobre estrategias de mitigación.

En la figura anterior (figura 2.4) se ilustra como en distintas partes del mundo se ha estudiado con mucho interés el tema de la mitigación del balance radiativo, además enfocándose principalmente el tema de azoteas, seguido de la vegetación y los pavimentos.

A continuación, se describirán, a manera de resumen, el resultado de la investigación sobre algunos casos de estudio, los cuales han logrado efectos favorables hacia la mitigación de la modificación del microclima urbano causado por la modificación del balance radiativo.

Caso 1. Comparación de los efectos de las estrategias de mitigación de isla de calor urbana en Toronto, Canadá. (Yupeng Wang et. al., 2015).

- Eligieron tres lugares con diferente configuración urbana, de 300 x 300 m, que estos de forma particular se evaluaron en redes de 3 x 3 x 3 m.

- Utilizaron el programa de cómputo ENVI-met de tres dimensiones, para simulación de microclima.

LUGARES:

1. Pueblo de Seaton; *Altura baja*, viviendas unifamiliares, típicas viviendas de dos pisos y jardines amplios.
2. Distrito Garden: *Altura media*, zona con una mezcla de edificios, condominios y oficinas con alturas de construcción variables, de dos a veinte pisos.
3. Distrito Financiero: *Gran altura*, es el núcleo de este distrito en el centro de Toronto, incluye edificios de hasta 70 pisos.

ANALIZARON:

- El efecto de la geometría urbana y densidad.
- El efecto del pavimento de concreto.
- El efecto de los techos color claro.
- El efecto de incorporar vegetación.

CONCLUSIONES:

- Con el uso de pavimento de concreto con albedo entre 0.20 y 0.40, la temperatura de la superficie se podría reducir hasta un máximo de 7.9°C durante el mediodía.
- El techo color claro, con un aumento de albedo de 0.30 a 0.70, la temperatura de la superficie podría reducir hasta 11.3°C.
- Con la adición de 10 % de la vegetación urbana, la temperatura del aire exterior podría reducirse entre 0.5-0.8°C durante el día.

Caso 2. Los efectos de la modificación del albedo en residencias en Tucson, Arizona (JR Simpson et. al., 1997).

- En este estudio se utilizaron tres modelos de viviendas a escala, situadas en la Universidad de Arizona, Campus Centro Agrícola.
- Se evaluaron las temperaturas según los colores del techo sobre la construcción, aplicando pintura blanca y plata a los techos de las casas 1 y 2; la casa 3 se mantuvo sin cambios (techo gris).
- Analizaron el comportamiento de techos con y sin aislamiento.

- Tomaron datos de temperatura del aire, temperatura de la superficie del techo, radiación solar, albedo de la superficie y radiación neta.
- El registro de albedo para diferentes superficies, se basó en mediciones simultáneas de la radiación solar reflejada, medida directamente sobre cada techo, así como la radiación solar entrante.

CONCLUSIONES:

- Los techos blancos (con albedo de 0.75) fueron hasta 10 °C más fríos que los techos grises (con albedo de 0.30) o plata (con albedo de 0.50).
- A pesar de que el techo de plata fue más reflexivo que el techo gris, sus temperaturas fueron similares.
- Se encontró una eficacia similar al aumento de albedo en techos aislados.

Caso 3. Comportamiento térmico de un tejado de hormigón fresco en diferentes condiciones climáticas de México (Hernández et. al., 2014).

- Utilizaron una losa horizontal de dos dimensiones una con recubrimiento y otra sin recubrimiento.
- Usaron dos configuraciones diferentes de losas: una de hormigón de 0.10 m de espesor y otra similar, pero con recubrimiento de poliestireno de 0.0254 m con total de espesor de 0.1254 m.
- Realizaron el estudio mediante un modelo matemático.
- Se seleccionaron cuatro ciudades: Ciudad de México, Hermosillo, Guadalajara y Mérida.
- Las variables meteorológicas (radiación, temperatura del aire y velocidad del aire) de las ciudades se obtuvieron de la base de datos del programa de cómputo Meteonorm.

CONCLUSIONES:

- La configuración del techo blanco y aislado fue capaz de reducir la temperatura de la superficie interior hasta los 28 °C durante mediodía, en comparación con un techo de color gris, con la losa original de hormigón.
- Pintar el techo de color blanco puede ser una manera menos costosa para reducir las grandes ganancias de calor en verano, reducir temperatura de la superficie y reflejar más radiación entrante.

Caso 4. Impacto a la respuesta térmica de los techos frescos en las construcciones: caso de estudio en Francia (Bozonnet et al., 2011).

- Midieron datos meteorológicos a través de sensores de temperatura y humedad del aire alrededor de 1.5 m por encima del techo y tomaron datos de una estación meteorológica local ubicada en el aeropuerto.
- Utilizaron una herramienta de simulación llamada Trnsys.
- El objeto de estudio fue una vivienda tradicional. Le pintaron el techo de color blanco.

CONCLUSIONES:

- La pintura blanca de la cubierta permite disminuir 9.9°C la temperatura en el ático, y una disminución de 5.8°C para la habitación, esto para la temperatura interior.
- El techo blanco disminuye la temperatura de la superficie exterior más de 10 °C.

Como lo comentan en sus investigaciones los autores Yupeng Wang et al. (2015), JR Simpson et al. (1997), Hernández et al. (2014) y Bozonnet et al. (2011) las estrategias de mitigación al impacto urbano dirigidas hacia los techos blancos han dado resultados favorables para lograr un descenso de temperatura en los ambientes urbanos.

A continuación, se presentan puntos relevantes encontrados, producto de la exploración de estrategias de mitigación:

- Las superficies frescas, como los techos blancos, tienen menos impacto negativo en el ambiente circundante (Akbari, 2001; JR Simpson et. al., 1997).
- La selección de los materiales apropiados para los entornos urbanos debe responder a un cuidadoso estudio de acuerdo a las condiciones climáticas locales y disponibilidad de recursos para nuevas normativas (Akbari et al., 2012; Levinson et al., 2005; Akbari y Levinson, 2008).
- El uso de materiales que presentan una alta reflectividad a la radiación solar, contribuyen a aumentar el albedo urbano y se considera que es una de las técnicas más prometedoras de mitigación al impacto térmico urbano. (Akbari et al., 2009; Akbari y Konopacki, 2005; Akbari et al., 2001).
- La vegetación ha demostrado una disminución de temperatura en el ambiente circundante mediante la acumulación de menos energía calorífica. (Sailor, 2011; Beradi et. al.,2014)

- La desventaja de considerar la vegetación como solución más apropiada, radica en el tiempo de crecimiento y los pocos espacios libres disponibles en la mayoría de las zonas ya urbanizadas. (Villanueva et. al., 2012; Gómez et. al., 2009)
- Las estrategias de mitigación orientadas a las azoteas muestran mayores posibilidades de mitigación. (Villanueva et. al., 2012; Lynn et al., 2009)

3. MARCO CONCEPTUAL

Las ciudades en su proceso de urbanización, como comenta Luyando (2010), han creado nuevas superficies al recubrir suelos naturales o agrícolas con materiales más densos e impermeables que poseen una mayor capacidad de almacenar calor. Esta modificación da origen a la isla de calor, ya que la energía neta retenida por la interfaz superficie/atmósfera se gasta en mayor proporción como calor sensible turbulento, que como calor latente de evaporación (Tejeda et al., 2010). Esto es, que la energía se gasta principalmente en calentar el aire en vez de en evaporar agua, como sucede en las zonas rurales.

Los países en desarrollo son vulnerables a la extrema variabilidad climática y al cambio climático. Es probable que aumente la frecuencia y magnitud de algunos fenómenos meteorológicos extremos y, en consecuencia, haya incremento en el número de desastres naturales asociados a esos fenómenos. La adaptación al cambio climático depende de la capacidad de adaptación actual y los modelos de desarrollo que están siendo adoptados por los países en desarrollo (Mirza, 2003).

Si bien, el problema del cambio climático es global, las raíces son eminentemente locales, al intervenir diferentes elementos que constituyen el medio ambiente urbano, que se explican como un conjunto numeroso de relaciones entre componentes naturales y sociales que se establecen al interior de las ciudades (Romero et al., 2010).

La característica básica del ambiente urbano es la heterogeneidad espacial de sus superficies horizontales y verticales, y esas diferencias conducen a la no uniformidad de transmisión y distribución de radiación y energía. Siendo la superficie urbana una interface física compleja, las propiedades termodinámicas y cinéticas de las superficies subyacentes pueden cambiar sustancialmente al cambiar las características físicas de esa superficie (Wang y Gong, 2010; Yaoping et al., 2012). Todos estos factores propician que las características climáticas sean específicas de la ciudad analizada.

3.1 Balance de radiación.

La radiación es la emisión, propagación y absorción de la energía en forma de ondas electromagnéticas. El proceso de radiación se diferencia de las otras formas de energía, como convección y conducción, por el hecho de que estas siempre necesitan un medio de transmisión, ya sea sólido, líquido o gaseoso, mientras que la radiación de energía se puede presentar además en el vacío. La radiación que llega del sol a la tierra es la fuente principal de energía para la generación de los fenómenos en la atmósfera, en los océanos y, en general, para la vida en la tierra. Conforme el espectro total de radiación solar (ultravioleta, UV, visible e infrarrojo, IR) penetra la atmósfera, se va modificando, de tal manera que gran parte de la radiación UV e IR son absorbidas, mientras que principalmente es la radiación visible la que llega a la superficie terrestre. La atmósfera tiene un papel muy importante en el mantenimiento del balance entre la radiación solar que entra al sistema terrestre y la radiación que sale de la tierra, manteniendo un promedio global de temperatura superficial del orden de 15°C. Si la tierra no tuviera una atmósfera para absorber y distribuir el calor que nos llega del sol, entonces gran parte de esa energía solar sería reflejada inmediatamente y la temperatura media sobre la superficie terrestre estaría por abajo de los 0°C. Cuando la radiación solar llega a la superficie de la tierra, es transformada en calor y en radiación infrarroja. Esta energía es absorbida por la atmósfera y emitida de nuevo al espacio (Reyes, 2001).

3.1.1 Radiación solar.

La principal fuente de calor que recibe la atmósfera proviene del sol, el cual está continuamente radiando energía en forma de ondas electromagnéticas. La cantidad total de energía solar que llega a la tierra depende de cuatro factores principales: 1) emisión de radiación solar; 2) distancia entre el sol y la tierra; 3) altitud del sol y 4) longitud del día (Reyes, 2001).

3.1.2 Emisión de radiación solar Ley de Stefan-Boltzmann.

La temperatura en la fotosfera del sol, T_s , es de aproximadamente 5,785 °K; por lo que, si se considera al sol como un cuerpo negro, este emitirá radiación electromagnética de acuerdo a la ley de Stefan-Boltzmann, derivada por los físicos austriacos Josef Stefan (1835 – 1893) y Ludwig Boltzmann (1844-1906), la cual establece que la radiación total emitida por un cuerpo, E , es proporcional a la temperatura absoluta, T , elevada a la cuarta potencia:

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (\text{Ecuación 3})$$

dónde: $\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ }^\circ\text{K}^{-4}$ es la constante de Stefan-Boltzmann y ε es la emisividad (Oke, 1987).

Ley de Planck.

La Ley de Planck es derivada por el físico alemán Max Planck (1858 - 1947), establece que el poder emisor espectral, E_λ , de un cuerpo negro a cualquier longitud de onda y temperatura, está dado por la relación:

$$E_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (\text{Ecuación 4})$$

donde E_λ está dada en unidades de $\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$; $C_1 = 3.7427 \times 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4 \text{ m}^{-2}$; $C_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m}^\circ\text{K}$; λ está dada en (μm) y T es la temperatura del cuerpo negro ($^\circ\text{K}$) (Reyes, 2001).

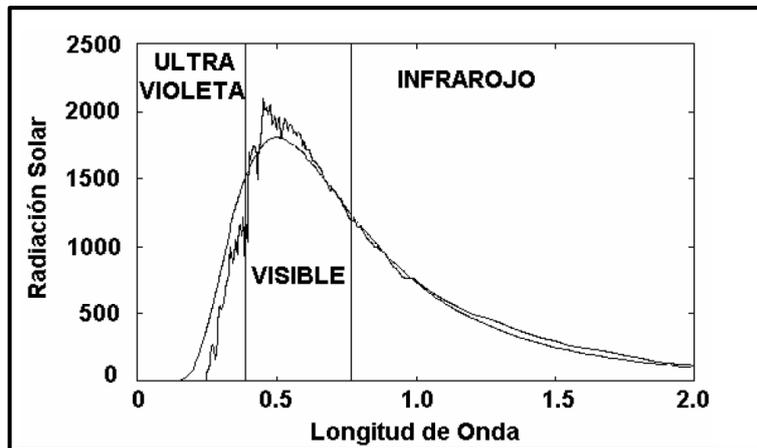


Figura 3.1 Espectro electromagnético solar en el tope de la atmósfera. La línea punteada se derivó de la Ley de Planck, suponiendo una temperatura del sol de 5,785 $^\circ\text{K}$; la línea continua se derivó de observaciones hechas con instrumentación a bordo de cohetes y satélites, fuera del sistema terrestre. Las unidades en el eje vertical son $\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ y en el eje horizontal son μm (Adaptado de Iqbal, 1983).

En la Fig. 3.1 se muestra el espectro electromagnético de la energía radiada por un cuerpo negro a la temperatura de 5,785 $^\circ\text{K}$, derivada de la Ley de Planck. También se muestra el valor promedio de la radiación solar medida en el tope superior de la atmósfera terrestre.

Ley de desplazamiento de Wien.

De acuerdo a la Ley de desplazamiento de Wien, derivada por el físico alemán Wilhelm Wien (1864 - 1928), la longitud de onda de la emisión de radiación máxima, λ_{max} , es inversamente proporcional a la temperatura absoluta del cuerpo radiante:

$$\lambda_{\text{max}} = \alpha/T \text{ (}\mu\text{m)} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Con $\alpha = 2897$ ($\mu\text{m}^\circ\text{K}$). Para una temperatura, T , de $5,785$ $^\circ\text{K}$, la longitud de onda de máxima radiación solar será aproximadamente igual a 0.5 μm (1).

Ley de Kirchhoff.

Dice que cualquier cuerpo no negro inmerso en un baño de radiación y en equilibrio con éste a la temperatura T , emitirá según:

$$R(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda)R_B(\lambda, T) \quad (\text{Ecuación 6})$$

donde ε es el coeficiente de emisividad que será equivalente al de absorptividad. Si, además, suponemos que este coeficiente es independiente de la longitud de onda, entonces podremos expresar la radiancia o emitancia radiante total para cualquier cuerpo negro radiante como:

$$R = \varepsilon\sigma T^4 \quad (\text{Ecuación 7})$$

(García et al., 2005)

3.1.3 Distancia entre el sol y la tierra.

La luz del día es el resultado de la radiación solar que ha viajado una distancia promedio de 1 Unidad Astronómica ($1 \text{ UA} = 1.496 \times 10^8$ km) del sol a la tierra. Debido a que la tierra gira alrededor del sol en una órbita elíptica, con el sol en uno de sus focos, entonces la distancia al sol varía continuamente, por lo que el flujo de radiación solar que incide sobre la tierra también varía a lo largo de la órbita de traslación de la tierra (Arroyo, 2015).

3.1.4 Altitud del sol.

La altitud del sol; es decir, el ángulo entre los rayos solares y el plano tangente a la superficie terrestre, también tiene un efecto importante en la distribución de radiación solar incidente en la tierra. Mientras más grande sea la altitud del sol (es decir, mientras más se acerquen a la perpendicular los rayos del sol), mayor será la radiación solar recibida por unidad de área sobre la tierra (Arroyo, 2015).

3.1.5 Longitud del día.

La longitud del día; es decir, el tiempo que está expuesta la faz de la tierra a la radiación solar, también afecta la cantidad de energía solar que recibe la tierra (Arroyo, 2015).

3.1.6 Radiación terrestre.

A medida que la atmósfera se hace más y más densa, la temperatura de la superficie terrestre difiere más de la temperatura efectiva, pues los distintos componentes atmosféricos como el vapor de agua, el dióxido de carbono, y otros gases denominados de invernadero, absorben intensamente esta radiación infrarroja, por lo que la atmósfera será calentada y, a su vez, re-emitará radiación a la superficie terrestre, aumentando la temperatura de esta última a un valor aproximado de 288°K ($\cong 15^\circ\text{C}$). Entonces, de acuerdo a la Ley de Planck, la tierra tendrá un espectro de radiación, principalmente en la región del infrarrojo entre los 3 y 50 μm (Reyes, 2001, Inzunza, 2012).

3.1.6 Absorción y dispersión de la radiación solar.

Absorción.

Los gases de la atmósfera son absorbedores selectivos de radiación solar, es decir que absorben gran cantidad para algunas longitudes de onda, moderadas en otras y muy poca en otras. Cuando un gas absorbe energía, esta se transforma en movimiento molecular interno que produce un aumento de temperatura. Los gases que son buenos absorbedores de radiación solar son importantes en el calentamiento de la atmósfera (Inzunza, 2012).

En la Figura 3.2 se muestra la proporción de radiación solar absorbida y reflejada en el sistema terrestre.

	Energía (10^{17}W)	Energía (%)
Energía solar en el tope de la atmósfera	$E_T = 1.748$	100
Energía solar reflejada por gases, nubes y superficie	$E_R = E_T (\alpha)$ $= 0.524$	30
Energía solar absorbida por el sistema terrestre	$E_A = E_T (1-\alpha)$ $= 1.049$	70
Energía solar absorbida por los gases atmosféricos	$E_{AG} = 0.270$	16
Energía solar absorbida por las nubes	$E_{AN} = 0.069$	4
Energía solar incidente en la superficie terrestre	$E_{IS} = 0.874$	50
Energía solar transformada en calor sensible (H) y calor latente (Q)	$H+Q = 0.535$	30
Energía solar absorbida por la superficie terrestre	$E_{AS} = 0.339$	20

Figura 3.2 Absorción de radiación solar por la atmósfera y por la superficie terrestre.

Dispersión.

La radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviar esta energía, lo que se llama dispersión. Esto explica como un área con sombra o pieza sin luz solar esté iluminada, le llega luz difusa o radiación difusa. El 26 % de radiación difusa desde la atmósfera llega a la tierra (Inzunza, 2012).

3.1.7 Espectros de absorción y emisión de gases atmosféricos.

Espectro de absorción.

Cada uno de los gases atmosféricos tiene la capacidad para absorber radiación en diferentes longitudes de onda. Los principales responsables son:

- El ozono (O₃): absorbe radiación ultravioleta.
- Dióxido de carbono (CO₂): absorbe radiación en 13-17.5μ
- Vapor de agua (H₂O): Absorbe radiación en 5.5-7μ y por encima de 27μ.

(Gandía, 1991).

Espectro de emisión.

Es el mecanismo por el cual la radiación electromagnética es reflejada por gases o partículas situados en la atmósfera. De este modo disminuye la radiancia directa y aumenta la difusa. Los principales causantes de la dispersión atmosférica son los gases y aerosoles (partículas sólidas o líquidas) que la componen, debido a la elevada variabilidad espacio-temporal de algunos de los gases y de los aerosoles resulta difícil establecer modelos generales para cuantificar su influencia final en una imagen (Gandía, 1991).

3.2 Climatología urbana.

La climatología urbana se ocupa del estudio del efecto climático de las zonas urbanas y la aplicación de los conocimientos adquiridos para una mejor planificación y diseño de las ciudades. Se define principalmente por su enfoque en la ciudad e incorpora aspectos de muchas disciplinas diferentes, incluyendo: meteorología, climatología, calidad del aire, arquitectura, ingeniería civil, diseño urbano, biometeorología, entre otras. Las áreas urbanas tienen un profundo efecto en el aire de la capa de dosel que resulta de los cambios en la naturaleza de la cobertura de superficie (forma urbana) y las emisiones de calor, vapor de agua y las actividades humanas.

Estas modificaciones han sido conocidas desde hace casi dos siglos, pero la naturaleza de los procesos responsables sólo se ha explorado en detalle en las últimas cuatro décadas (Gerald Mills, 2014).

Por tanto, una ciudad que va reemplazando a una cobertura natural de suelo parece crear modificaciones importantes en el clima regional. La estructura física de la ciudad, la energía artificial liberada por los procesos residenciales e industriales, las emisiones de

contaminación, y la reacción de los elementos climáticos con la superficie urbana, interactúan para crear un clima urbano.

En la actualidad, la mayoría de los estudios relacionados con clima urbano han tenido lugar en ciudades densamente pobladas, ubicadas en climas templados y subtropicales (Arnfield, 2003). En cambio, las ciudades localizadas en ecosistemas desérticos se han estudiado muy poco (Pearlmutter et. al., 2006). Este tipo de estudios son aún más escasos para los desiertos del Norte de América que tienen condiciones de extrema aridez, con excepción de ciudades como Phoenix y Tucson en los Estados Unidos (Chow, et al., 2012; Hawkins et al., 2004; Baker et al., 2002; Comrie, 2000); y más recientemente en la ciudad de Mexicali en Baja California, México (Camargo y García-Cueto, 2012; García Cueto, et. al., 2009a; García-Cueto, et. al., 2007).

En términos generales, las investigaciones realizadas sobre el tema se han enfocado principalmente a la identificación y análisis del comportamiento térmico en los espacios urbanos, así como al establecimiento de estrategias de mitigación.

3.2.1. Escalas.

En los estudios de climatología urbana, se han elaborado importantes valoraciones de los fenómenos resultantes y que ha pasado desapercibidos durante el proceso de urbanización de las ciudades, que ayudan a entender la manera en la cual se producen los fenómenos climáticos a diferentes escalas espaciales (Figura 3.3) (Oke, 1987).

Esta valoración suele dividirse en:

- a) *Capa de dosel urbano (UCL)*. Es la capa de aire existente por debajo de la capa límite urbana, extendiéndose desde el nivel del suelo hasta el nivel que marca la altura de los tejados de los edificios, que forman como un dosel. Abarca todos aquellos sectores entre los edificios de la ciudad y que presentan todo un conjunto de microclimas inferida por las características de los alrededores más inmediatos.
- b) *Capa límite urbana (UBL)*. Es aquella porción integrante de la capa límite planetaria donde las características climáticas están modificadas por la presencia de la ciudad en la superficie. Se extiende desde los techos de los edificios hasta un nivel debajo del cual los fenómenos locales están gobernados por la naturaleza de la superficie urbana.
- c) *Capa superficial*. Puede subdividirse en la subcapa de rugosidad y la subcapa inercial (García, 1999).

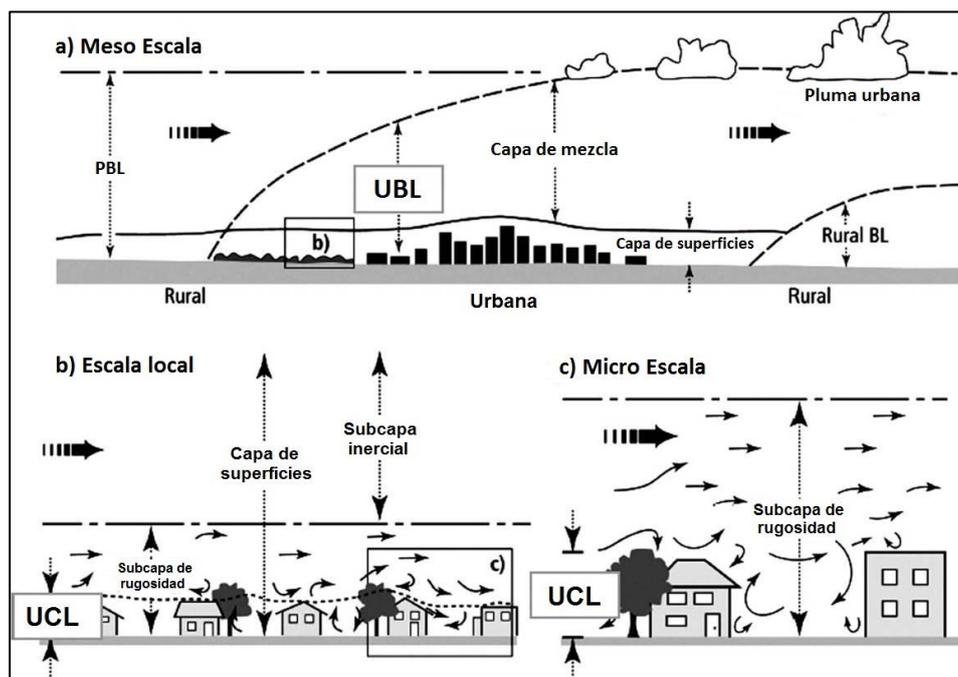


Figura 3.3 Estructuras de capa límite en una zona urbana (Oke, 1987).

- A) *Meso escala.* Corresponde al estudio climático de la ciudad completa (10 a 20 km o superior).
- B) *Escala local.* Los fenómenos de climas urbanos que se desarrollan a nivel de conjunto de edificaciones y sus calles permitiendo aumentar la resolución espacial de 1 a 2 km.
- C) *Micro escala.* Corresponde al estudio climático de vecindad inmediata o del clima del volumen de aire contenido en una calle; el espacio de análisis del microclima está contenida por la capa UCL, siendo esta escala (100 a 200 m) la más precisa del estudio del clima urbano, permitiendo conocer las variaciones de temperatura del aire incluso en distancias pequeñas dentro de una misma calle (Chicas, 2012).

3.2.2. Modificación del clima urbano debido a la urbanización.

En 2003, 47 % de los 6.3 billones de habitantes del mundo estaban habitando en áreas urbanas; en los países más desarrollados, 75 % de la población (1.2 billones) se encuentran en zonas urbanas (Population Reference Bureau 2003). Las alteraciones al medio ambiente, resultan de la estructura física de la ciudad, sus emisiones de energía y la contaminación interactúan para formar climas urbanos distintos (Bridgman et al. 1995).

El proceso de urbanización cambia de manera sustancial la cobertura y uso del suelo al aumentar las áreas construidas con materiales impermeables, y disminuye consecuentemente

las zonas con vegetación, por lo que se modifica, entre otros: 1) el balance radiativo, 2) los hábitats naturales, y 3) el valor estético del paisaje (Santana et al., 2010; Celis et al., 2007).

Al alterar el balance de energía nativo de un lugar, por la introducción de materiales urbanos, la temperatura del aire en las ciudades aumenta significativamente con respecto a sus alrededores, fenómeno al que se le denomina isla de calor urbana (ICU) (Voogt y Oke, 2003), la cual puede ser referida como un cambio climático antropogénico; ya que dentro de sus afectaciones negativas se encuentran: el incremento en el consumo de agua y energía, la reducción en la ventilación que conduce a un aumento del estrés térmico y su asociación como catalizador para la formación de contaminantes atmosféricos que se encuentran relacionados con las infecciones respiratorias agudas (García-Cueto et al., 2007; Deng y Wu, 2013; Ramírez et al., 2009),

Alteraciones antropogénicas de la morfología de la superficie del suelo debido a la urbanización, cambia significativamente el balance de energía de la superficie y crea un nuevo microclima local (Bonan, 2000; Harman y Belcher, 2006 ; Coutts et al, 2007; Roth, 2007; Hart y Sailor, 2009; Pearlmutter et al., 2009).

En particular, la cubierta de la superficie del suelo, sufre modificaciones antropogénicas que alteran la radiación neta, el almacenamiento de calor en el tejido urbano, y la partición de los flujos de calor sensible y latente. A través de la urbanización, las superficies naturales se sustituyen por materiales con mayor capacidad de almacenar calor, mayor conductividad térmica, y diferentes propiedades radiativas (menor albedo de la superficie y emisividad). De modo que, la comprensión de la relación entre la urbanización y el microclima es necesaria para la planificación urbana con un enfoque ambiental y para determinar estrategias efectivas de diseño, por ejemplo, la incorporación de vegetación y un sistema de riego, con el fin de mejorar el clima urbano. El conocimiento de cómo manipular deliberadamente el balance de energía cambiando la ocupación del suelo urbano es crucial para la adaptación al clima urbano (Middel et al. 2012).

Además, es importante tener en cuenta que el espacio físico que ocupan las ciudades, el tamaño y densidad de la población, la actividad antropogénica, y aspectos socioeconómicos de una ciudad juegan un papel crítico en la determinación del efecto de la urbanización en la variación de temperatura (Chen et al, 2006; Oke, 1978).

Es por esto que, los planificadores, diseñadores urbanos, funcionarios de salud pública y las autoridades de la ciudad, están cada vez más preocupados, ya que las zonas urbanas se están calentando a un ritmo más rápido en relación con sus áreas rurales circundantes (Stone, 2012). Por lo que cada vez más se le va dando importancia a este tema, y se están evaluando e implementando soluciones que mitiguen este problema.

3.2.3. Albedo.

La palabra albedo se deriva de la raíz latina *albus* que significa ‘blanco’; de tal manera que el albedo de un cuerpo es su capacidad de reflejar la luz (o su reflectividad). La radiación solar que llega a la tierra es intensamente reflejada por los cuerpos claros o ‘blancos’, tales como las nubes, el agua, la nieve, el hielo, los desiertos y las planicies; mientras que los cuerpos opacos o ‘negros’, tales como los bosques, las selvas y las ciudades, son relativamente malos reflectores de la luz (Reyes, 2002).

De igual manera, el albedo es una medida de la capacidad de un material para reflejar la luz del sol. Se mide en una escala de 0 a 1. Un valor de albedo de 0.0 indica una absorción completa de la radiación solar, mientras que un valor de 1.0 indica completa reflexión (Heat Island Effect Glossary, 2009). Cuando grandes cantidades de radiación solar son absorbidas por un material, el calor concentrado contribuye al aumento de las temperaturas del aire adyacentes. Por el contrario, materiales más ligeros reflejan la radiación (Taha, 1997).

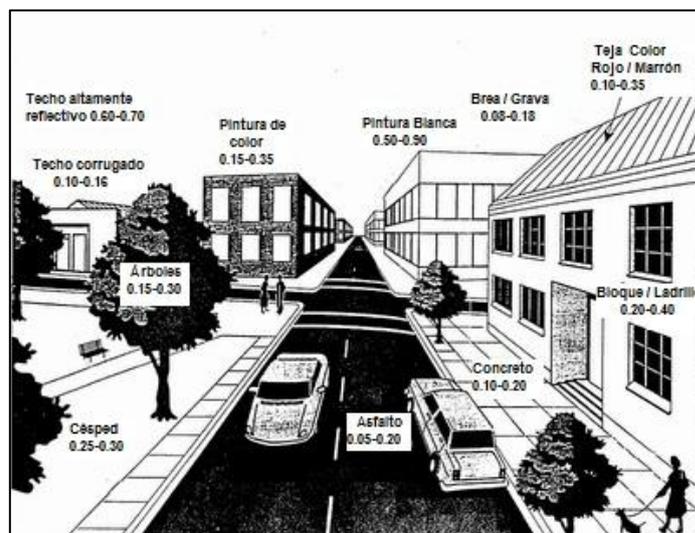


Figura 3.4 Distintos albedos en el medio urbano (Huang et al., 1990).

Los valores del albedo varían en gran medida con el tipo de terreno (Figura 3.4). Las velocidades de calentamiento de la superficie son diferentes, dependiendo de la elevación solar, es decir, la hora del día, la latitud y la estación (J. Otterman, 1977).

Diversos estudios reconocen el importante papel de albedo para influir en la temperatura superficial (Dickinson, 1996; Deardorff, 1978; Streutker 2003; Bretz et al., 1997; Aida y Gotoh, 1982), y la evolución diurna de la capa límite atmosférica (Betts et al., 1996).

De manera que, un estudio fue llevado a cabo en Estados Unidos para identificar los materiales de la superficie urbana, se encontró que una cantidad significativa de material para techos, materiales impermeables y permeables, estaban compuestas de materiales grises y negros (Konopacki et al. 1997). En otro estudio se compara el albedo de varias superficies, encontrando que los materiales de superficie gris y negro tuvieron valores de albedo de 0.18 y 0.14, respectivamente. En consecuencia, los climas urbanos generalmente tienen valores de albedo totales que oscilan entre 0.10 y 0.20 (Streutker, 2003). Estos valores bajos son indicativos de los materiales superficiales urbanos oscuros. La medición de los valores de albedo de una gama de materiales que componen una ciudad puede ser utilizado para medir los niveles de concentración de calor. Los edificios, pavimentos, carteles y otros materiales al aire libre con bajos valores de albedo, resultan en una acumulación de calor que contribuye al efecto general de isla de calor de una zona urbana (Taha, 1997).

Es por esto que, el uso de materiales de alto albedo reduce la cantidad de radiación solar absorbida a través de edificios y otras estructuras urbanas y mantiene su superficie más fría (Streutker, 2003). Como resultado, y en conjunto con la vegetación, se convierte en un factor importante en la mitigación del efecto de isla de calor urbano (Bretz et al., 1997).

En concreto, la vegetación contribuye a la mitigación de este efecto a través de la evapotranspiración de las plantas y la evaporación directa de la planta que intercepta agua producto de la precipitación. Además, afecta a la energía superficial disponible a través de la transferencia de radiación dentro de la copa de los árboles mediante la modificación del albedo de la superficie (Deardorff, 1978).

En cuanto al albedo del suelo desnudo, ha demostrado ser uno de los parámetros importantes que controlan el balance de energía de la superficie terrestre y posteriormente afecta a la capa límite atmosférica impactando de manera positiva al balance radiativo (Pielke y Avissar, 1990).

Con respecto a la ciudad de Mexicali, las coberturas superficiales de las que se compone mayormente la ciudad son en una buena parte asfaltos y concretos, siendo el primero el del albedo menor y el que más contribuye al calentamiento urbano, es decir, es el principal precursor del desarrollo de la isla urbana de calor; el concreto aunque con un albedo menor, pero siendo un material impermeable y carente de evaporación, calienta la superficie, y por ende como calor sensible calienta directamente el aire de los alrededores. Un material altamente reflectivo es el PPEB (poliestireno con pintura elastomérica blanca) y, por tanto, el que menos almacenamiento de calor representa para el medio urbanizado; este material se encuentra en los techos de las construcciones (García-Cueto et al., 2013).

El material nativo de la región es la arcilla, y tiene un albedo sumamente parecido al concreto y al césped, debido a sus propiedades físicas, alcanza temperaturas sumamente altas, muy parecidas a las del asfalto, pero durante la noche es el que más enfriamiento tiene.

Debido a que en los alrededores de la ciudad se cuenta parcialmente con esta cobertura se ha visto en otros estudios (García-Cueto et al., 2009a) que en la ciudad de Mexicali se desarrolla la isla urbana de calor, un fenómeno típicamente nocturno.

3.3. Desarrollo urbano de Mexicali.

La ciudad de Mexicali se ha visto en la necesidad de modificar su cobertura nativa, derivado del rápido crecimiento poblacional de los últimos años, tan solo en el año 2010 se contaba con 936, 826 habitantes (INEGI, 2010). Esta aceleración poblacional exige enormes y costosas exigencias, entre ellas, la construcción de conjuntos habitacionales y vías de comunicación más rápidas y eficaces, invadiendo espacio aéreo, tierras, ríos, etc., con impactos que modifican la vegetación, calidad del aire y clima (Giorgi, 2007).

El proceso de expansión urbana registrado en Mexicali muestra el incremento de colonias y la actividad industrial no previstos en la planeación del desarrollo urbano, que continúa acumulando el déficit en el sector hidráulico, de vivienda, vialidad, transporte, y especialmente en el sector ambiental. Esto ha concentrado las instalaciones industriales de alto riesgo en las zonas de alta densidad poblacional, provocando la mezcla de usos urbanos incompatibles que crean una gran variedad de riesgos potenciales y situaciones conflictivas para la población residente del municipio (González, 1994).

Mexicali muestra una agrupación de localidades vinculadas a la ciudad, en la que domina una distribución de la población que pasa de un patrón de dispersión rural a uno de concentración urbana (Estrella y Ranfla, 1996).

Entre 1990 y 2005 las tendencias de crecimiento urbano en Mexicali muestran que los sectores tanto residenciales como industriales, iniciaron una incipiente ocupación de espacios vacíos dentro de la mancha urbana (Leyva, 2012).

El crecimiento poblacional de Mexicali, su región urbana y las localidades cercanas a la ciudad, presentan un rápido crecimiento que intensifica la ampliación del área urbanizada de la ciudad, esto se ve favorecido por la existencia de áreas industriales, de comercio y servicios regionales, también por las facilidades de traslado hacia el centro urbano.

La superficie urbana ha experimentado un aumento significativo debido a la demanda de suelo urbano para satisfacer las necesidades de la creciente población, así como el cumplimiento de las exigencias de las nuevas actividades económicas que se han establecido en la ciudad. Esta mayor oferta de suelo urbano se ha reflejado en una mayor cantidad de viviendas. Por otra parte, la morfología de Mexicali es de manera general horizontal, la mayor parte de los edificios tienen una altura de uno y dos pisos, con excepción de algunos edificios del sector público como el centro de Gobierno, hospitales y campus universitarios (Casillas, 2013).

3.3.1. Clima.

El tipo de clima de Mexicali se clasifica como muy seco y muy cálido según la clasificación Köppen, modificada por E. García, (1970), con temperaturas máximas promedio de 46° C, llegándose a registrar máximas de 52°C; en tanto que las temperaturas mínimas promedian alrededor de 2° C. Se considera a Mexicali como una ciudad de clima extremo, en donde la temperatura es el elemento climático con mayor impacto en el desarrollo. Las medidas utilizadas para solventar sus efectos son un alto costo social y económico, a través del uso adicional de materiales aislantes de construcción, altos consumos de agua y electricidad (PDU-CMP, 2010).

En relación a la precipitación pluvial, el régimen de lluvias es en invierno, con un promedio anual de 73.9 mm, aunque se registran años en los que se han presentado precipitaciones acumuladas de 132 mm.

Los vientos dominantes, son en dirección de Noroeste a Sureste en los meses de noviembre a abril, y de sureste a noroeste el resto del año (PDU-CMP, 2010).

3.3.2. Uso de suelo.

El uso del suelo en la ciudad de Mexicali se encuentra destinado principalmente a viviendas, actividades educativas, comerciales e industriales, con fuerte ausencia de vegetación (PDU-CPM 2025).

El área urbana propuesta al 2010 tiene una superficie de 206.33 km² y la superficie ocupada en el 2004 es de 0.14 km², que representan un 72% del total de la superficie. La distribución de los usos del suelo en la ciudad de Mexicali, es predominantemente habitacional (56.8%), con concentraciones de uso industrial hacia el este y al sureste, y de uso comercial en el primer cuadro de la ciudad, y hacia el sureste. De 1998 al 2004 la superficie del área urbana aumentó 39% y la superficie de ocupación en 22%. Por otro lado, la superficie de baldíos se ha duplicado del 12% del total de la mancha urbana al 24%, los usos comerciales y de servicios se han reducido del 6 al 5.5% y el uso industrial aumentó ligeramente de 5.5% al 6% del total de la superficie (PDU-CPM 2025).

Pese a lo anterior, en Mexicali existe una particularidad desde hace varias décadas, y es que existe un porcentaje significativo de superficie baldía. En 1980 38% (24.2 km²) de la superficie total de la ciudad era baldío (Aviña et al., 1983). Veinte años después el porcentaje disminuyó a 14% (20.9 km²), permaneciendo como porcentaje considerable.

En las últimas tres décadas la ciudad experimentó una explosión demográfica y económica debido al crecimiento de la industria manufacturera, actualmente existen once parques industriales con un total de 1,164 empresas manufactureras cubriendo una superficie de 8.25 km² la mayoría de estos parques industriales fueron construidos en la década de 1980 en lo que solía ser campos agrícolas en la periferia de la ciudad. Sin embargo, a causa de la expansión de la ciudad en la actualidad gran parte de la industria manufacturera está inmersa en la ciudad, situación que ha provocado que los edificios industriales contribuyan al aumento

de la temperatura tanto por sus características constructivas, como por sus emisiones a la atmósfera (Ramos, 2011; Corona y Rojas, 2009; SPA, 2007).

En contraste, la ciudad cuenta con alrededor de 1.4 km² de áreas verdes públicas, superficie que representa una dotación de 2.1 m² por habitante, mientras que la normativa nacional establece 10 m² por habitante y la Organización Mundial de la Salud establece 9 m² por habitante, por lo tanto, existe un importante déficit (Pena-Salmón y Rojas-Caldelas, 2009).

3.4. Coberturas de suelo y sus propiedades.

El uso del suelo y sus cambios en la cobertura influyen en el clima directamente mediante la alteración de la superficie y sus propiedades físicas, tales como son la cantidad de luz radiación solar reflejada (albedo) y la cantidad de agua transpirada de los suelos a la atmósfera (Foley et al., 2005; Bonan 2008).

Los cambios en la cobertura del suelo son resultado de la combinación, a distintas escalas espacio-temporales, de una serie de factores entre los que se encuentran: los cambios naturales a largo plazo debidos a variaciones en las condiciones climática; los procesos ecológicos y geomorfológicos, como la erosión; la variabilidad climática interanual que afecta principalmente, a las áreas naturales y agrícolas; las alteraciones antropogénicas de la cobertura vegetal y del paisaje, como la deforestación y la degradación de suelos; y el efecto invernadero, causado por las actividades humanas (Lambin y Strahler, 1994). De entre estas causas, las que tienen un mayor significado por su incidencia y origen son aquellas en las que el hombre tiene un papel preponderante como agente de cambio, ya que generalmente se presentan fuera de los ritmos y plazos de recuperación de los sistemas naturales, por lo que su efecto es mayor. De hecho, se asegura que este tipo de cambios constituye una de las fuerzas de mayor impacto a nivel planetario (Watson et al., 2000), lo que hace primordial su monitoreo y análisis para el diseño de políticas sustentables de gestión territorial.

Los cambios en los patrones de uso y cobertura del suelo derivados de la influencia de las actividades humanas (Vitousek, 1994), constituyen a su vez, la causa de una serie de amenazas a los sistemas naturales y productivos por la degradación ambiental que los acompaña.

Diferentes estudios se han centrado en la influencia que tiene la densidad de edificación y el tipo de materiales utilizados en las construcciones en el clima de las ciudades (Shitara, 1957; Nishizawa, 1958; Takahashi, 1959).

Según tales estudios, las ciudades suelen mostrar un perfil térmico nocturno, obtenido a partir de un transecto térmico desde la periferia al centro urbano, que aproximadamente corresponde con la densidad de edificación de los distintos sectores urbanos atravesados, así como el tamaño y compacidad de los edificios.

Para una mejor comprensión, a continuación se presentan tablas donde se pueden observar las propiedades radiativas de los materiales naturales como son albedo y emisividad (Tabla 3.1), así como una tabla donde se muestran las propiedades térmicas de los materiales utilizados en la construcción (Tabla 3.2)

Tabla 3.1 Propiedades radiativas de materiales naturales.

Superficie	Observaciones	Albedo	Emisividad
Suelos	Oscuro, Mojado	0.05	0.98
	Claro, seco	0.40	0.90
Desierto		0.20 - 0.45	0.84 - 0.91
Césped	Largo (1.0 m)	0.16	0.9
	Corto (0.02 m)	0.26	0.95
Cultivo Agrícola, tundra		0.18 - 0.25	0.90 - 0.99
Hortaliza		0.15 - 0.20	
Bosque que hoja caduca	Desnudo	0.15	0.97
	Cubierto de hojas	0.20	0.98
Coníferas		0.05 - 0.15	0.97 - 0.99
Agua	Ángulo cenital pequeño	0.03 - 0.10	0.92 - 0.97
	Ángulo cenital grande	0.10 - 1.0	0.92 - 0.97
Nieve	Viejo	0.4	0.82
	Reciente	0.95	0.99
Hielo	Océano	0.30 - 0.45	0.92 - 0.97
	Glaciar	0.20 - 0.40	

Fuente: Oke, 1987.

Tabla 3.2 Propiedades térmicas de los materiales utilizados en la construcción urbana.

Material (Seco)	Estado	Densidad Kgm^{-3}	Calor específico $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{X}10^3$	Capacidad Calorífica $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}\text{X}10^3$	Conductividad térmica $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Difusividad térmica $\text{M}^2\text{s}^{-1}\text{X}10^6$	Admitancia térmica $\text{Jm}^{-2}\text{s}^{1/2}\text{K}^{-1}$
Asfalto		2,11	0,92	1,94	0,75	0,38	1205
Concreto	Aireado	0,32	0,88	0,28	0,08	0,29	150
	Denso	2,14	0,88	2,11	1,51	0,72	1785
Piedra	Promedio	2,68	0,84	2,25	2,19	4,93	2220
Ladrillo		1,83	0,75	1,37	0,83	0,61	1065
Teja		1,92	0,92	1,77	0,84	0,47	1220
Madera	Ligera	0,32	1,42	0,45	0,09	0,2	200
	Densa	0,81	1,88	1,52	0,19	0,13	535
Acero		7,85	0,5	3,93	53,5	13,6	14475
Vidrio		2,48	0,67	1,66	0,74	0,44	1110
Yeso	Promedio	1,28	1,09	1,4	0,46	0,33	795
Aislamiento	Poliestireno	0,02	0,88	0,02	0,03	1,5	25
	Corcho	0,16	1,8	0,29	0,05	0,17	120

Fuente: Oke, 1987.

3.4.1. Coberturas de suelo en Mexicali.

En la ciudad de Mexicali los materiales de cobertura de suelo que destacan son: el ladrillo o bloques para paredes y losa o madera para los techos, la mayoría de ellos cubierto con un aislamiento e impermeabilización y pintura reflectante. Las calles están pavimentadas con asfalto y/o concreto.

Pavimento

Pavimento es la capa durable colocada sobre caminos, calles, banquetas o al interior de construcciones a fin de caminar o transportarse fácilmente por esas superficies. Los materiales más comunes para pavimentar son asfalto, losa, piedra, ladrillos, azulejos, etcétera.

El asfalto es el hidrocarburo más pesado obtenido en la destilación de petróleo crudo. Esta sustancia espesa, impermeable y de color negro es utilizada para fabricar cemento asfáltico, la mezcla con la que se pavimentan carreteras, avenidas, pistas de aeropuertos y estacionamientos (Hebert, 1986).

Los pavimentos constituyen un conjunto de componentes de indiscutible relevancia debido a que su incidencia cuantitativa sobre el área urbana es muy significativa. Por ejemplo, en tramas urbanas en cuadrícula tradicional, las calzadas vehiculares ocupan aproximadamente el

16% del suelo urbano, y 23% en tramas rectangulares típicas de conjuntos de viviendas sociales (Correa et al., 2003).

Pavimentos (carreteras, aparcamientos, etc.) cubren un porcentaje importante de superficie de una ciudad y sus características térmicas juegan un papel dominante en la formación del fenómeno de isla de calor urbano. Superficies pavimentadas pueden contribuir al calentamiento del aire cerca de la superficie y se puede transferir el calor hacia abajo para ser almacenado en el subsuelo del pavimento para luego ser emitido en forma de calor por la noche (M. Pomerantz, et al., 2000).

La temperatura de la superficie es de primordial importancia, ya que modula la temperatura del aire de las capas más bajas de la atmósfera urbana, es fundamental para el equilibrio energético de la superficie, ayuda a determinar los climas internos de edificios y tiene un impacto en los intercambios de energía que afectan a la comodidad de habitantes de la ciudad (Voogt y Oke, 2003).

Concreto

Es la unión de cemento, agua, aditivos, grava y arena lo que nos da la mezcla llamada concreto. El cemento representa sólo el 15% en la mezcla del concreto por lo que es el que ocupa menor cantidad en volumen; sin embargo, su presencia en la mezcla es esencial.

Este material al igual que el asfalto, incrementan el almacenamiento de calor por su bajo albedo y mayor admitancia térmica, sellan las superficies que, de otra manera, permitirían la libre evaporación del agua y la transpiración de la vegetación nativa, por lo que decrece el calor latente, favoreciendo por tanto el incremento de la temperatura y el desarrollo de la isla de calor urbano (García-Cueto et al., 2015).

3.5. Mitigación.

Las ciudades pueden alterar en mayor o menor medida, todos los parámetros de sus climas locales. La combinación del aumento en el consumo de energía y las marcadas diferencias del balance radiativo de las ciudades, muestran temperaturas más altas que las zonas rurales. Esto da lugar al fenómeno conocido como isla de calor urbano (ICU), que se materializa en las temperaturas más altas del centro urbano, en comparación con el entorno de espacios rurales (Oke, 1982; Arnfield, 1982).

Debido a lo anterior, se han desarrollado estrategias de mitigación con el fin de enfriar los espacios urbanos. Estas estrategias son principalmente relacionadas con la configuración del entorno construido de acuerdo con la radiación solar favorable, los materiales utilizados en la construcción y la presencia de vegetación urbana (Akbari y Matthews, 2012; Santamouris, 2013).

Los materiales utilizados en la envolvente de los edificios y las estructuras urbanas juegan un papel muy importante en el equilibrio térmico urbano. Ellos absorben la radiación solar e infrarroja, y disipan parte del calor acumulado a través de convección y los procesos radiativos a la atmósfera, cada vez aumentando la temperatura del ambiente (Santamouris et al., 2011).

El albedo de las ciudades es menor en comparación con las zonas rurales circundantes. Cantat (1989) ha demostrado que el albedo en París es casi 16 % más bajo que en los alrededores de las zonas rurales. Aida y Gotoh (1982) han evaluado la disminución del albedo urbano debido a las características geométricas de cañones urbanos. Se ha encontrado que una configuración urbana con cañón ancho de aproximadamente el doble de la anchura de edificios, resulta un albedo más bajo en todos los ángulos cenitales. También, Aida (1982) ha informado que, en condiciones climáticas claras, la absorción de las estructuras urbanas se incrementa hasta el 20% aproximadamente en comparación con una superficie plana del mismo material.

Por otra parte, se ha observado el uso de materiales que presentan una alta reflectividad a la radiación solar y alta emisividad espectral y materiales de color claro, contribuyen al aumento el albedo urbano (Figura 3.5) y se considera que es una de las técnicas más prometedoras para mitigar el fenómeno de isla de calor (Akbari et al., 2009).

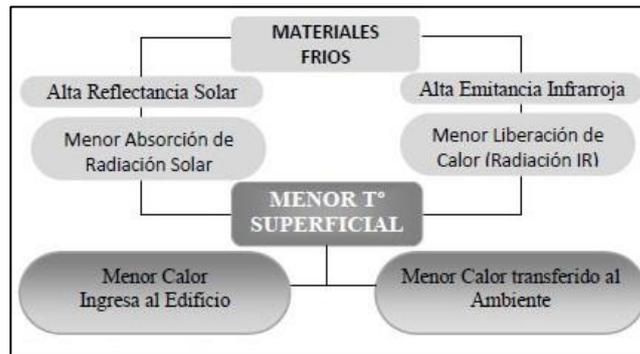


Figura 3.5 Principios básicos de los materiales fríos (Fuente: Santamouris et al., 2011).

Por lo tanto, los materiales de colores claros han ganado una creciente aceptación y son ampliamente utilizados en edificios que presentan una alta reflectancia solar en la superficie y por lo tanto, contribuye a la disminución de la temperatura del ambiente (Akbari, 2003; Santamouris et al., 2008; Jo et al., 2010).

De igual manera Akbari et al., (2012), señala que es efectivo cambiar los albedos urbanos por índices más altos, esto es, por superficies con mayor capacidad de reflejar la radiación solar, podrían incluso ayudar a combatir el cambio climático, por lo cual propone que en los reglamentos, políticas y programas orientados a mitigar los efectos del cambio climático, debiesen promover el uso de color blanco y colores claros en la medida que las superficies urbanas son renovadas. Así mismo señala que el enfriamiento de las cubiertas por medio del mejoramiento de los albedos, puede reducir el uso del aire acondicionado disminuyendo el uso de energía y por lo tanto de las emisiones de CO₂, de manera que una ciudad que mejore sus albedos reduce los efectos de ICU, también mejora el confort térmico en general y de los espacios públicos, así como una reducción en la contaminación del aire.

De manera que, la selección de los materiales apropiados para los entornos urbanos, deben responder a un cuidadoso estudio de acuerdo a las condiciones climáticas locales y disponibilidad de recursos para nuevas disposiciones normativas.

Superficies de colores claros expuestas a la radiación solar también fueron reconocidas para producir beneficios clave como técnica mundial de mitigación del calentamiento (Akbari et al, 2009; Rossi et al., 2013).

La integración de los espacios verdes en la planificación urbana, junto con materiales altamente reflectantes en lugar de superficies pavimentadas convencionales en las carreteras y tejados han demostrado ser métodos eficaces de mitigación de isla de calor urbano.

En 2003, Northridge y Sclar, estimaron que la población mundial en los próximos 30 años se incrementaría de manera que exigirá la expansión urbana. Aunque la población mundial se estima que aumentará a un ritmo del 0.97% anual, se espera que la población urbanizada de las regiones menos desarrolladas aumentara 2.67% anual.

Por consecuencia, el desarrollo de las ciudades ha llevado a la pérdida de la vegetación, ya que se va reemplazando cada vez más por espacios que se asignan a los edificios como: estacionamientos, banquetas y otras superficies. De manera que, la pérdida de vegetación es un elemento clave para impactar negativamente a los microclimas urbanos, ya que ésta proporciona servicios de sombra y de evapotranspiración que enfrían y regulan la temperatura de las superficies y la temperatura atmosférica. La evapotranspiración describe el proceso mediante el cual las plantas absorben agua a través de sus raíces y emiten a través de sus hojas. Mediante el uso de calor del aire se evapora el agua, este proceso contribuye al descenso de temperaturas (Carter, 1995).

Además la vegetación ha demostrado enfriar el ambiente circundante ya que refleja más radiación solar (albedo superior en comparación con pavimentos comunes), mediante la absorción y la acumulación de menos calor, mientras que la evapotranspiración contribuye a enfriar el medio ambiente (Sailor, 2011; Millward y Sabir, 2011; Ng et al. 2012; Beradi et al., 2014).

Además de la reducción de la vegetación, la urbanización ha llevado a un aumento en las superficies pavimentadas. La sustitución de la vegetación por pavimento produce un cambio general en el albedo en toda una ciudad.

De ahí que, los materiales de una superficie tienen un impacto significativo en los microclimas urbanos por la forma en que afectan el valor total albedo de un área (Middel et al 2014; Yaghoobian y Kleissl 2012). Así mismo, las estructuras abundantes en las ciudades con bajos valores de albedo son áreas pavimentadas.

Otro aspecto que se ha tomado en cuenta en relación al tema, son los techos y pavimentos claros que han sido estudiados por su contribución a la mitigación de isla de calor urbano. Ya que se ha comprobado que las superficies de colores claros, contribuyen a la modificación de los materiales de la superficie de una ciudad para lograr un impacto negativo menor en sus ambientes circundantes (Akbari, 2001).

Por otra parte, los edificios convencionales con techos oscuros absorben altos niveles de radiación solar, lo que resulta en un aumento significativo de las temperaturas, tanto en el aire adyacente a la superficie y el aire dentro del espacio del edificio (Scherba et al. 2011). En techos formados por material de bajo albedo, la diferencia entre la superficie y la temperatura del aire circundante puede ser tan grande como 50°C. Por el contrario, los techos formados por material de alto albedo pueden tener una diferencia de tan bajo como 10°C (Akbari, 2001). Superficies de color más claro tienen valores de albedo más altos y por tanto son una herramienta eficaz para reducir la temperatura del aire (EPA 2008). En consecuencia, techos blancos han comenzado a eliminar los techos negros y a los de color oscuro tradicionales (Sproul et al., 2014).

Otra de las ventajas de los techos con superficies claras es el ahorro de energía, por lo que varios estudios de campo lo han documentado en mediciones de energía que resultan del aumento del albedo de los techos. Konopacki (et al. 1997) estimó el potencial de ahorro de energía directa de los techos con alto albedo en once áreas metropolitanas en Estados Unidos. Los resultados mostraron que tres principales tipos de edificios representan más del 90 % en ahorro de electricidad y ahorro monetario anual: en residencias con varios años de haber sido construidas (55 %), residencias recientes (5 %), y los edificios de oficinas y tiendas al por menor juntos (25 %).

Tomando en cuenta lo antes descrito, las estrategias de mitigación que se han considerado más adecuadas y que se han propuesto para la ciudad de Mexicali son el uso de techos con colores claros que han demostrado reducir la temperatura hasta 8°C, seguido de la reforestación que contribuye con una reducción de hasta 2.2 °C. A diferencia de los techos con colores claros, la vegetación no es un efecto inmediato porque es necesario considerar el tiempo de crecimiento del arbolado, además de que son pocos los espacios que han quedado libres en el área de estudio, dentro de los cuales se podría reforestar (Villanueva et al., 2013).

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se hace una descripción de los materiales empleados y del método que se utilizó en la elaboración del proyecto de balance radiativo sobre complejos habitacionales en la ciudad de Mexicali, Baja California.

Se comenzará por detallar el arreglo experimental, el equipo empleado, y otros aspectos de los mismos.

4.1 Arreglo experimental

La experimentación se llevó a cabo en tres conjuntos habitacionales de la ciudad de Mexicali: fraccionamiento Sevilla, fraccionamiento Toledo y colonia Conjunto Urbano Esperanza.

Los fraccionamientos Sevilla y Toledo residencial se encuentran ubicados al oriente de la ciudad (véase Figura 4.1) Se eligieron estos fraccionamientos ya que es hacia donde la ciudad ha tenido su crecimiento en los últimos años.

La colonia Conjunto Urbano Esperanza, se localiza al poniente de la ciudad dentro del área urbana de Mexicali (Figura 4.1). Se eligió este sitio ya que cuenta con distintas características de materiales de cobertura, que son de manera heterogénea.



Figura 4.1 Ubicación de las áreas de estudio: Sevilla Residencial, Toledo Residencia y Conjunto Urbano Esperanza.

La presente investigación fue realizada en 2 etapas:

- 1) Primera etapa: Campaña de Mediciones Radiométricas del 10 al 30 de octubre de 2014. Es un mes de transición entre estaciones del año: verano e invierno.
- 2) Segunda etapa: Campaña de Mediciones Radiométricas del 20 de marzo al 14 de abril de 2015. Es un periodo de transición entre el invierno y el verano.

4.2 Primera Etapa: Campaña de Mediciones Radiométricas

El enfoque general para estimar el balance de energía urbana es medir por encima de la altura media de las construcciones, a fin de evitar efectos locales de elementos de rugosidad individuales, es decir, la medición de la altura tiene que estar por encima de la subcapa de rugosidad (Rotach, 1999, 2002).

Por lo tanto, se ubicaron estratégicamente estaciones radiométricas dentro de los fraccionamientos Sevilla y Toledo a 20 m de altura (Figuras 4.2a y 4.2b), con apoyo de maquinaria de elevación en la cual se realizó la instalación del equipo, el cual, una vez ya instalado y en funcionamiento, las estaciones radiométricas registraron simultáneamente datos promedios cada 30 minutos a lo largo 20 días. Sólo se tomaron en cuenta datos de días despejados.



Figura 4.2 a) Ubicación de equipo en Sevilla Residencial y b) Ubicación del equipo en Toledo Residencial

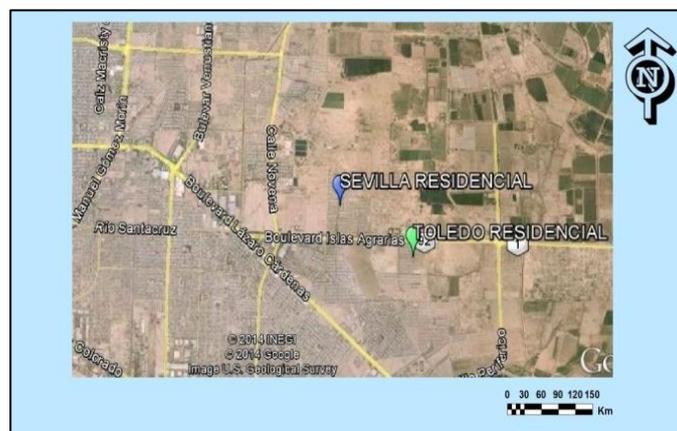


Figura 4.3 Ubicación de los dos complejos habitacionales: Sevilla y Toledo Residencial.

Esta primera etapa de la campaña se realizó del 10 al 30 de octubre, haciendo el acopio de datos cada semana, esto se realizó mediante la descarga de los mismos por medio del equipo de cómputo. La descarga de dichos datos se realizó a través del programa PC400 (Campbell Scientific), que permite la visualización de los datos contenidos en el datalogger. Estos mismos datos fueron procesados por medio del programa de hojas de cálculo Excel.

4.2.1 Área de análisis y campo de visión del equipo radiométrico

A continuación, se muestran las áreas de estudio delimitadas que se tomaron en cuenta para realizar la cuantificación de materiales de cobertura de suelo (cuadro rojo) y el campo de visión del sensor que midió las componentes del balance (círculo punteado).



Figura 4.4 a) Área de análisis en Sevilla Residencial y b) Área de análisis en Toledo Residencial

El campo de visión del sensor NR01 que se empleó para esta investigación, se calculó utilizando la ecuación 4 (Anthoni et al., 2000):

$$R_{\max} = (\tan 85^\circ) h \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$h = h_{\text{inicial}} - h_{\text{desplazamiento}}$$

Donde R_{\max} representa el radio máximo de la vista activa del radiómetro NR01 que se describe más adelante; $\tan 85^\circ$ se refiere al ángulo que es suficiente para capturar el 99% de las contribuciones de radiación (Anthoni, 2000).

La h representa la altura donde se ubicó el sensor, y se calculó tomando en cuenta la altura inicial del equipo radiométrico en la que se colocó en el área de estudio (h_{inicial}) menos la

altura de desplazamiento, es decir, la altura media de las viviendas dentro del área de visión del sensor ($h_{\text{desplazamiento}}$) (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Resultados del cálculo del campo de visión del sensor NR01 para los fraccionamientos Sevilla y Toledo Residencial.

h_{inicial} (m)	$h_{\text{desplazamiento}}$ (m)	h (m)	R_{max} (m)
19	6	13	148.60

La altura de desplazamiento se consideró igual para ambos fraccionamientos ya que por ser complejos habitacionales muy similares, ambos cuentan con viviendas de dos plantas con alturas prácticamente iguales.

Área de análisis.

El área del recuadro rojo (figura 4.4) se calculó una vez obtenido el radio máximo de la vista activa del sensor. Dicha área se tomó en cuenta para la cuantificación de materiales que se describe en secciones posteriores. Esta área se obtuvo a partir de los planos que cuentan con las medidas correspondientes para el caso de los fraccionamientos Sevilla y Toledo Residencial, en cuanto a la colonia Conjunto Urbano Esperanza el cálculo fue apoyado por imágenes satelitales (Google Earth).

4.3 Segunda etapa: Campaña de Mediciones Radiométricas

La segunda campaña de mediciones tuvo lugar en el fraccionamiento Sevilla y en la colonia Conjunto Urbano Esperanza, este cambio se debió a que la colonia conjunto Urbano Esperanza presenta una cobertura de materiales muy heterogénea comparado con la de un fraccionamiento (Figura 4.6), y con la finalidad de obtener resultados aún más contrastantes ya que este complejo habitacional se ubica en una zona diferente de la ciudad como se muestra en la figura 4.1.

Para esta etapa al igual que la anterior, se ubicaron estratégicamente estaciones radiométricas a 20 m de altura con apoyo de maquinaria de elevación donde se llevó a cabo la instalación del equipo, dentro del fraccionamiento Sevilla (figura 4.4a) y Colonia Conjunto Urbano Esperanza (figura 4.4b), éstas registraron simultáneamente datos promedios cada 30 minutos

a lo largo 26 días. Al igual que en la campaña anterior, sólo se tomaron en cuenta datos de días despejados.

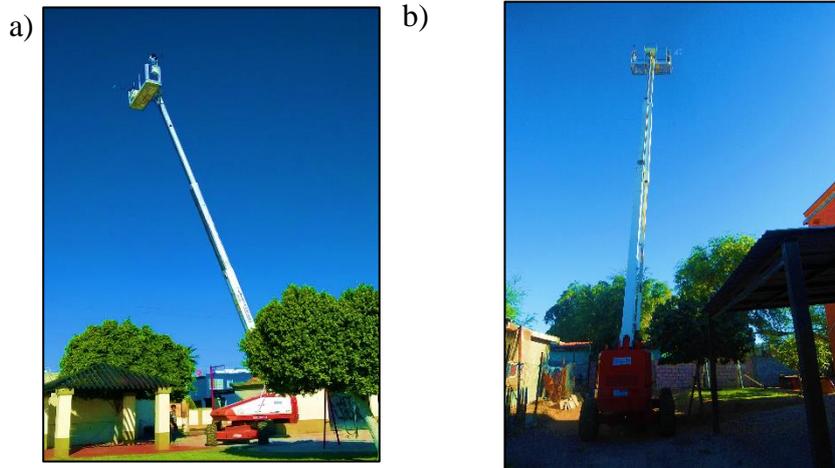


Figura 4.5 a) Ubicación de equipo en Sevilla Residencial y b) Ubicación del equipo en Conjunto Urbano Esperanza.

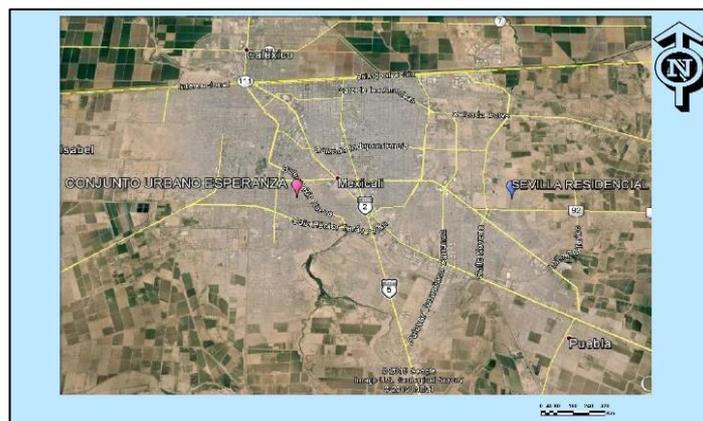


Figura 4.6 Ubicación de los dos complejos habitacionales: Sevilla Residencial y Conjunto Urbano Esperanza.

Esta segunda etapa de la campaña se realizó del 20 de marzo al 14 de abril de 2015, realizando el acopio de datos cada semana mediante la descarga de los mismos por medio del equipo de cómputo. La descarga de dichos datos se realizó a través del programa PC400 (Campbell Scientific), que permite la visualización de los datos contenidos en el datalogger. Estos mismos datos fueron procesados por medio del programa de hojas de cálculo Excel.

4.3.1 Área de análisis y campo de visión del equipo radiométrico.

Para ésta segunda etapa, se realizó el mismo procedimiento para obtener el área de análisis y campo de visión del equipo radiométrico (Tabla 4.2).

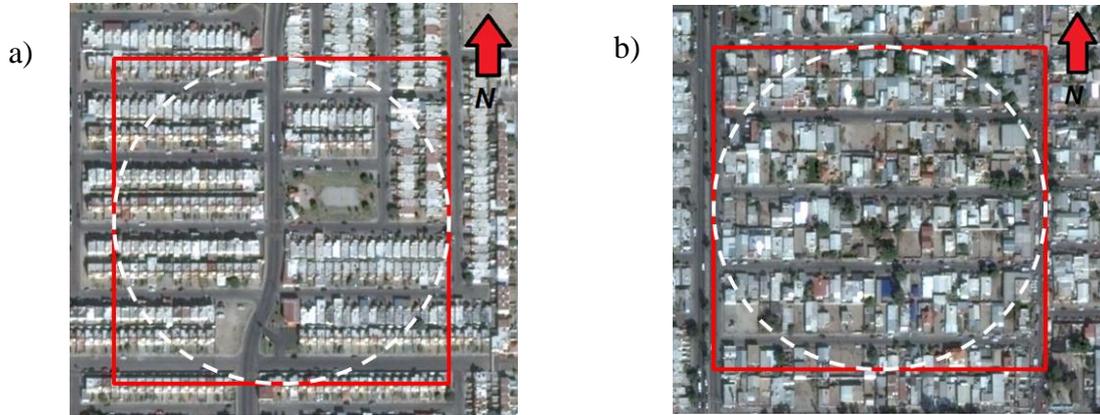


Figura 4.7 a) Área de análisis en Sevilla Residencial y b) Área de análisis en Conjunto Urbano Esperanza

Tabla 4.2 Resultados del cálculo del campo de visión del sensor NR01 para el fraccionamiento Sevilla y colonia Conjunto Urbano Esperanza.

$h_{inicial}$ (m)	$h_{desplazamiento}$ (m)	h (m)	R_{max} (m)
19	6	13	148.60

La altura de desplazamiento se consideró igual para ambos sitios, ya que dicha colonia también cuenta con algunas viviendas de dos plantas, además, se tomó en cuenta la altura de los árboles considerados como altura de viviendas de dos pisos debido a que estos no presentan gran altura.

4.4 Equipo utilizado.

4.4.1 Datalogger CR3000.

Para la parte experimental, se empleó el equipo datalogger CR3000 de la compañía Campbell Scientific, el cual se programó para el registro de datos de mediciones de radiación neta, flujos de calor, variables meteorológicas como: temperatura del aire, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, entre otros.



Figura 4.8 Datalogger CR3000, Campbell Scientific.

4.4.2 Radiómetro NR01.



Figura 4.9 Radiómetro NR01, Campbell Scientific.

Para la realización de esta investigación, que consiste en medir, analizar y discutir las componentes del balance radiativo, se midieron con el radiómetro de cuatro componentes, el NR01, que mide los componentes individuales de la radiación de onda corta y onda larga (Duchon y Wilk, 1994).

Las mediciones realizadas por los radiómetros netos de cuatro componentes tienen una mayor precisión, especialmente en la noche, cuando la magnitud de Q^* es baja ($< 20 \text{ Wm}^{-2}$) (Foken, 2008b). En la figura 4.10 se presenta un esquema de las componentes del radiómetro utilizado.

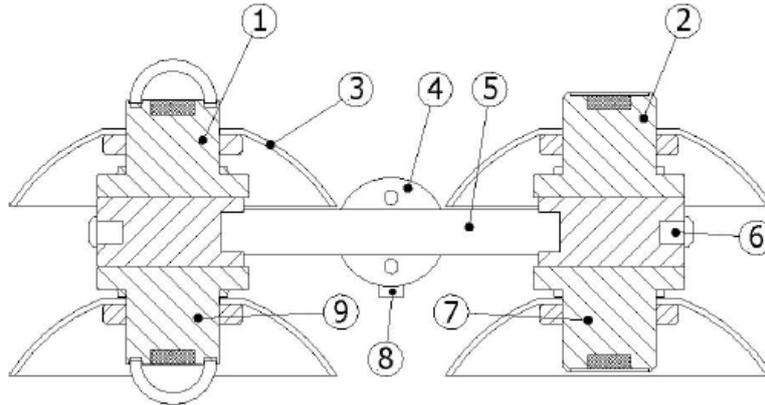


Figura 4.10 Componentes del Radiómetro NR01, Campbell Scientific.

Fuente: Manual, 2011.

1. R_s in ($K\downarrow$), Sensor de radiación solar o piranómetro.
2. RI in ($L\downarrow$), Sensor de radiación del infrarrojo lejano o pirgeómetro.
3. Escudo de radiación.
4. Nivelación de montaje de x y eje y, el bloque más tornillos para el ajuste del eje x.
5. Nivelación de montaje para el eje X e Y, varilla horizontal.
6. Cuerpo de conexión que contiene el sensor Pt100 de temperatura, calentador, y el agujero para el sensor de temperatura.
7. RI ($L\uparrow$) out, Sensor de radiación del infrarrojo lejano o pirgeómetro.
8. Nivelación de montaje para ejes X e Y, tornillos para el ajuste del eje y.
9. R_s out ($K\uparrow$), sensor de radiación solar o piranómetro.

En otros estudios se ha utilizado el mismo equipo para realizar experimentos muy similares obteniendo resultados satisfactorios que sustentan la veracidad de la hipótesis planteada (O.O. Jegede, 1997; Alados et al. 2003; Anthoni et al. 2000; Rotach, 1999, 2002; Foken, 2008).

4.4.1 Cuantificación de materiales de cobertura

Se realizó una cuantificación de materiales de cobertura en cada uno de los complejos habitacionales. Los métodos que se emplearon fueron:

1. Recorridos peatonales. Se realizaron en cada complejo habitacional con el objetivo de contabilizar lotes baldíos, observar presencia de vegetación, tipos de techos, presencia de banquetas y pavimentos, cuya información fue plasmada en registros de elaboración propia (ver anexos al final del documento).
2. Planos. Con ayuda de los planos de los fraccionamientos Sevilla y Toledo residencial se cuantificaron los porcentajes de pavimentos, banquetas y áreas construidas (Fig. 4.11).
3. Imágenes satelitales. Esto se realizó con herramientas como son google earth y google maps.

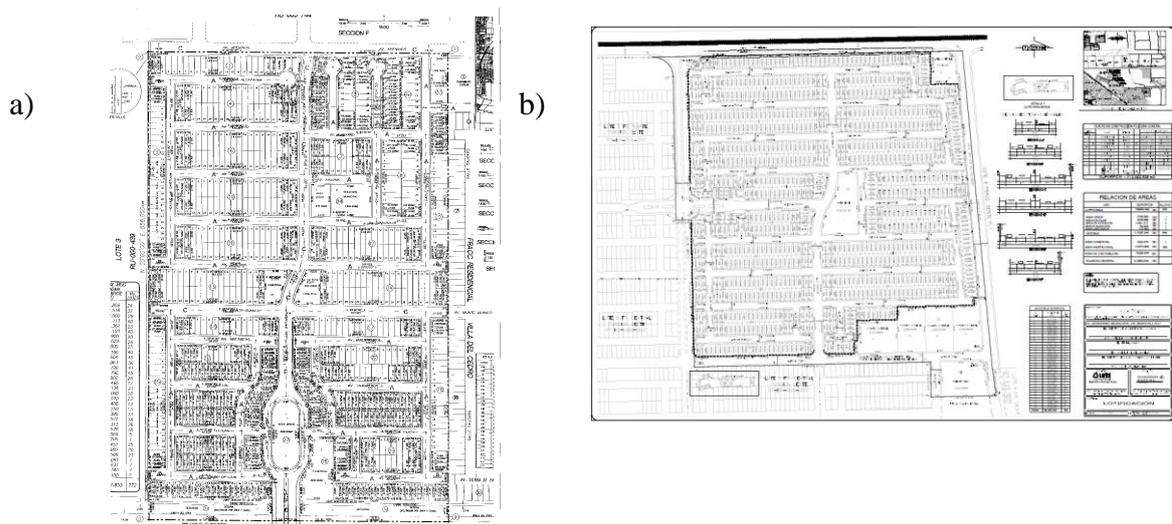


Figura 4.11 Planos de fraccionamientos: a) Sevilla Residencial y b) Toledo Residencial.

4.5 Prueba estadística de diferencia de medias.

Con el propósito de cuantificar si las diferencias observadas de las componentes radiométricas medidas en las diferentes campañas de medición, eran estadísticamente significativas se realizó una prueba de diferencia de medias en las dos campañas de mediciones, mediante la siguiente expresión (Canavos, 1988):

$$Z = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{\sigma^2 x}{nx} + \frac{\sigma^2 y}{ny}}} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

$\bar{x} - \bar{y}$ = Diferencia del promedio de conjunto de datos.

σ^2 = Varianza.

n = Número de datos.

El nivel de significancia estadística elegido para esta prueba del 5% (p-level de 0.05). Se exhibe también el valor Z empírico (Z_{emp}) estimado, a partir de la ecuación (9), el cual se compara con el valor teórico ($Z_{\text{tablas}} = 2.275$) de la distribución normal, y se aplica la regla de decisión de que si $|Z_{\text{emp}}| < |Z_{\text{tablas}}|$ se acepta que no hay diferencias significativas en las medias, y de que si hay diferencias en caso contrario.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1 Primera campaña de mediciones. Sevilla y Toledo Residencial.

A continuación, se muestra el análisis de los datos registrados en la primera campaña de mediciones radiométricas que se llevó a cabo en el fraccionamiento Sevilla y en el fraccionamiento Toledo del 10 al 30 de octubre de 2014.

Se exponen gráficas generales que muestran el comportamiento de las componentes del balance consideradas (Figura 5.1 y 5.2), así como gráficas de los días que se tuvieron en cuenta como representativos.

Además, se incluyen gráficas donde se examinan las componentes en periodo diurno y nocturno y el albedo.

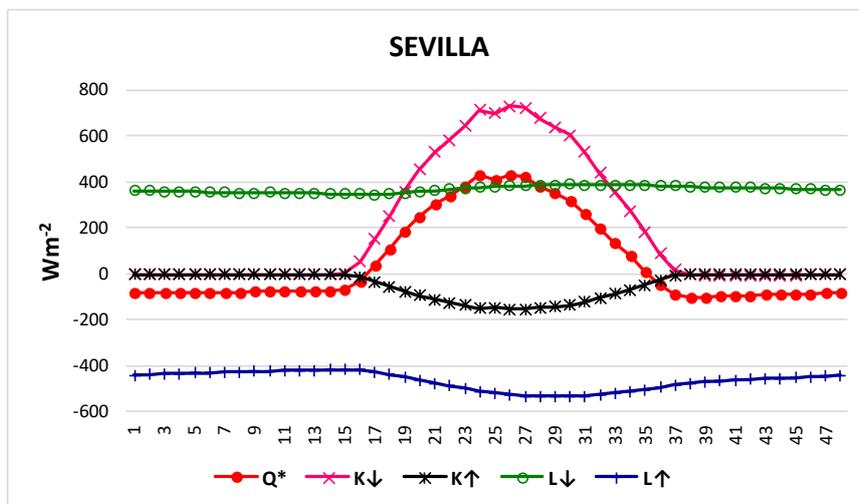


Figura 5.1 Comportamiento promedio de las componentes del balance radiativo en Sevilla Residencial en un periodo de 20 días.

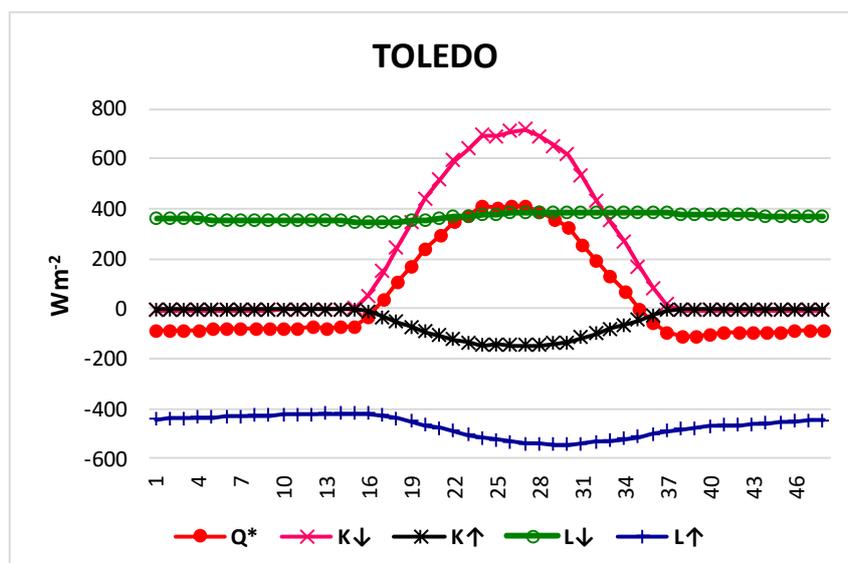


Figura 5.2 Comportamiento promedio de las componentes del balance radiativo en Toledo Residencial en un periodo de 20 días.

En las figuras anteriores (5.1 y 5.2) se muestra un comportamiento muy similar de las componentes del balance en ambos fraccionamientos, sin embargo, en la tabla 5.1 se aprecia como Q^* es mayor en Sevilla residencial con 55.07 Wm^{-2} ya que en Toledo se observa una $Q^*=52.77 \text{ Wm}^{-2}$, $K\uparrow$ es menor en Toledo residencial con 44.12 Wm^{-2} comparado con Sevilla que presenta una $K\uparrow=46.20 \text{ Wm}^{-2}$, $L\uparrow$ es mayor en Toledo residencial con 469.80 Wm^{-2} contra el promedio en Sevilla de $L\uparrow= 466.73 \text{ Wm}^{-2}$. $K\downarrow$ y $L\downarrow$ permanecen prácticamente constantes, ambas provenientes de la misma atmósfera.

Los datos de la tabla 5.1 que se muestra a continuación, son promedios resultado del análisis de los 20 días de mediciones.

Tabla 5.1 Promedios (Wm^{-2}) de las componentes del balance radiativo para los fraccionamientos Sevilla y Toledo residencial.

	Q^*	$K\downarrow$	$K\uparrow$	$L\downarrow$	$L\uparrow$
SEVILLA	55.08	199.89	46.20	368.12	466.73
TOLEDO	52.77	197.89	44.13	368.81	469.80

Unidades: Wm^{-2}

En secciones posteriores se muestran gráficas comparativas de ambos complejos habitacionales tomando en cuenta las componentes Q^* , $K\uparrow$ y $L\uparrow$, en forma más detallada haciendo énfasis en las diferencias tanto del comportamiento como en sus magnitudes.

5.1.1 Comparativo de la componente de radiación solar de onda corta que sale de la superficie ($K\uparrow$).

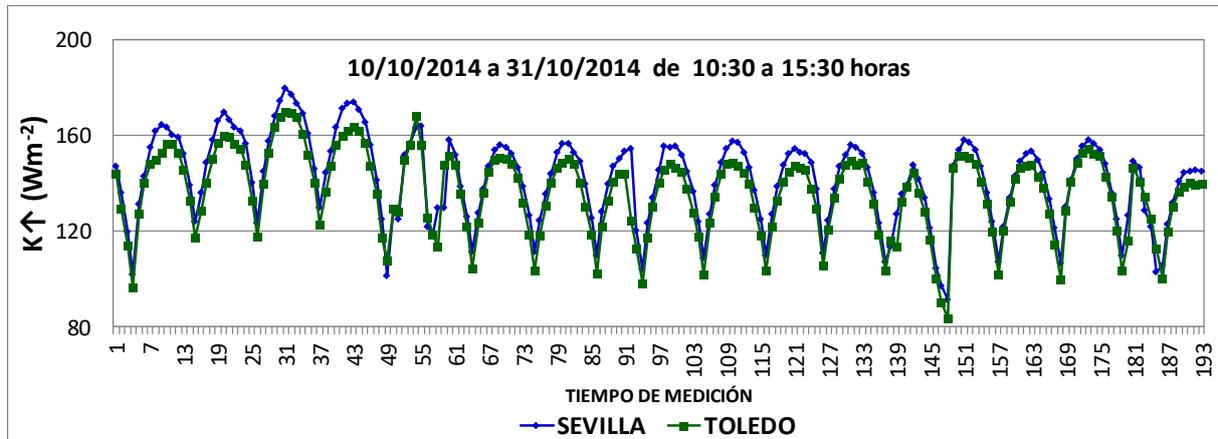


Figura 5.3 Comparativo de la componente $K\uparrow$ = Radiación solar de onda corta que sale de la superficie, entre Sevilla y Toledo Residencial en un periodo de 20 días.

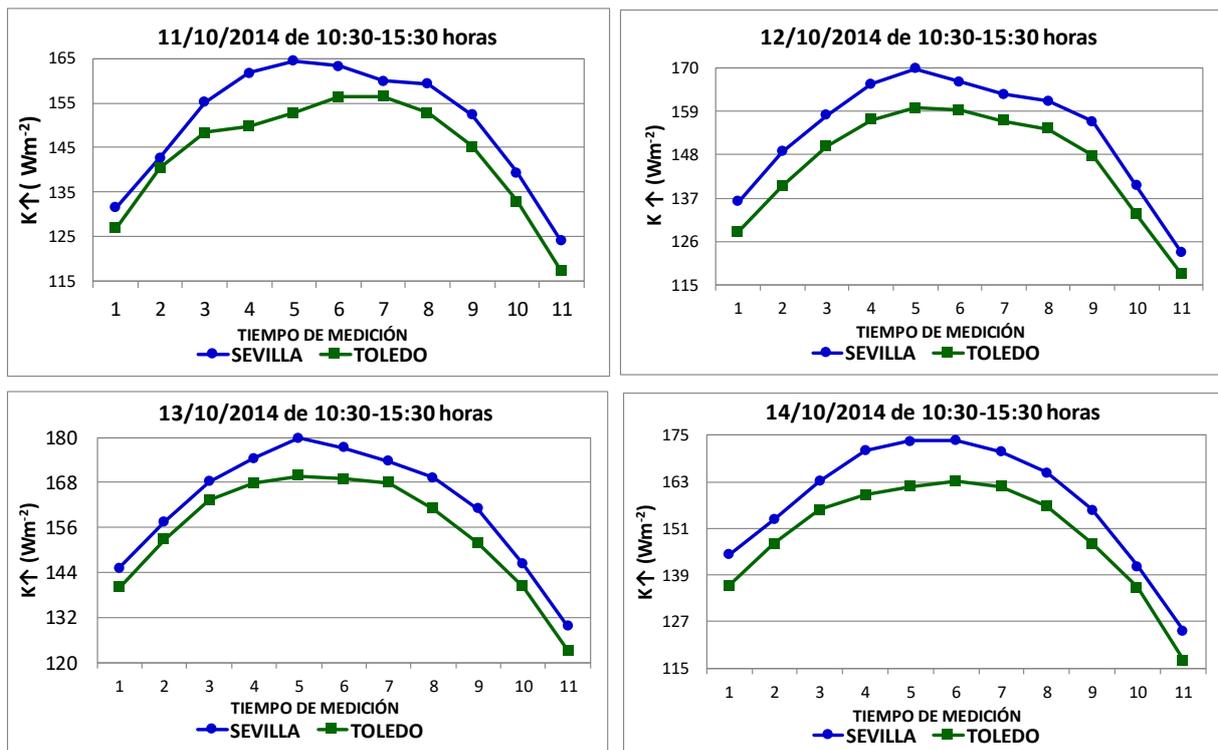


Figura 5.4 Comparativo de la componente $K\uparrow$ = Radiación solar de onda corta que sale de la superficie, entre Sevilla y Toledo Residencial.

Se observa que en el fraccionamiento Sevilla, la radiación solar de onda corta que sale de la superficie ($K\uparrow$), es mayor que en fraccionamiento Toledo.

5.1.2 Comparativo de la componente de radiación infrarroja de onda larga que sale de la superficie ($L\uparrow$).

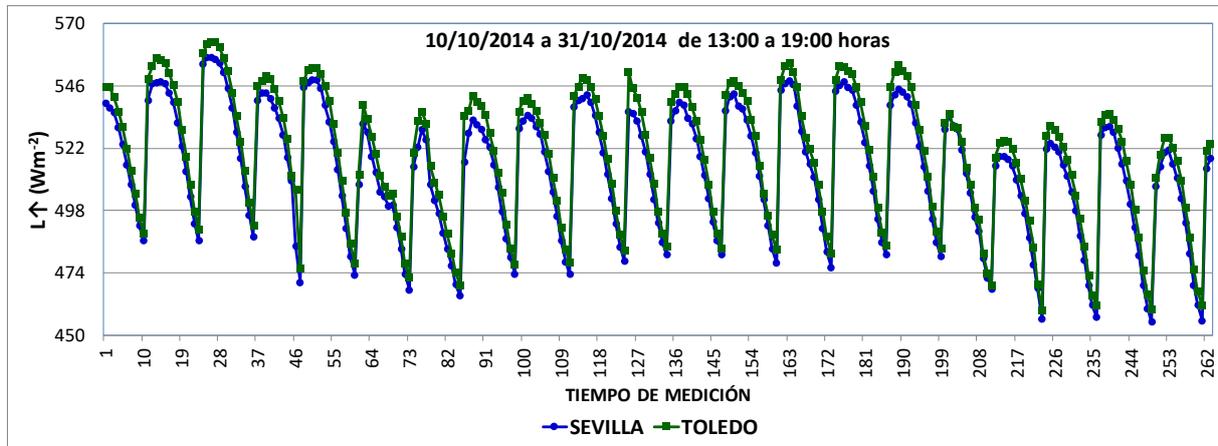


Figura 5.5 Comparativo de la componente $L\uparrow$ = Radiación infrarroja de onda larga que sale de la superficie, entre Sevilla y Toledo Residencial en un periodo de 20 días.

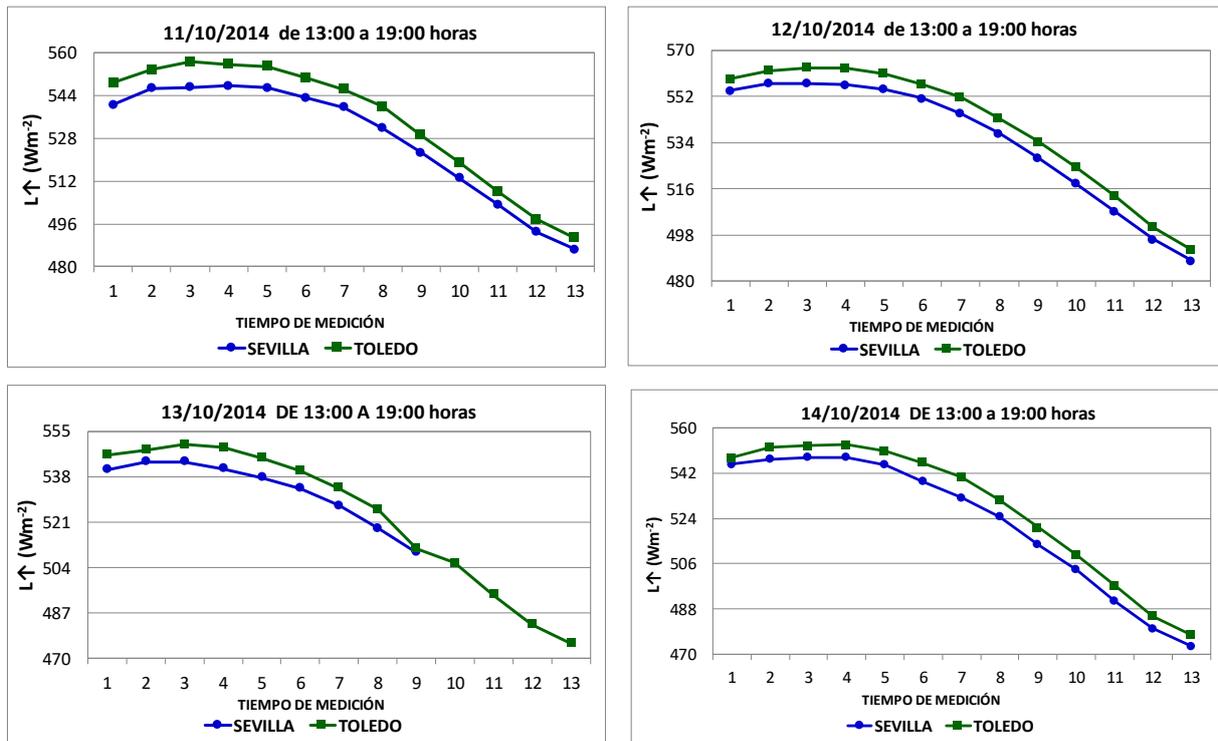


Figura 5.6 Comparativo de la componente $L\uparrow$ = Radiación infrarroja de onda larga que sale de la superficie, entre Sevilla y Toledo Residencial.

Se observa que en el fraccionamiento Toledo la radiación infrarroja de onda larga que sale de la superficie ($L\uparrow$) es mayor que en el fraccionamiento Sevilla

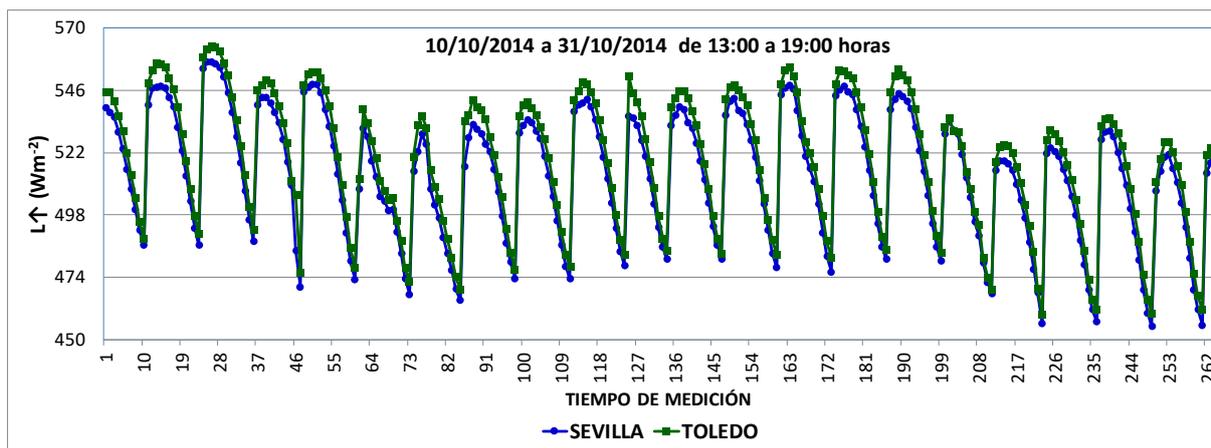


Figura 5.7 Comparativo de la componente $L\uparrow$ = Radiación infrarroja de onda larga que sale de la superficie durante el periodo diurno, entre Sevilla y Toledo Residencial.

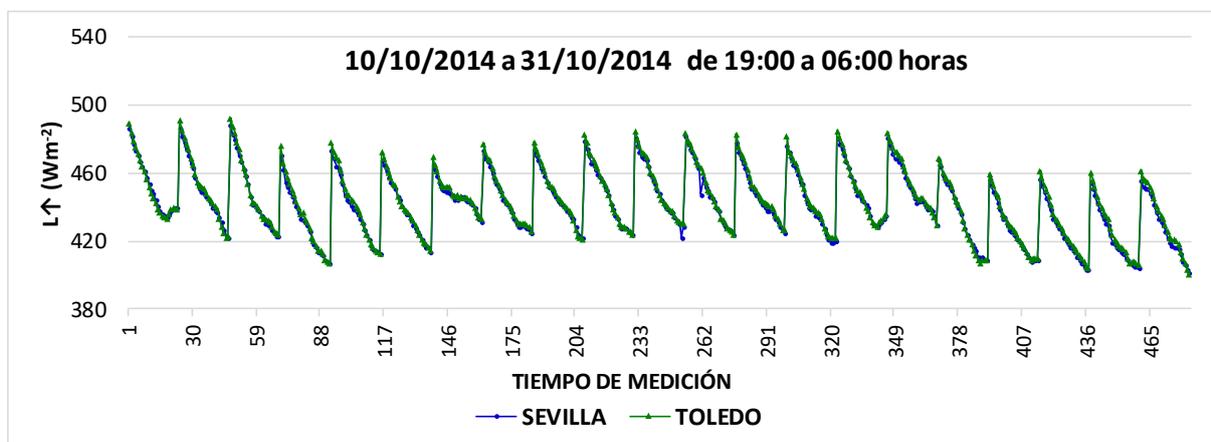


Figura 5.8 Comparativo de la componente $L\uparrow$ = Radiación infrarroja de onda larga que sale de la superficie durante el periodo nocturno, entre Sevilla y Toledo Residencial.

En las figuras 5.7 y 5.8 se observa para el periodo diurno en el fraccionamiento Toledo que la radiación infrarroja de onda larga que sale de la superficie ($L\uparrow$) es mayor, siendo $L\uparrow=519.42 \text{ Wm}^{-2}$, mientras que en el fraccionamiento Sevilla tiene un valor de $L\uparrow=513.56 \text{ Wm}^{-2}$; de igual manera se comporta en el periodo nocturno con $L\uparrow=441.14 \text{ Wm}^{-2}$ para Sevilla residencial y $L\uparrow=443.04 \text{ Wm}^{-2}$ para Toledo residencial (Tabla 5.).

Tabla 5.2 Tabla comparativa de $L\uparrow$ entre Sevilla y Toledo durante los periodos diurno y nocturno.

$L\uparrow \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$	Diurno	Nocturno
Sevilla	513.57	441.15
Toledo	519.42	443.05

5.1.3 Comparativo de Q^* neta, energía disponible como resultado del balance radiativo.

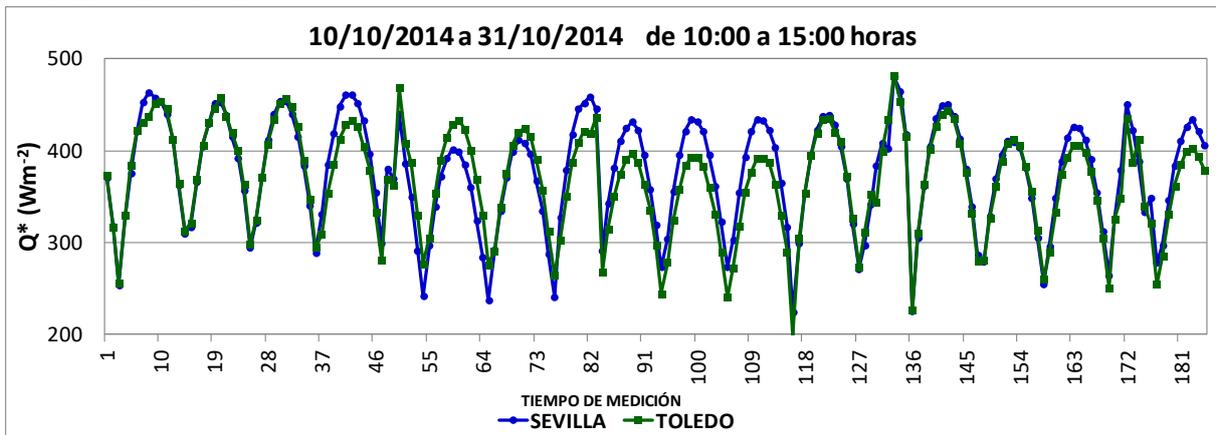


Figura 5.9 Comparativo de Q^* neta = Energía disponible como resultado del balance radiativo, entre Sevilla y Toledo Residencial en un periodo de 20 días.

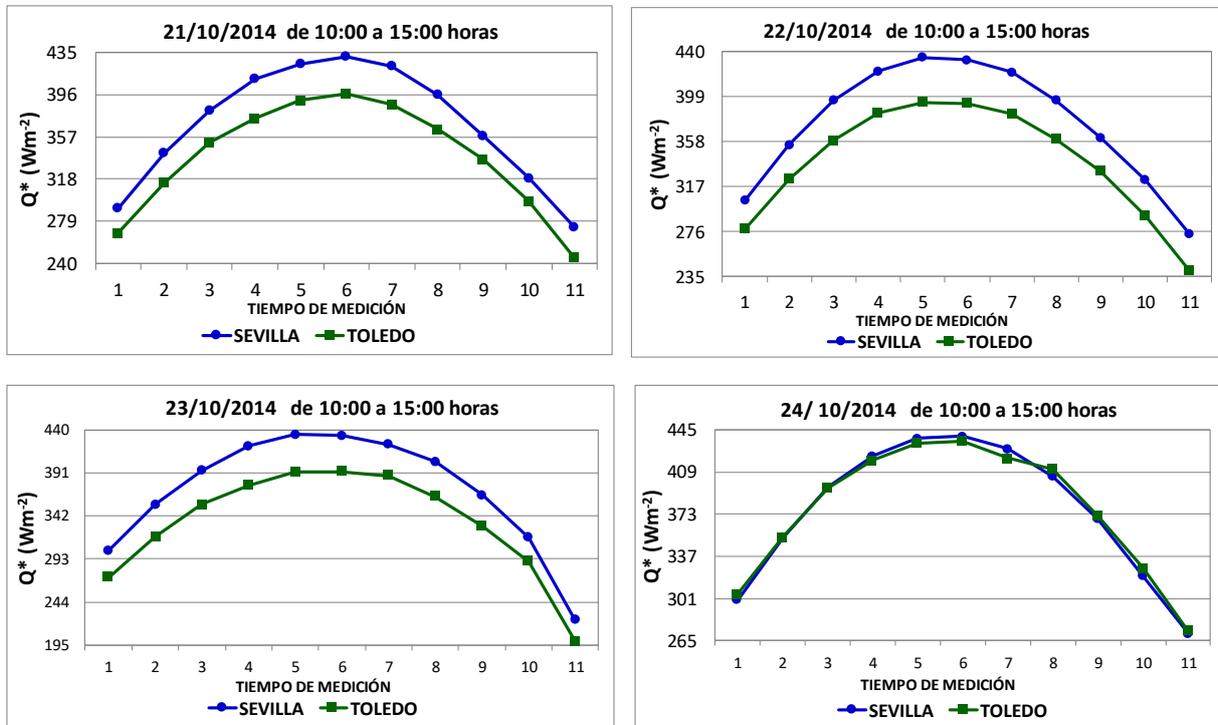


Figura 5.10 Comparativo de Q^* neta = Energía disponible como resultado del balance radiativo, entre Sevilla y Toledo Residencial.

La energía neta disponible (Q^*) es mayor en el fraccionamiento Sevilla.

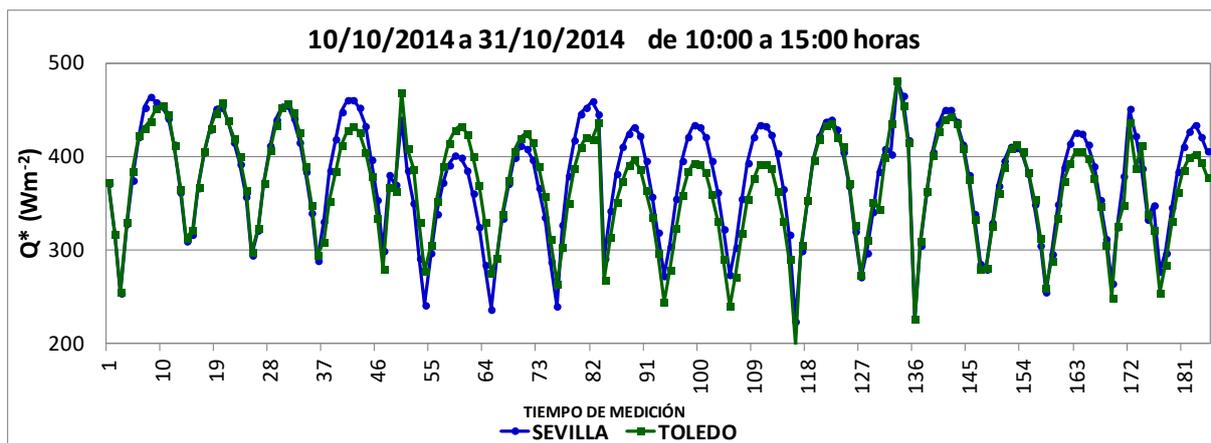


Figura 5.11 Comparativo de Q^* neta = Energía disponible como resultado del balance radiativo para el periodo diurno, entre Sevilla y Toledo Residencial.

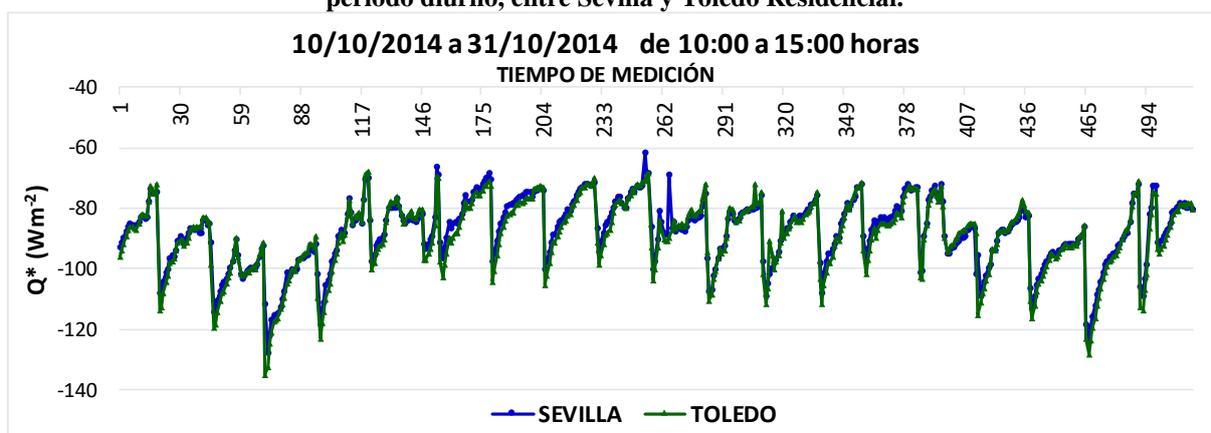


Figura 5.12 Comparativo de Q^* neta = Energía disponible como resultado del balance radiativo para el periodo nocturno, entre Sevilla y Toledo Residencial.

Se puede observar en las figuras 5.11 y 12 que Q^* es mayor en Sevilla. En la tabla 5.3 se aprecia que la energía neta disponible (Q^*) para el periodo diurno es mayor en el fraccionamiento Sevilla con $Q^* = 376.16 \text{ Wm}^{-2}$ que en el fraccionamiento Toledo con $Q^* = 368.42 \text{ Wm}^{-2}$, de igual manera se comporta en el periodo nocturno para Sevilla con $Q^* = -88.87 \text{ Wm}^{-2}$, siendo menor en Toledo con $Q^* = -88.96 \text{ Wm}^{-2}$.

Tabla 5.3 Tabla comparativa de Q^* entre Sevilla y Toledo durante los periodos diurno y nocturno.

Q^* (Wm^{-2})	Diurno	Nocturno
Sevilla	376.17	-87.88
Toledo	368.43	-88.96

5.1.4 Comparativo del albedo entre Sevilla y Toledo.

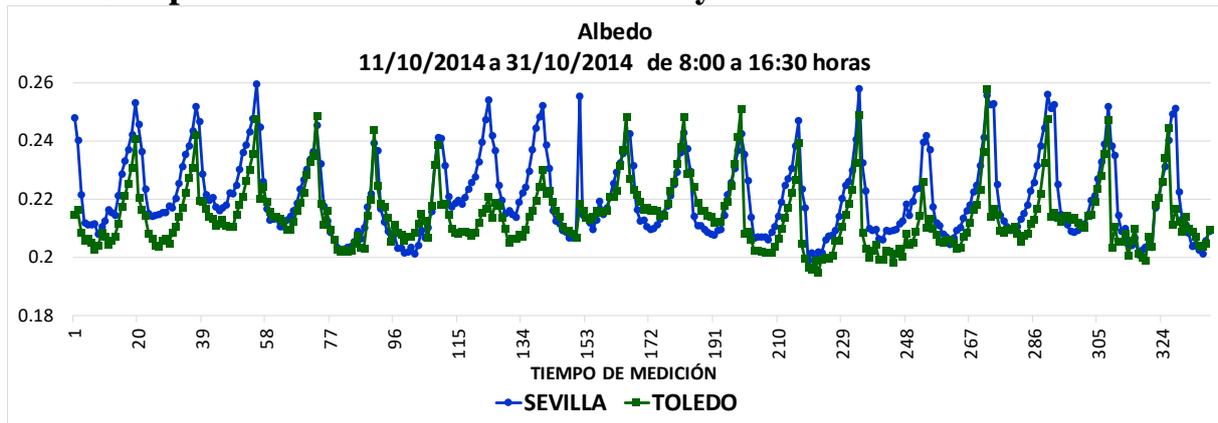


Figura 5.13 Comparativo de albedo, entre Sevilla y Toledo Residencial.

En la figura 5.13 se observa que el albedo es ligeramente mayor para el fraccionamiento Sevilla, ya que en este es de 0.23 y en el fraccionamiento Toledo es de 0.22 (Tabla 5.4).

Tabla 5.4 Tabla comparativa de albedo entre Sevilla y Toledo.

ALBEDO	
SEVILLA	TOLEDO
0.234	0.224

5.1.5. Análisis comparativo de resultados de componentes de balance radiativo entre fraccionamiento Sevilla vs fraccionamiento Toledo

En función a los resultados obtenidos, a continuación, se realiza, una comparación de lo encontrado.

Durante la primera campaña en 2014, se observó que el fraccionamiento Sevilla presenta en promedio una radiación solar de onda corta que sale de la superficie ($K\uparrow$) de 141.77 W/m^2 y radiación neta (Q^*) de 376.17 W/m^2 siendo mayores que en el fraccionamiento Toledo en el cual se encontró un promedio de $K\uparrow = 136.26 \text{ Wm}^{-2}$ y $Q^* = 368.42 \text{ Wm}^{-2}$ (Tabla 5.5), también se observó un albedo de 0.23 para Sevilla y 0.22 para Toledo. Esta pequeña diferencia se debe a la presencia de techos blancos que predominan en Sevilla, ya que son más reflectivos (Tabla 5.6), este resultado podría ser aprovechado de acuerdo a lo que menciona Akbari et al (2012) en el sentido que las superficies con mayor capacidad de reflejar la insolación, podrían incluso ayudar a mitigar los efectos del cambio climático promoviendo el uso de color blanco y colores claros en la medida que las superficies urbanas son renovadas. Además de diversos estudios realizados en distintas ciudades del mundo a lo largo de los años (Villanueva et al., 2013; Bozonnet et al., 2011; Hernández et al., 2014; Yupeng Wang et al., 2015; JR Simpson

et al., 1997; Tiziana Susca, 2012; Araújo y Lourenço, 2005; Akbari, 2001; Middel et al. 2014; Santamouris et al. 2008; Akbari, 2003; Rossi et al., 2013; Sproul et al., 2014; Konopacki et al. 1997; Streutker, 2003; Taha, 1997; Jo et al., 2010).

Por otra parte, se encontró en promedio una radiación solar de onda larga que sale de la superficie ($L\uparrow$) de 513.56 W/m^2 para el fraccionamiento Sevilla, siendo mayor en el fraccionamiento Toledo con $L\uparrow = 519.42 \text{ W/m}^2$ (Tabla 5.4), se observa que hay mayor calentamiento de las superficies en el Fracc. Toledo de acuerdo a la ley de Stefan-Boltzman al igual que en el periodo nocturno con $L\uparrow = 443.04 \text{ Wm}^{-2}$ (Tabla 5.5), y eso se atribuye a que cuenta con más pavimentos. (Tabla 5.6). El material más común que se utiliza para pavimentar en la ciudad de Mexicali es el asfalto, este se calienta en un grado considerablemente mayor que otros materiales durante el día, y se libera una sustancial cantidad de calor a la atmósfera a través de la radiación infrarroja ($L\uparrow$) (Takashi et al., 1996). Además, el fraccionamiento Sevilla cuenta con mayor proporción de banquetas y vegetación escasa.

Tabla 5.5 Comparación de los resultados de las componentes entre Sevilla y Toledo Residencial.

	SEVILLA	TOLEDO
$K\uparrow$	141.77 Wm^{-2}	136.26 Wm^{-2}
$L\uparrow$	513.56 Wm^{-2}	519.42 Wm^{-2}
Q^*	376.17 Wm^{-2}	368.42 Wm^{-2}

Tabla 5.6 Porcentajes de techos blancos y pavimentos en Sevilla y Toledo Residencial.

%	SEVILLA	TOLEDO
Techos blancos	32.75 %	25.24%
Pavimentos	24.67%	34.83 %

5.2 Segunda Campaña de mediciones. Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza.

Al igual que en los resultados de la campaña anterior, en esta sección se muestra el análisis de los datos realizados en la segunda campaña de mediciones radiométricas que se llevó a cabo en el fraccionamiento Sevilla y en la colonia Conjunto Urbano Esperanza, del 20 de marzo al 14 de abril de 2015.

Se exponen gráficas generales que muestran el comportamiento de las componentes del balance consideradas (Figura 5.14 y 15), así como gráficas de los días que se tuvieron en cuenta como representativos a lo largo de la campaña.

Además, se incluyen gráficas donde se examinan las componentes en periodo diurno y nocturno y el albedo.

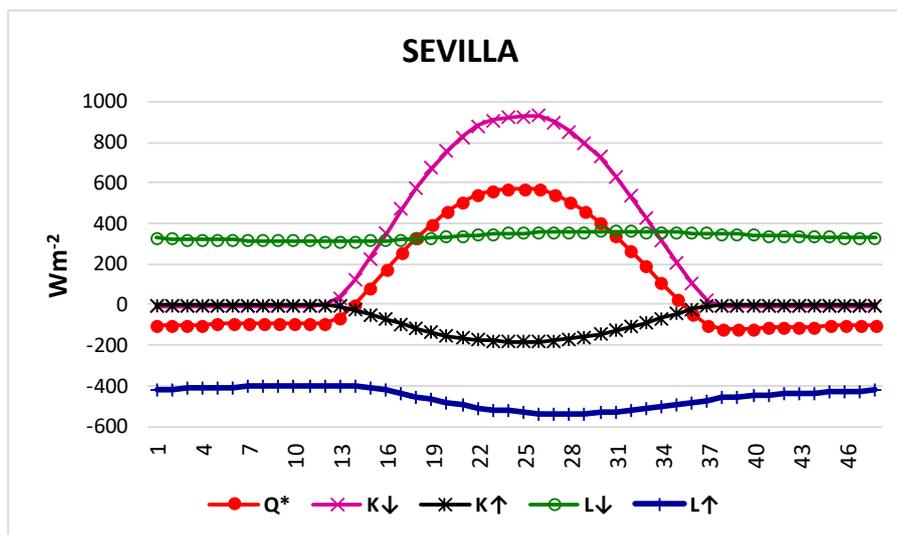


Figura 5.14 Comportamiento promedio de las componentes del balance radiativo en Sevilla Residencial en un periodo de 26 días.

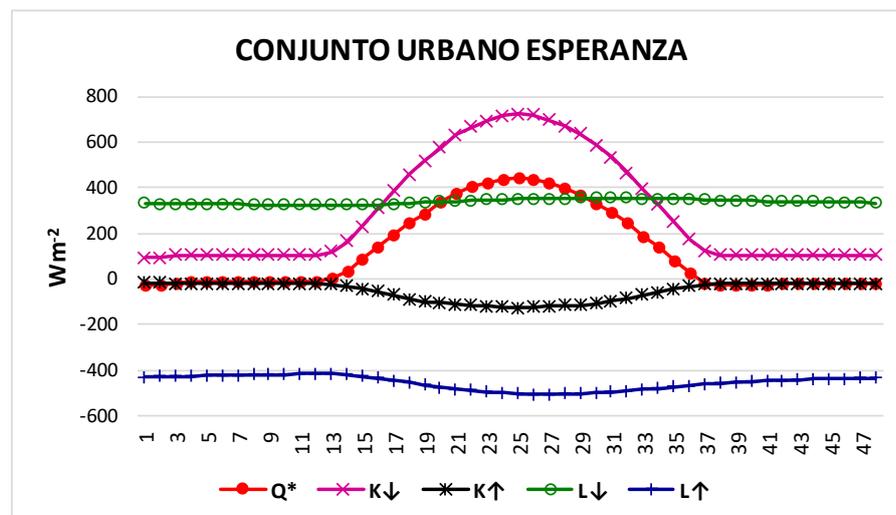


Figura 5.15 Comportamiento promedio de las componentes del balance radiativo en Conjunto Urbano Esperanza en un periodo de 26 días.

En las figuras anteriores (5.14 y 5.15) se muestra un comportamiento muy similar de las componentes del balance en ambos fraccionamientos, sin embargo, en la tabla 5.7 se aprecia que Q^* es mayor en Conjunto Urbano Esperanza (CUE) que tiene un valor de 122.85 Wm^{-2} , en cambio en Sevilla se observa una $Q^*=111.01 \text{ Wm}^{-2}$.

Respecto a $K\uparrow$, se observa que es menor en CUE que tiene un valor promedio de 54.25 Wm^{-2} y en Sevilla tiene una $K\uparrow=59.93 \text{ Wm}^{-2}$; $L\uparrow$ es mayor en Sevilla residencial con 457.77 Wm^{-2} por otra parte en CUE se tiene una $L\uparrow= 456.76 \text{ Wm}^{-2}$. $K\downarrow$ y $L\downarrow$ provienen de la atmósfera, se puede observar diferencias que pueden atribuirse a una ligera acumulación de polvo en el instrumento de medición.

Los datos de la tabla que se muestra a continuación, son resultado del análisis de los 26 días de mediciones.

Tabla 5.7 Promedios de las componentes del balance radiativo para el fraccionamiento Sevilla y para Conjunto Urbano Esperanza.

	Q^*	$K\downarrow$	$K\uparrow$	$L\downarrow$	$L\uparrow$
SEVILLA	111.01	292.58	59.93	336.14	457.78
CUE	122.86	294.78	54.26	338.71	456.38

Unidades: Wm^{-2}

En secciones posteriores se muestran gráficas comparativas de ambos complejos habitacionales tomando en cuenta las componentes Q^* , $K\uparrow$ y $L\uparrow$ ya que, como se mencionó en el párrafo anterior $K\downarrow$ y $L\downarrow$ provienen de la atmósfera y por lo tanto se consideraron como variables constantes para el análisis.

A continuación, se presentan gráficas comparativas en las que se aprecian las diferencias entre complejos habitacionales mediante una selección de periodos de tiempo para las horas diurnas.

5.2.1 Comparativo de la componente de radiación solar de onda corta que sale de la superficie ($K\uparrow$).

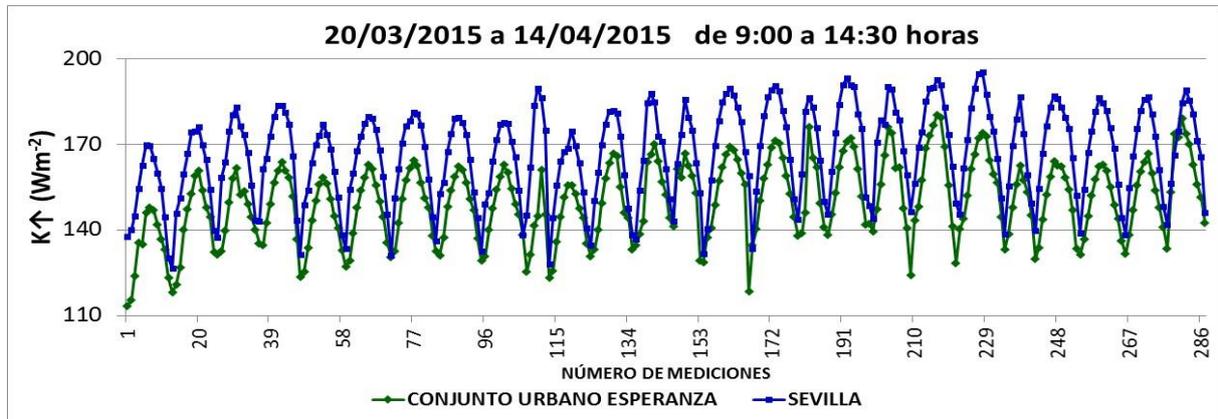


Figura 5.16 Comparativo de la componente $K\uparrow$ = Radiación solar de onda corta que sale de la superficie, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza en un periodo de 26 días.

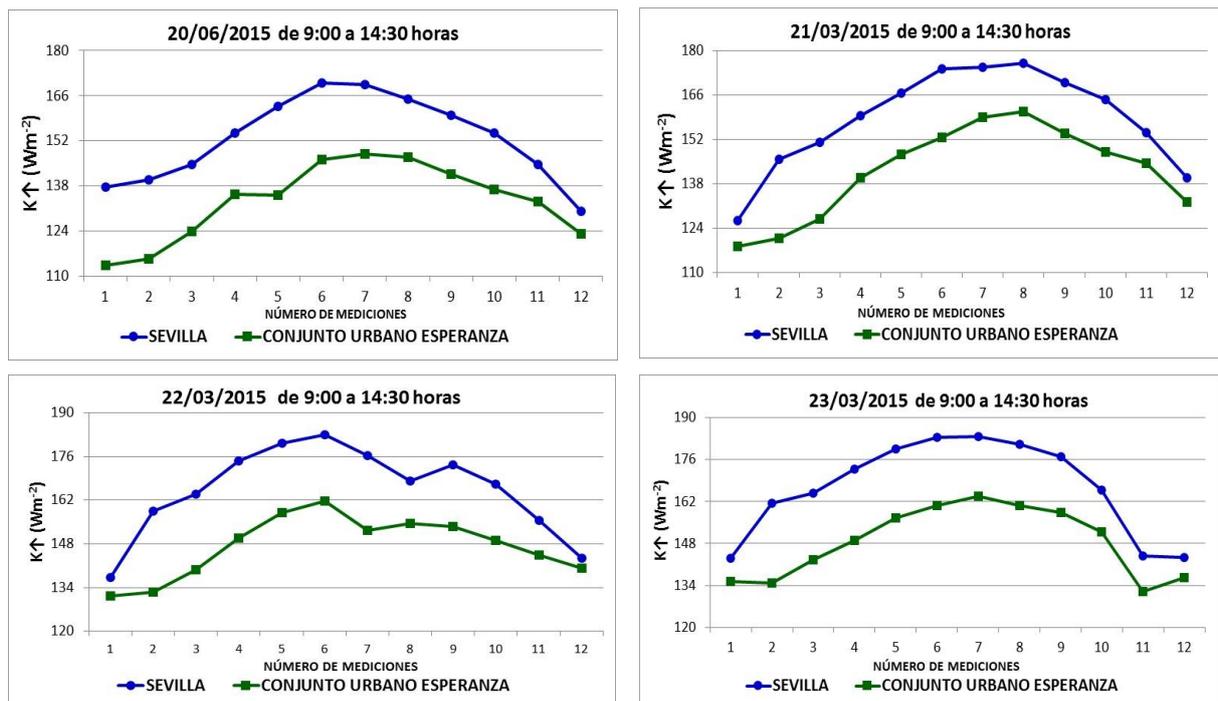


Figura 5.17 Comparativo de la componente $K\uparrow$ = Radiación solar de onda corta que sale de la superficie, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza.

Se observa que en el fraccionamiento Sevilla, la radiación solar de onda corta saliente de la superficie ($K\uparrow$), es mayor que en Conjunto Urbano Esperanza.

5.2.2 Comparativo de la componente radiación infrarroja de onda larga que sale de la superficie ($L\uparrow$).

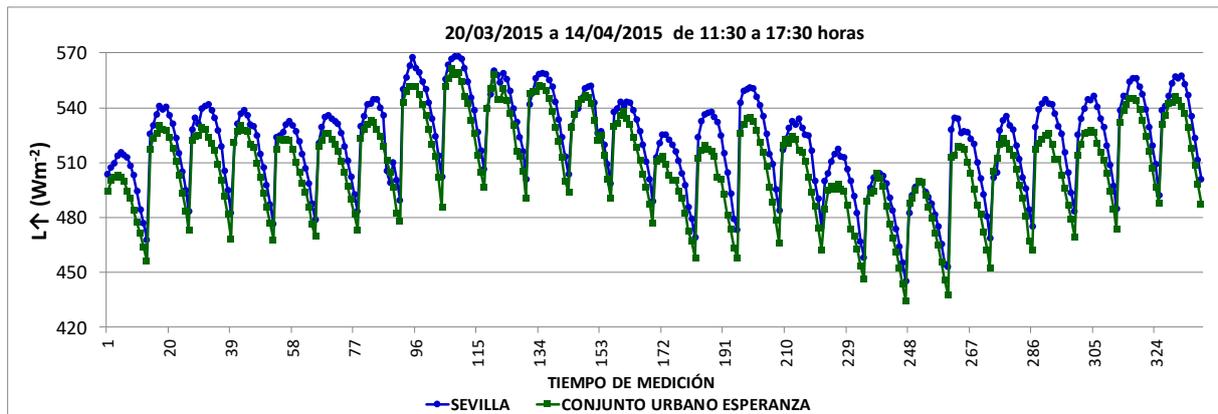


Figura 5.18 Comparativo de la componente $L\uparrow$ = Radiación infrarroja de onda larga que sale de la superficie, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza en un periodo de 26 días.

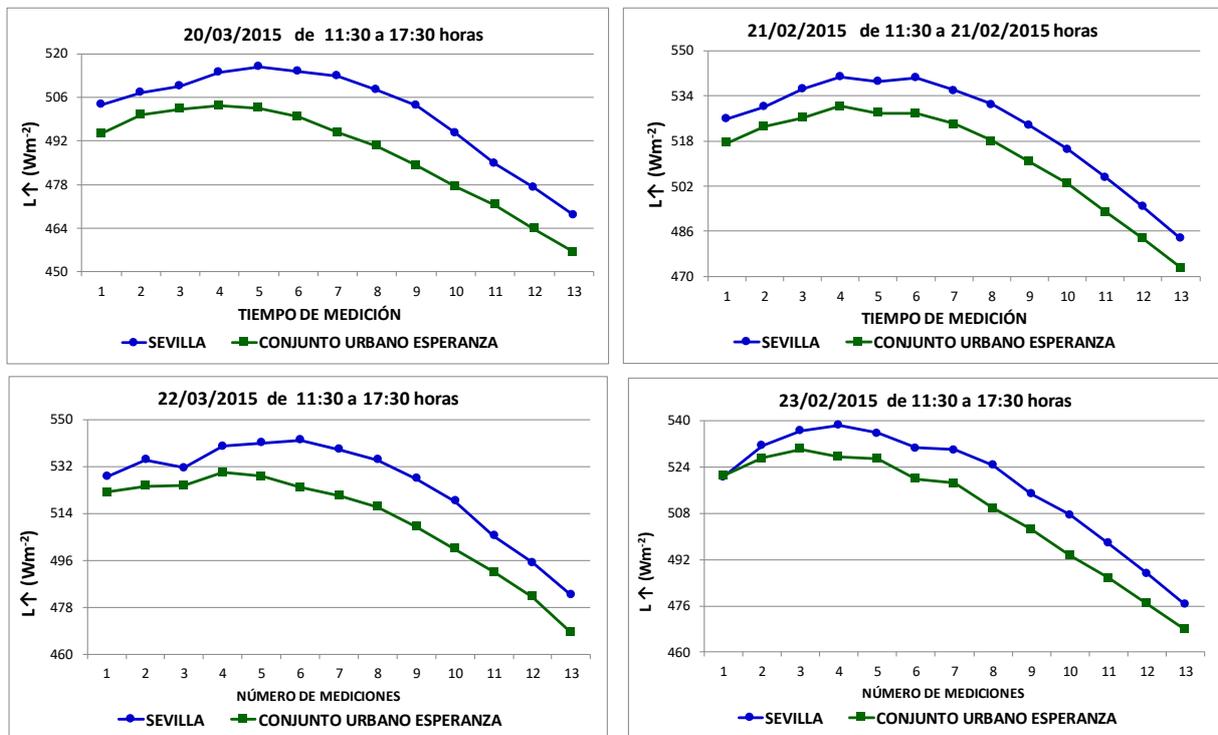


Figura 5.19 Comparativo de la componente $L\uparrow$ = Radiación infrarroja de onda larga que sale de la superficie, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza.

Se observa que en el fraccionamiento Sevilla la radiación infrarroja de onda larga saliente de la superficie ($L\uparrow$) es mayor que en la colonia Conjunto Urbano Esperanza.

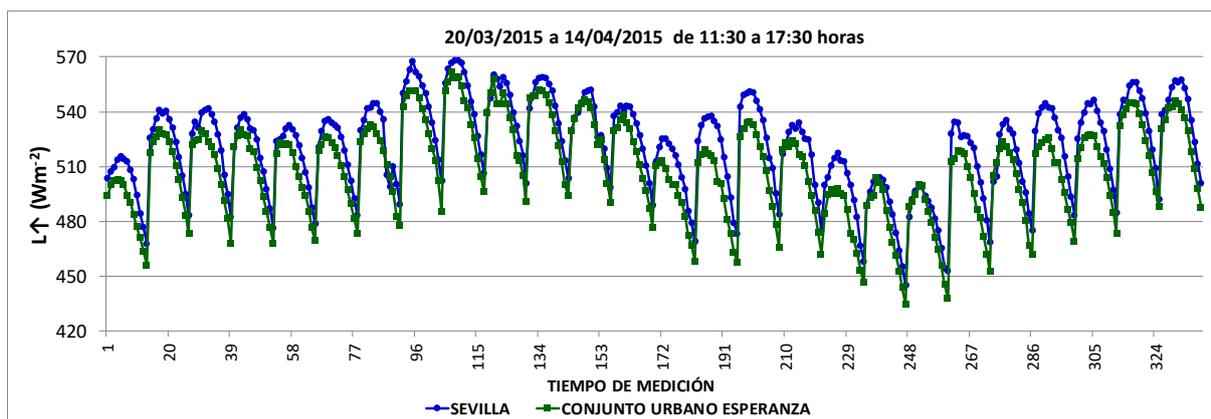


Figura 5.20 Comparativo de la componente $L\uparrow$ = Radiación infrarroja de onda larga que sale de la superficie durante el periodo diurno, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza.

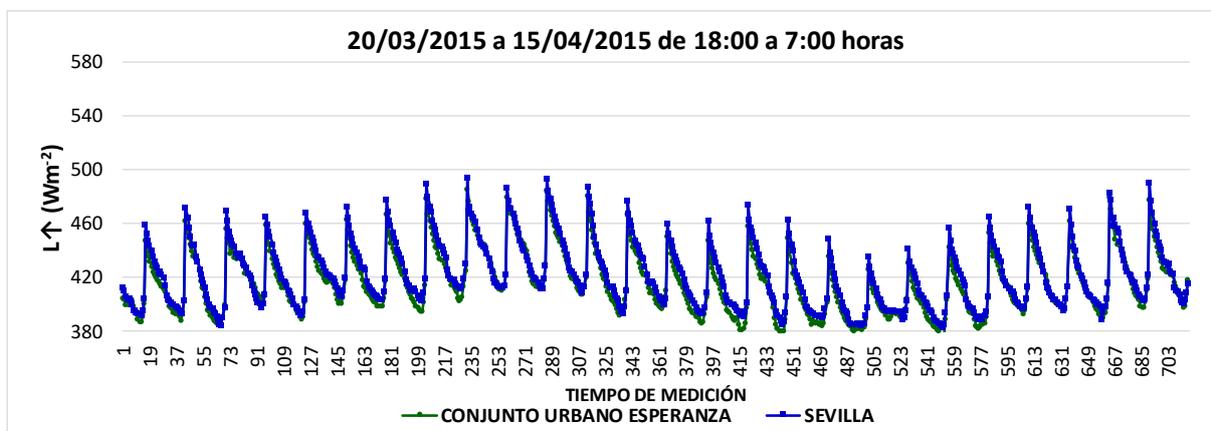


Figura 5.21 Comparativo de la componente $L\uparrow$ = Radiación infrarroja de onda larga que sale de la superficie durante el periodo nocturno, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza.

En las figuras 5.20 y 5.21 se observa para el periodo diurno en el fraccionamiento Sevilla la radiación infrarroja de onda larga que sale de la superficie ($L\uparrow$) es mayor con $L\uparrow=521.46$ Wm^{-2} que en Conjunto Urbano Esperanza (CUE) con $L\uparrow=509.41$ Wm^{-2} , de igual manera se comporta en el periodo nocturno con $L\uparrow=422.24$ Wm^{-2} para Sevilla residencial y $L\uparrow=416.68$ Wm^{-2} para CUE (Tabla 5.8).

Tabla 5.8 Promedios de $L\uparrow$ entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza durante los periodos diurno y nocturno.

$L\uparrow$ (Wm^{-2})	Diurno	Nocturno
Sevilla	521.47	422.25
CUE	509.42	416.69

5.2.3 Comparativo de Q^* neta, energía disponible como resultado del balance radiativo.

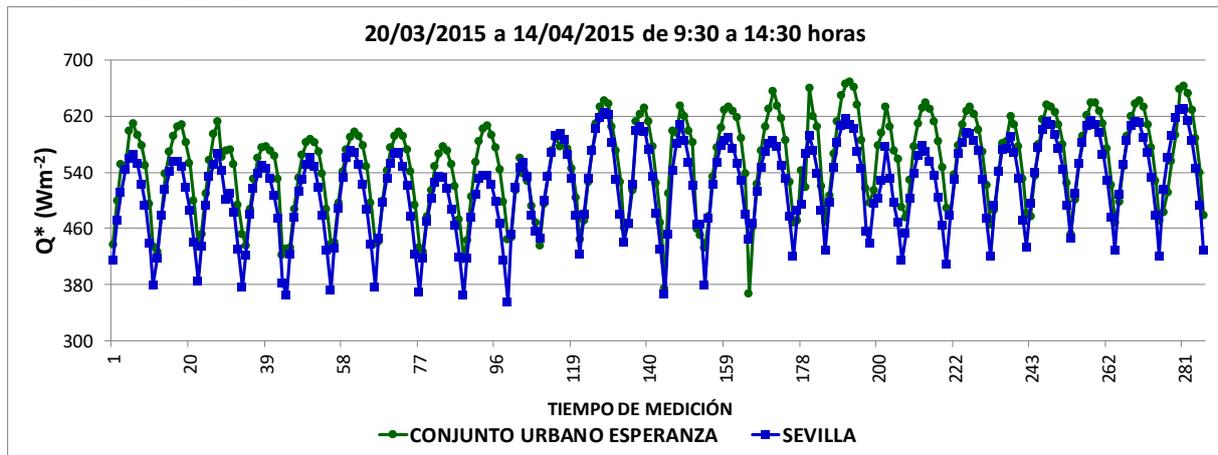


Figura 5.22 Comparativo de Q^* neta = Energía disponible como resultado del balance radiativo, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza en un periodo de 26 días.

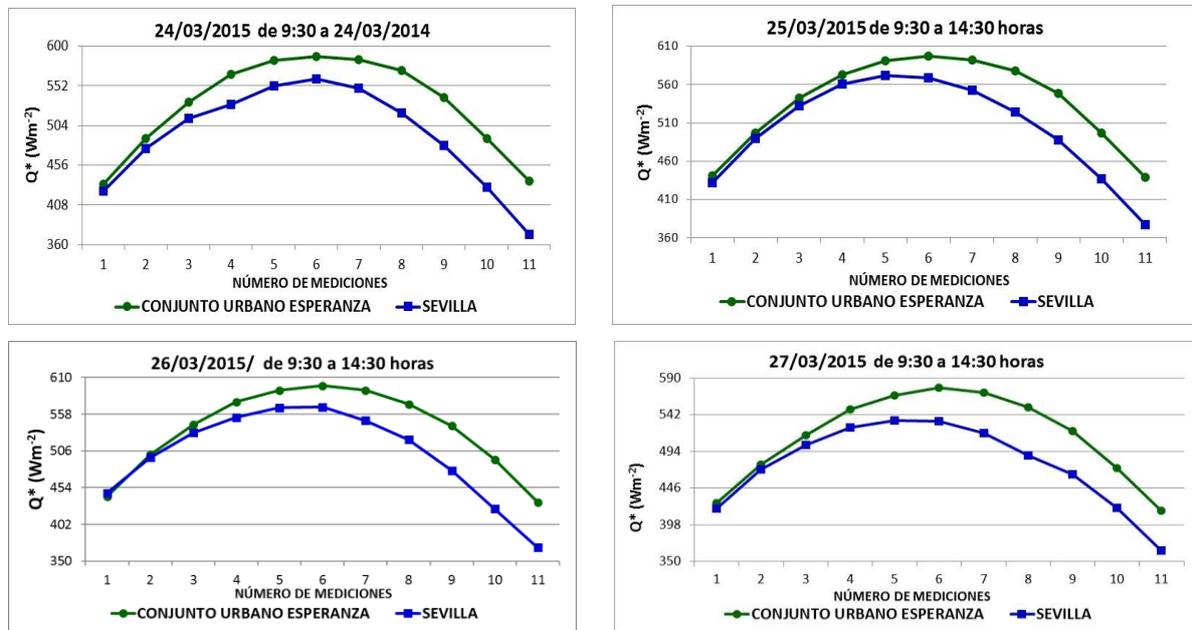


Figura 5.23 Comparativo de Q^* neta = Energía disponible como resultado del balance radiativo, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza.

La energía neta disponible (Q^*) es mayor en el Conjunto Urbano Esperanza.

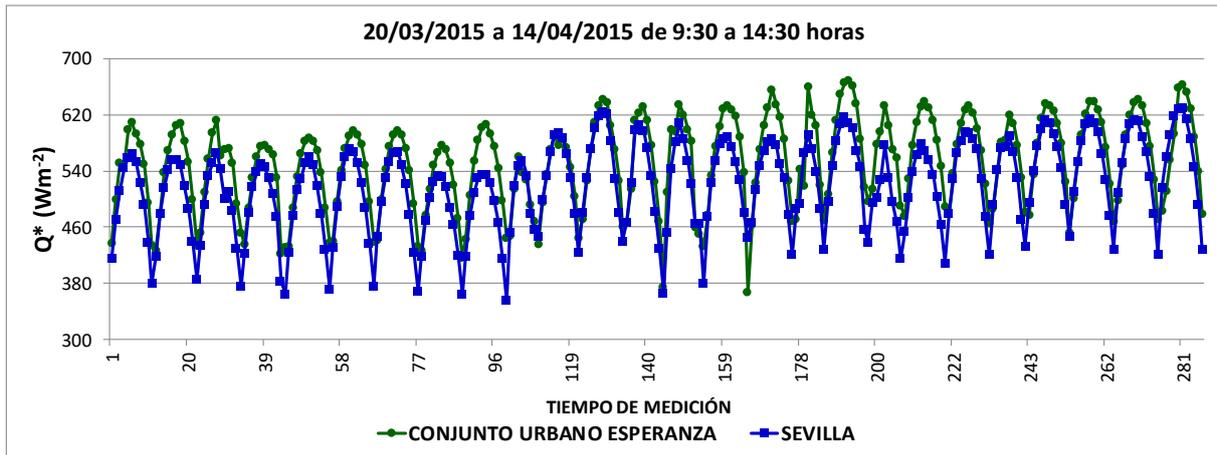


Figura 5.24 Comparativo de Q^* neta = Energía disponible como resultado del balance radiativo para el periodo diurno, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza.

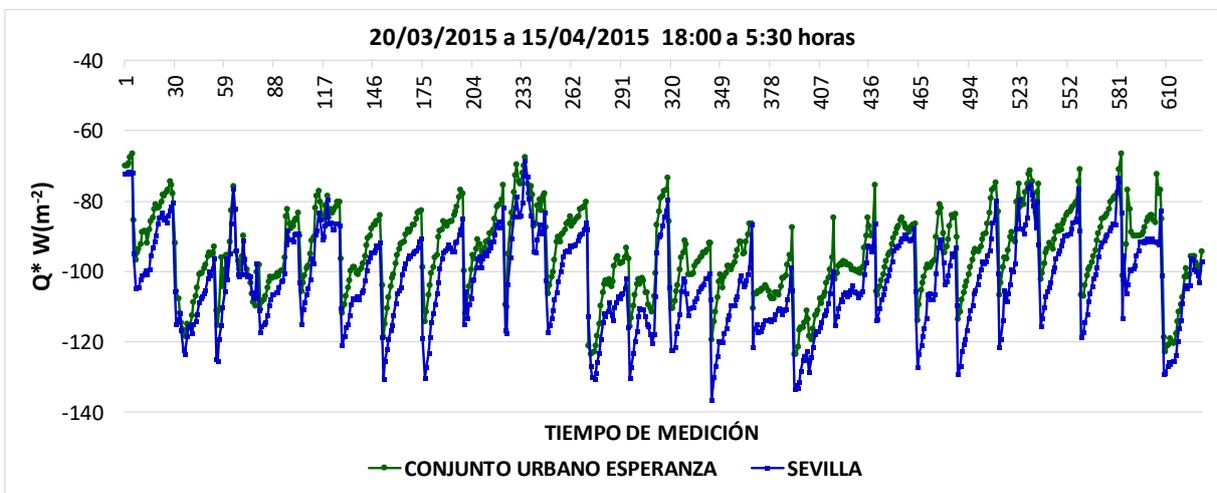


Figura 5.25 Comparativo de Q^* neta = Energía disponible como resultado del balance radiativo para el periodo nocturno, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza.

Se puede observar en las figuras 5.24 y 25 que Q^* es mayor en Conjunto Urbano Esperanza. Ya que en la tabla 5.9 se aprecia que la energía neta disponible (Q^*) para el periodo diurno es mayor en Conjunto Urbano Esperanza con $Q^* = 551.97 \text{ Wm}^{-2}$ que en el fraccionamiento Sevilla con $Q^* = 519.11 \text{ Wm}^{-2}$, de igual manera se comporta en el periodo nocturno para Sevilla con $Q^* = -102.75 \text{ Wm}^{-2}$, siendo menor en Conjunto Urbano Esperanza con $Q^* = -94.67 \text{ Wm}^{-2}$.

Tabla 5.9 Tabla comparativa de Q^* entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza durante los periodos diurno y nocturno.

Q^* (Wm^{-2})	Diurno	Nocturno
Sevilla	519.12	-102.75
CUE	551.98	-94.67

5.2.4 Comparativo de albedo entre Conjunto Urbano Esperanza y Sevilla.

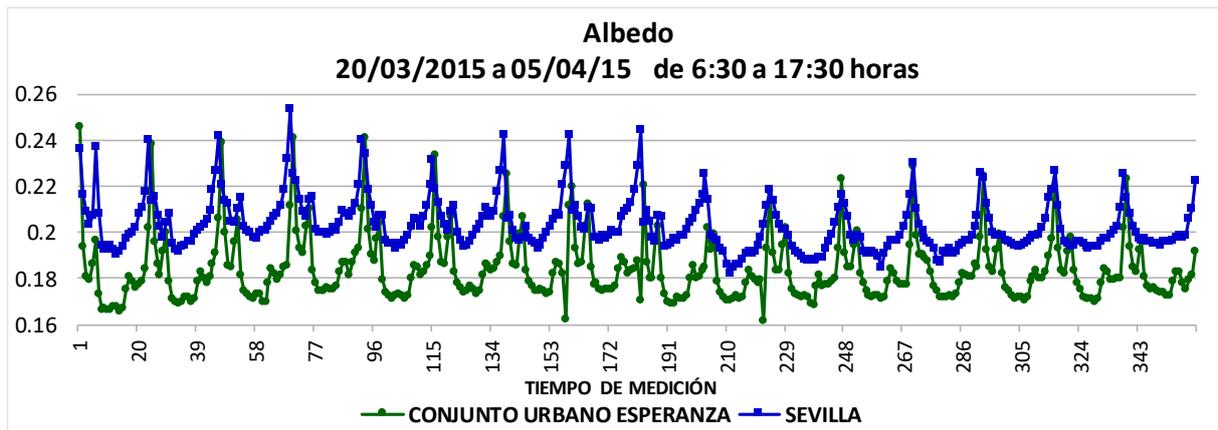


Figura 5.26 Comparativo de albedo, entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza.

En la figura 5.26 se observa claramente que el albedo es mayor para el fraccionamiento Sevilla, ya que en este es de 0.20 y en Conjunto Urbano Esperanza (CUE) es de 0.18 (Tabla 5.10).

Tabla 5.10 Tabla comparativa de albedo entre Sevilla y Conjunto Urbano Esperanza.

ALBEDO	
SEVILLA	CUE
0.203	0.184

Discusión de resultados.

De acuerdo a los resultados encontrados, enseguida se realiza una discusión de lo obtenido.

Para la segunda campaña en 2015 se observa para el fraccionamiento Sevilla que $K_{\uparrow} = 166.47 \text{ W/m}^2$, siendo menor en la colonia Conjunto Urbano Esperanza con $K_{\uparrow} = 150.20 \text{ W/m}^2$.

Aunque el fraccionamiento Sevilla presenta L_{\uparrow} mayor que en CUE, la principal componente que define la mayor diferencia en el balance es K_{\uparrow} , ya que ésta es marcadamente mayor para dicho fraccionamiento por sus techos reflectivos.

Estudios realizados demuestran cómo el uso de pavimentos con materiales de colores claros reducen el impacto al clima urbano debido a una disminución considerable de la temperatura de la superficie de entre 2° a 4°C e incluso hasta 7°C entre otras variaciones (Noro y Lazzarin, 2015; Yupeng Wang et al., 2015; Akbari y Matthews, 2012; M. Pomerantz, et al., 2000; Bretz et al., 1997; Synnefa et al., 2011). Sin embargo, esta es una opción que se considera no viable para la ciudad de Mexicali por el factor económico, además de que en algunos casos de estudio se consideraron colores poco comunes y resultaría aún más costoso llevarlo a cabo.

Por otra parte, se encontró un albedo mayor en Sevilla que en Conjunto Urbano Esperanza (Tabla 5.10). En estudios se ha documentado que se produce un cambio de albedo de las superficies mediante la aplicación de pintura blanca, a diferencia de los materiales oscuros que comúnmente se encuentran en los medios urbanos, ya que los techos blancos son más reflectivos que los techos oscuros (Erell et. al. 2014; Streutker 2003). En la colonia Conjunto Urbano Esperanza se observa un menor albedo lo cual coincide con la cuantificación de materiales que se realizó en la que se encontró un mayor porcentaje de techos oscuros en contraste con el fraccionamiento Sevilla (Tabla 5.12)

Por otra parte, se observa para el fraccionamiento Sevilla $L\uparrow=521.46 \text{ W/m}^2$ siendo mayor que en la colonia Conjunto Urbano Esperanza con $L\uparrow=509.41 \text{ W/m}^2$ (Tabla 5.11). Esta componente se analizó también para el periodo nocturno, cuyos resultados fueron para Sevilla $L\uparrow=422.24 \text{ W/m}^2$, siendo mayor que en la colonia Conjunto Urbano Esperanza con $L\uparrow=416.68 \text{ W/m}^2$. Se infiere que hay mayor calentamiento de las superficies en el fraccionamiento Sevilla (ley de Stefan-Boltzman), y eso es congruente con la cuantificación de superficies ya que se tienen más pavimentos, banquetas y no se cuenta con porciones de áreas verdes sobresalientes (Tabla 5.12),

En un estudio realizado en Suiza (Christen y Voogt, 2004), se encontró que la mayoría de los casos $L\uparrow$ es mayor en zonas con características propias de las zonas urbanas en las que gran parte de la superficie está cubierta con pavimentos, banquetas y donde no abunda la vegetación como es el caso del fraccionamiento Sevilla, ya que se encuentra ubicada al oriente de la ciudad que es precisamente hacia donde Mexicali ha ido extendiendo la mancha urbana.

Por otro lado, se observa para el fraccionamiento Sevilla $Q^*= 519.11 \text{ W/m}^2$ siendo menor que en la colonia Conjunto Urbano Esperanza con 551.97 W/m^2 . También se analizó para el periodo nocturno donde se encontró $Q^*=-102.75 \text{ W/m}^2$ para el fraccionamiento Sevilla, siendo mayor en la colonia Conjunto Urbano Esperanza con $Q^*=-94.67 \text{ W/m}^2$. (Tabla 5.11).

Acerca de Energía Neta Q^* existe un fuerte vínculo entre la presencia de terrenos baldíos, espacios sin construcción y techos oscuros con valores más altos para el Conjunto Urbano Esperanza que en el fraccionamiento Sevilla (Tabla 5.12).

La energía neta Q^* es la responsable de los procesos de evaporación, el calentamiento del aire y de calor acumulado en el suelo (O.O. Jegede et al., 2006). Además, se ha documentado

que el 80% de la Energía Neta se utiliza en dichos procesos (Pal S. Arya, 2001), lo que concuerda con la mayor presencia de espacios con suelo desnudo en la Colonia Conjunto Esperanza.

Tabla 5.11 Comparación de los resultados de las componentes entre Sevilla Residencial y Conjunto Urbano Esperanza (CUE).

	SEVILLA	CUE
K↑	166.47 Wm⁻²	150.20 Wm⁻²
L↑	521.46 Wm⁻²	509.41 Wm⁻²
Q*	519.11 Wm⁻²	551.97 Wm⁻²

Tabla 5.12 Comparación de porcentajes de materiales de cobertura en Sevilla Residencial y Conjunto Urbano Esperanza (CUE).

%	SEVILLA	CUE
Techos blancos	32.75 %	14.20 %
Techos oscuros	0.55 %	4.32 %
Pavimentos	24.67%	16.67 %
Banquetas	7.73 %	4.14 %
Baldíos	1.27 %	15.21 %
Áreas verdes	2.64%	2.54%

Esto es debido al rápido almacenamiento de la energía calorífica en la superficie del suelo durante el día, y de esta misma manera se libera durante la noche. Este análisis toma en cuenta las propiedades de albedo y emisividad del suelo desnudo y los materiales producto de la urbanización, que como se muestran en la tabla 3.1 el suelo desnudo presenta un bajo albedo y por lo tanto almacena gran cantidad de calor.

El flujo de energía Q* se exhibe mayor para el Conjunto Urbano Esperanza. Dadas las características climáticas de la región y la poca vegetación en ambos conjuntos habitacionales, es congruente pensar que esta energía disponible en su mayor parte será convertida en calor sensible, mismo que impactará a las temperaturas cercanas a la interface superficie-atmósfera a un incremento.

Este estudio permite catalogar al fraccionamiento Sevilla como un complejo habitacional con ventajas de infraestructura que resultan en un menor impacto al clima urbano.

5.3. Cuantificación de materiales de cobertura

Se llevó a cabo una cuantificación de materiales en Sevilla, Toledo Residencial y en la Colonia Conjunto Urbano Esperanza, con el propósito de definir los materiales que predominan en cada zona y así relacionarlo con la afectación al balance radiativo.

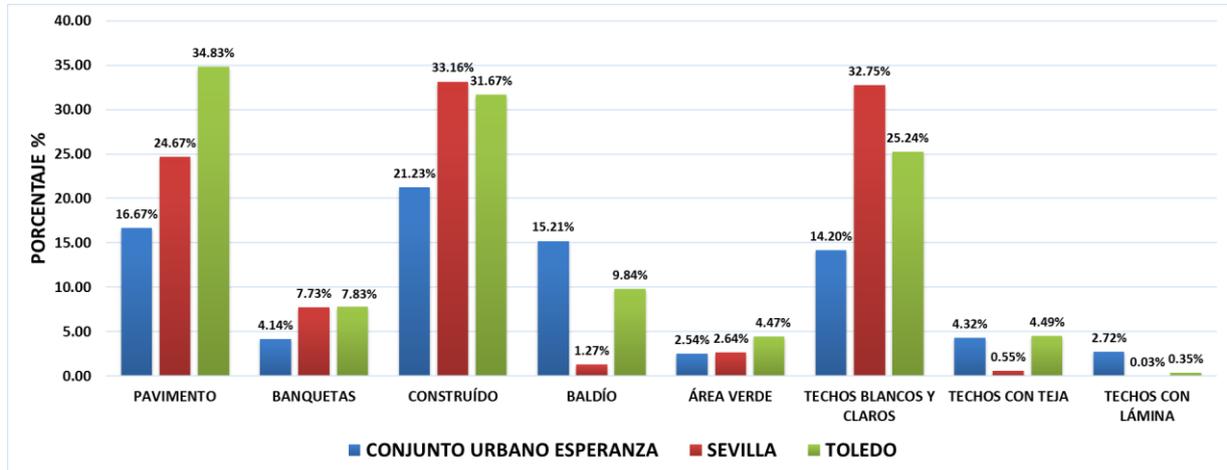


Figura 5.27 Cuantificación de materiales de cobertura en los Fraccionamientos Sevilla, Toledo Residencial y en la Colonia Conjunto Urbano Esperanza.

Como se observa en la figura 5.27, se encontró que en el fraccionamiento Toledo existe un mayor porcentaje de pavimento, banqueta, área verde y techos con teja, con respecto al resto de los complejos habitacionales.

En cuanto al fraccionamiento Sevilla, se observa que predominan los espacios construidos y los techos claros.

Por otra parte, en Conjunto Urbano Esperanza destaca la presencia de lotes baldíos y techos con lámina en contraste con ambos fraccionamientos.

Los resultados de esta investigación permitieron observar un **impacto cuantificable al balance radiativo** debido a los materiales utilizados para la edificación de la ciudad como lo mencionan diversos autores (Zhou W. et al., 2011; Grimmond et al., 2004a; Luyando, 2010; Arnfield, 2003; García Cueto et al., 2009; Jáuregui y Tejeda, 2004; Kanda et. al., 2002), que han realizado experimentos en otras ciudades, y que también consideran las componentes del balance radiativo entre otros elementos.

5.4 Prueba de diferencia de medias.

Tomando en cuenta que el valor teórico es $Z_{\text{tablas}} = 2.275$ de la distribución normal, se observa que en la campaña 1 (ver tabla 5.13), $K\uparrow$, $L\uparrow$ y el albedo, son significativamente diferentes, al nivel de confianza del 95%, mientras que Q^* no muestra diferencia estadísticamente significativa.

Para la campaña 2 (en la misma tabla), $K\uparrow$, $L\uparrow$, Q^* y el albedo son significativamente diferentes, al nivel de confianza del 95%.

Tabla 5.13 Resultados del análisis de diferencia de medias para ambas campañas; σ se refiere a la desviación estándar, n es el número de datos y Z el valor empírico obtenido a partir de la ecuación 9.

CAMPAÑA 1			CAMPAÑA 2		
$K\uparrow$	Sevilla (x)	Toledo (y)	$K\uparrow$	Sevilla (x)	CUE (y)
Promedio	141.77	136.26	Promedio	166.47	150.2
σ	325.17	298.6	σ	255.62	185.47
n	193	193	n	303	303
Z	3.064912014		Z	13.48482334	
$L\uparrow$	Sevilla (x)	Toledo (y)	$L\uparrow$	Sevilla (x)	CUE (y)
Promedio	513.56	519.42	Promedio	521.46	509.41
σ	617.29	656.43	σ	619.34	661.53
n	263	263	n	338	338
Z	-2.662799742		Z	6.190031657	
Q^*	Sevilla (x)	Toledo (y)	Q^*	Sevilla (x)	CUE (y)
Promedio	376.17	368.42	Promedio	519.11	551.97
σ	3467.1	3207.8	σ	4006.61	4114.59
n	185	185	n	272	272
Z	1.290224204		Z	-6.013702064	
Albedo	Sevilla (x)	Toledo (y)	Albedo	Sevilla (x)	CUE (y)
Promedio	0.23	0.22	Promedio	0.2	0.18
σ	0.0012	0.00086	σ	0.00018	0.00017
n	420	420	n	358	358
Z	4.515346002		Z	20.22728002	

Lo descrito anteriormente con respecto a la 1ra y 2da campaña de mediciones y la cuantificación de materiales de cobertura coincide con los resultados obtenidos en la prueba de diferencia de medias. Algunos autores documentan la importancia de realizar pruebas de este tipo para validar datos (Black, 1976; Johnson, 1980; Solís, 1997).

Mientras tanto para el periodo nocturno se observa que en la campaña 1 (ver tabla 5.14), $L\uparrow$ y Q^* , no muestra diferencia estadísticamente significativa.

Para la campaña 2 (ver tabla 5.14), $L\uparrow$ y Q^* son significativamente diferentes, al nivel de confianza del 95%.

Tabla 5.14 Resultados del análisis de diferencia de medias para ambas campañas de $L\uparrow$ y Q^* para el periodo nocturno; σ se refiere a la desviación estándar, n es el número de datos y Z es el valor empírico obtenido a partir de la ecuación 9.

CAMPAÑA 1			CAMPAÑA 2		
$L\uparrow$	Sevilla (x)	Toledo (y)	$L\uparrow$	Sevilla (x)	CUE (y)
Promedio	441.14687	443.04532	Promedio	416.68505	422.246591
σ	361.48262	388.21005	σ	518.515234	578.728525
n	483	483	n	717	717
Z	-1.523813053		Z	-4.495760329	
Q^*	Sevilla (x)	Toledo (y)	Q^*	Sevilla (x)	CUE (y)
Promedio	-87.877794	-88.96269	Promedio	-94.672422	-102.7511
σ	121.318635	143.78194	σ	139.579406	169.460277
n	516	516	n	630	630
Z	1.513588152		Z	11.5346249	

Debido a que en el fraccionamiento Toledo se cuentan con mayores proporciones de pavimentos y baldíos (Figura 5.27) se puede decir que se crea un equilibrio térmico durante la noche con respecto al fraccionamiento Sevilla, por la diferencia de proporciones en materiales.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones.

Las mediciones realizadas en este estudio son de gran importancia y un precedente que abre camino a considerar una base de datos más extensa, realizando más mediciones en distintas zonas de la ciudad, fraccionamientos de interés social con esquemas de construcción y ubicaciones distintas. Por lo cual resulta interesante estudiar el comportamiento de las componentes del balance en distintos puntos para que, teniendo una base de datos considerable, se pueda utilizar para conocer más a detalle la afectación de las mismas como se comprobó en esta investigación. Este caso los sitios de estudio fueron: fraccionamiento Sevilla Residencial, fraccionamiento Toledo Residencial para la primera campaña de mediciones y fraccionamiento Sevilla y colonia Conjunto Urbano Esperanza para la segunda campaña.

Por los resultados de esta investigación y lo analizado en el estado del arte, podemos decir que la afectación al balance radiativo, se atribuye al cambio de cobertura de suelo por distintos materiales empleados para urbanizar la ciudad. (Akbari ,2012; Yupeng Wang et. al., 2015; JR Simpson et. al., 1997; Hernández et. al., 2014; Bozonnet et al., 2011). Esto se logró al realizar mediciones de las componentes de radiación solar (onda corta) y terrestre (onda larga) en tres complejos habitacionales de la ciudad.

Durante el análisis del comportamiento del balance radiativo durante las campañas de mediciones se observaron notables diferencias en las componentes del balance radiativo ($K\uparrow$, $L\uparrow$, Q^*) y el albedo, las cuales fueron respaldadas con un análisis estadístico de diferencia de medias en el cual se comprobó que efectivamente esas diferencias son estadísticamente significativas. Posteriormente, y apoyado fuertemente con la cuantificación de materiales realizada en cada uno de los complejos habitacionales, se puede concluir que los contrastes observados en las componentes del balance radiativo, están ligadas fuertemente con los materiales de construcción empleados. Esto se comprobó al realizarse la comparación las proporciones de cobertura de suelo de cada una de las zonas de estudio con los resultados del balance.

Por otra parte, se realizó un análisis preliminar de propuestas de mitigación al balance radiativo mediante una exploración de estudios realizados anteriormente en diversas partes del

mundo, esto ligado con los resultados del balance radiativo se puede concluir que la estrategia de mitigación en la que se ha tenido un mejor resultado es en pintar los techos de colores claros.

6.2 Recomendaciones.

En base a los resultados obtenidos en el presente estudio y a la literatura analizada se recomienda que:

- Es necesario la adición de vegetación propia de la región, considerando el consumo de agua, el tiempo de crecimiento y realizando un estudio particular para identificar la flora adecuada y en qué proporciones sería necesaria, además considerar de igual manera el factor económico. (Villanueva et al., 2013; Gillner et al., 2015; Rodríguez y Mirtha, 2011; Gómez et al., 2010).
- Una opción factible económicamente y que va de acuerdo a la literatura y resultados de este estudio es pintar los techos de blanco, que influye además en un ahorro de energía eléctrica (Konopacki et al., 1997; Rossi et al., 2013; Romero et al., 2010).
- La recomendación anterior es factible tanto en viviendas, edificios y demás construcciones. (Akbari, 2012; Middel et al. 2014; Santamouris et al. 2008; Akbari, 2003).

7. REFERENCIAS.

Aida, M., Gotoh, K., 1982. Urban albedo as a function of the urban structure – a two dimensional numerical simulation. *Boundary Layer Meteorology* 23, 415–424.

Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H., (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70, 295–310.

Akbari, H., (2003). Measured energy savings from the application of reflective roofs in two small non-residential buildings. *Energy* 28 (9), 953–967.

Akbari H., Konopacki S. (2005). Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. *Energy Policy* 33:721–756

Akbari H. and Levinson R. (2008). Evolution of cool roof standards in the United States *Adv. Build. Energy Res.* 2 1–32.

Akbari, H., Menon, S., Rosenfeld, A., (2009). Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO₂. *Climatic Change* 95.

Akbari, H Damon Matthews and Donny Seto (2012). The long-term effect of increasing the albedo of urban areas. *Environmental Research Letters* 7 024004 (10pp).

Akbari, H., Matthews, H.D., (2012.) Global cooling updates: reflective roofs and pavements. *Energy Build.* 55, 2–6.

Alados I., Foyo-Moreno I., Olmo F.J., Alados-Arboledas L., (2003). Relationship between net radiation for semi-arid shrub-land. *Agricultural and Forest Meteorology* 116 221–227.

Anthoni P.M., Ley B.E., Unsworth M.H., Vong R.J., (2000). Variation of net radiation over heterogeneous surfaces: measurements and simulation in a juniper–sagebrush ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology* 102 (2000) 275–286.

Araujo Prado T.R., Lourenço Ferreira F. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings* 37 295–300.

Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology* 23: 1–26.

Arnfield A. J., (1975). A note on the diurnal, latitudinal and seasonal variation of surface reflection coefficient. *J. Appl. Meteorol.* 14, 1603-1608.

Arnfield, A., (1982). An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiation budgets of cities. *Phys. Geogr.* 3, 97–122.

Atlas De Mexicali. Álvarez, Ranfla, Toudert, Dorantes. 2001. Universidad Autónoma de Baja California, *Instituto de Investigaciones sociales*.

Aviña, M. L., Mendieta, V. S. C., Perea, A. A., Ruiz, C. R. G., (1983). Uso de suelo ciudad de Mexicali, Tesis Profesional de Arquitectura, Escuela de Arquitectura, UABC, Mexicali, México.

Baker, L., A. J. Brazel, N. Selover, C. Martin, N McIntyri, F. Steiner, A. Nelson y L. Musacchio. (2002). Urbanization and Warming of Phoenix (Arizona, USA): Impacts, Feedbacks and Mitigation. *Urban Ecosystems*, Vol. 6, 183-203.

Black F., (1976). The pricing of commodity contracts, *Journal of Financial Economics*, 3, 167-179.

Benita Y. Tam, William A. Gough, Tanzina Mohsin, (2015). The impact of urbanization and the urban heat island effect on day to day temperature variation. *Urban Climate* 12 1–10.

Berardi U., Ghaffarian Hoseini A.H., Ghaffarian Hoseini A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs, *Appl. Energy* 115 411–428.

Betts, A., Ball, J., Beljaars, A., Miller, M., Viterbo, P., (1996). The land surface–atmosphere interaction: a review based on observational and global modelling perspectives. *Journal of Geophysical Research*, 101, 7209–7225.

Bonan G.B. (2000). The microclimates of a suburban Colorado (USA) landscape and implications for planning and design. *Landscape and Urban Planning* 49: 97–114, DOI: 10.1016/S0169-2046(00)00071-2.

Bonan G. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate Benefits of forests. *Science* 320: 1444–1449. doi:10.1126/science.1155121

Bretz, S., Akbari, H., & Rosenfeld, A. (1997). Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. *Atmospheric Environment*, 32, 95–101.

Bridgman, H., R. Warner, and J. Dodson, (1995): *Urban Biophysical Environments*. Oxford *University Press*, 152 pp.

Budyko, M. I. (1969): The effects of solar radiation variations on the climate of the Earth, en *Tellus*, 21, págs. 611-619.

Camargo, B. A., García, C. R. O. (2012). Evaluación de dos Modelos de Reducción de Escala en la Generación de Escenarios de Cambio Climático en el Valle de Mexicali en México. *Inf. tecnol.* Vol.23, n.3, pp. 11-20. ISSN 0718-0764.

Campbell Scientific, Inc., 2011. Instruction Manual, NR01 Four-Component Net Radiation Sensor.

Canavos, G. C. (1988). Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y métodos, McGrall Hill 968-451-850-0 p. 278.

Cantat, O., (1989). Contribution a l' etude des variations du bilan d' energie en region parisienne'. PhD. *Thesis, University of Paris Sorbonne*, p. 362.

Carter, E. J. (1995). The potential of urban forestry in developing countries: a concept paper. Rome: *Forestry Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations*.

Casillas H. A., (2009). Climatología de la Isla Urbana de Calor en Mexicali, B.C. y su relación con el Uso de Suelo. *Tesis de Maestría, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, México*.

Casillas, H. A., García, C. R., González, N. F., Castro, J. R., Dávalos, E. (2011). Evolución de la Isla Urbana de Calor en Mexicali, BC., mediante una herramienta inteligente. *Congreso, Organización Mexicana de Meteorólogos A.C.*

Casillas, H. A., (2013). Desarrollo de un sistema experto para la localización geográfica y determinación de la intensidad de la isla urbana de calor en Mexicali, B. C. *Tesis doctoral, Instituto de Ingeniería, UABC*, 185 pp. México.

Casillas H. A., García C. R., Camacho, O., Gonzalez N. F. F., (2014). Detección de la Isla Urbana de Calor mediante Modelado Dinámico en Mexicali, BC, México. *Información tecnológica*, 25(1), 139-150.

Celis, J.E, Morales, J.R, Zaror, C.A, y Carvacho, O.F. (2007), Contaminación del Aire Atmosférico por Material Particulado en una Ciudad Intermedia: El Caso de Chillán (Chile). *Información tecnológica*,

18(3), 49-58.

Chandler, T.J. (1976). Urban Climatology and its relevance to urban design. Technical Note 149, *World Meteorological Organization, Geneva*, 61 pp.

Chen, X.-L., Zhao, H.-M., Li, P.-X., Yin, Z.-Y., (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sens. Environ.* 104, 133–146.

Chicas, M. J. C., (2012). Morfología urbana y clima urbano estudio de microclimas urbanos en Santiago de Chile, mediante la aplicación del concepto de cañón urbano e índices de confort térmico. *Santiago de Chile*. pp26.

Chow, Winston T. L., Dean Brennan, y Anthony J. Brazel. (2012). Urban Heat Island Research in Phoenix, Arizona: Theoretical Contributions and Policy Applications. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 517–530. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00011.1>

Christen A y R. Voogt, (2004). Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal Climatology* 24: 1395–1421.

Cleugh, H. A., and T. R. Oke, (1986): Suburban–rural energy balance comparisons in summer for Vancouver, B.C. *Bound.- Layer Meteor.*, 36, 351–369.

Comrie, Andrew C. (2000). Mapping a Wind–Modified Urban Heat Island in Tucson, Arizona (with Comments on Integrating Research and Undergraduate Learning). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 2417–2431.

Corona, E., Rojas. I., (2009). Calidad del aire y su incorporación en la planeación urbana: Mexicali, Baja California, México. *Estudios Fronterizos, UABC, Mexicali*, vol. 10, núm. 20, 79-102.

Correa, E.N., Flores, L. S., Lesino, G. (2003). Isla de calor urbana: efecto de los pavimentos. Informe de avance. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 7, Nº 2, 2003. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184

Coutts AM, Beringer J, Tapper NJ. (2007). Impact of increasing urban density on local climate: spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 46: 477–493, DOI: 10.1175/JAM2462.1.

Danny S. Parker, Stephen F. Barkaszi, Jr. (1997). Roof solar reflectance and cooling energy use: field research results from Florida. *Energy and Buildings* 25 105-115.

Deardorff, J.W. (1978). Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, 83, 1889–1903.

Deng C. y C. Wu, (2013). Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: A spectral unmixing and thermal mixing approach. *Remote Sensing of Environment*, 131, 262-274.

Dickinson, R., (1996). In: Gash, J., Nobre, C., Roberts, J., Victoria, R. (Eds.), *Amazonian Deforestation and Climate*. pp. 399–411.

Duchon C. E. and G. E. Wilk, (1994). Field comparison of direct and component measurements of net radiation under clear skies. *Journal of Applied Meteorology*. 33, 245-251.

E. Bozonnet, M. Doya, F. Allard. (2011). Cool roofs impact on building thermal response: A French case study. *Energy and Buildings*, 43 3006–3012.

Environmental Protection Agency. (2008). Reducing urban heat islands: Compendium of strategies. <http://www.epa.gov/heatisland/resources/compendium.htm>. Accessed 23April 2015.

Estrella, G., Ranfla, A. (1996). Demografía y economía de una capital estatal. *Estudios fronterizos*, 37,9-32.

EuropeAid, (2009). Climate change in latin America. European Commision-Development Cooperation in Latin America (Europe Aid), Belgium.

Feigenwinter C, Vogt R, Parlow E. (1999). Vertical structure of selected turbulence characteristics above an urban canopy. *Theoretical and Applied Climatology* 62: 51–63.

Foken T., (2008b). Micrometeorology. *Springer-Verlag, Berlin*, p. 320.

Foley J., De Fries R., Asner G., Barford C. (2005). Global consequences of land use. *Science* 309:570–574

García-Cueto O.R., Jáuregui, O.E., Toudert, D., and Tejeda, M.A. (2007). Detection of the urban heat island in Mexicali, B.C., Mexico and its relationship with land use. *Atmósfera* 20(2), 111-131.

García-Cueto R., Tejeda, Bojórquez, (2009a). Urbanization effects upon the air temperature in Mexicali, B. C., México *Atmósfera* 22: 349-365.

García-Cueto O.R., Tejeda Martínez A. Jáuregui Ostos, (2009b). Heat waves and heat days in an arid city in the northwest of México: current trend and in climate change scenarios. *International Journal of Biometeorol*, DOI 10.1007/s00484-009-0283-7. Published online: 12 December.

García-Cueto R. y N. Santillán, (2012). Modeling Extreme Climate Events: Two Case Studies in México, *Climate Models*, INTECH ISBN: 979-953-307-338-4.

García-Cueto O. R. G., Soto, N. S., Rincón, Z. H., & Benitez, S. O. (2013). El balance de radiación para diferentes superficies de suelo: estudio experimental en la ciudad de Mexicali, Baja California, México. *Congreso de la Organización Mexicana de Meteorólogos A.C.*

García-Cueto O. R., Santillán, S., Ojeda, B. S., (2015). El concreto se calienta: clima urbano. *La ciencia y el hombre*. No. 2, Vol. XXVIII, Mayo- Agosto, ISSN: 0187-8786.

García M. D. C. M. (1999). Climatología urbana. Volumen 160. *Edicions Universitat Barcelona*. pp.27.

García R.J., Pérez B.F., Rodríguez Q.J. (2005). Problemas resueltos de meteorología. *Universidad de Huelva*. www.gnu.org. pp3.

Gerald Mills, (2014). Urban climatology: History, status and prospects. School of Geography, *Planning & Environmental Policy*, UCD, Dublin, Ireland.

Gillner S., Vogt J., Tharang A., Dettmann S., Roloff A. (2015). Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites. *Landscape and Urban Planning* 143 33–42.

Giorgi F, Meleux F. (2007). Modeling the regional effects of climate on air quality. *Elsevier, ScienceDirect, C. R. Geoscience* 339, pp. 721-733.

Gómez M., Porta G., Fernández. (2010). Effect of tree shades in urban planning in hot-arid climatic regions. *Landscape and Urban Planning* 94 149–157.

González. P. (1994). Crecimiento industrial y riesgo urbano: caso de Mexicali, Baja California, *Estudios Fronterizos* (34):9-30.

Grimmond CSB, Oke TR. (1995). Comparison of heat fluxes from summertime observations in the suburbs of four north American cities. *Journal of Applied Meteorology* 34: 873–889.j.

Grimmond, C. S. B., C. Souch, and M. D. Hubble, (1996): Influence of tree cover on summertime surface energy balance fluxes, San Gabriel Valley, Los Angeles. *Climate Res.*, 6, 45–57.

Grimmond CSB, Oke TR. (1999). Heat storage in urban areas: local-scale observations and evaluation of a simple model. *Journal of Applied Meteorology* 38: 922–940.

Grimmond CSB, Oke TR. (2002). Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local-scale urban meteorological parametrization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology* 41: 792–810.

Grimmond CSB, Su HB, Offerle B, Crawford B, Scott S, Zhong S, Clements C (2004a) Variability of sensible heat fluxes in a suburban area of Oklahoma City. The joint between 8th symposium on integrated observing and assimilation systems in the atmosphere, oceans and land surface and the symposium on planning, nowcasting, and forecasting in the urban zone, Seattle, Washington, *American Meteorological Society*. <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/67542.pdf>. Accessed 15 Dec 2008.

Harrison, E.F., Minnis, P., Barkstrom, B.R., Ramanathan, V., Cess, R.D. and Gibson, G.G. (1998). Seasonal variation of cloud radiative forcing derived from the Earth Radiation Budget Experiment. *J. Geophys. Res.* **95**, 18687–18703.

Harman IN, Belcher SE. (2006). The surface energy balance and boundary layer over urban street canyons. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 132: 2749–2768, DOI: 10.1256/qj.05.185.

Hart MA, Sailor DJ. (2009). Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology* 95: 397–406, DOI: 10.1007/s00704-008-0017-5.

Hawkins, T. W., A. J. Brazel, W. L. Stefanov, W. Bigler, E. M. Saffell. (2004). The role of rural variability in urban heat island determination for Phoenix, Arizona. *J. Applied Meteorology*, 43, 476-486.

Heat Island Effect Glossary. (2009). *Environmental Protection Agency*.

Hebert Luke. (1986). *The Engineer's and Mechanica's Encyclopaedia* Vol. 2.

Hernández P., Álvarez G., Gilbert H., Xamán J., Chávez Y., Shah B. (2014). Thermal performance of a concrete cool roof under different climatic conditions of Mexico. *Energy Procedia*. 57 1753 – 1762.

Holtslag, A.A.M. and van Ulden, A.P. (1982). A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, p. 22, 517–529.

Hualou Long, Yongqiang Liu, Xuegang Hou, Tingting Li, Yurui Li, (2014). Effects of land use transitions due to rapid urbanization on ecosystem services: Implications for urban planning in the new developing area of China. *Habitat International*. p 537, 44 536e544.

Huang, Y. J., Akbari, H., Taha, H. G. (1990). The wind shielding and shading effects of trees on residential heating and cooling requirements. ASHRAE Transactions, American Society of Heating, Refrigeration and air conditioning Engineers, Atlanta, January.

Ichinose T, Shimodozno K, Hanaki K. (1999). Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment* 33:3897–3909.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010

Iqbal, M., (1983): An Introduction to Solar Radiation. Ontario: *Academic Press*, 390pp.

J. Otterman. Anthropogenic impact on the albedo of the earth. *Climate change*. June (1977), Volume 1, Issue 2, pp 137-155

Jáuregui E. y Tejeda-Martínez A. (2004). Cuatro décadas de climatología urbana en México. *Estudios de Arquitectura Bioclimática*, vol. VI: 163-178. UAM Iztapalapa y Editorial Limusa, México.

Jo, J.H., Carlson, J.D., Golden, J.S., Bryan, H., (2010). An integrated empirical and modeling methodology for analyzing solar reflective roof technologies on commercial buildings. *Building and Environment* 45 (2), 453–460.

Johnson, G. T., Oke, T. R., Lyons, T. J., Steyn, D. G., Watson, I. D., & Voogt, J. A. (1991). Simulation of surface urban heat islands under ‘ideal’ conditions at night. Part I: Theory and test against field data. *Boundary Layer Meteorology*, 56, 275–294.

J.R. Simpson, E.G. McPherson. (1997). The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona. *Energy and Buildings*, 25 127-I 37

Johnson D. H., (1980). The Comparison of Usage and Availability Measurements for Evaluating Resource Preference. *USGS Northern Prairie Wildlife Research Center*. Paper 198.

Kanda M., Moriwaki R., Roth M., Oke T.R. (2002). Area-averaged sensible heat flux and a new method to determine zero plane displacement length over an urban surface using scintillometry. *Boundary-Layer Meteorology* 105: 177–193.

Kikegawa Y, Genchi Y, Kondo H, Hanaki K. (2006). Impacts of cityblock-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a buildings energy-consumption for air-conditioning. *Applied Energy* 83: 649–668.

Kimura F, Takahashi S. (1991). The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: a numerical experiment. *Atmospheric Environment* 25B: 155–164.

Konopacki, S., Akbari, H. P., Gabersek, S., & Gartland, L. (1997). Cooling energy savings potential of light-colored roofs for residential and commercial buildings in 11 U.S. Metropolitan areas. Berkeley: *The Environmental Protection Agency*.

Kyle, T. G., (1991): Atmospheric Transmission, Emission and Scattering. Oxford: *Pergamon Press*, 288pp.

Lambin, E. F. y Strahler A. H. (1994): “Indicators of land-cover change for change vector analysis in multitemporal space at coarse spatial scales”, *International Journal of Remote Sensing*, 15, pp. 2099–2119.

Levinson R, Akbari H, Konopacki S and Bretz S (2005). Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements. *Energy Policy* 33 151–70

Leyva, C.O., (2012). Expansión urbana de la ciudad de Mexicali 1990-2005. Ranfla G. A., Ortega, V. L. M., *Procesos urbanos en Baja California: Análisis, planeación y sustentabilidad*. Pag.71, 73

Luyando López E., Tejeda Martínez A. (2010). Escenarios de bioclima humano en la megalópolis del centro de México ante cambio climático. *Asociación Española de Climatología, Clima, Ciudad y Ecosistemas*, Serie A, núm. 7. Madrid, España. ISBN: 978-84-7628-658-6.

Lynn, Barry H., Toby N. Carlson, Cynthia Rosenzweig, Richard Goldberg, Leonard Druyan, Jennifer Cox, Stuart Gaffin, Lily Parshall, y Kevin Civerolo. (2009). A Modification to the NOAA LSM to

Simulate Heat Mitigation Strategies in the New York City Metropolitan Area. *Journal Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 199–216.

M Pomerantz, B Pon, H Akbari, SC Chang. (2000). The Effect of Pavements' Temperatures On Air Temperatures in Large Cities. *LBNL Report-43442*.

Middel, A. Anthony J. Brazel, Patricia Gober, Soe W. Myint, Heejun Chang and Jiunn-Der Duh, (2012), Land cover, climate, and the summer surface energy balance in Phoenix, AZ, and Portland, OR. *International Journal of Climatology* 32: 2020–2032.

Middel, A., Chhetri, N., & Quay, R. (2014). Urban forestry and cool roofs: assessment of heat mitigation strategies in Phoenix residential neighborhoods. *Urban Forestry and Urban Greening*, 14(1), 178–186.

Millward, A.A., S. Sabir, S. (2011). Benefits of a forested urban park: what is the value of Allan Gardens to the city of Toronto, Canada? *Landsc. Urban Plan.* 100 (3) 177–188.

Mirza, M., (2003). Climate change and extreme weather events: Can developing countries adapt? *Climate Policy* 3:233_248.

Monteith, J.L., Unsworth, M.H., (1990). Principles of Environmental Physics. Edward Arnold, *Hodder Headline PLC, London*.

Muritala A. Ayola, Lukman A. Sunmonu, Muniru I. Bashiro, Oluwagbemiga O. Jegede. (2014), Measurements of net all-wave radiation at a tropical location, Ile-Ife, Nigeria. *Atmósfera* 27(3), 305-315.

Ng E., Chen L., Wang Y., Yuan C. (2012). A study on the cooling effects of greening in a high-density city: an experience from Hong Kong, *Build. Environ.* 47 256–271.

Nielsen, L.B., Prahm, L.P., Berkowicz, R. and Conradsen, K. (1981). Net incoming radiation estimated from hourly global radiation and/or cloud observations. *J. Climat.*, 1, 255–272.

Nishizawa, T. (1958). The influence of buildings on urban temperature. Miscell, Rep. *Res.Inst.Nat. Resour.*, 48, pp. 40-47.

Noro, M., Lazzarin, R. (2015). Urban heat island in Padua, Italy: Simulation analysis and mitigation strategies. *Urban Climate*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2015.04.004>

Northridge, M. E., & Sclar, E. (2003). A joint urban planning and public health framework: contributions to health impact assessment. *American Journal of Public Health*, 93(1), 118–121. Oke, T. R., (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 7(8), 769–779.

Oke, T.R., (1978). *Boundary Layer Climates*, second ed. Wiley and Sons.

Oke T.R., (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108, pp. 1 -24.

Oke, T.R., (1987). *Boundary Layer Climates*. Routledge, p. 12, 435.

Oke T.R., G.T. Johnson, D. G. Steyn and I.D. Watson, (1991). Simulation of Surface urban heat islands under ideal conditions at night, part 2: diagnosis of causation. *Bound. Lay. Meteorol.* 56, 339-358.

Oke, T.R., Zeuner, G., Jauregui, E., (1992). The surface energy balance in Mexico City. *Atmospheric Environment* 26B, 433-444.

Oke, T. R. (1995). The heat island of the urban boundary layer: Characteristics, causes and effects. In J. E. Cermak (Ed.), *Wind climate in cities* (pp. 81–107). Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Oke, T.R., R.A. Spronken-Smith, E. Jáuregui, C.S.B. Grimmond. (1999): The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmospheric Environment* 33, 3919-3930.

Oliveira S., Andrade H., Vaz T. 2011. The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment* 46 2186-2194.

O.O. Jegede. (1997). Diurnal Variations of Net Radiation at a Tropical Station - Osu; Nigeria, *Theor. Appl. Climatol.* 58, 161-168.

O.O. Jegede. (2003). A note on net radiation at Osu, Nigeria. *Meteorologische Zeitschrift*, 12(5), 269-271.

O. O. Jegede, E. O. Ogolo and T. O. Aregbesola, (2006), Estimating net radiation using routine meteorological data at a tropical location in Nigeria. *International Journal of Sustainable Energy* Vol. 25, No. 2, June 2006, 107–115.

Pal S. Arya. (2001). Introduction to micrometeorology. Second Edition. *International Geophysics series, volume 79*.0-12-059354-8 p. 47

Papadopoulos, A.M. (2001). The influence of street canyons on the cooling loads and the performance of air conditioning systems, *Energy Build.* 33 601–607.

Pearlmutter D., Berliner P. y Shaviv E. (2006). Current research and challenges in urban climate research in arid regions. Plenary address in: Grimmond S. and Lindqvist S. (Eds.) Proceedings of ICUC6 - 6th *International Conference on Urban Climate*. Goteborg, Suecia, 12 al 16 Junio, 28-31.

Pearlmutter D, Krüger EL, Berliner P. (2009). The role of evaporation in the energy balance of an open-air scaled urban surface. *International Journal of Climatology* 29: 911–920, DOI: 10.1002/joc.1752.

Pena-Salmon C. A. y Rojas-Caldelas R. I., Methodology for planning urban green areas: the case of Mexicali, Baja California, México. *Sustainable Development and Planning IV*, Vol. 1 (33) DOI:10.2495/SDP090041 (2009).

Pielke, R. A., & Avissar, R. (1990). Influence of landscape structure on local and regional climate. *Landscape Ecology*, 4, 133–155.

Population Reference Bureau, cited (2003): Demographic data and estimates for the countries and regions of the world. [2003 data no longer online; 2006 data are available online at <http://www.prb.org/pdf06/06WorldDataSheet.pdf>.

Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Mexicali, B.C. 2010

Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Mexicali, B.C. 2025

Racine Tadeu Araújo Prado, Fabiana Lourenço Ferreira (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the Surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings* 37 295–300.

Ramanathan, V., Cess, R.D., Harrison, E.F., Minnis, P. and Barkstrom, B.R. (1989). Cloud-radiative forcing and climate: Insights from the Earth Radiation Budget Experiment. *Science*, 243, 57–63.

Ramírez-Rembao, M., Rojas, R.I., y García-Cueto, R., (2009). Influencia de los Contaminantes Atmosféricos en las Infecciones Respiratorias Agudas en Mexicali-Baja California, México. *Información tecnológica*, 20(3), 89-100.

Ramos G. José M., (2011). Gestión estratégica ambiental del aire en la frontera Mexicali-Imperial. *Estudios Fronterizos*, UABC, Mexicali. Vol. 12, Núm. 24, 35-73.

Reyes Coca, S. (2001). In Sergio Reyes Coca (Eds.), *Introducción a meteorología*. Universidad Autónoma de Baja California. (ID: 4236).

Rodríguez Laredo y Daisy Mirtha. (2011). La gestión del verde urbano como un criterio de mitigación y adaptación al cambio climático. *Investig@ UMSA*. Vol. 2(1), 55-70.

Romero H., M. Salgado y P. Smith, (2010). Cambios climáticos y climas urbanos: Relaciones entre zonas termales y condiciones socioeconómicas de la población de Santiago de Chile. *Revista INVI*, 25(70), 151-179.

Rossi, F., Cotana, F., Filipponi, M., Nicolini, A., Menon, S., Rosenfeld, A., (2013). Cool roofs as a strategy to tackle global warming: economical and technical opportunities. *Adv. Build. Energy Res.* 7 (2), 254–268.

Rotach, M.W. (1999). On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion. *Atmospheric Environment* 33: 4001–4008.

Rotach MW. (2002). The siting, choice, and operation of surface instrumentation in urban areas. In *Surface Energy Balance in Urban areas. Cost Action 715. Extended Abstracts of an Expert Meeting, Antwerp, Belgium, April 2000, EUR 19447, European Commission.*

Roth M. (2007). Review of urban climate research in subtropical regions. *International Journal of Climatology* 27: 1859–1873, DOI: 10.1002/joc.1591.

Santamouris, M. (2001). *Energy and climate in the urban built environment*. New York, NY: Routledge.

Santamouris, M., Synnefa, A., Kolokotsa, D., Dimitriou, V., Apostolakis, K., (2008). Passive Cooling of the built environment—use of innovative reflective materials to fight heat island and decrease cooling needs. *International Journal Low Carbon Technologies* 3 (2), 71–82.

Santamouris M., Synnefa A., Karlessi T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar energy* 3085–3102.

Santamouris, M. (2013). Cooling the cities – a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Sol. Energy* 103, 682–703.

Santana L.M., L.A. Escobar y P.A. Capote, (2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite, *Revista de geografía Norte Grande*, (45), 77-95.

Sailor, D.J. (2011). A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment, *Int. J. Climatol.* 31 (2) 189–199.

Schmid, H. A. Cleugh, C. S. B. Grimmond, and T. R. Oke, (1991): Spatial variability of energy fluxes in suburban terrain. *Bound.-Layer Meteor.*, 54, 249–276.

Scherba, A., Sailor, D., Rosenstiel, T., & Wamser, C. (2011). Modeling impacts of roof reflectivity, integrated panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment. *Building and Environment*, 2542–2551.

Secretaría de Protección al Ambiente del Estado de Baja California (SPA). *Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Estado de Baja California 2007*. Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente.

Shitara, H., (1957). Effects of buildings upon the winter temperatures in Hiroshima City. *Geographical Review of Japan*, 30, pp.468-482

Smith G. L. and D. A. Rutan, (2003). The diurnal cycle of outgoing longwave radiation from earth radiation budget experiment measurements. *J. Atmos. Sci.* 60, 1529-1542.

Sproul, J., Wan, M. P., Mandel, B., & Rosenfield, A. (2014). Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States. *Energy and Buildings*, 71, 20–27.

Stewart, I. D., (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31, 200–217.

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879–1900.

Stone B., Norman J.M. (2006). Land use planning and surface heat island formation: a parcel-based radiation flux approach. *Atmospheric Environment* 40: 3561–3573, DOI: 10.1016/j.atmosenv.01.015.

Stone, B., Jr. (2012). *The city and the coming climate: Climate change in the places we live*. New York, NY: Cambridge University Press.

Streutker, D. R. (2003). Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sensing of the Environment*, 85, 282–289.

Synnefa A., Karlessi T., Gaitani N., Santamouris M., Assimakopoulos D.N., Papakatsikas C. (2011). Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. *Building and Environment* 46 38e44.

Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25, 99–103.

Takahashi, M. (1959). Relation between the air temperature distribution and the density of houses in small cities of Japan. *Geographical Review of Japan*, 32, pp. 305-313.

Takashi Asaeda, Vu Thanh Ca, Akio Wake. (1996). Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment* Vol. 30, No. 3, pp. 413-427.

Tejeda M.A., García C.O.R., Aquino M.L.P., (2010). Bases para la modelación del campo térmico y el balance de energía en una ciudad mexicana del desierto: Mexicali. *Clima, Ciudad y Ecosistemas, Asociación Española de Climatología (AEC), Serie A, Núm. 7, 565-573.*

Tiziana Susca, (2012). Enhancement of life cycle assessment (LCA) methodology to include the effect of surface albedo on climate change: Comparing black and white roofs. *Environmental Pollution* 163 48e54.

Villanueva S.J., A. Ranfla y M.A. Quintanilla. (2013). Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo, *Información tecnológica*, 24(1)

Vitousek, P. M. (1994): “Beyond Global Warming: Ecology and Global Change”, *Ecology*, 75, pp. 1861–1876.

Viudez-Mora A., (2011). Atmospheric downwelling longwave radiation at the surface during cloudless

and overcast conditions: Measurements and modeling. Ph.D. *thesis. Universitat de Girona, Spain.*

Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86, 370–384.

Wang X.Q., Gong Y.B., (2010). The impact of an urban dry island on the summer heat wave and sultry weather in Beijing City. *Chin. Sci. Bull.* 55: 1657-1661.

Watson, R. T.; Noble, I. R.; Ravindranath, N. H.; Verardo, D. J. y Dokken, D. J. (2000): “Special report on land use, land-use change and forestry”. *Intergovernmental Panel on Climate Change.*

Wilson K, Goldstein A, Falge E, Aubinet M, Baldocchi D, Berbigier P, Bernhofer C, Ceulemans R, Dolman H, Field C, Grelle A, Ibrom A, Law BE, Kowalski A, Meyers T, Moncrieff J, Monson R, Oechel W, Tenhunen J, Valentini R, Verma S. (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113: 223–243.

Yaghoobian, N., & Kleissl, J. (2012). Effect of reflective pavements on building energy use. *Urban Climate*, 2, 25–42.

Yang F, Lau SSY, Qian F., (2010). Summertime heat island intensities in three high-rise housing quarters in inner-city Shanghai China: building layout, density and greenery. *Build Environ*; 45:115-34.

Yaoping C., Jiyuan L., Yunfeng H., Junbang W. & Wenhui K., (2012). Modeling the radiation balance of different urban underlying surfaces. *Chin. Sci. Bull.* 57: 1046-1054.

Yupeng Wang, Umberto Berardi, Hashem Akbari. (2015). Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada, *Energy Buildings*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>

Zhou W., Huang G., Cadenasso M. (2011). Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning* 102, 54–63.

ANEXOS

ANEXO 1. Registro de recorrido por calle Toledo lado norte.

CALLE TOLEDO							
NORTE							
LOTE	1 piso	2 pisos	Baldío	# Árb	Sin Banq	Techo teja	Techo lámina
1		X		1			
2			X				
3		X					
4			X				
5		X					
6		X		1			
7		X					
8			X				
9		X					
10	X	COLEGIO		2			
11	X			1			
12	X						
13			X				
14		X					
15			X				
16	X						
17		X					
18			X				
19	X			1			
20	X			2			
21			X	2			
22			X				
23			X				
24			X				
25							
26							
27							
28							
29							
30							
TOTAL	6	8	10	10	4		

ANEXO 2. Registro de recorrido por calle Toledo lado sur.

CALLE TOLEDO							
SUR							
LOTE	1 piso	2 pisos	Baldío	# Árb	Sin Banq	Techo teja	Techo lámina
1	X	CLINICA HERNIAS					
2	X						
3		X					
4	X						
5	X			2			
6	X	ABARROTOS					
7		X					
8			X				
9		X	TALLER				
10			X				
11			X				
12			X				
13		X		1			
14	X			1			
15	X			2			
16	X			1 PALM			
17	X			2			
18	X			ZAC			
19		X					
20	X						
21	X						
22			X				
23	X						
24	X						
25							
26							
27							
28							
29							
30							
TOTAL	14	5	5	9	6	3	9

ANEXO 3. Registro de recorrido por calle Pamplona lado norte.

CALLE PAMPLONA							
NORTE							
LOTE	1 piso	2 pisos	Baldío	# Árb	Sin Banq	Techo teja	Techo lámina
1		X					
2		X		4			
3			X				
4			X				
5			X				
6	X			2			
7		X					
8			X				
9		X					
10			X				
11			X				
12	X			2			
13	X						
14	X						
15	X						
16	X						
17	X			3			
18		X		1			
19	X						
20	X						
21	X			2	PALMAS		
22	X						
23		X	TALLER				
24		X	TALLER				
25							
26							
27							
28							
29							
30							
TOTAL	11	7	6	14	5	3	3

ANEXO 4. Registro de recorrido por calle Pamplona lado sur.

CALLE PAMPLONA							
SUR							
LOTE	1 piso	2 pisos	Baldío	# Árb	Sin Banq	Techo teja	Techo lámina
1	X	TORTILLERÍA					
2	X			2			
3	X						
4	X						
5	X						
6		X					
7	X			2			
8	X						
9	X			5			
10	X						
11	X			1			
12		X					
13		X					
14			X				
15	X						
16	X	COLEGIO					
17	X			2			
18	X						
19	X			3			
20		X					
21	X	VEGETACIÓN					
22	X			2			
23		X					
24	X						
25							
26							
27							
28							
29							
30							
TOTAL	18	5	1	17	3	2	3

ANEXO 5. Registro de recorrido por calle Gerona lado norte.

CALLE GERONA							
NORTE							
LOTE	1 piso	2 pisos	Baldío	# Árb	Sin Banq	Techo teja	Techo lámina
1	X			3			
2	X			3			
3	X						
4		X		1			
5	X						
6		X					
7	X						
8	X						
9	X			4			
10		X					
11	X						
12	X			2			
13		X					
14		X					
15	X			4			
16	X			7			
17	X						
18	X						
19	X			5			
20	X						
21			X				
22	X						
23	X						
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
TOTAL	17	5	1	29	0	4	1

ANEXO 6. Registro de recorrido por calle Gerona lado sur.

GERONA							
SUR							
LOTE	1 piso	2 pisos	Baldío	# Árb	Sin Banq	Techo teja	Techo lámina
1			X				
2			X				
3	X			3			
4			X				
5		X					
6		X					
7	X			3			
8	X						
9	X						
10	X			3			
11	X						
12	X						
13		X					
14			X	9			
15	X						
16		X					
17	X			3			
18	X			2			
19	X			1			
20	X			3			
21	X						
22	X						
23			X				
24		X					
25							
26							
27							
28							
29							
30							
TOTAL	14	5	5	27	4.5	1	7

ANEXO 7. Registro de recorrido por calle Cáceres lado norte.

CALLE CÁCERES							
NORTE							
LOTE	1 piso	2 pisos	Baldío	# Árb	Sin Banq	Techo teja	Techo lámina
1		X	PANADERÍA				
2		X		3			
3	X			2			
4	X			2			
5	X			3			
6		X					
7	X			3			
8	X						
9	X			3			
10	X						
11	X						
12	X						
13	X			2			
14	EN CONTRUCCIÓN		X				
15			X				
16	X						
17	X			2			
18	X			2			
19	X			5			
20	X						
21	X						
22	X						
23	X			1			
24		X					
25		X					
26		X					
27							
28							
29							
30							
TOTAL	18	6	2	28	2	3	8

ANEXO 8. Registro de recorrido por calle Cáceres lado sur.

CALLE CÁCERES							
SUR							
LOTE	1 piso	2 pisos	Baldío	# Árb	Sin Banq	Techo teja	Techo lámina
1	X	GASOLINERA Y OXXO					
2	X						
3	X						
4		X		4			
5			X				
6	X						
7	X						
8			X				
9			X				
10			X				
11			X				
12		X					
13		X					
14	X						
15	X						
16	X						
17			X	1			
18			X				
19	X						
20			X				
21		X					
22		X					
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
TOTAL	9	5	8	5	8	1	1

ANEXO 9. Registro de recorrido por calle Burgos lado norte.

CALLE BURGOS							
NORTE							
LOTE	1 piso	2 pisos	Baldío	# Árb	Sin Banq	Techo teja	Techo lámina
1	X						
2		X	TALLER				
3		X	TALLER				
4			X				
5	X	LAURELES					
6			X				
7		X					
8	X						
9		X		3			
10	X			1			
11		X		2			
12	X			2			
13	X						
14	X			1			
15	X						
16	X			2			
17	X						
18	X			2			
19			X				
20	X			1			
21	X						
22	X	AUTOSERVICIO					
23	X			2			
24	X						
25	X	TALLER					
26							
27							
28							
29							
30							
TOTAL	17	5	3	16	3	3	7

ANEXO 10. Registro de recorrido por calle Burgos lado sur.

CALLE BURGOS							
SUR							
LOTE	1 piso	2 pisos	Baldío	# Árb	Sin Banq	Techo teja	Techo lámina
1	X			2			
2	X						
3		X		2			
4	X			1			
5		X					
6	X						
7			X				
8	X			3			
9	X						
10	X						
11	X			2			
12	X						
13		X		2			
14	X						
15	X						
16	X			3			
17	X						
18		X		2			
19	X			1			
20			X				
21		X		1			
22	EN CONSTRUCCIÓN		X				
23	X			1			
24	X						
25			X				
26							
27							
28							
29							
30							
TOTAL	16	5	4	20	6.5	5	3