

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“Balance de energía en la interfaz atmósfera-suelo sobre coberturas urbanas en Mexicali, B.C.”

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA
PRESENTA

Zalia Patricia Haro Rincón

DIRECTOR

Dr. Néstor Santillán Soto

CODIRECTOR

Dr. Onofre Rafael García Cueto

Índice

1	Introducción	1
1.1	Planteamiento del problema	3
1.2	Hipótesis	4
1.3	Justificación	4
1.4	Objetivo general	5
1.5	Objetivos específicos	5
2	Marco conceptual	7
2.1	Climatología urbana	8
2.1.1	Escalas de la climatología urbana	9
2.1.2	Capa de dosel urbano	10
2.1.3	Comportamiento del viento e insolación en los entornos urbanos	12
2.2	Balance energético atmosférico ideal	13
2.2.1	Balance energético atmósfera-ciudad	13
2.3	Cobertura de suelo y sus propiedades térmicas	14
2.4	Mexicali	17
2.4.1	El clima de la ciudad de Mexicali, B.C.	18
2.4.2	Rosa de vientos a meso-escala	20
2.4.3	Suelo nativo: vertisoles	23
2.4.4	Usos de suelo	23
2.5	Coberturas comunes de la ciudad de Mexicali	24
2.5.1	Asfalto	24
2.5.2	Concreto	24
2.5.3	Suelo nativo (arcilloso)	25
2.5.4	Césped	26
2.6	Instrumentos de medición	27
2.6.1	Piranómetros y solarímetros	27
2.6.2	Pirgeómetros	29
2.6.3	Sensor NR01 (cuatro componentes de radiación neta)	30
3	Materiales y métodos	34
3.1	Arreglo experimental	34
3.2	Equipo	36
3.3	Materiales	37
3.4	Modelo propuesto	37
3.5	Rosa de los vientos	38
3.5.1	WRPLOT View	39
4	Resultados	41
4.1	Resultados campaña verano 2011, 2012	41
4.1.1	Comportamiento de Temperatura Superficial	45
4.1.2	Comportamiento de Albedo	46
4.1.3	Resumen de la campaña de verano 2011,2012	48
4.2	Resultados de la campaña de invierno 2012, 2013	48
4.2.1	Comportamiento de Temperatura Superficial	53
4.2.2	Comportamiento de Albedo	53
4.2.3	Resumen de la campaña de invierno 2012,2013	54
4.3	Resultados de la campaña de primavera 2012, 2013	54
4.3.1	Comportamiento de Temperatura Superficial	58
4.3.2	Comportamiento de Albedo	59

4.3.3 Resumen de la campaña de primavera 2012,2013	59
4.4 Resultados de la campaña otoño 2012.....	60
4.4.1 Comportamiento de Temperatura Superficial	62
4.4.2 Comportamiento de Albedo	63
4.4.3 Resumen de la campaña de otoño 2012.....	63
4.5 Resumen de los resultados.....	64
5 Discusión	66
5.1 Descripción del área fuente	66
5.2 Campaña de verano 2011, 2012.....	67
5.2.1 Discusión de los flujos de calor promedio de la campaña verano	67
5.2.2 Discusión de la rosa de vientos y posibles aportaciones de la campaña de verano	69
5.2.3 Discusión del comportamiento de los flujos de calor de la campaña de verano.....	69
5.3 Campaña invierno 2012, 2013	71
5.3.1 Discusión de los flujos de calor promedio de la campaña de invierno.....	71
5.3.2 Discusión de la rosa de vientos y posibles aportaciones de la campaña de invierno.....	72
5.3.3 Discusión del comportamiento de los flujos de calor de la campaña de invierno	73
5.4 Campaña primavera 2012, 2013.....	74
5.4.1 Discusión de los flujos de calor promedio de la campaña de primavera	74
5.4.2 Discusión de la rosa de vientos y posibles aportaciones de la campaña de primavera	76
5.4.3 Discusión del comportamiento de los flujos de calor de la campaña de primavera.....	76
5.5 Campaña otoño 2012.....	78
5.5.1 Discusión de los flujos de calor promedio de la campaña de otoño	78
5.5.2 Discusión de la rosa de vientos y posibles aportaciones de la campaña de otoño	79
5.5.3 Discusión del comportamiento de los flujos de calor de la campaña de otoño.....	79
5.6 Contraste entre los flujos promedio normalizados de la campaña de verano 2012,2013 e invierno 2012,2013.	80
6 Conclusiones	85
6.1 De las mediciones.....	85
6.2 Del balance de energía	85
6.3 Del contraste verano, invierno	86
6.4 Del impacto al clima urbano	86
6.5 De las propuestas de mitigación	87
6.6 De la metodología.....	87
6.7 Del trabajo futuro y líneas de generación del conocimiento.....	88
Referencias.....	89

Índice de figuras

Figura 2. 1: Estructuras idealizadas de capa límite en una zona urbana.....	10
Figura 2. 2: Sectores de modificación climática urbana en la vertical.....	11
Figura 2. 3: Corte esquemático de un cañón urbano, con el volumen de aire contenido en él.....	11
Figura 2. 4: Relación cañones urbanos y el factor de visión del cielo. SVF= 1 equivale a campo abierto.....	12
Figura 2. 5:Sistema de topoformas del estado de Baja Californi.	18
Figura 2. 6: Distribución anual de dirección del viento en Mexicali 2005-2008.....	21
Figura 2. 7: Distribución en julio de dirección del viento en Mexicali 2005-2008.	21
Figura 2. 8: Distribución en enero de dirección del viento en Mexicali 2005-2008.	22
Figura 2. 9: Distribución en abril de dirección del viento en Mexicali 2005-2008.....	22
Figura 2. 10: Distribución en octubre de dirección del viento en Mexicali 2005-2008.....	23
Figura 2. 11: Piranómetro hecho con una fotocelda de silicio.....	27
Figura 2. 12: Respuesta espectral del piranómetro en comparación con el espectro solar.....	28
Figura 2. 13: Respuesta espectral del pirgeómetro en comparación con el espectro de onda larga atmosférica.	30
Figura 2. 14: Sensor NR01 (sensor de cuatro componentes de radiación neta).	31

Figura 3. 1: Esquema experimental de los materiales a caracterizar.	35
Figura 3. 2: Ubicación de sensores de radiación neta, flujos de calor y temperatura superficial sobre el experimento.	35
Figura 3. 3: Asfalto recolectado de la zona oriente de la ciudad de Mexicali.	37
Figura 4. 1: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el suelo desnudo, 5-7 de Agosto de 2011.	42
Figura 4. 2: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el asfalto, 9-11 de agosto de 2011.	43
Figura 4. 3: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos el concreto, 12-14 de agosto de 2011.	43
Figura 4. 4: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el poliestireno expandido c/elastomérica blanca, 18-20 de agosto de 2011.	44
Figura 4. 5: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el poliestireno expandido c/elastomérica blanca, 19-21 de Agosto de 2012.	44
Figura 4. 6: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el césped, 21-23 de septiembre de 2012.	45
Figura 4. 7: Temperatura superficial promedio (2011,2012)	46
Figura 4. 8: Albedo promedio. Verano 2011,2012	47
Figura 4. 9: Ubicación de equipo de aire acondicionado sobre la cubierta del Instituto de Ingeniería, UABC, Mexicali, B. C.	47
Figura 4. 10: Ubicación de equipo de aire acondicionado sobre la cubierta del Instituto de Ingeniería, UABC, Mexicali, B. C.	48
Figura 4. 11: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el concreto, 25-27 de enero de 2012.	49
Figura 4. 12: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el poliestireno expandido c/elastomérica blanca, 30 de enero y 4 de febrero de 2012.	50
Figura 4. 13: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el poliestireno expandido con pintura elastomérica blanca, 4 y 5 de febrero de 2013.	51
Figura 4. 14: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para suelo desnudo, 9-11 de febrero de 2012.	51
Figura 4. 15: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el asfalto, 24-26 de febrero de 2012.	52
Figura 4. 16: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el césped, 12 y 13 de marzo de 2013.	53
Figura 4. 17: Temperatura superficial promedio (2012,2013)	53
Figura 4. 18: Albedo promedio. Invierno 2012,2013	54
Figura 4. 19: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para suelo desnudo, 16-18 de abril de 2012.	55
Figura 4. 20: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el concreto, 19 y 23 de abril de 2012.	56
Figura 4. 21: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el poliestireno expandido c/elastomérica blanca, 28-30 de abril de 2012.	57
Figura 4. 22: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el asfalto, 9-11 de mayo de 2012.	57
Figura 4. 23: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el césped, 4 -6 junio de 2013.	58
Figura 4. 24: Temperatura superficial promedio (2012, 2013)	59
Figura 4. 25: Albedo promedio. Primavera2012, 2013.	59
Figura 4. 26: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el suelo desnudo, 12-14 de noviembre de 2012.	61
Figura 4. 27: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para concreto, 18-20 de noviembre de 2012.	61
Figura 4. 28: Flujos promedio diurnos para el poliestireno expandido c/elastomérica blanca, 20-22 de noviembre de 2012.	62
Figura 4. 29: Temperatura superficial promedio. Otoño2012.	63
Figura 4. 30: Albedo promedio. Otoño2012.	63
Figura 5. 1: Ubicación del experimento y equipos de aire acondicionado.	82

Índice de tablas

Tabla 2. 1: Albedo de varias superficies	15
---	----

Tabla 2. 2: Propiedades térmicas de materiales naturales (tomada de Oke op. cit., 1987)	16
Tabla 2. 3: Propiedades térmicas de materiales en la construcción urbana (tomada Oke op. cit., 1987).....	17
Tabla 2. 4: Usos del suelo en Mexicali, B.C.....	23
Tabla 2. 5: Comparación cualitativa de propiedades texturales entre suelos arenosos y arcillosos.....	25
Tabla 3. 1: Días de monitoreo de campañas de verano 2011,2012; invierno 2012,2013; primavera 2012,2013; y otoño 2012.....	36
Tabla 3. 2: Equipo utilizado en la experimentación.....	36
Tabla 3. 3: Representación de la dirección del viento.....	39
Tabla 4. 1: Flujos de calor promedio, temperatura superficial, albedo y razón de Bowen. Verano. SD se refiere a suelo desnudo (arcilla), mientras que PPEB a Poliestireno con Pintura Elastomérica Blanca.	41
Tabla 4. 2: Flujos de calor promedio, temperatura superficial, albedo y razón de Bowen. Invierno.	49
Tabla 4. 3: Flujos de calor promedio, temperatura superficial, albedo y razón de Bowen. Primavera.....	55
Tabla 4. 4: Flujos de calor promedio, temperatura superficial, albedo y razón de Bowen. Otoño.	60
Tabla 5. 1: Tipos de cubierta predominante en 1 km alrededor del Instituto de Ingeniería.....	66
Tabla 5. 2: Porcentajes de aportaciones por cada tipo de cubierta en 1 km alrededor del Instituto de Ingeniería para cada rumbo de viento dominante.....	67
Tabla 5. 3: Propiedades térmicas de arcilla y materiales de la construcción urbana	67
Tabla 5. 4: Flujos de calor promedio normalizados verano 2011 e invierno 2012 del asfalto	80
Tabla 5. 5: Flujos de calor promedio normalizados verano 2011 e invierno 2012 del concreto.....	81
Tabla 5. 6: Flujos de calor promedio normalizados verano 2011 e invierno 2012 del suelo desnudo.	81
Tabla 5. 7: Flujos de calor promedio normalizados verano 2011,2012 e invierno 2012,2013 del PPEB.	82
Tabla 5. 8: Flujos de calor promedio normalizados verano 2012 e invierno 2013 del césped.....	83

AGRADECIMIENTOS

A Dios por acompañarme todos los días.

A la Universidad Autónoma de Baja California, al Instituto de Ingeniería y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por creer en este proyecto y permitirme la realización de esta tesis, somos un buen equipo....

A todas las personas que participaron e hicieron posible este proyecto, muchas gracias por su apoyo y enseñanza; Dr. Néstor Santillán Soto y Dr. O. Rafael García Cueto, directores; Dr. Alejandro Lambert, Dr. Margarito Quintero y Dra. Sara Ojeda, sinodales, sin ustedes no hubiera sido posible...

A quienes participaron en la fase de investigación y experimento: Jesse Evert Parra Morales y Enrique Dávalos, por su incondicional apoyo...

DEDICATORIA

A mi amado esposo que ha sido el impulso durante toda mi carrera y el pilar principal para la culminación de la misma, que con su apoyo constante y amor incondicional ha sido amigo y compañero inseparable, fuente de sabiduría, calma y consejo en todo momento.

A mi preciosa hija Bella Sofía para quien ningún sacrificio es suficiente, que con su luz ha iluminado mi vida y hace mi camino más claro.

A mis padres, César y Vicky que con su amor y enseñanza han sembrado las virtudes que se necesitan para vivir con anhelo y felicidad.

RESUMEN

A partir de los hallazgos realizados anteriormente con el estudio de Casillas (2009) en el cual se localizaron dos islas de calor urbano en Mexicali, B. C., al oriente y poniente, con 10 ° C y 12 ° C de diferencia respecto al área rural, respectivamente, nace la inquietud del presente trabajo “Balance de energía en la interfaz atmósfera-suelo sobre coberturas urbanas en Mexicali, B. C.”, en el cual mediante el uso de un sensor de radiación neta estimada a partir de dos componentes de radiación solar de onda corta y dos componentes de radiación de onda larga, y equipo de covarianza turbulenta, se analizan el comportamiento y la intensidad de los flujos de calor usando el modelo $Q^* = Q_E + Q_G + Q_H + Q_F + Q_D$ siendo la captura de radiación en el dosel urbano (Q^*). En segundo lugar, la absorción y el almacenamiento de calor durante el día (Q_G) debido a las propiedades térmicas de los materiales de construcción y características de las superficies urbanas, en tercer lugar, la generación de un flujo de calor turbulento positivo al ambiente tanto de noche como en horas diurnas (Q_H); la cuarta modificación es el calor sensible por intercambio de calor latente que no es posible en zonas densamente urbanas con poca vegetación (Q_E); la posibilidad de un gran flujo de calor antropogénico (Q_F), esto es a menudo un fenómeno físico generado por el hombre y puede ser o no intencional. Por último, el flujo de calor advectivo (Q_D), debido al movimiento horizontal del aire; de manera directa solamente se midieron tres flujos, Q^* , Q_E y Q_H ; Q_G es el que más posibilita su manejo como residual, en cambio para Q_F y Q_D la incertidumbre es muy alta.

Se realizaron campañas de medición durante las estaciones de primavera, verano, otoño e invierno entre los años 2011 y 2013, en ciclos de 48 horas promediados a períodos de 24 horas.

Materiales como el asfalto y el concreto almacenan gran cantidad de su energía disponible, la cual no liberan eficientemente durante la noche; el suelo desnudo gana calor rápidamente durante el día, sin embargo, disipa este calor durante el período nocturno; el césped a diferencia de las demás coberturas muestra una repartición equitativa entre su flujo de calor sensible y su flujo de calor latente, tomando un papel importante en el proceso de mitigación de la isla de calor urbano; el poliestireno expandido con pintura elastomérica, el cual muestra que el flujo de calor sensible excede la radiación neta; en la campaña de verano 2011 la radiación neta promedio resultó de 31.41 W/m² y el flujo de calor sensible de 74.9 W/m², en la campaña de verano 2012 los resultados promedios fueron de 43.46 W/m² y 87.32 W/m², respectivamente, este flujo adicional podría ser atribuible a la influencia térmica de los equipos aire acondicionado, lo cual reduce el modelo del balance de energía a $Q^* = Q_H + Q_F + Q_D$.

Al final de este documento, se presentan algunas propuestas de mitigación que contribuyan a reducir los efectos generados por el cambio de uso de suelo, por mencionar algunas, la colaboración multidisciplinaria para generar programas de planificación urbana y el aumento del albedo urbano en futuras renovaciones de materiales de superficies, mediante colores claros y reflectivos.

Los resultados de este estudio serán la base para la generación de nuevas líneas de investigación para la futura propuesta de materiales que ayuden a mitigar los efectos inadvertidos de los asentamientos urbanos. También se mencionan recomendaciones emanadas de la experiencia de haber realizado esta investigación, las cuales son incrementar la escala temporal y espacial para obtener mayor representatividad no solo de los materiales, sino también de la geometría y disposición de los complejos habitacionales de esta ciudad.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1 Introducción

La urbanización genera una configuración espacial compleja, en gran parte producidos por la modificación de usos de suelos promovida por el marketing y la política (Wrenn 2014). No obstante, cualquier modificación de los factores de la naturaleza, ya que son paisaje nativo, la energía, la vegetación y el agua, están estrechamente relacionadas con los impactos ecológicos y sociales; por ejemplo, la proyección de las personas que van a vivir en las ciudades es de 67,2% para 2050 (Taubenböck et al., 2014). Esto implica que la tierra nativa disponible en zonas rurales se utilizará para el uso del suelo urbano. Muchos factores convergen e impactan cuando una superficie de la ciudad aumenta su área urbana. En realidad todas las tendencias actuales están enfocados a las Smart Cities (SC) (Neirotti et al., 2014) en la que los dominios duros (energía, medio ambiente, salud, seguridad) y de dominio blando (educación, cultura, gobierno, economía) describen una variedad de visiones y facetas de la SC.

Cambios en la cobertura del suelo promueven variaciones en la energía y el equilibrio de la radiación. En comparación con un paisaje nativo, una cobertura urbana requiere aumentos de drenaje de la superficie, la reducción en el flujo de calor latente y aumento del flujo de calor sensible al ambiente urbano (Järvi et al, 2011;.. Feyisa et al, 2014), que tiene efectos para el confort humano (McMichael et al., 2008). La relación entre el clima y la vegetación o la cobertura del suelo en los procesos de intercambio de energía es esencial para entender cómo los ecosistemas interactuarán con trastornos físicos y biológicos en el futuro (Krishnan et al., 2011). En particular, la urbanización es una de las formas más extremas en las que el ser humano altera la cubierta vegetal y uso del suelo, lo que resulta en diferencias dramáticas después de que se establecen las ciudades.

Resultante de las modificaciones anteriores, la temperatura de la superficie y la temperatura del aire cerca de la superficie sobre un área urbana son generalmente más grandes respecto a los de las zonas rurales, lo que resulta en la isla de calor urbano (ICU) (Mackey et al, 2012;.. Yuan-Fong et al. , 2012; Krüger y Emmanuel, 2013; Zhang et al, 2013). Algunos factores a meso-escala contribuyen al desarrollo de la ICU, algunos están relacionadas con factores naturales tales como el clima y la ubicación. Otros factores están relacionados con la actividad humana, como la geometría urbana y materiales, flujo de calor antropogénico y la deforestación (Radhi et al, 2013;.. Groleau y Mestayer, 2012). Todos los factores mencionados pueden inducir diferente cantidad de energía disponible en la interfase entre la atmósfera y la superficie urbana, llamada radiación neta, y afectar el confort térmico

humano, los efectos negativos para la salud y los incrementos de energía para espacios interiores (Steenneveld et al, 2014;. Shahidan et al ., 2010).

La problemática de las islas de calor urbano sigue siendo un tema que se aborda en las más recientes investigaciones, su identificación, descripción de su comportamiento, cuantificación de su intensidad, formas de modelar la proyección de su crecimiento y opciones de mitigación se documenta en algunas ciudades a nivel mundial (Chan 2011, Oliveira 2011, Susca 2011, Zhou 2011). 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, 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, la energía se gasta principalmente en calentar el aire en vez de en evaporar agua, como sucede en las zonas rurales.

Varios autores (Oke, 1987, Malhi et al., 2005, Foken, 2008), documentan que en ausencia de advección, la radiación neta (Q^*) en la interfaz superficie/atmósfera se disipa a través del calor sensible turbulento (Q_H), el calor latente de evaporación (Q_E) y el calor almacenado en la superficie (Q_G), resultando la ecuación: $Q^*=Q_H+Q_E+Q_G$. Ese balance de energía proporciona la explicación básica de la isla de calor, ya que en áreas citadinas rodeadas por vegetación, el contraste térmico se presenta porque la radiación solar en el ambiente rural es consumida mayoritariamente en la evaporación del agua mientras que en las superficies urbanas la energía es empleada para calentar las estructuras, y una parte de este calor es liberado hacia la atmósfera durante las noches (Tejeda 2010).

No es deseable añadir un componente de energía (en forma de energía antrópica debido a la ocupación del suelo y uso de la tierra) a la energía disponible, ya que la radiación neta en la superficie de la tierra determina la cantidad de energía, que se puede utilizar para los procesos físicos y biológicos, como la evapotranspiración, el aire y el calentamiento del suelo (Kalthoff et al, 2014, Geraldo et al, 2011;.. Hye y Shunlin, 2010). La radiación neta es una variable fundamental que determinan el clima de las capas inferiores de la atmósfera y que depende fundamentalmente de la física y la química de la atmósfera y la presencia de nubes, además de la superficie característica como albedo, emisividad, temperatura, humedad y propiedades térmicas del suelo subyacente.

Dada la importancia de esta magnitud y su relación con cualquier cambio en el paisaje, las mediciones precisas de la radiación neta son esenciales en los estudios sobre el cambio climático global y urbano, donde la energía neta en la superficie de la Tierra desempeña un papel mayor en la condición térmica y

balance energético de superficie (Blonquist et al., 2009). Sobre cualquier paisaje, transformados o no, urbanizado o no, el uso de la radiación neta como una variable fundamental en los modelos de intercambio tierra-atmósfera es de rutina; Sin embargo, su medición no (Cobos y Baker, 2003). Por lo tanto, para todos los aspectos analizados, el uso de sensores solares como parte de los cálculos de balance de energía, son una de la mejor herramienta aliada para el estudio del paisaje y uso de la tierra, ya que su uso ha tenido importantes resultados para otras aplicaciones de cobertura del suelo como son la agricultura y la silvicultura (Parajes, 2011).

Los resultados de esta investigación serán de gran utilidad para tomadores de decisiones de la ciudad, ya que se contará con conocimiento de los materiales utilizados para la cobertura de esta, sus efectos en el clima urbano y generará nuevas e interesantes líneas de investigación. Se parte del conocimiento de estudios previos que utilizaron información remota satelital.

1.1 Planteamiento del problema

Esta investigación se origina debido al cambio que se ha presentado en los últimos años en las temperaturas de Mexicali, principalmente las mínimas, la ocurrencia y localización de las llamadas islas de calor urbano (ICU) consecuencia de la modificación del suelo nativo con distintos materiales.

La radiación neta es el resultado de la diferencia entre la radiación solar global y la radiación reflejada emitida por la superficie. 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 ser una variable que altere la temperatura en la capa límite superficial. La generación de información radiométrica en diferentes materiales urbanos podrá ser utilizada para distintas aplicaciones, por ejemplo, para calibración de medidas realizadas por satélites ambientales, para introducir datos confiables a modelos climáticos que se utilicen en zonas urbanas semidesérticas, pero sobre todo para conocer el impacto actual y su uso como una herramienta científica para la implementación de las estrategias estatales de mitigación del cambio climático las cuales se encuentran en la etapa de diagnóstico en el caso particular de Baja California (PEACC, 2013). Este estudio, del cual no se tiene precedente en la región proporcionará información esencial para el diagnóstico bioclimático de la ciudad de Mexicali, B.C., y las propuestas de algunas medidas estratégicas para mitigar el efecto negativo hacia el medio ambiente.

De acuerdo a lo anterior, y considerando que poco se ha realizado en esta región del país respecto a este tema, se ve la importancia del proyecto y lo que pretende aportar al estudio del crecimiento de las

ciudades. Es importante entender como el clima de una ciudad desértica mexicana, en este caso Mexicali, ubicada en el noroeste de México, se ha modificado por el desarrollo urbano acelerado que ha tenido, particularmente en lo que se refiere a la modificación térmica, es decir en el desarrollo de la isla urbana de calor y su relación con la dinámica de cambio en el uso del suelo. En este sentido, esta problemática ha sido abordada internacional, nacional y localmente por varios autores (Kim, 1992; Weng, 2004; Correa, 2003; De Steffens, 2001; Prats, 2005; Méndez, 2007; García, 2007, Casilas, 2009), los cuales mediante distintas metodologías han tratado de relacionar los efectos en el incremento de la temperatura superficial y las aportaciones al fenómeno de la isla calor urbano con el entorno de la ciudad, encontrando diferencias térmicas urbano-rural de hasta 12°C, Méndez (2007) concluye que el clima de la ciudad está asociado con el cambio de uso de suelo de la ciudad, observándose una modificación importante de la temperatura, precipitación, humedad relativa y el comportamiento de los vientos, lo que esta relaciona estrechamente con la presencia de la ICU, sin embargo, una de las mayores tareas en el ámbito de la climatología es determinar la verdadera influencia de las actividades del hombre en el clima regional y local, estos estudios que servirán de antecedente y nos permitirán profundizar en la problemática.

1.2 Hipótesis

Los materiales están afectando al balance de energía en la interfaz atmósfera-suelo y se está propiciando un clima urbano que tiene afectaciones negativas hacia el medio ambiente de Mexicali, B. C.

1.3 Justificación

La ciudad de Mexicali ubicada al noroeste de México (32.55° N, 115.47° W y 4 bajo el nivel del mar), (García Cueto et. al., 2009) ha presentado un gran crecimiento en los últimos años, generando con ello la necesidad de tener nuevos espacios, así como vías más rápidas y eficaces de comunicación, buscando siempre lo práctico pero sobre todo económico para lograr el objetivo. En consecuencia de la gran demanda, se han generado cambios en el escenario climático de la región, llegándose a comportar como una isla de calor. Los materiales que se utilizan para cubrir el suelo de la región contienen un poder calorífico que se relaciona directamente con las ondas de calor, lo que trae como resultado un aumento notorio en la temperatura. Dichos aumentos de temperatura afectan de manera considerable a la población de Mexicali, ya que además problemas de salud y confort, impactan

considerablemente en la vida diaria de quien en ella habita. Bajo este contexto se propuso esta investigación.

1.4 Objetivo general

Generar un mayor conocimiento de la repartición de energía en la interfaz atmósfera-suelo mediante el estudio de diferentes materiales de cobertura urbana en la ciudad de Mexicali, B.C.

1.5 Objetivos específicos

1. Obtener mediciones de radiación neta sobre diferentes superficies.
2. Realizar el balance de energía en la atmósfera baja en las diferentes estaciones del año, sobre coberturas de asfalto, concreto, poliestireno pintado con pintura elastomérica blanca, césped y arcilla.
3. Contrastar los flujos de balance de energía para cada material en las estaciones verano e invierno.
4. Presentar propuestas de mitigación de las superficies que más impactan al clima urbano.
5. Generar líneas de investigación a partir de los resultados obtenidos.

CAPITULO 2

MARCO CONCEPTUAL

2 Marco conceptual

En los últimos años las urbes han cambiado el paisaje de las regiones donde éstas se han asentado, pasando de coberturas de suelos homogéneos a usos de suelo heterogéneos. Particularmente la ciudad de Mexicali alcanzó los 936 826 habitantes en el año 2010 (INEGI, 2010). Esta aceleración en el proceso de urbanización impondrá costosas y enormes exigencias de infraestructura productiva, equipamiento y servicios, no sólo en Mexicali, sino en todas las ciudades del país, así como fuertes presiones sobre el medio ambiente y los recursos naturales que serán necesarios prevenir y contener. Las áreas urbanas, con mayores exigencias espaciales cada vez, ocupan espacio aéreo, tierra, ríos, etc., con impactos que modifican principalmente la vegetación natural, la calidad del agua, la calidad del aire y el clima.

Las diferentes características del diseño de espacios y el fenómeno de la isla de calor urbana ocasionan, en el interior de las ciudades, la individualización de áreas en función de pequeñas variaciones en las condiciones climáticas. Esta variedad de microclimas puede presentar importantes consecuencias: por un lado su innegable papel sobre las condiciones de confort bioclimático dada su escala espacial; y por otro la posible influencia que puede ejercerse sobre el desarrollo de la isla de calor (García Codron, 2004).

De acuerdo a lo anterior, se puede decir que 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. Estos procesos de urbanización inducen cambios radicales en la naturaleza de la superficie y, por tanto, en las propiedades atmosféricas de una región; involucra no solamente la transformación de las propiedades radiativas, térmicas, hídricas y aerodinámicas (Oke, 1987), sino que a su vez, modifica los balances de calor, masa y momentum (Oke et al., 1999), por lo que se generan un conjunto de distintos climas a micro y mesoescala, dando lugar al efecto de ICU, en el que la ciudad tiene un clima térmico modificado, comparado al área rural (Badarinath, et al., 2002), y que tiene implicaciones prácticas en la conservación de energía y agua, salud humana y confort, dispersión de contaminantes del aire y circulación local del aire (Roth y Oke, 1989).

En la actualidad existe poca conciencia del clima en la planificación de la ciudad, debido en parte al poco desarrollo y difusión de métodos de diseño y planificación integrales que tomen en cuenta la relación ciudad-planificación-clima, sin embargo, es muy reconocida la necesidad del diseño con el clima desde edificaciones individuales hasta la planificación regional, en la búsqueda de mejorar condiciones ambientales de la población en áreas urbanas y reducir los riesgos derivados de dichos efectos inadvertidos sobre el clima (Molina 2012; Alcoforado, 2012; Bridgman et al, 2006; Mills, 2010; Grimmond, 2010).

La introducción de nuevas superficies van modificando la mancha urbana y como resultado la energía disponible varía, creando microclimas dentro del área urbana, contribuyendo al aumento de las temperaturas mínimas que se han documentado los últimos 30 años en la ciudad de Mexicali, B.C. (García Cueto et. al., 2009), así como la ocurrencia de islas de calor urbano, situadas en la zona norte y zona oriente de la ciudad, con una diferencia térmica de 10° y 12° centígrados respectivamente, en contraste con sus alrededores (Casillas, 2009).

Los materiales utilizados en la urbanización de espacios libres responden a exigencias de resistencia, funcionalidad y bajo costo económico, que han generado en el último medio siglo una reducción significativa de la gama de materiales empleados. El cemento y los derivados del petróleo han relegado a un segundo y reducido plano el empleo tradicional de materiales pétreos en el pavimento de calzadas. Igualmente, se ha generalizado el sobre dimensionado de calles, plazas y áreas de estacionamiento para adaptar la ciudad a la cada vez mayor circulación rodada y se han cubierto con pavimentos con un alto poder calorífico, también conocidos como pavimentos duros. Todo ello ha provocado una intensificación de la influencia que el comportamiento termohigrométrico de los materiales urbanos ejerce sobre la dinámica climatológica local (García Codron, 2004).

2.1 Climatología urbana

A partir del siglo XVII con el establecimiento de observaciones meteorológicas realizadas con instrumentación adecuada se da un paso decisivo para el futuro del nacimiento de la Climatología urbana. El auténtico estudio pionero del clima urbano surge en el inicio de la era industrial en Londres, con la obra publicada en 1833 por Luke Howard (1772-1884), acerca del clima de esa ciudad y en el que analiza las observaciones meteorológicas correspondientes al periodo 1797-1831. Deduce las principales características y advierte ya algunas alteraciones; por ejemplo, se da cuenta del efecto de

“isla de calor” (aun cuando todavía no recibía esa denominación) del centro urbano de Londres (García, 1999).

La Climatología urbana tiene como objeto de estudio principal el conocimiento preciso de los mecanismos propios del clima urbano y la evaluación de la alteración climática causada por la ciudad, el interés por adquirir conocimiento en este tema ha incrementado en las últimas décadas el número de publicaciones referentes al tema (Oke, 1981; Grimmond, 1991; Jáuregui, 1997; García-Cueto, 2007; García, 2007; Romero, 2008; De Schiller, 2014). García (1999), comenta que el interés por conocer todo lo relativo al clima de las ciudades y las alteraciones antropogénicas observadas en ellas se justifica muy bien en estos momentos, cuando, precisamente, una buena parte de la población mundial puede considerarse como urbana.

2.1.1 Escalas de la climatología urbana

Las investigaciones en climatología urbana han realizado importante conceptualización de los fenómenos resultantes e inadvertidos de la construcción de la ciudad que ayuda a entender la manera en la cual se producen los fenómenos climáticos a diferentes escalas espaciales de esta (Oke, 1987). Esta conceptualización parte de la composición vertical de la atmósfera urbana y suele dividirse en las siguientes capas: a) la capa de dosel urbana (UCL, urban canopy layer, por sus siglas en inglés) la cual se ubica aproximadamente del suelo al nivel de la altura de los techos de las edificaciones, y b) la capa límite urbana (UBL, urban boundary layer, por sus siglas en inglés) que se ubica por arriba del nivel de los techos de las construcciones (Chicas, 2012).

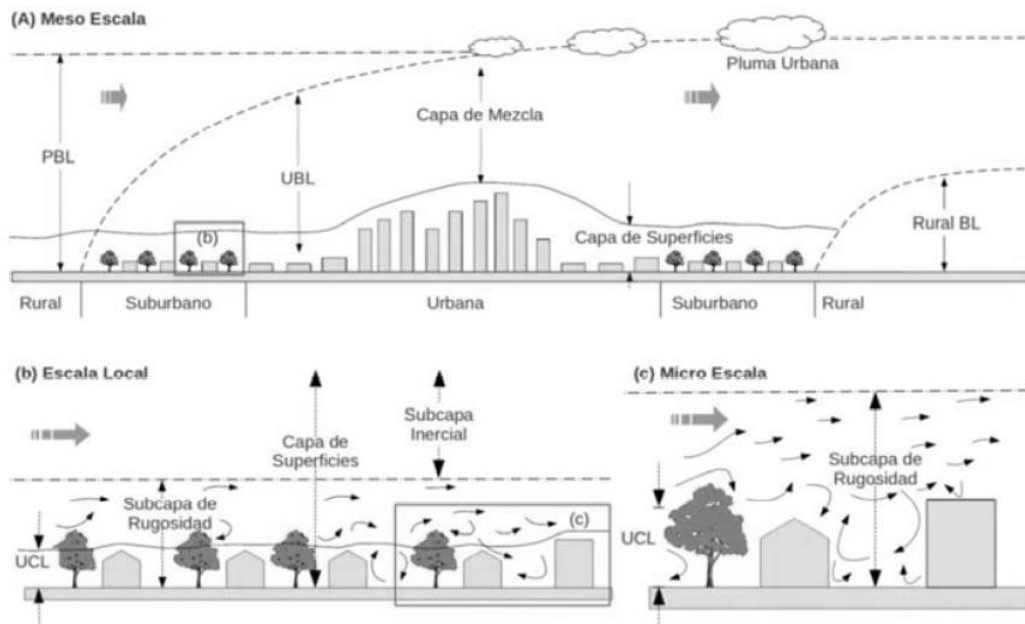


Figura 2. 1: Estructuras idealizadas de capa límite en una zona urbana.
Fuente: Oke 1987. Modificación propia.

En la Figura 2.1 se observa que en cada una de las capas atmosféricas se estudian diferentes fenómenos climáticos, así en la meso escala (A) denominada capa límite urbana (UBL, urban boundary layer) corresponde al estudio climático de la ciudad completa (10 a 20 km), escala ideal para el estudio de la isla de calor urbano; a escala local (B) denominada capa de dosel urbano (UCL, urban canopy layer) se estudian fenómenos de climas urbanos que se desarrollan a nivel de conjunto de edificaciones y sus calles, la resolución espacial varía de 1 a 2 km; la escala correspondiente al estudio climático de vecindad inmediata o del clima del volumen de aire contenido en una calle, es micro escala (C), el espacio de análisis de microclima está contenida por la capa de dosel urbano, siendo su escala de 100 a 200 m, resultando esta la escala más precisa de la climatología urbana, permitiendo conocer las variaciones de temperatura del aire en varios grados incluso en distancias pequeñas dentro de una misma calle o cañón urbano, así mismo permite el estudio y análisis para comprender la circulación y perturbaciones del aire dentro de las calles (Chicas, 2012).

Varios autores han realizado estudios de la capa límite planetaria (Oke, 1995; Clarke, 1969; Menut, 1999; Rotach, 2005) en los que se discuten la altura de la capa límite urbana, así como sus causas y efectos.

2.1.2 Capa de dosel urbano

En la Figura 2.2 se muestra un esquema de la capa de dosel urbano, que es la capa existente por debajo de la capa límite urbana, extendiéndose desde la superficie hasta el nivel que marca la altura de los techos de los edificios, que forman como un dosel, su principal unidad es el cañón urbano, que incluye el suelo entre dos edificios adyacentes y sus paredes (García, 1999), Grimmond (1998), Offerle (2006), Mestayer (2004), Mayer (2003), son algunos autores que han realizado parte de sus investigaciones en la capa de dosel urbano en las cuales se han realizado aportaciones importantes al complicado tema de la micro climatología urbana, buscando resultados con mayor exactitud y apegados a la morfología real de las ciudades.

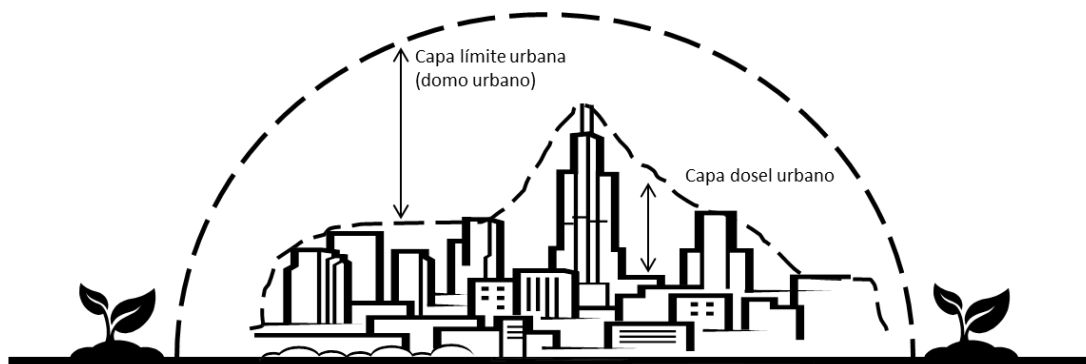


Figura 2. 2: Sectores de modificación climática urbana en la vertical.
Fuente: elaboración propia en base a García (1997).

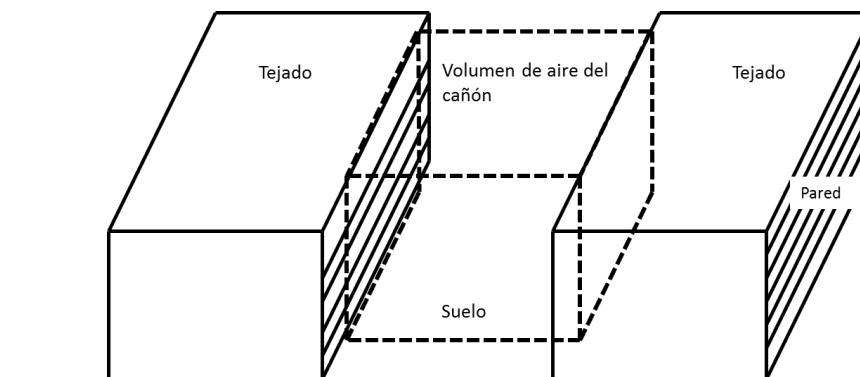


Figura 2. 3: Corte esquemático de un cañón urbano, con el volumen de aire contenido en él.
Fuente: elaboración propia en base a García (1997).

Santamouris (2001) señala que el estudio de los micro climas urbanos dentro de la capa de dosel urbano es el estudio del sistema aire-atmósfera. Así los estudios dentro de esta capa se enfocan en los siguientes análisis:

- el balance energético dentro del cañón urbano (ganancias y pérdidas térmicas)
- la distribución de la temperatura en el aire y en las superficies de los materiales
- el comportamiento de la circulación del aire dentro del cañón urbano

De los cuales, la circulación del aire y la distribución de la temperatura dentro de los cañones urbanos (Figura 2.3) son significativos para el estudio del consumo energético de los edificios, el estudio de la dispersión del material particulado, el potencial de ventilación natural en las edificaciones y el confort de los transeúntes, así como el acceso a la iluminación natural de los espacios habitados (Santamouris, 2001).

Como se mencionó, la distribución de micro climas en la ciudad está determinada por el balance de radiación solar y las emisiones antropogénicas, de manera que la radiación solar incidente en las superficies urbanas por estas y luego es transformada en calor sensible en el ambiente. La mayoría de esta radiación incidente es recibida por cubiertas y paredes verticales de las edificaciones. La intensidad de la radiación emitida depende de una característica muy importante en los entornos urbanos: el factor de visión del cielo (skyview factor, SVF) lo cual determina la cantidad de exposición a la radiación solar que la superficies tengan. Grimmond (2001), realizó una comparación de métodos para la estimación del factor de visión del cielo aplicado en áreas urbanas, usando un radiómetro LI-COR LAI-2000, así como un método fotográfico. (Figura 2.4)

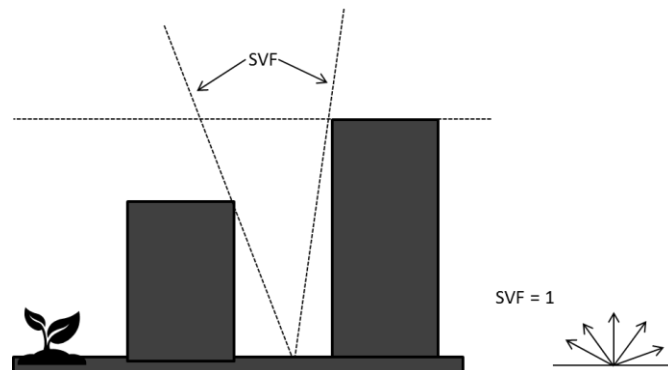


Figura 2. 4: Relación cañones urbanos y el factor de visión del cielo. SVF= 1 equivale a campo abierto.
Fuente: elaboración propia en base a Oke (1987)

2.1.3 Comportamiento del viento e insolación en los entornos urbanos

La climatología urbana entiende a la ciudad como una superficie espacial vertical rígida en oposición a la dinámica natural del aire, en la cual las distintas alturas de edificación crean una rugosidad propia de los ambientes urbanos, aumentando la turbulencia del aire y disminuyendo el potencial de convección térmica creando condiciones de estancamiento del aire (Oke, 1987).

Mientras que la radiación solar que incide sobre las superficies urbanas, es la fuente principal de los climas urbanos, que junto con el calor generado por las múltiples actividades humanas (calor antropogénico) y la densidad poblacional misma, aportan cantidades significativas de energía térmica al sistema aire-superficies que describe el clima en los ambientes urbanos (Chicas, 2012).

2.2 Balance energético atmosférico ideal

El balance energético atmosférico en una superficie ideal relativamente lisa, horizontal, homogénea, extensa, y opaca a la radiación, identifica esencialmente cuatro tipos de flujos de energía, la radiación neta, los flujos de calor sensible (directo) y latente (indirecto), y el flujo de calor que entra o sale del sub-medio (suelo o el agua).

Para derivar una ecuación simplificada para el balance de energía en una superficie ideal, asumimos la superficie a una interfaz muy fina entre los dos medios (aire y el suelo o el agua). Los flujos de energía fluyen dentro y fuera de una superficie sin ninguna pérdida o ganancia a la superficie. Entonces, el principio de la conservación de la energía en la superficie se puede expresar como:

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G$$

En la ecuación, Q^* es el resultado de la diferencia entre la radiación solar global (Q_S) y la radiación reflejada y emitida por la superficie (Q_R), por lo que: $Q^* = Q_S - Q_R$; flujo de calor sensible, Q_H , se refiere al intercambio turbulento de calor entre la superficie y la atmósfera, originado por la diferencia térmica entre los dos medios; el flujo de calor latente, Q_E , ó flujo de vapor de agua, es el intercambio turbulento de calor, por procesos evapotranspirativos (ó de condensación) entre la superficie y la atmósfera; y Q_G , es el flujo de calor al suelo o medio superficial. La exacta partición del exceso ó déficit radiativo (entre Q_H , Q_E y Q_G) está regida por la naturaleza de la superficie y las habilidades relativas del suelo y la atmósfera para transportar calor (Oke, op. Cit., 1987). Es así que las propiedades físicas del suelo, tales como la admitancia térmica y la capacidad calorífica, son probablemente las más importantes para la definición del clima local (Arya, 1988; García, 2006).

2.2.1 Balance energético atmósfera-ciudad

Los intercambios tierra-atmósfera afectan la partición flujos de energía, modificando el clima local, de modo que los residentes urbanos experimentan una variedad de climas en diferentes partes de la ciudad en diferentes momentos del día (Balogun et. al., 2009; Coutts et. al., 2007; Coutts et. al., 2010; Grimmond, 2010; Hart et. al., 2009; Xu et. al., 2008).

El primer estudio de balance de energía en México se llevó a cabo por Oke (1992) en una zona residencial / comercial / industrial en el barrio de Tacubaya de la Ciudad de México. Los resultados mostraron una considerable similitud con las zonas residenciales de las ciudades con climas templados, entre ellos la relación de Bowen ($\beta = Q_H / Q_E$), que era un poco mayor que la unidad. Una debilidad subyacente en el estudio Tacubaya fue el hecho de que sólo la radiación neta (Q^*) y el flujo de

calor sensible turbulento (Q_H) se midieron directamente, el almacenamiento de calor lo obtuve mediante estimación parametrizada en materiales urbanos (ΔQ_S), dejando el flujo de evaporación (Q_E) como el residuo en el balance.

Masson (2006) describe los principales impactos de la urbanización sobre el balance de energía superficial local causado por la forma tridimensional heterogénea de la capa de dosel urbana. En primer lugar, la captura de radiación en el dosel urbano (Q^*), en segundo lugar, la absorción y el almacenamiento de calor durante el día (ΔQ_S) debido a las propiedades térmicas de los materiales de construcción y características de las superficies urbanas, en tercer lugar, la generación de un flujo de calor turbulento positivo al ambiente por la noche (Q_H), la cuarta modificación es el calor sensible por intercambio de calor latente que no es posible en zonas densamente urbanas con poca vegetación (Q_E). Por último, la posibilidad de un gran flujo de calor antropogénico (Q_F), esto es a menudo un fenómeno físico por el hombre y puede ser o no intencional (Khodjet, 2012). Este estudio muestra que la ocupación del suelo urbano y el uso del agua se encuentran entrelazados, lo que sugiere que la ordenación del territorio urbano y la gestión del agua deben integrarse plenamente al diseñar ciudades que pueden albergar el futuro crecimiento de la población y reducir al mínimo los impactos negativos del cambio climático (House-Peters, 2011).

La división de la radiación neta en los flujos turbulentos de calor y la humedad es un factor determinante de las condiciones meteorológicas y el clima de la región. Las distribuciones de estos flujos son determinados por los atributos físicos de la superficie, incluyendo el tipo de cobertura y las propiedades del suelo, en particular, el contenido de humedad del suelo. En las regiones desérticas, donde la humedad del suelo es limitado y la cubierta vegetal es escasa y / o seca, domina el flujo de calor sensible. En el estudio de Sturman y McGowan (2009) destaca la arcilla como fuente de calor sensible en los paisajes del desierto.

2.3 Cobertura de suelo y sus propiedades térmicas

Las coberturas de suelo, entendidas como la cobertura biofísica que en forma natural tiene la superficie terrestre (por ejemplo, bosques ó desiertos), son fuentes y sumideros de flujos de masa y energía; el uso del suelo (que es la manera en que los seres humanos emplean la tierra y sus recursos) y los cambios de cobertura de suelo están enlazados de manera compleja e interactiva a la modificación climática a nivel local y regional, y tal vez estén enlazados a los procesos ambientales globales. Los

cambios en las emisiones de gases invernadero, albedo y rugosidad son los que afectan el clima. (García Cueto et. al., 2006)

Con respecto a la cobertura del suelo, especialmente la vegetación afecta de manera importante al clima local y regional debido a su impacto en el albedo, agua del suelo, rugosidad, fisiología de la planta, y cantidad del área foliar desde la que el calor puede ser intercambiado. De todos esos factores, uno de los más importantes es el albedo. Está definido como “la proporción de radiación solar incidente reflejada por una superficie. Típicamente se expresa como una fracción decimal que varía entre 0 y 1” (Erell, 2001). Así un material que absorbe mucha radiación solar tendrá un valor cercano a 0, mientras que una superficie que tenga alta reflexión será igual a 1.

Albedos altos resultan en menos radiación solar absorbida en la superficie, y por tanto una superficie más fría; albedos bajos resultan en más radiación solar absorbida, y consecuentemente una superficie más caliente. Los albedos varían de 0.80 a 0.95 para nieve fresca, a tan bajos como 0.03 a 0.10 para agua a bajos ángulos zenitales solares (Tabla 2.1). La nieve, los desiertos y los glaciares tienen los albedos más altos, mientras que las superficies urbanas, en general, albedos bajos, a excepción de las pintadas de color blanco, comenta García Cueto (2006).

Tabla 2. 1: Albedo de varias superficies

<i>Superficie</i>	<i>Albedo</i>
Natural	
Nieve fresca	0,80-0,95
Nieve vieja	0,45-0,70
Desierto	0,20-0,45
Glaciar	0,20-0,40
Suelo	0,05-0,40
Tierra de cultivo	0,18-0,25
Tierra de pasto	0,16-0,26
Bosque deceduooso	0,15-0,20
Bosque conífero	0,05-0,15
Agua	0,03-0,10
Urbano	
Carretera	0,05-0,20
Techo	0,08-0,35

Pared	0,10-0,40
Pintura blanca	0,50-0,90
Pintura roja, café, verde	0,20-0,35
Pintura negra	0,02-0,15

Fuente: de Bonan, 2002

Mexicali, B.C. cuenta con una superficie continental de 14 541.44 km² (INEGI, 2005) de los cuales 252.91 km² son superficies de áreas urbanas (INEGI, 2010). En 1992 Mexicali, B.C., contaba con 92 km² de área urbana, lo que representa un incremento del 60%, el crecimiento acelerado trae consigo consecuencias tanto positivas como negativas para la ciudad y sus habitantes.

García Cueto (2006) comenta que los constituyentes principales de construcción urbana, como asfalto, cemento y concreto tienen una capacidad calorífica mucho más grande que la vegetación y otros rasgos naturales que han sido crecientemente desplazados de las regiones metropolitanas (Tablas 2.2 y 2.3). Como resultado, las estructuras urbanas absorben gran cantidad de energía térmica durante las horas diurnas, y lentamente reemiten esta energía almacenada al finalizar la tarde y durante la noche.

El exceso de energía calorífica que es absorbida, como resultado de la construcción urbana y deforestación, es suficientemente grande como para elevar por varios grados la temperatura promedio de la ciudad, respecto de las regiones periféricas no urbanizadas (Oke, op. Cit., 1987).

Tabla 2. 2: Propiedades térmicas de materiales naturales

Material	Estado	Densidad $\text{kgm}^{-3}\times 10^3$	Calor específico $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\times 10^3$	Capacidad calorífica $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}\times 10^3$	Conductividad térmica $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Difusividad térmica $\text{m}^2\text{s}^{-1}\times 10^6$	Admitancia térmica $\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1/2}\text{K}^{-1}$
Arena	Seca	1,6	0,8	1,28	0,3	0,24	620
	Saturada	2	1,48	2,96	2,2	0,74	2550
Arcilla	Seca	1,6	0,89	1,42	0,25	0,18	600
	Saturada	2	1,55	3,1	1,58	0,51	2210
Turba	Seco	0,3	1,92	0,58	0,06	0,1	190
	Saturado	1,1	3,65	4,02	0,5	0,12	1420
Nieve	Nueva	0,1	2,09	0,21	0,08	0,1	130
	Vieja	0,48	2,09	0,84	0,42	0,4	595
Hielo	0°C, puro	0,92	2,1	1,93	2,24	1,16	2080
Agua*	4°C, calma	1	4,18	4,18	0,57	0,14	1545
Aire*	10°C, calma	0,0012	1,01	0,0012	0,025	21,5	5
Aire*	Turbulento	0,0012	1,01	0,0012	~125	~10 $\times 10^6$	390

*Las propiedades dependen de la temperatura
Fuente: Oke, 1987

Tabla 2. 3: Propiedades térmicas de materiales en la construcción urbana (tomada Oke op. cit., 1987)

<i>Material (seco)</i>	<i>Estado</i>	<i>Densidad kgm⁻³X10³</i>	<i>Calor específico Jkg⁻¹K⁻¹X10³</i>	<i>Capacidad calorífica Jm⁻³K⁻¹X10³</i>	<i>Conductividad térmica Wm⁻¹K⁻¹</i>	<i>Difusividad térmica m²s⁻¹X10⁶</i>	<i>Admitancia térmica Jm⁻²s^{-1/2}K⁻¹</i>
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

2.4 Mexicali

El valle de Mexicali está ubicado en el desierto del noroeste mexicano, en esta zona se hace presente el Río Colorado que desemboca en el Golfo de California. Por su localización, es una región cercana al océano Pacífico y a la costa suroeste de Estados Unidos. Al Oeste, una cordillera de hasta 2 500 m de altitud, una llanura al nivel del mar permitió, con las aguas del Río Colorado, el desarrollo de un oasis (200 000 hectáreas) que atrajo un gran número de migrantes. Las obras de riego realizadas a principios del siglo XX favorecieron cosechas de algodón, trigo y hortalizas, y permitieron el asentamiento de población en localidades de varios tamaños en el valle de Mexicali (Figura 2.5). La ciudad, por su posición fronteriza, ha crecido más que éstas (Muñoz, 2001). El censo del Instituto de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 2010) establece que la ciudad cubre una extensión de 14,890 hectáreas y tiene una población de 689,775 habitantes, lo cual resulta en una densidad de 46 Hab/ha, mostrando una ciudad de expansión horizontal.

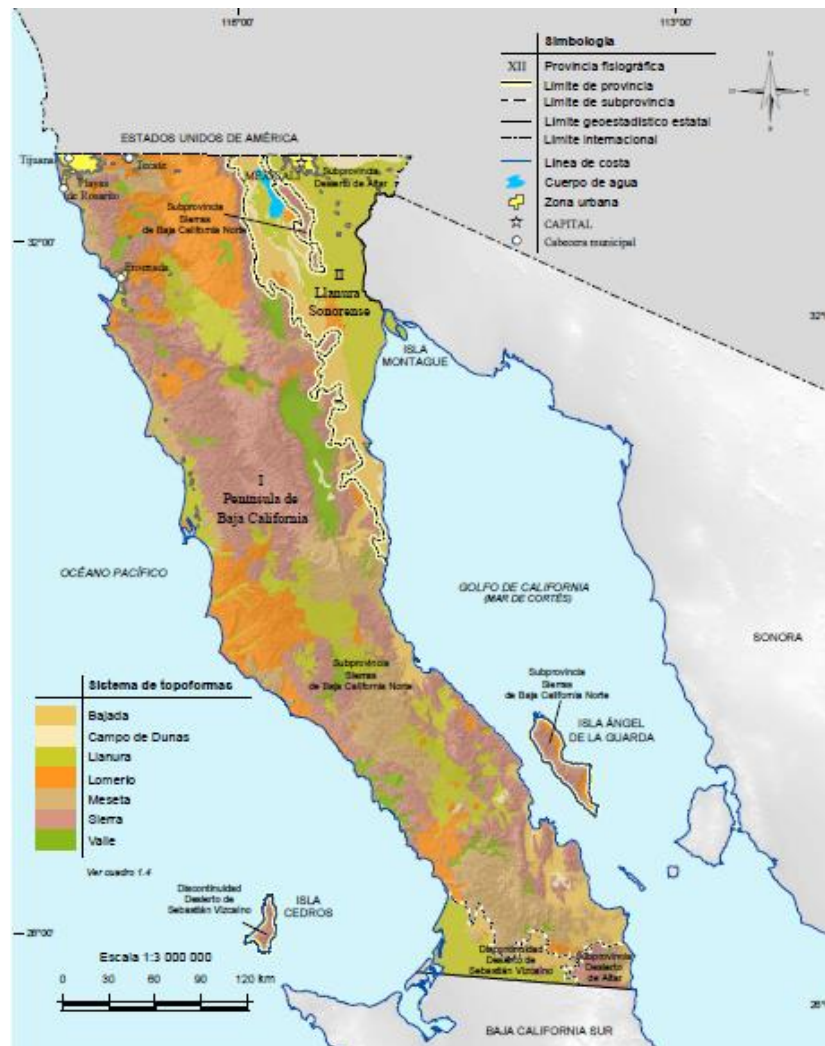


Figura 2. 5: Sistema de toposomas del estado de Baja California.

Fuente INEGI. Continuo nacional del conjunto de datos de la Carta Fisiográfico escala 1:1 000 000, serie I.

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 625 hectáreas, la mayoría de estos parques industriales fueron construidos en la década de los 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).

2.4.1 El clima de la ciudad de Mexicali, B.C.

El clima de la ciudad de Mexicali se puede resumir en baja precipitación anual, cielos claros y tiempo cálido la mayor parte del año, debido en gran parte al régimen casi estacionario de la celda de alta presión atmosférica que prevalece en la región. Sin embargo por estar localizada en una zona de transición entre latitudes medias y subtropicales tiene una gran variabilidad climática, ocasionada por los flujos de circulación estacional. A fenómenos como El Niño se le asocia una clara teleconexión con inviernos húmedos, siendo el caso opuesto cuando se presenta La Niña. Otra importante característica, que lo diferencia de la zona occidental del estado de Baja California, es el monzón de verano que con su flujo húmedo puede ocasionar lluvias y tormentas eléctricas, sobre todo en los meses de julio y agosto.

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1981), es del tipo $BW(h')hs(x')(e')$, lo que quiere decir que la ciudad de Mexicali presenta un tipo de clima cálido, seco, muy árido, con régimen de lluvias de invierno y con una oscilación anual de temperaturas medias mensuales muy extremosa.

Presenta una temperatura media anual de 22.4°C , y en su marcha mensual experimenta un período extremadamente cálido, que abarca de junio a septiembre, con temperaturas medias por arriba de los 30°C , correspondiendo a julio ser en promedio el mes más caliente del año con una media de 33.1°C , y una media máxima de 41.8°C ; el mes más frío corresponde a enero con una media mensual de 12.4°C . Se han registrado grandes contrastes térmicos en Mexicali, B.C., con temperaturas tan altas como 54.3°C , y tan bajas como -7.0°C .

Influido por los sistemas frontales de invierno, el régimen anual de la precipitación presenta su máximo en los meses de diciembre y enero, con 11.1 mm y 9.8 mm, respectivamente; junio es el mes más seco con un valor tan bajo como 0.2 mm, siguiéndole el mes de mayo con 0.6 mm; en los meses de julio y agosto se presenta una segunda temporada de lluvias, ocasionada por las llegadas ocasionales de las surgencias de humedad y perturbaciones tropicales debilitadas. En general, la precipitación en Mexicali, B.C., es sumamente baja, ya que presenta un total anual de tan sólo 72.6 mm. La marcha mensual de humedad relativa presenta un comportamiento semejante al de la precipitación; la humedad relativa promedio anual es de 45.7%, correspondiendo a diciembre y enero ser los meses de mayor humedad relativa promedio con 60.1% y 53.8%, respectivamente, mientras que mayo y junio son

los de menor humedad promedio con tan sólo 35.5% y 33%, y al igual que en la marcha de la precipitación, se observa un período ascendente que culmina en el mes de agosto con 49.8%.

El régimen de vientos que afecta a Mexicali, B.C., en general, tiene el siguiente comportamiento estacional: desde principios de otoño y hasta mediados de primavera prevalece un flujo de aire marítimo modificado del noroeste. Este flujo está asociado con el campo de la Alta Presión del Pacífico noroeste, que en esta temporada tiene su máximo desplazamiento hacia el sur. Este flujo del noroeste se ve reforzado cuando un sistema frontal atraviesa la región, ya que se intensifica el gradiente de presión que acompaña a estos sistemas frontales. Durante los meses de junio a agosto, y hasta mediados de septiembre, Mexicali y su valle se encuentra dominado por una masa de aire muy caliente de tipo continental, relativamente seca, la cual posee una baja presión debido a la intensa radiación solar. Esta masa de aire contrasta notablemente con una masa de aire más fría, húmeda, tipo tropical marítima del Golfo de California, donde predomina un sistema de alta presión. Se establece entonces un gradiente de presión sur-norte, por lo que el flujo de aire es dirección sur y sureste durante esta temporada. Este flujo, generalmente húmedo, ocasiona incomodidad al ambiente debido a la combinación alta temperatura-alta humedad (García-Cueto, 1999).

2.4.2 Rosa de vientos a meso-escala

En la Figura 2.6 se muestra la rosa de vientos promedio anual en superficie a meso escala, con información del aeropuerto local de los años 2005 al 2008. Se puede observar un patrón de flujo diferenciado básicamente en dos direcciones más frecuentes. Los vientos del cuadrante norte-oeste se presentan con una frecuencia del 45%, siendo las direcciones preferidas oeste-noroeste y norte-noroeste, y ocurren particularmente de octubre a mayo. El patrón de vientos del cuadrante este-sur se presenta con una frecuencia del 39%, y los de mayor ocurrencia son del sur y sur-sureste, presentándose sobre todo en los meses de junio a septiembre (Pro-Aire 2011-2020).

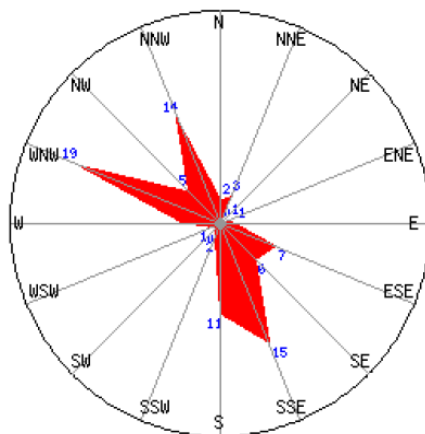


Figura 2. 6: Distribución anual de dirección del viento en Mexicali 2005-2008.

Fuente: Aeropuerto local, Windfinder.com (Tomado del programa para mejorar la calidad del aire Mexicali 2011-2020.)

La distribución anual preferente del viento presentada es a meso escala, para el micro experimento la dirección del viento es un resultado promedio de los días de medición a micro escala, por lo tanto y debido a las bajas velocidades promedio registradas la dirección muestra una constante variabilidad.

A continuación se mencionan los meses representativos de cada estación del año y su dirección del viento prevalente.

El mes representativo durante la estación de verano es julio, la dirección prevalente es del sur-sureste (Figura 2.7).

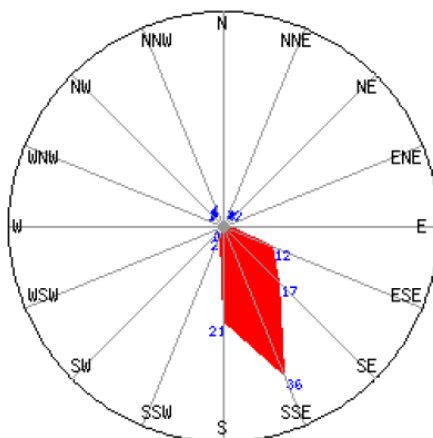


Figura 2. 7: Distribución en julio de dirección del viento en Mexicali 2005-2008.

Fuente: Aeropuerto local, Windfinder.com (Tomada de Pro-Aire 2011-2020)

El mes representativo durante la estación de invierno es enero, la dirección prevalente es del oeste-noroeste, siguiéndole la del norte-noroeste (Figura 2.8).

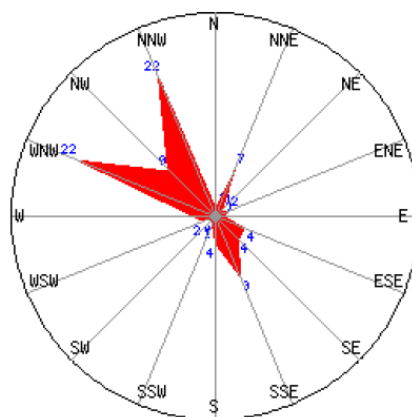


Figura 2. 8: Distribución en enero de dirección del viento en Mexicali 2005-2008.

Fuente: Aeropuerto local, Windfinder.com (Tomada de Pro-Aire 2011-2020)

El mes representativo durante la estación de primavera es abril, la dirección prevalente es del oeste-noroeste, siguiéndole la del norte-noroeste, aunque para este mes la segunda dirección de mayor frecuencia es del sur-sureste (Figura 2.9).

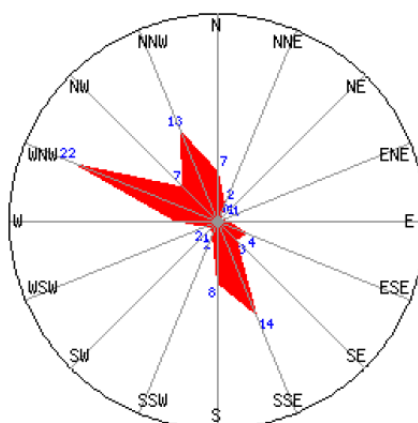


Figura 2. 9: Distribución en abril de dirección del viento en Mexicali 2005-2008.

Fuente: Aeropuerto local, Windfinder.com (Tomada de Pro-Aire 2011-2020)

Octubre es el mes representativo durante la estación de otoño, la dirección prevalente es del oeste-noroeste, siguiéndole la del norte-noroeste (Figura 2.10).

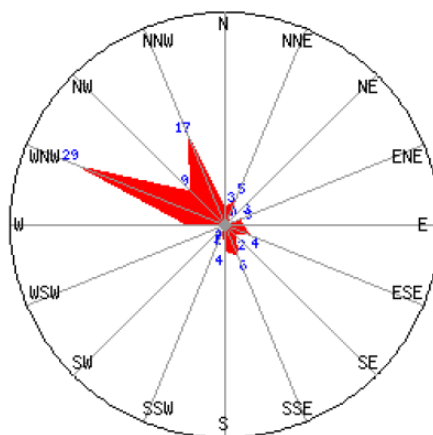


Figura 2. 10: Distribución en octubre de dirección del viento en Mexicali 2005-2008.
Fuente: Aeropuerto local, Windfinder.com (Tomada de Pro-Aire 2011-2020)

2.4.3 Suelo nativo: vertisoles

Este tipo de suelo se presentan en climas templados y cálidos, en zonas en las que hay una marcada estación seca y árida.

Los vertisoles crómicos se caracterizan por las grietas anchas y profundas que aparecen en ellos en la época de sequía. Son suelos muy arcillosos, frecuentemente negros o grises en las zonas del Centro y Oriente de México, y cafés rojizos en el Norte. Estos suelos son pegajosos cuando están húmedos y muy duros cuando están secos y presentan por lo general una baja susceptibilidad a la erosión, características muy marcadas en el suelo nativo de Mexicali (SPP, 1981).

2.4.4 Usos de suelo

El municipio de Mexicali cuenta con una superficie de 14 541.44 km² (INEGI, 2005), de los cuales 220.92 km² (INEGI, 2010) corresponden al área urbana de la ciudad de Mexicali, distribuyéndose como se indica en la Tabla 2.4.

Tabla 2. 4: Usos del suelo en Mexicali, B.C.

<i>Uso de suelo</i>	<i>Porcentaje</i>
Vivienda	57
Industria	6
Equipamiento	6.1
Comercio y servicios	5.5
Grandes baldíos	22.6
Área verde	2
Total (hectáreas)	20,633 (al año 2004)

Fuente: Ayuntamiento de Mexicali-IMIP (2007). Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Mexicali 2025.

2.5 Coberturas comunes de la ciudad de Mexicali

2.5.1 Asfalto

Los asfaltos son aquellas sustancias de color oscuro que pueden ser líquidas, semisólidas o sólidas, compuestas esencialmente de hidrocarburos solubles en sulfuro de carbono en su mayor parte y procedentes de yacimientos naturales u obtenidos como residuo del tratamiento de determinados crudos de petróleo por destilación o extracción, cuyas cualidades aglutinantes y propiedades físicas y químicas los hacen óptimos para un gran número de aplicaciones.

Muchos de los asfaltos usados en trabajos de pavimentación provienen de la destilación del petróleo. La gran versatilidad de los materiales bituminosos hace que éstos sean los más utilizados para la construcción y mantenimiento de estructuras de pavimentos flexibles. Los principales tipos de ligantes bituminosos que se emplean actualmente para la elaboración de las mezclas asfálticas son los asfaltos naturales, los cementos asfálticos o asfaltos de penetración, los asfaltos líquidos o asfaltos rebajados, las emulsiones asfálticas y los crudos del petróleo. (Reyes, 2003)

Varios autores han relacionado al asfalto con la presencia de la isla de calor urbana, se han realizado estudios (Sobrino, 2009; Villanueva-Solis, 2013; Angel et. al, 2010; Comarazamy), en los que concluyen que el efecto de la isla de calor urbana está creciendo a la par del desarrollo urbano.

2.5.2 Concreto

El concreto es una mezcla de cemento, agregado grueso o piedra, agregado fino o arena y agua. El cemento, el agua y la arena constituyen el mortero cuya función es unir diversas partículas de agregado grueso llenando los vacíos entre ellas. En teoría, el volumen de mortero sólo debería llenar el volumen entre partículas. En la práctica, este volumen es mayor por el uso de una mayor cantidad de mortero para asegurar que no se formen vacíos.

Para obtener un buen concreto no sólo basta contar con materiales de buena calidad mezclados en proporciones correctas. Es necesario también tener en cuenta factores como el proceso de mezclado, transporte, colocación o vaciado y curado. (E. Harmsen Teodoro. Diseño de estructuras de concreto armado, 2005). Este compuesto al igual que el asfalto es una cobertura común de áreas urbanas, se ha incluido en estudios (Bello, 1994; Papparelli, 2007) en la cuales se menciona que el cambio de uso de suelo, así como la densidad de la edificación aumentan la intensidad de la isla de calor urbana, en donde a partir de elevadas correlaciones obtenidas, se han calculado las máximas islas de calor, como un valor medio anual y valor medio bajo diferentes situaciones atmosféricas, para un máximo teórico de

edificación del 100%. Dichas isla alcanzaría un valor medio anual de 2,5°C, bajando a 1,93°C con tiempo inestables y alcanzando los 2,7°C con tiempo estable.

2.5.3 Suelo nativo (arcilloso)

Como resultado de los procesos de meteorización química y mecánica, la roca original se desmenuza y los minerales contenidos en ella (minerales primarios) se transforman en otros de distinta naturaleza química (minerales secundarios). Como consecuencia de estos procesos, el suelo va conformándose con partículas de distinto tamaño y composición. Así, en la fase sólida mineral de un suelo común, se pueden distinguir cuatro fracciones de material según su tamaño:

1. Grava: fracción con partículas de tamaño superior a 2 mm de diámetro.
2. Arena: fracción con partículas de tamaño comprendido entre 2 y 0.05mm.
3. Limo: fracción con partículas comprendidas entre 0.05 y 0.002 mm.
4. Arcilla: fracción con partículas de diámetro inferior a 0.002mm.

La proporción en la que entran a formar parte estas fracciones en un suelo determina en gran manera su textura y sus propiedades. La textura viene determinada por la porosidad, la permeabilidad y la estructura. La porosidad es una medida de la relación entre el volumen de los poros y el volumen total del suelo. La permeabilidad mide la velocidad a la que circula un fluido a través de un medio. La estructura de un suelo viene determinada por la intensidad de la unión entre partículas. En la Tabla 2.5 se resumen las propiedades texturales de un suelo arenoso y de otro arcilloso.

Tabla 2. 5: Comparación cualitativa de propiedades texturales entre suelos arenosos y arcillosos.

<i>Propiedad</i>	<i>Suelo arenoso</i>	<i>Suelo arcilloso</i>
Porosidad	Baja	Alta
Permeabilidad	Alta	Baja
Aireación	Alta	Baja
Retención humedad	Baja	Alta
Retención nutrientes	Baja	Alta

Un suelo arcilloso está formado por partículas pequeñas, con una tendencia a pegarse entre ellas, lo cual origina un suelo con poros de diámetro muy pequeño, y por tanto, poco permeable. Como consecuencia, este tipo de suelos están poco aireados y retienen el agua. Puesto que la porción de

silicatos laminares es elevada en los suelos arcillosos, también lo es su capacidad de retención y de intercambio de cationes nutrientes. (Peral, 2006)

2.5.4 Césped

El grupo de plantas cespitosas, llamadas comúnmente pastos, posee características botánicas que lo distinguen del resto de las gramíneas, básicamente por su facilidad para reponerse de los pisoteos, por su crecimiento erguido, matoso, su adaptación a los cortes frecuentes y la rusticidad frente a las temperaturas bajas.

El césped es una asociación de plantas de la familia botánica de las gramíneas, orden de las monocotiledóneas. Constituye una de las familias botánicas más numerosas del reino vegetal, pues presenta unos 600 géneros y 10 000 especies. (Álvarez, 2006)

Tipos de césped:

Césped ornamental o suntuario: es aquel que cubre las expectativas estéticas del diseño con el objeto de ofrecer la belleza del color, textura, brillo y uniformidad de la carpeta. Estos céspedes no se pisan, sirven para preparar exposiciones de plantas y flores, cubrir un parterre o acompañar un dibujo de bordado.

Césped funcional o utilitario: es el que puede soportar el pisoteo de los niños, adolescentes y adultos en las áreas recreativas y deportivas de clubes o paseos públicos y privados.

Césped de ambos usos: se puede usar integrando mezclas deportivas y también solo, como especie ornamental, dado su color verde claro luminoso y brillante.

Pradera natural: es una cobertura con gramíneas y no gramíneas, que con el mantenimiento basado en cortes periódicos, fertilización y desmalezado, puede llegar a constituir una carpeta verde ornamental.

Plantas cubresuelos: es un recurso para cubrir lugares escarpados y taludes (Álvarez y Urien, 2006)

2.5.5 Poliestireno expandido con pintura elastomérica blanca

El poliestireno expandido es un plástico celular rígido hecho de sustancias petroquímicas derivadas del petróleo crudo. Las características primordiales son su baja conductividad térmica, su poco peso, su resistencia a la humedad y su estabilidad dimensional (no cambia con la temperatura y la humedad).

El poliestireno expandido no se deteriora con el paso del tiempo, debido a su estructura de células cerradas que sólo contiene aire. En pruebas realizadas no se mostraron evidencias de crecimiento de hongos ni bacterias. Estas características únicas y su durabilidad lo hacen un material útil en la construcción (López, 2006).

La conductividad térmica (λ) de los paneles de espuma de poliestireno expandido es de las más bajas de los materiales empleados en la construcción. Su coeficiente a cero grados centígrados es $\lambda=0.024$ Kcal/mh°C. Es un buen material para el aislamiento del frío y calor (Payá, 2004).

El poliestireno expandido y la pintura elastomérica funcionan como un sistema impermeabilizante sobre los techos de viviendas en zonas desérticas con el propósito de reducir el sobrecalentamiento por asoleamiento directo y con ello la carga de enfriamiento a los sistemas de climatización (Duarte et. al., 2008).

La pintura elastomérica cuenta con un albedo alto y refleja la mayor parte de radiación incidente, esta se puede comportar como un material frío, algunos autores recomiendan utilizar pinturas para mitigar el efecto de la isla de calor urbana en techos y pavimentos (Alchapar, 2012; Synnefa et. al., 2006; Satamouris et. al., 2011).

2.6 Instrumentos de medición

2.6.1 Piranómetros y solarímetros

Los piranómetros y solarímetros no sólo son sensibles a la radiación solar directa, sino también a la difusa. Su elemento sensor es, por lo regular, una termopila (serie de termopares) que produce una corriente, la cual da pie a que se establezca la magnitud de la radiación. La parte sensora está protegida por una cápsula de vidrio o de cuarzo que impide el paso de la radiación de onda larga. En el caso del vidrio va de 350 a 2 800 nm y en el cuarzo de 250 a 4000 nm. Generalmente, estos instrumentos tienen un tiempo de atraso máximo de 50 s, y el error que introducen en la medición es de cerca de $\pm 5\%$ (Figura 2.11).



Figura 2. 11: Piranómetro hecho con una fotocelda de silicio.
Fuente: Campbell Scientific, Inc

Piranómetros. Un piranómetro debe medir el flujo de radiación solar de onda corta (SW, por sus iniciales en inglés, short wave) en un campo de visión de 180 grados. El espectro de la radiación de onda corta atmosférica se extiende aproximadamente 300 a 2800 nm. De ello se desprende que un piranómetro debe cubrir ese espectro con una sensibilidad espectral que es tan "plana" como sea posible.

Para una medición de flujo, se requiere, por definición, que la respuesta a la radiación varíe con el coseno del ángulo de incidencia. Por ejemplo, la respuesta completa se produce cuando la radiación solar incide en el sensor perpendicularmente (normal a la superficie, el sol en el cenit, 0 grados de ángulo de incidencia); respuesta a cero se produce cuando el sol está en el horizonte (ángulo de 90 grados de incidencia el ángulo cenital) y respuesta media se produce a los 60 grados de ángulo de incidencia. Se desprende de la definición que un piranómetro debe ser llamado de "respuesta direccional" o "respuesta coseno", que está cerca de la característica ideal del coseno (Figura 2.12). Con el fin de alcanzar los niveles de dirección y espectrales adecuados, los componentes principales de un piranómetro son:

1. Sensor de termopila con un recubrimiento negro para absorber toda la radiación solar, proporciona un espectro plano que cubre un intervalo de 300 hasta 50,000 nanómetros, y tiene una respuesta coseno casi perfecta.

2. Cúpula de cristal, limita la respuesta espectral de 200 a 2800 nanómetros, mientras que la preservación del campo visual de 180 grados. Otra función de la cúpula es que proteger el sensor de termopila de la convección.

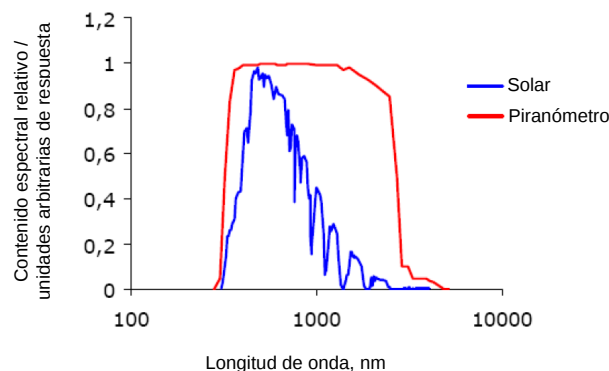


Figura 2. 12: Respuesta espectral del piranómetro en comparación con el espectro solar.
El piranómetro sólo corta una parte insignificante del espectro solar total (tomada de manual de Campbell, modificación propia)

El revestimiento negro sobre el sensor de termopila absorbe la radiación solar. Esta radiación se convierte en calor. El calor fluye a través del sensor a la carcasa piranómetro. El sensor de termopila genera una señal de salida de voltaje que es proporcional a la radiación solar. (Campbell Scientific 2008-2011)

Difusómetros. Los piranómetros y solarímetros descritos pueden servir también para obtener la magnitud de la radiación directa (Q) y la difusa (q) por separado; para ello hay que utilizar dos instrumentos simultáneamente: uno en la forma común para determinar ($Q+q$), y el otro provisto de una banda que dé sombra al sensor pero que permita la llegada de radiación difusa. Entonces podrán establecerse las cantidades q , ($Q+q$), y Q se calcula a partir $Q=(Q+q)-q$.

Un piranómetro usado de esta manera es un difusómetro y se debe tener especial cuidado de orientar la banda de sombra de tal manera que siga el curso aparente del sol en el cielo, pues de lo contrario se corre el riesgo de incurrir en graves apreciaciones. (L. Barradas Víctor. Instrumentación biometeorológica. Pág. 26,27.1994) (Barradas, 1994).

2.6.2 Pirgeómetros

Un pirgeómetro debe medir la radiación de infrarrojo lejano o de onda larga (LW, por sus iniciales en inglés, long wave) de un campo de visión de 180 grados. El espectro de radiación de onda larga atmosférica se extiende aproximadamente desde 4,500 a 50,000 nm. El pirgeómetro debe cubrir ese espectro con una sensibilidad espectral que es tan "plana" como posible.

El pirgeómetro tiene una respuesta direccional igual que el piranómetro, descrita en párrafo descrito con anterioridad (Figura 2.13).

Para lograr las características direccionales y espectrales adecuadas, los componentes principales de un pirgeómetro son:

1. Sensor de termopila con un recubrimiento negro, absorbe toda la radiación de onda corta y onda larga, proporciona un espectro plano que cubre el intervalo de los nanómetros 300 a 50.000, y tiene una respuesta coseno casi perfecta.

2. Ventana de silicio solar como bloqueo, limita la respuesta espectral de 4,500 a 50,000 nanómetros (corta la parte de abajo de 4,500 nm), mientras que la preservación del campo de 150 grados de vista (no los ideales de 180 grados). Otra función de la ventana es que protege el sensor de termopila de la convección.

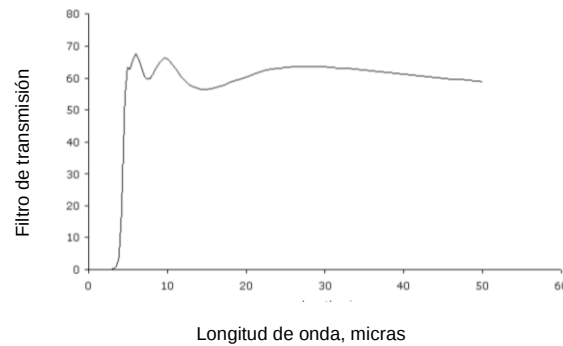


Figura 2. 13: Respuesta espectral del pirgeómetro en comparación con el espectro de onda larga atmosférica.
Tomada de Campbell Scientific, modificación propia

El revestimiento negro sobre el sensor de termopila absorbe la radiación de onda larga. Esta radiación se convierte en calor. El calor fluye a través del sensor a la carcasa. El sensor de termopila genera una señal de salida de voltaje que es proporcional a la radiación de onda larga que se intercambia entre el sensor y la fuente. Sin embargo, el propio sensor también irradia radiación de onda larga. Esto es de acuerdo a la ley de Plank, de modo que la señal termopila del pirgeómetro se compone de la radiación entrante menos la radiación saliente. Con el fin de estimar la componente de salida, la temperatura del pirgeómetro se mide de forma independiente, utilizando un sensor de temperatura suministrada por el usuario.(Campbell Scientific 2008-2011)

2.6.3 Sensor NR01 (cuatro componentes de radiación neta)

El sensor NR01 hace mediciones independientes de la energía solar de onda corta o SW y el lejano Infrarrojo de onda larga o LW. Se ofrece una solución profesional para la medición de la radiación neta y sus cuatro componentes principales. (Figura 2.14)



Figura 2. 14: Sensor NR01 (sensor de cuatro componentes de radiación neta).
Fuente: Campbell Scientific, Inc.

El NR01 sirve para medir las cuatro componentes separadas del balance de radiación de la superficie. Genera cuatro tensiones de salida pequeñas proporcional a la entrada y salida de SW y los flujos de LW; SW_{ent} o la radiación solar global, SW_{sal} o radiación solar reflejada, LW_{ent} o infrarroja emitida por el cielo y LW_{sal} o infrarroja emitida por la superficie del suelo.

A partir de estos parámetros también se pueden calcular el albedo, la temperatura del cielo, la temperatura superficial y por supuesto la radiación neta (valor neto de todos los flujos de SW y LW) (Campbell Scientific, Inc. 2008-2010)

2.6.4 Principio de medición del NR01

En su aplicación más común, son NR01 las medidas netas de radiación. Los cuatro componentes de la radiación neta se miden y la radiación neta se calcula, con el siguiente principio de medición:

(Campbell Scientific, Inc. 2008-2011).

$$SW_{ent} = U_{pirano, arriba} / E_{pirano, arriba}$$

$$SW_{sal} = U_{pirano, abajo} / E_{pirano, abajo}$$

$$LW_{ent} = (U_{pirgeo, arriba} / E_{pirgeo, arriba}) + 5.67 \cdot 10^{-8} (T_{pirgeo})^4$$

$$LW_{sal} = (U_{pirgeo, abajo} / E_{pirgeo, abajo}) + 5.67 \cdot 10^{-8} (T_{pirgeo})^4$$

NOTA: en el LW_{net} la temperatura del instrumento se cancela:

$$LW_{net} = U_{pirgeo, arriba} / E_{pirgeo, arriba} - U_{pirgeo, abajo} / E_{pirgeo, abajo}$$

$$SW_{net} = U_{pirano, arriba} / E_{pirano, arriba} - U_{pirano, abajo} / E_{pirano, abajo}$$

$$NR = SW_{net} + LW_{net}$$

Parámetros especiales que podrían deducirse:

$$SW_{albedo} = SW_{ent} / SW_{sal}$$

$$T_{sup} = (LW_{sal} / 5.67 \cdot 10^{-8})^{1/4}$$

$$T_{cielo} = (LW_{ent} / 5.67 \cdot 10^{-8})^{1/4}$$

*U, debe dividirse por la sensibilidad del sensor; una constante, E, que se suministra con cada instrumento individual.

Donde:

SW_{ent} = longitud de onda corta de entrada

SW_{sal} = longitud de onda corta de salida

LW_{ent} = longitud de onda larga de entrada

LW_{sal} = longitud de onda larga de salida

U_{pirano} = voltaje de salida

E_{pirano} = constante de sensibilidad

T_{pirgeo} = temperatura del pirgeómetro

LW_{net} = longitud neta de onda larga

SW_{net} = longitud neta de onda corta

NR = radiación neta

SW_{albedo} = albedo

T_{sup} = temperatura de superficie

T_{cielo} = temperatura ambiente

CAPITULO 3

MATERIALES Y

MÉTODOS

3 Materiales y métodos

En el siguiente capítulo se describen los materiales y métodos utilizados en la investigación de caracterización de materiales de cubrimiento de suelos en Mexicali, B. C., se inicia explicando la ubicación del arreglo experimental, selección de materiales y equipo, así como aspectos relevantes de éste.

3.1 Arreglo experimental

Para obtener una mayor precisión, la presente investigación se realizó a micro escala, en la capa de dosel urbano, el arreglo experimental se ubicó en el techo del Instituto de Ingeniería Campus Mexicali de la Universidad Autónoma de Baja California, que tiene una altura de 8,50 m, y a 1,25 m por encima de la cubierta. Se construyó una caja de madera cuyas dimensiones eran de 1m x 1 m con 0,55 m de profundidad, completamente llena de suelo nativo (arcilloso) sobre la cual se colocaron las superficies a caracterizar. Se llevaron a cabo las campañas de medición de ciclos de 48 horas para conseguir un ciclo promedio de 24 horas. Este diseño experimental (Figura 3.1) se ubica en la capa de dosel urbano y su alcance espacial queda circunscrito al flujo de propiedades, térmicas e hídricas, realizado con el viento, tal y como se documenta en la sección de discusión de resultados.

El equipo de balance energético y radiativo fue colocado a 0,20 m sobre cada una de las coberturas, de tal manera que su campo de visión abarcó completamente el material caracterizado, de acuerdo a Anthoni et al. (2000), un radiómetro neto instalado adecuadamente, muestrea un área por debajo del sensor con un ángulo de vista de 85° alrededor de la vertical, que le permite tener la cobertura del 99% del área visual inferior; el radio máximo inicial en la horizontal (Rmax) se calcula como:

$$R_{\max} = (\tan 85^\circ) h$$

De la ecuación anterior se despejó la variable h (altura), para obtener la altura adecuada para el posicionamiento del equipo (Figuras 3.2).

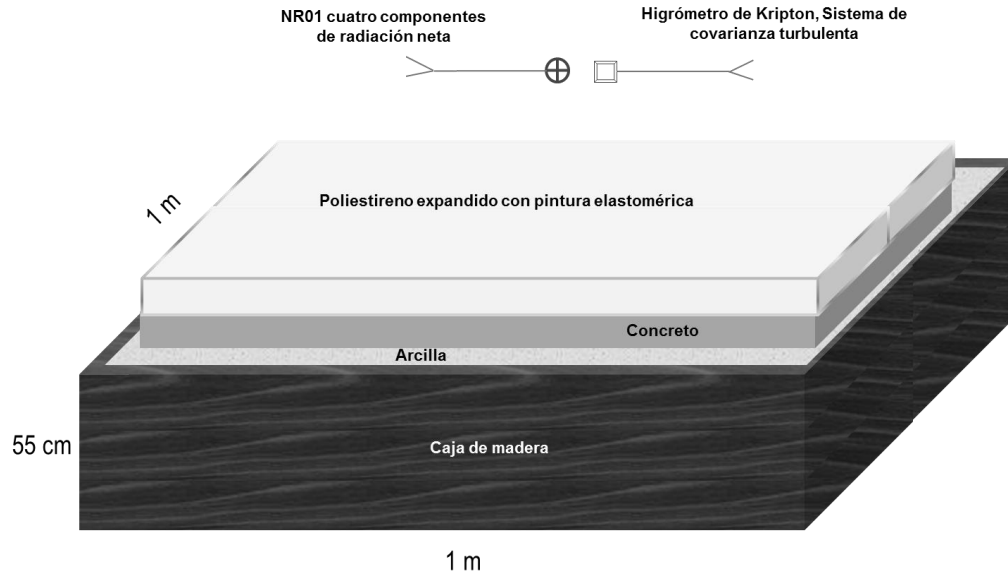


Figura 3. 1: Esquema experimental de los materiales a caracterizar.
Fuente: elaboración propia.



Figura 3. 2: Ubicación de sensores de radiación neta, flujos de calor y temperatura superficial sobre el experimento.

El arreglo experimental fue utilizado en varias campañas de medición, las cuales se presentan en la Tabla 3.1. En Verano se monitoreó el año 2011, 2012; Invierno 2012 ,2013; Primavera 2012, 2013; y Otoño 2012.

Tabla 3. 1: Días de monitoreo de campañas de verano 2011,2012; invierno 2012,2013; primavera 2012,2013; y otoño 2012.

Cobertura	Días de monitoreo			
	Verano 2011, 2012	Invierno 2012,2013	Primavera 2012,2013	Otoño 2012
SD	5-7 Agosto 2011	9-11 Febrero 2012	16-18 Abril 2012	12-14 Noviembre 2012
Asfalto	9-11 Agosto 2011	24-26 Febrero 2012	9-11 Mayo 2012	
Concreto	12-14 Agosto 2011	25-27 Enero 2012	19 y 23 Abril 2012	18-20 Noviembre 2012
PPEB	18-20 Agosto 2011	30 Ene y 4 Feb 2012	28-30 Abril 2012	20-22 Noviembre 2012
PPEB	19-21 Agosto 2012	4 y 5 Febrero 2013		
Césped	21-23 Septiembre 2013	12 y 13 Marzo 2013	4 y 6 Junio 2013	

3.2 Equipo

En la investigación se utilizó equipo (Tabla 3.2) de la compañía Campbell Scientific conectado a sistemas de adquisición de datos CR23X, CR10 Y CR3000, los cuales se programaron para obtener mediciones de radiación neta, flujos de calor (sensible y latente) y variables meteorológicas como temperatura del aire, humedad relativa, dirección y velocidad del viento.

Tabla 3. 2: Equipo utilizado en la experimentación

Sensor	Compañía	Medición	Unidad
NR01, cuatro componentes de radiación neta	Campbell scientific	Radiación onda corta y larga	W/m ²
CSAT3, anemómetro sónico tridimensional	Campbell scientific	Calor Sensible y componentes del viento	W/m ² , m/s
KH20, anemómetro de Kriptón	Campbell scientific	Calor Latente	W/m ²
Sonda HMP45	Campbell scientific	Temperatura del aire y humedad relativa	°C, %
SI-111, termómetro infrarrojo	Campbell scientific	Temperatura superficial	°C

El acopio de datos se llevó a cabo mediante sistemas de adquisición de datos (DataLogger), datos de radiación neta, flujos de calor sensible y latente, temperatura y humedad relativa del aire se registraron cada 30 minutos, temperatura superficial se registró cada 10 minutos. El procesamiento de dato obtenidos, se efectuó principalmente a través de procesos estadísticos básicos en el programa Excel (distintas versiones); para programar, compilar y comunicación del equipo se utilizó el software de Campbell Scientific PC200W, el análisis de dirección y velocidad del viento en el programa Lakes Enviromental y la representación gráfica de los balances energéticos en el programa Grapher 10.

La radiación de onda corta y larga, se midió con el sensor NR01; el flujo de calor sensible, así como las componentes del viento con un anemómetro sónico tridimensional, CSAT3; el flujo de calor latente se midió con un anemómetro de Kriptón, KH20; la temperatura y humedad relativa del ambiente con una sonda HMP45; y la temperatura de superficie, se midió con un termómetro infrarrojo SI-111, todo el equipo de la compañía Campbell Scientific.

3.3 Materiales

Los materiales utilizados en esta investigación fueron suelo nativo (arcilla), césped, concreto, asfalto y poliestireno expandido con pintura elastomérica blanca (PPEB). Algunos de ellos fueron colectados del área urbana (Figura 3.3), a continuación de enlistan los espesores de cada uno:

Suelo nativo (arcilla) (0,55 m)

Concreto (0,1 m)

Asfalto (común del área urbana)

Césped (común del área urbana)

PPEB (0,05 m)

La selección de estas coberturas se realizó en base a que se encuentran en zonas donde se ubicó la ocurrencia del fenómeno de isla de calor urbano (Casillas, 2009).

La instalación de equipo in-situ no fue posible debido a la inseguridad por el vandalismo que se pudiera presentar, por lo que se optó por un sitio seguro, en el cual se facilitara la manipulación de las superficies, intercalando cada una de ellas cada 48 horas de medición continua, buscando siempre que las condiciones meteorológicas prevalecieran estables, en cuanto a días soleados, y en la medida de lo posible, que el viento no fuera un factor importante para evitar el transporte advectivo de propiedades termodinámicas.



Figura 3. 3: Asfalto recolectado de la zona oriente de la ciudad de Mexicali.

3.4 Modelo propuesto

En el modelo utilizado en este estudio se asume que existe un cuasi-equilibrio en el sistema superficie – atmósfera, formulado de acuerdo con la primera ley de la termodinámica (conservación

de la energía), en el que es posible identificar cinco tipos de flujos de energía : la radiación neta (Q^*), el flujo de calor sensible (Q_H), el flujo de calor latente (Q_E), los cuales se midieron; el flujo de calor almacenado (Q_G), que se manejó como residual; en tanto que para el flujo de calor antropogénico (Q_F) y el flujo de calor advectivo (Q_D) la incertidumbre es muy alta. El balance de energía de superficie se puede escribir como:

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G + Q_F + Q_D$$

donde Q^* es el resultado de la diferencia entre la radiación solar global (Q_S) y la radiación reflejada y emitida desde la superficie (Q_R), de manera que : $Q^* = Q_S - Q_R$ (radiación neta), flujo de calor sensible Q_H , se refiere a turbulento intercambio de calor entre la superficie y la atmósfera , causada por la diferencia de temperatura entre los dos medios , el Q_E de calor latente , o flujo de vapor de agua es el intercambio turbulento de calor , procesos de evapotranspiración (o condensación) entre la superficie y la atmósfera , Q_G es el flujo de calor a través del suelo o de la superficie , Q_F el flujo de trucos antropogénico, es el flujo de calor generado por la actividad humana , y Q_D el flujo de calor advectivo es el flujo de calor transportado en forma horizontal. Se aplicó la relación de Bowen (β) a los flujos turbulentos de calor sensible y latente para determinar el flujo predominante. Esta se define como la relación de flujos de calor sensible y calor latente sobre una superficie:

$$\beta = Q_H / Q_E$$

β es más pequeño para superficies húmedas, donde hay más energía para la evaporación, y más grande para superficies secas.

3.5 Rosa de los vientos

Las influencias de los alrededores que intervienen en el modelo propuesto del balance de energía requieren del conocimiento y distribución de la dirección y velocidad del viento.

El viento que prevalece en un rango de tiempo puede ser representado por medio de una rosa de los vientos, la cual indica el porcentaje de tiempo en el que el viento sopla de diferentes direcciones. La gráfica consiste en utilizar barras o extensiones que van desde el centro de un círculo hacia un punto determinado que ilustra la dirección del viento, la longitud de cada extensión indicará el porcentaje de tiempo en el que el viento se dirigió hacia esa dirección (Ahrens, 1998).

Los datos se presentan en ocho direcciones primarias y ocho secundarias que se presentan en la siguiente Tabla (3.3).

Tabla 3. 3: Representación de la dirección del viento.

Primarias	Secundarias
N (norte)	NNE (nor noreste)
S (sur)	ENE (este noreste)
E (este)	ESE (este sudeste)
W (oeste)	SSE (sud sudeste)
NE (nordeste)	SSW (sud sudoeste)
NW (noroeste)	WSW (oeste sudoeste)
SE (sudeste)	WNW (oeste noroeste)
SW (sudoeste)	NNW (nor noreste)

Fuente: Análisis de parámetros meteorológicos utilizando el modelo de la rosas de los vientos (2007)

La velocidad del viento se divide en rango que se puede dar en varias unidades, que van desde millar por hora a metro por segundo.

3.5.1 WRPLOT View

WRPLOT View es un programa para Windows mediante el cual se generan gráficas de rosa de los vientos para varios formatos de datos meteorológicos. Una rosa de los vientos muestra la frecuencia de ocurrencia de los vientos en cada una de las direcciones del viento proporcionadas y las clases de velocidad para tiempo y lugar específico (Lakes Environmental Software, 2014).

WRPLOT View se alimenta de datos guardados en archivos con formato SCRAM, CDQ144, SAMSON y datos meteorológicos ISC procesados anticipadamente. Produce rosas de los vientos con opciones de color, al mismo tiempo que crea tablas de distribución y estabilidad de clases (HF-Fax, Wx Software, 2005)

Algunas de las funciones de este programa además de la creación de rosas de los vientos, son las múltiples opciones que presenta para mejorar la rosa de los vientos ya sea utilizando diferentes colores y fuentes especiales, revisar errores, guardar clases de los viento para usos posteriores, importar fácilmente desde Excel y obtener vectores resultantes (The meteorological resource center. Software, 2002)

CAPITULO 4

RESULTADOS

4 Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de los materiales analizados: suelo desnudo, asfalto, concreto, césped, y poliestireno expandido con pintura elastomérica blanca (PPEB), para las campañas de prueba piloto in-situ (2011), de verano (2011,2012, 2013), otoño (2012), invierno (2012, 2013) y primavera (2012, 2013), se presentan tablas y gráficas que ilustran resultados de radiación global, radiación neta, flujo de calor sensible, flujo de calor latente, almacenamiento de calor, temperatura de superficie, albedo y razón de Bowen.

4.1 Resultados campaña verano 2011, 2012

La “campaña de verano” se realizó en tres etapas, debido a la repetición de la caracterización del césped y PPEB, se llevó a cabo durante los períodos 2011 y 2012, en las figuras siguientes se especifican los días de medición de cada material.

Se observaron resultados muy interesantes en esta etapa de la investigación los cuales se analizan en seguida. La tabla 4.1 muestra resultados promedio de esta campaña.

Tabla 4. 1: Flujos de calor promedio, temperatura superficial, albedo y razón de Bowen. Verano. SD se refiere a suelo desnudo (arcilla), mientras que PPEB a Poliestireno con Pintura Elastomérica Blanca.

Variable	Unidad	Asfalto 2011	Concreto 2011	SD 2011	PPEB 2011	PPEB 2012	Césped 2012
Radiación neta	W/m ²	144,95	125,46	111,45	34,41	38,07	111,40
Flujo de calor sensible	W/m ²	62,35	100,99	64,64	74,9	167,20	17,87
Flujo de calor latente	W/m ²	6,17	1,51	2,15	9,51	7,97	76,67
Almacenamiento de calor	W/m ²	76,43	22,96	44,66	-50	-44,19	58,91
Temperatura superficial	°C	41,47	34,47	40,9	33,35	35,24	28,17
Albedo	Adim	0,168	0,26	0,264	0,67	0,54	0,26
Razón de Bowen	Adim	10,11	66,88	30,07	7,88	20,95	0,23

Dirección y velocidad del viento. Durante la campaña de verano 2011 predominan vientos provenientes del cuadrante norte-oeste, con una velocidad promedio de 0,43 m/s. En el verano 2012 los vientos preferentes provienen del cuadrante norte-este con velocidad promedio de 0,55 m/s. Según Pro-Aire (2011) la dirección predominante del viento a meso escala es preferente del cuadrante sur-este por lo que en ambas campañas realizadas la dirección del viento no refleja el comportamiento estacional, o bien que la baja altura del anemómetro sónico, en conjunto con los obstáculos de alrededor del lugar de medición, perturban el flujo regional de manera importante (Figura 2.7).

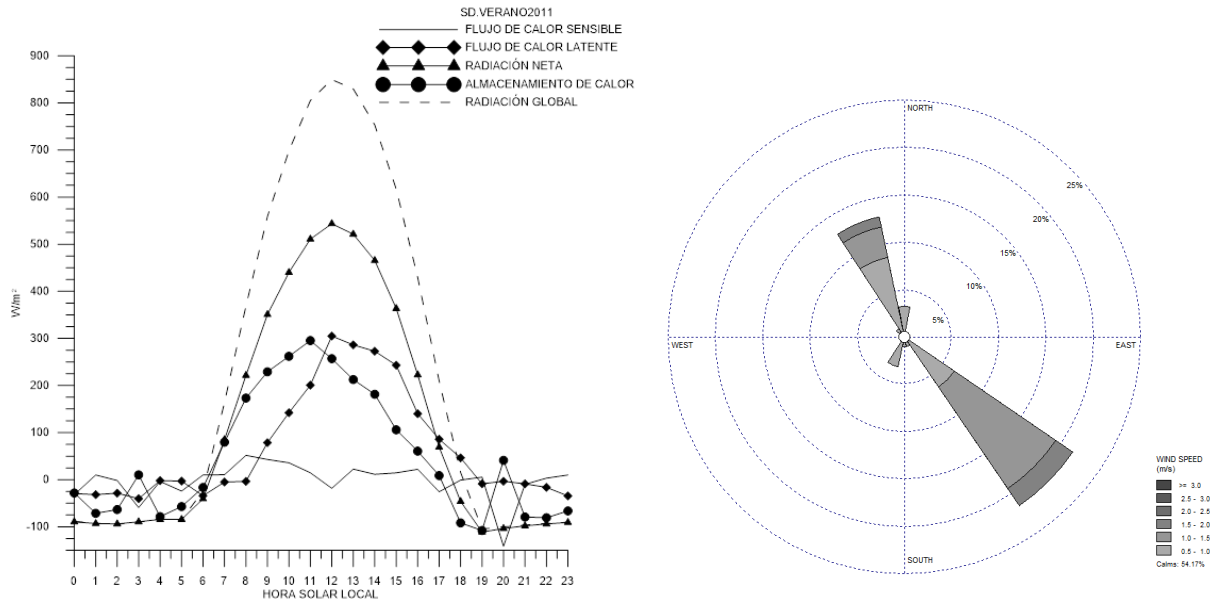


Figura 4. 1: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el suelo desnudo, 5-7 de Agosto de 2011.

Suelo desnudo. Se registró en promedio una radiación neta de $111,45 \text{ W/m}^2$, de los cuales $44,66 \text{ W/m}^2$ se almacenan en la superficie, $64,64 \text{ W/m}^2$ son cedidos en flujo de calor sensible y $2,15 \text{ W/m}^2$ en flujo de calor latente, el termómetro infrarrojo midió $40,9^\circ \text{C}$ en la superficie, con un albedo de $0,26$ y la razón de Bowen de $30,07$. Al igual que el concreto sus flujos se reparten principalmente en flujo de calor sensible y almacenamiento de calor, los vientos predominantes provinieron del sureste (Figura 4.1).

Asfalto. El promedio total de energía disponible en esta superficie fue de $144,95 \text{ W/m}^2$, la cual se reparte en $62,35 \text{ W/m}^2$ en flujo de calor sensible, $6,17 \text{ W/m}^2$ en flujo de calor latente y $76,43 \text{ W/m}^2$ en almacenamiento de calor, su temperatura superficial fue de $41,47^\circ \text{C}$, albedo de 0.168 y razón de Bowen menor a la unidad. En la figura 27 se observa la repartición de los flujos de calor, la repartición de flujos más relevantes de este material son el flujo de calor sensible y el almacenamiento de calor, el viento predominante resultó proveniente del noroeste oscilando entre $1,5$ y 2 m/s (Figura 4.2).

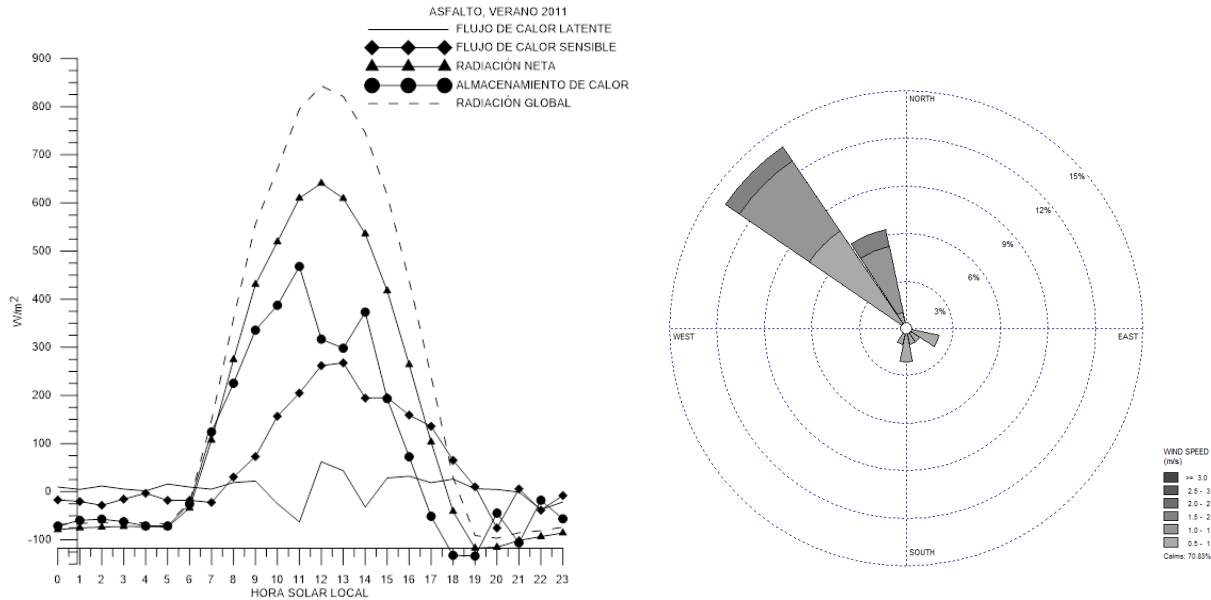


Figura 4. 2: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el asfalto, 9-11 de agosto de 2011.

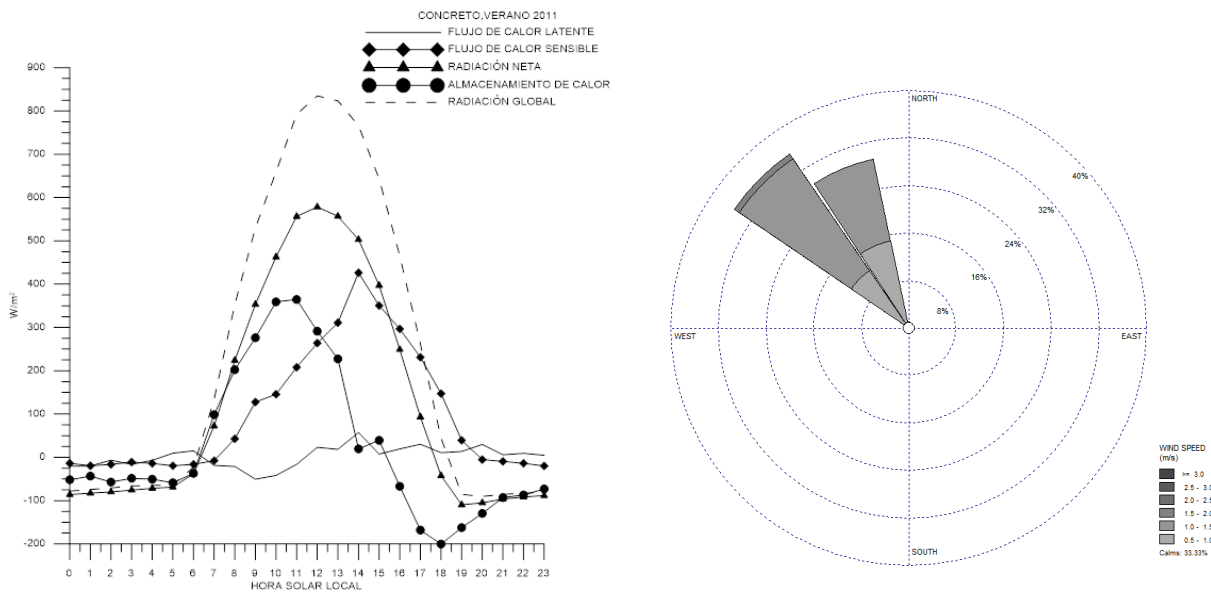


Figura 4. 3: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos el concreto, 12-14 de agosto de 2011.

Concreto. De la energía promedio disponible, 125.46 W/m^2 , se disipa como calor sensible 100,99 W/m^2 , en forma de calor latente 6,17 W/m^2 y se almacena en la cobertura estudiada 22,96 W/m^2 . Se registró una temperatura promedio de la superficie de 34,47 °C y 0.26 de albedo, debido a que es una superficie seca su razón de Bowen es mayor a la unidad. La principal repartición de flujos se da

en almacenamiento de calor y flujo de calor sensible, vientos predominantes del noroeste (Figura 4.3).

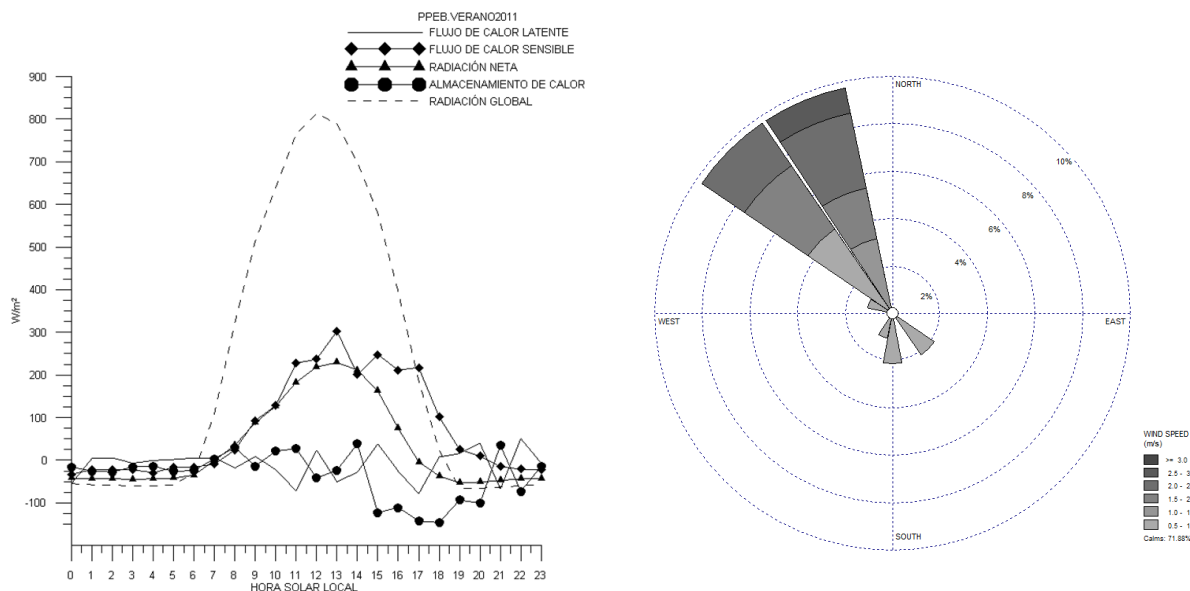


Figura 4. 4: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el poliestireno expandido c/elastomérica blanca, 18-20 de agosto de 2011.

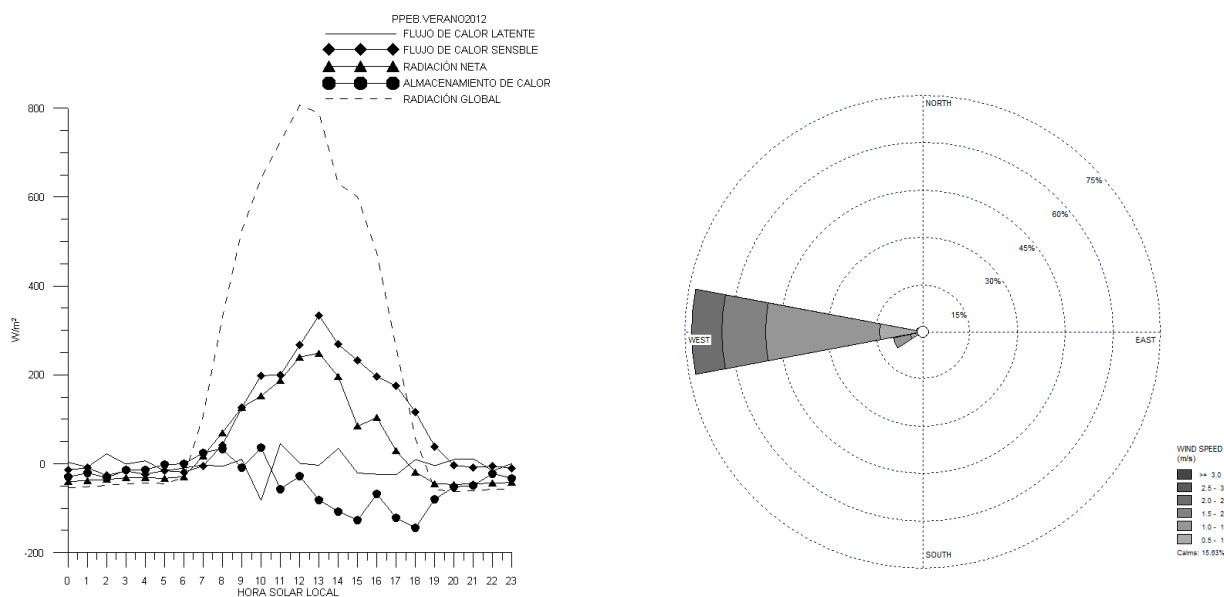


Figura 4. 5: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el poliestireno expandido c/elastomérica blanca, 19-21 de Agosto de 2012.

PPEB. En las dos campañas de verano que se caracterizó esta cobertura, el flujo de calor latente y almacenamiento de calor no fueron significativos, no siendo así para el flujo de calor sensible, 74,9

W/m² (2011) y 167,20 W/m² (2012), sobrepasando la radiación neta de 34,41 W/m² y 38,07 W/m², años 2011 y 2012, respectivamente en sus promedios. En la sección de discusiones se analiza a detalle este comportamiento. En ambas campañas presentan el albedo más alto 0,67 y 0,54, razón de Bowen mayor a la unidad y temperatura superficial alrededor de los 30 ° C. En las Figuras 4.4 y 4.5 se aprecia como el flujo de calor sensible es mayor a la cantidad de energía disponible, en ambos casos la rosa de los vientos indica que provienen del noroeste, precisamente donde están ubicados los equipos de aire acondicionado, atribuyendo este exceso de calor a flujos de calor antropogénico y advectivo, vientos predominantes de noroeste (Figura 4.9 y 4.10).

Césped. En contraste con las demás coberturas, ésta disipa la mayor parte de su energía disponible en flujo de calor latente, como consecuencia del contenido de humedad presente en ella.

Del total, 111,40 W/m², 76,67 W/m² se utilizan para evaporar el agua, mucho mayor que la energía utilizada para calentar el aire, 17,87 W/m², la razón de Bowen menor que a la unidad, a su vez presentó la temperatura promedio superficial más baja, 28, 17°C. A diferencia de las otras superficies, el césped muestra una repartición de flujos con más proporción hacia el flujo de calor latente debido a su contenido de humedad, la predominancia del viento resultó del noreste (Figura 4.6).

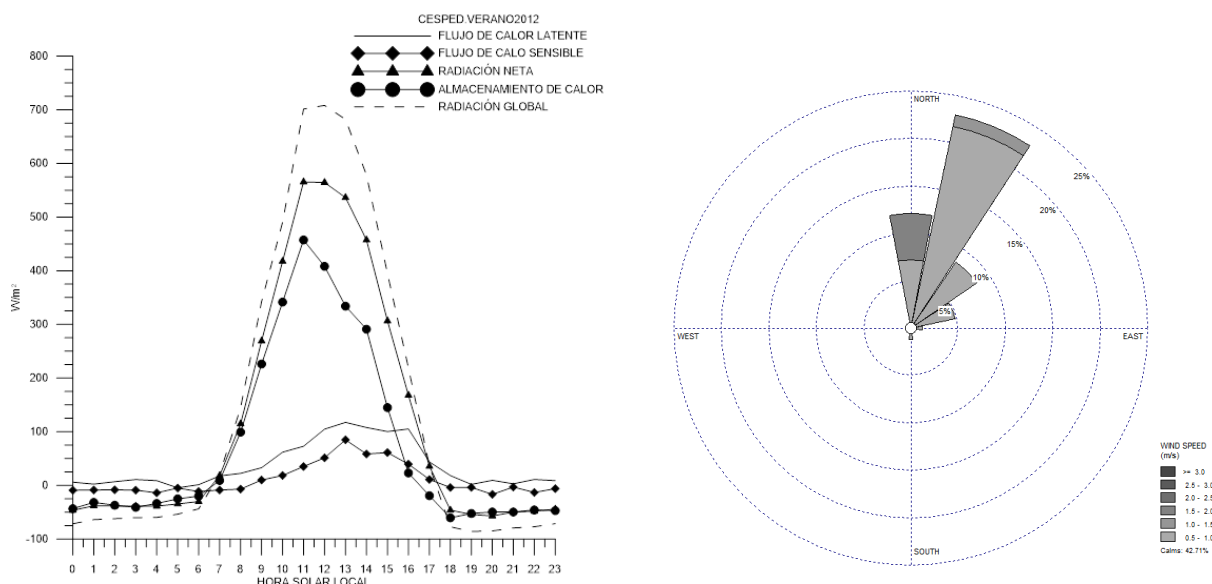
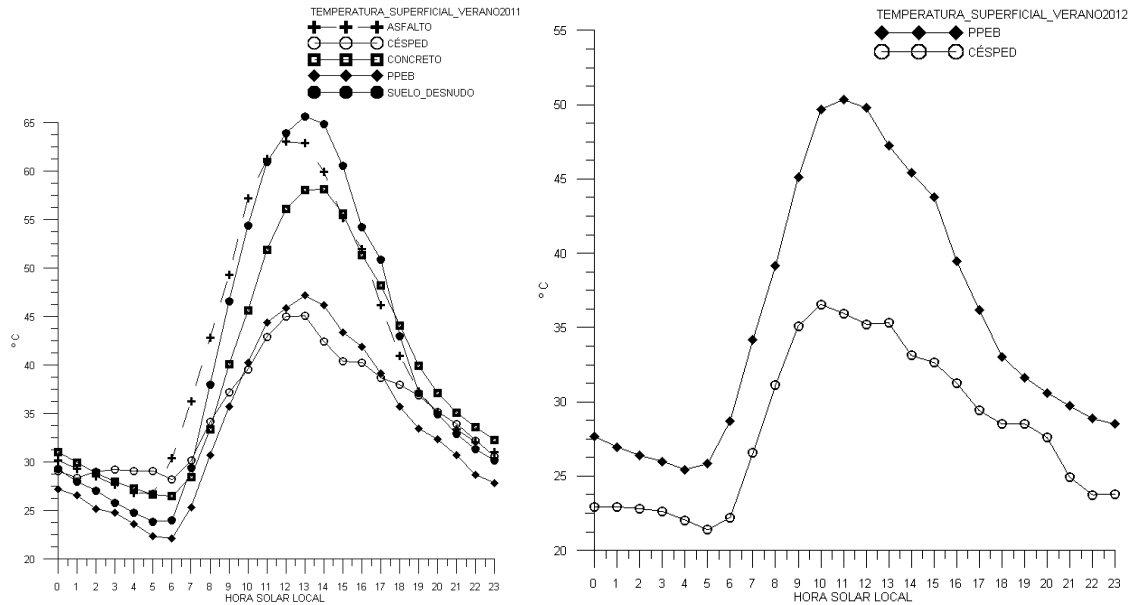


Figura 4. 6: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el césped, 21-23 de septiembre de 2012.

4.1.1 Comportamiento de Temperatura Superficial

El sensor infrarrojo registró en promedio la temperatura superficial más elevada en el asfalto, con 41,47 ° C, y la más baja en el césped, 28,17 ° C, añadiendo sustento al comentario antes dicho respecto a que el césped gasta mayor cantidad de energía evaporando su cantidad de humedad que calentando el aire cercano a su superficie (Figura 4.7).



4.1.2 Comportamiento de Albedo

La superficie más reflectiva resultó ser el PPEB en ambos casos, 0,67 y 0,54, las otras superficies obtuvieron albedos muy similares a los que se encuentran en la literatura, como se muestra en la Tabla 3 (Bonan, 2002) (Figura 4.8).

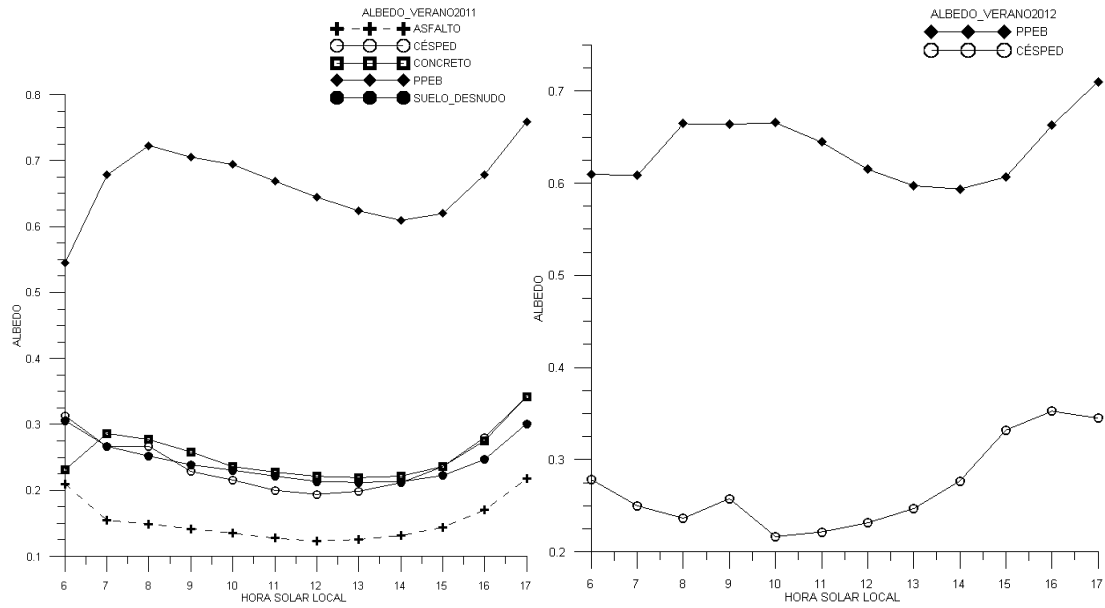


Figura 4. 8: Albedo promedio. Verano 2011,2012



Figura 4. 9: Ubicación de equipo de aire acondicionado sobre la cubierta del Instituto de Ingeniería, UABC, Mexicali, B. C.



Figura 4. 10: Ubicación de equipo de aire acondicionado sobre la cubierta del Instituto de Ingeniería, UABC, Mexicali, B. C.

4.1.3 Resumen de la campaña de verano 2011,2012

Lo más relevante durante la campaña de verano 2011,2013, sucedió en los resultados del césped, fue el material con razón de Bowen menor a la unidad (0,23), debido al contenido de humedad presente, las demás superficies mostraron valores mayores a la unidad; el albedo más alto fue el del PPEB en ambos años, 0,67 y 0,54; la temperatura superficial más elevada en el asfalto, con 41,47 ° C, y la más baja en el césped, 28,17 ° C.

El PPEB mostró en las campañas de verano un exceso en su flujo de calor sensible (74,9 W/m²) sobre la radiación neta (34,41 W/m²) para el verano 2011 y para el verano 2012, repite este comportamiento, ($Q_H = 167,20 \text{ W/m}^2$; $Q^* = 38,07 \text{ W/m}^2$) lo cual podría ser atribuible a la presencia de flujo de calor antropogénico y advectivo ($Q_F + Q_D$), dadas las características de los alrededores del experimento y la dirección del viento prevalente durante los días de medición del cuadrante norte-oeste, misma ubicación de los equipos de aire acondicionado que permanecen encendidos durante el verano.

4.2 Resultados de la campaña de invierno 2012, 2013

La “campaña de invierno” se divide en dos etapas, en la primera etapa se caracterizaron asfalto, concreto, suelo desnudo y PPEB, y en la segunda, PPEB y césped, se llevó a cabo durante los periodos 2012 y 2013, en la figuras se especifica el día exacto de monitoreo de cada material.

A continuación se muestran la tabla 4.2 y figuras con resultados promedio de esta campaña:

Tabla 4. 2: Flujos de calor promedio, temperatura superficial, albedo y razón de Bowen. Invierno.

Variable	Unidad	Asfalto 2012	Concreto 2012	SD 2012	PPEB 2012	PPEB 2013	Césped 2013
Radiación neta	W/m ²	75,00	29,27	49,72	26,42	23,59	118,49
Flujo de calor sensible	W/m ²	40,52	16,72	25,54	24,53	13,26	21,93
Flujo de calor latente	W/m ²	1,89	1,22	1,94	1,11	-0,79	20,39
Almacenamiento de calor	W/m ²	32,59	11,33	22,24	-1,4	11,12	76,17
Temperatura superficial	°C	21,33	17,42	20,43	12,07	18,16	22,66
Albedo	adim	0,18	0,15	0,18	0,5	0,47	0,22
Razón de Bowen	adim	21,44	13,7	13,16	22,1	16,82	1,08

Dirección y velocidad del viento. A meso escala durante la estación de invierno los vientos preferentes es del cuadrante oeste-noroeste (Figura 2.8), sin embargo por la ubicación y posibles perturbaciones que se ubican alrededor del experimento la dirección del viento muestran gran variabilidad, en los cuadrantes sur-oeste, norte-este y norte-oeste, la velocidad promedio para el año 2012 resultó de 0,21 m/s; y para el año 2013, 0,26 m/s.

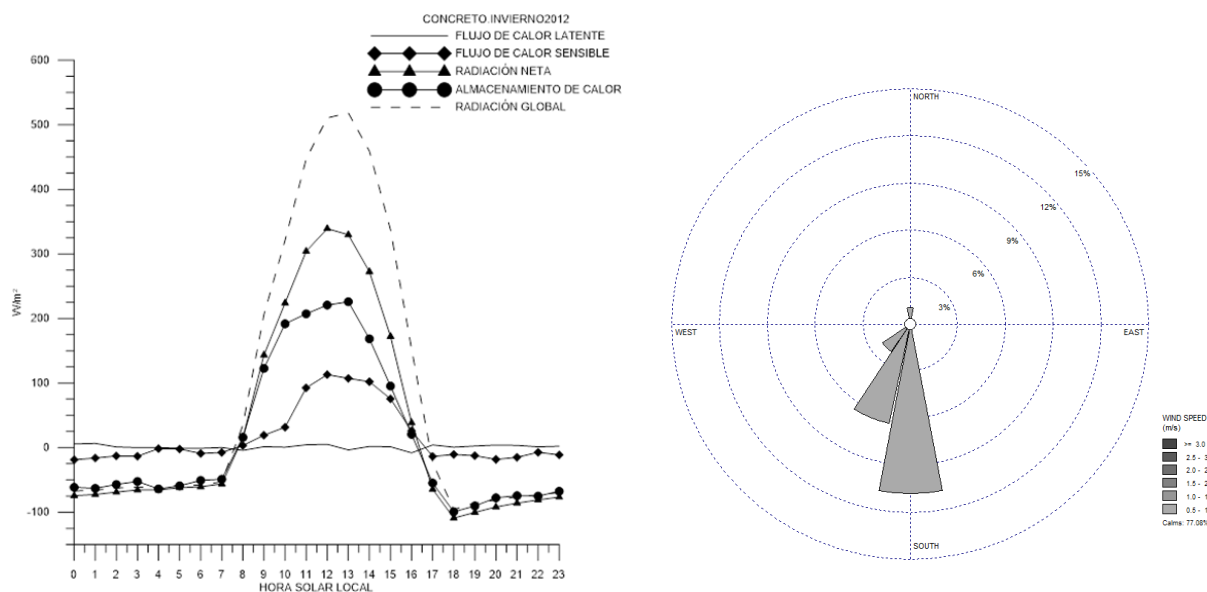


Figura 4. 11: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el concreto, 25-27 de enero de 2012.

Concreto. En promedio, 16,72 W/m² se disipan en flujo de calor sensible, 1,22 W/m² en flujo de calor latente y 11, 33 W/m² permanecen almacenados, de los 29,27 W/m² disponibles. Su temperatura superficial resultó ser de 17,42 ° C, 0, un valor de albedo muy bajo 0,15 y razón de

Bowen de 13,7. La rosa de los vientos muestra una dirección del viento proveniente del sur-oeste con velocidades promedio de 0,5 m/s (Figura 4.11).

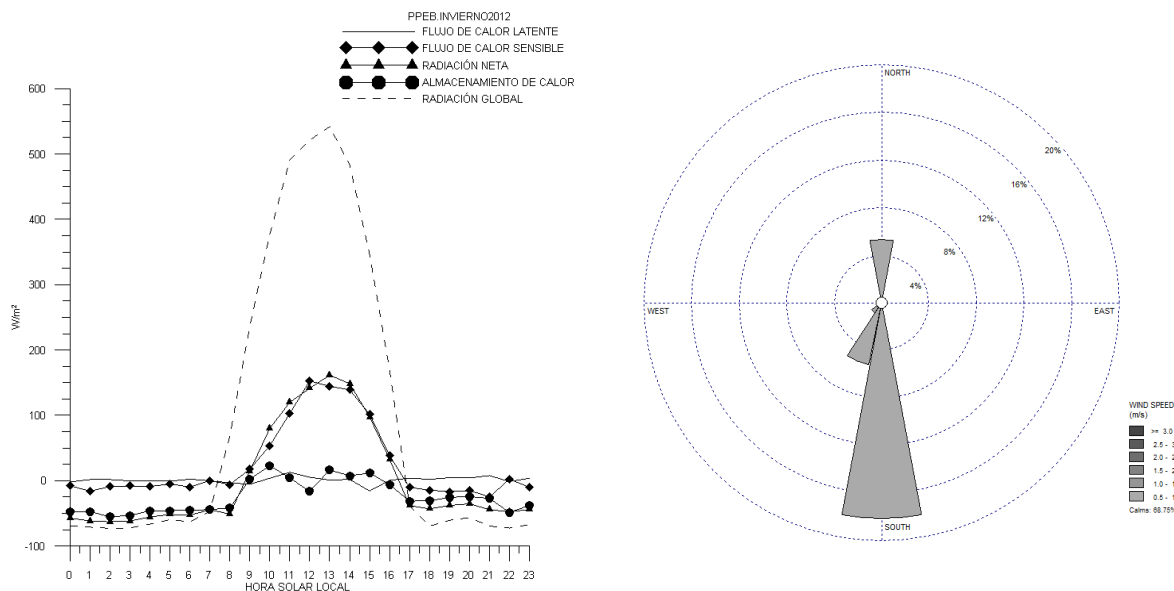


Figura 4. 12: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el poliestireno expandido c/elastomérica blanca, 30 de enero y 4 de febrero de 2012.

PPEB. En los resultados de esta superficies en los dos años que fue caracterizado, se registraron mediciones en promedio muy similares. La cantidad de energía disponible resultó de 24,24 W/m^2 (2012) y 23,59 W/m^2 (2013), los flujos de calor latente y almacenamiento de calor por sus mínimos valores, se consideran despreciables, mientras que el flujo de calor sensible fue de 24,53 W/m^2 y 13,26 W/m^2 , para los años 2012 y 2013, respectivamente, donde en el año 2012 el flujo de calor sensible prácticamente iguala su promedio con los de la radiación neta. La razón de Bowen resultó mayor a la unidad en ambas mediciones. Albedo de 0,5 (2012) y 0,45 (2013) y temperaturas superficiales de 12,07 ° C (2012) y 18,16 ° C (2013), los vientos predominantes provienen del sur con velocidades promedio de 0,5 m/s (Figura 4.12 y Figura 4.13).

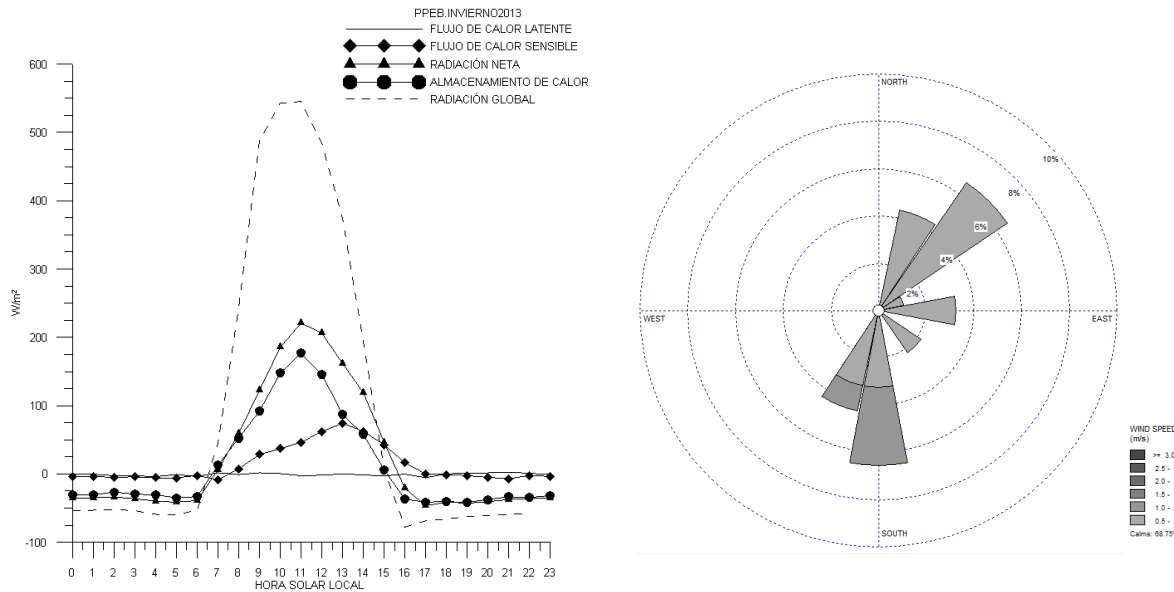


Figura 4. 13: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el poliestireno expandido con pintura elastomérica blanca, 4 y 5 de febrero de 2013.

Suelo desnudo. La cantidad de energía disponible en el suelo desnudo fue de $49,72 W/m^2$, almacenando $22,24 W/m^2$ de esta, y disipando la energía restante en flujo de calor sensible y latente, $25,54 W/m^2$ y $1,94 W/m^2$, respectivamente. El sensor de temperatura superficial registró $20,43 ^\circ C$. Un albedo de $0,18$ y razón de Bowen mayor a la unidad, los vientos promedio entre $0,5$ y $1 m/s$ preferentes resultaron del sur (Figura 4.14).

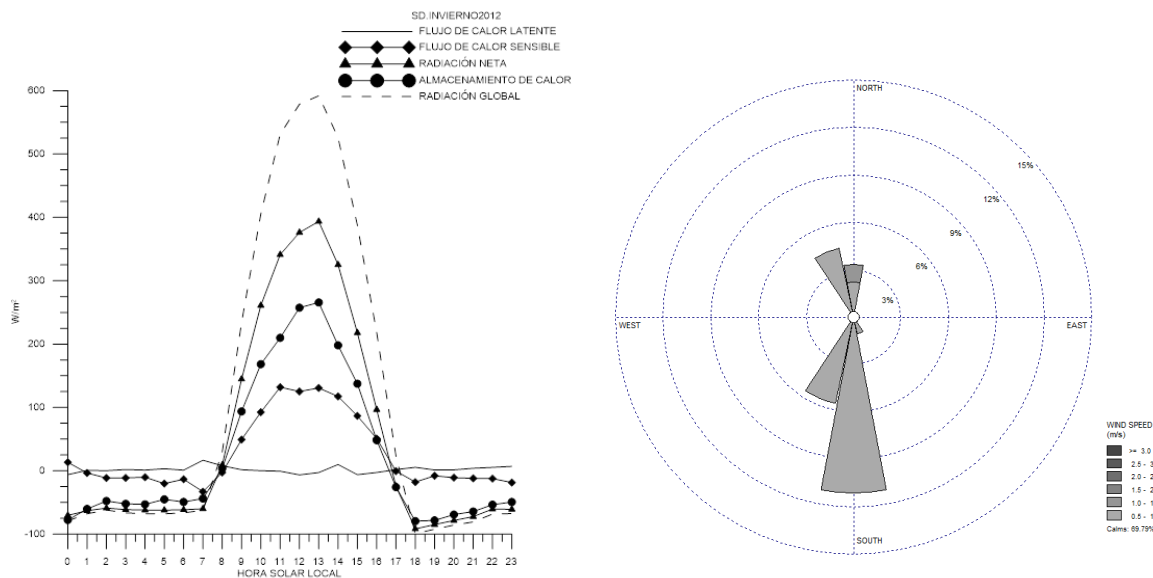


Figura 4. 14: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para suelo desnudo, 9-11 de febrero de 2012.

Asfalto. La cantidad de energía disponible en esta superficie fue de 75 W/m^2 , repartida en forma de calor sensible, $40,52 \text{ W/m}^2$, calor latente, $1,89 \text{ W/m}^2$ y $32,59 \text{ W/m}^2$ energía almacenada. Temperatura superficial de $21,33^\circ \text{C}$, muy bajo albedo, $0,18$, y razón de Bowen mayor a la unidad ($21,44$).

Los días de medición predominaron vientos provenientes del noroeste con valores entre $0,5$ y $1,5 \text{ m/s}$. (Figura 4.15).

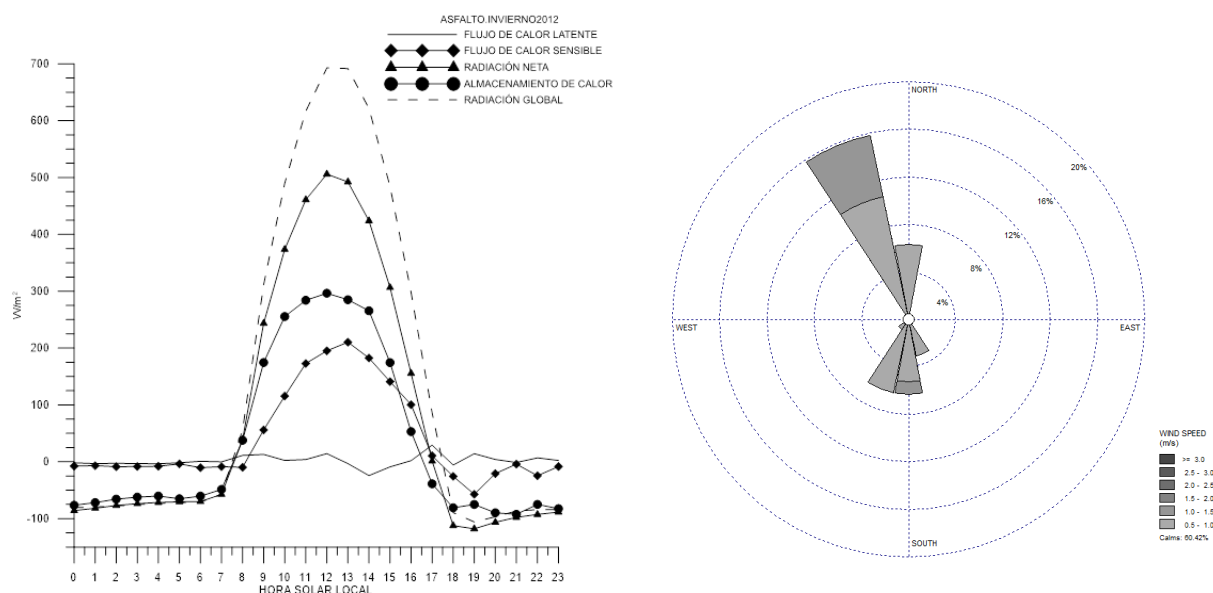


Figura 4. 15: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el asfalto, 24-26 de febrero de 2012.

Césped. Esta cobertura resultó con una energía disponible de $118,49 \text{ W/m}^2$, de los cuales $21,93 \text{ W/m}^2$ se utilizaron para elevar la temperatura del aire, $20,39 \text{ W/m}^2$ en evaporar el agua, y $76,16 \text{ W/m}^2$ se almacenaron. Su temperatura de superficie fue $22,66^\circ \text{C}$, albedo de $0,12$ y razón de Bowen muy cercana a la unidad, $1,08$. Los vientos predominan del sur-oeste con velocidades promedio entre $0,5$ y $1,5 \text{ m/s}$ (Figura 4.16).

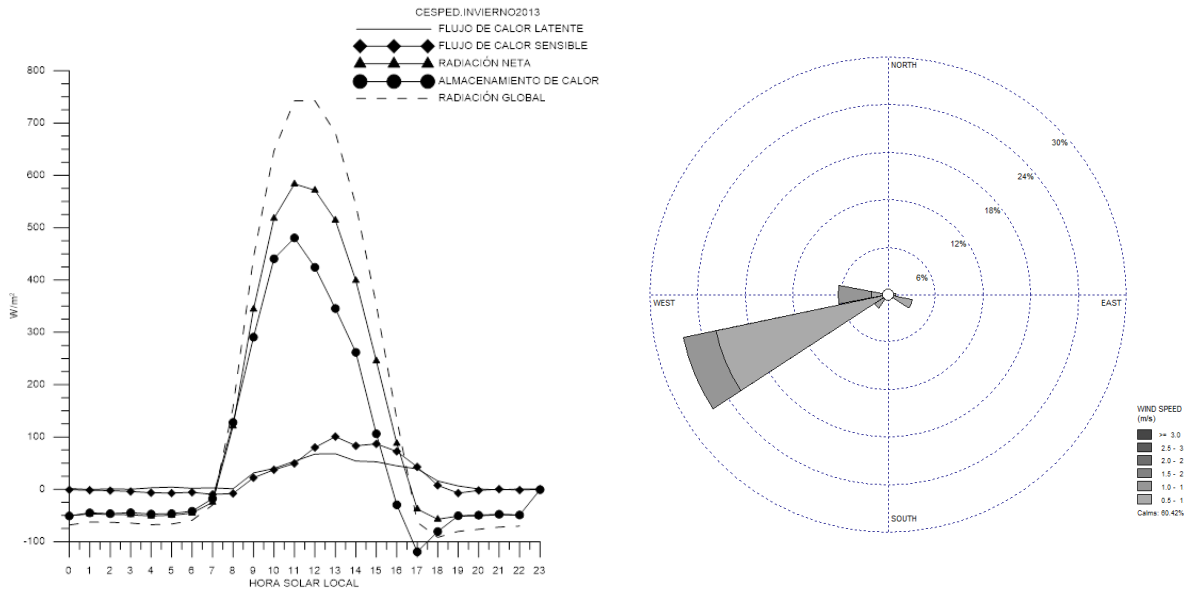


Figura 4. 16: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el césped, 12 y 13 de marzo de 2013.

4.2.1 Comportamiento de Temperatura Superficial

En la Figura 4.17 se muestran los resultados de esta variable, se aprecia que el suelo desnudo alcanzó el valor máximo, alrededor de los $44^{\circ}C$, después de este se encuentra el asfalto, el PPEB y el concreto, la cobertura más fresca fue el césped, con una temperatura máxima de $29^{\circ}C$.

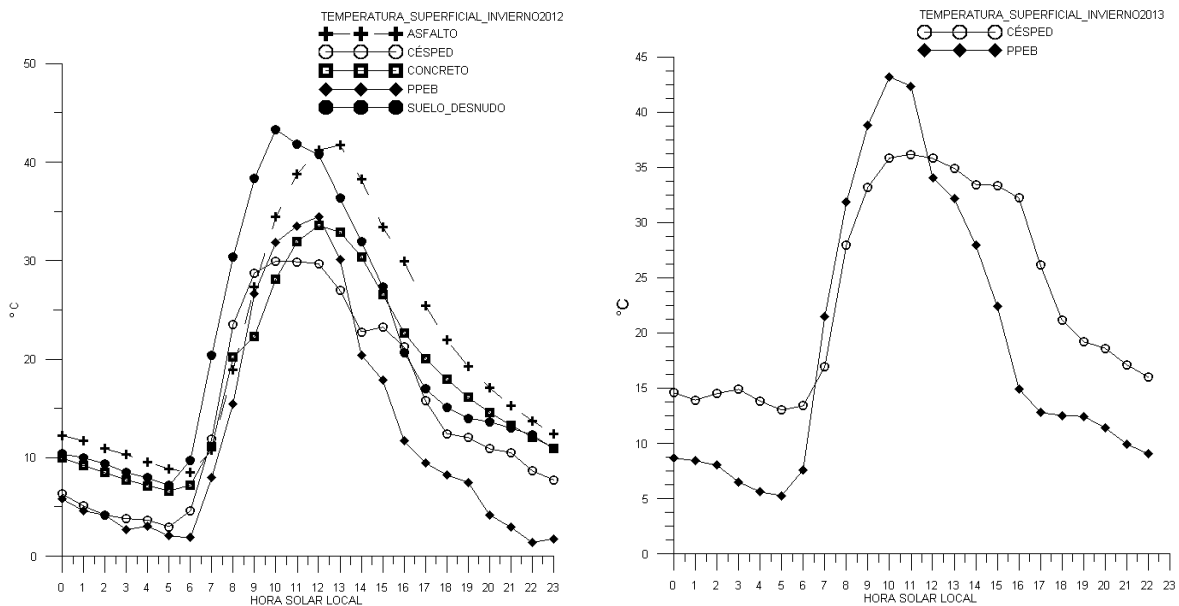


Figura 4. 17: Temperatura superficial promedio (2012,2013)

4.2.2 Comportamiento de Albedo

La superficie que tiene la propiedad de reflejar la radiación solar fue el PPEB (0,5 y 047), seguido por le concreto (0,15), suelo desnudo y césped (0,18 y 0,22); el asfalto (0,18), fue el material menos reflectivo. (Figura 4.18).

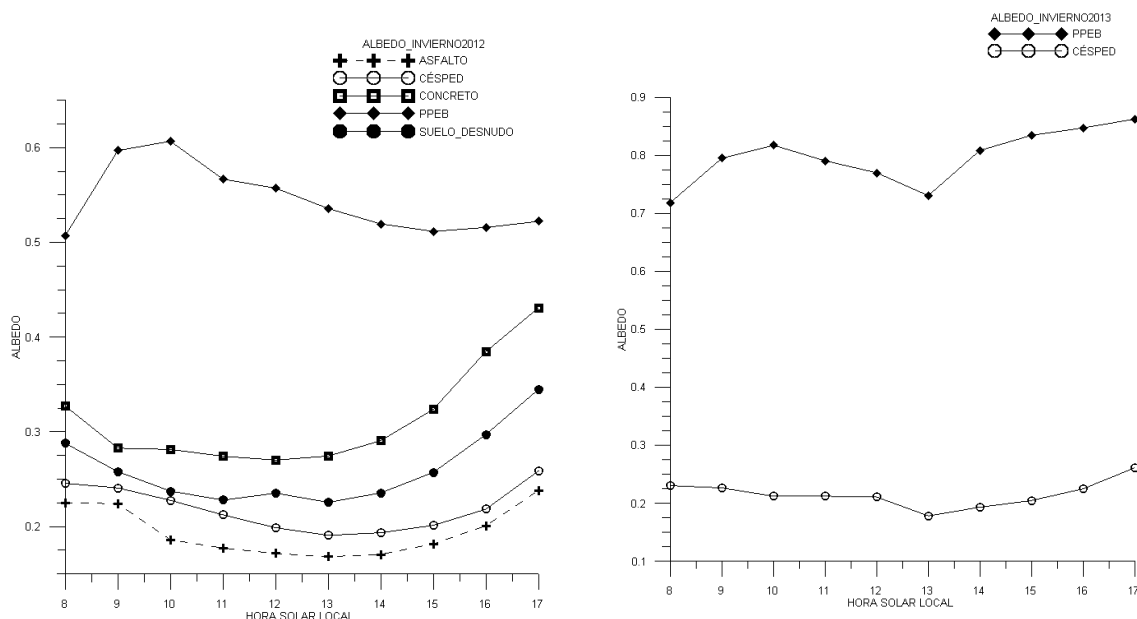


Figura 4. 18: Albedo promedio. Invierno 2012,2013

4.2.3 Resumen de la campaña de invierno 2012,2013

Durante la campaña de invierno 2012,2013 el asfalto, concreto y suelo desnudo disipan su calor disponible en flujo de calor sensible y almacenado, siendo irrelevante el flujo de calor latente; el césped muestra una repartición equitativa entre flujo de calor sensible, latente y almacenado; el PPEB no excede a la energía total disponible, sin embargo su comportamiento pareciera que reduce el modelo de $Q^* = Q_H + Q_E + Q_G + Q_F + Q_D$ a $Q^* = Q_H$.

Al igual que en verano el césped mostró una razón de Bowen muy cercana a la unidad, el asfalto, concreto, suelo desnudo y PPEB resultaron mayor a la unidad; el albedo más alto fue el del PPEB en ambos años, 0,5 y 0,47; la temperatura superficial más elevada del césped, con 22,66 ° C, y la más baja del PPEB 2012, 12,07 ° C.

4.3 Resultados de la campaña de primavera 2012, 2013

En la “campaña de primavera” al igual que en la campañas de verano e invierno se caracterizó el asfalto, césped, concreto, poliestireno expandido con pintura elastomérica blanca y suelo desnudo, esta se realizó durante los años 2012 y 2013; los días de monitoreo de cada material se muestran en las siguientes figuras.

En la tabla 4.3 y en las figuras se presentan los resultados promedio:

Tabla 4. 3: Flujos de calor promedio, temperatura superficial, albedo y razón de Bowen. Primavera.

Variable	Unidad	Asfalto 2012	Concreto 2012	SD 2012	PPEB 2012	Césped 2013
Radiación neta	W/m ²	144,97	109,56	145,9	73,12	176,08
Flujo de calor sensible	W/m ²	55,51	54,53	49,87	69,67	37,05
Flujo de calor latente	W/m ²	2,38	2,99	2,79	1,97	24,44
Almacenamiento de calor	W/m ²	87,08	52,04	93,24	1,48	114,58
Temperatura superficial	°C	33,98	34,15	27,36	27	30,49
Albedo	adim	0,2	0,27	0,21	0,54	0,28
Razón de Bowen	adim	23,32	18,24	17,87	35,37	1,51

Dirección y velocidad del viento. Durante la campaña de primavera 2012 la dirección del viento predominante resultó de los cuadrantes sur-este y norte-oeste con velocidad promedio de 0,45 m/s, en la campaña del año 2013 la dirección del viento presentó variabilidad entre los cuadrantes sur-oeste, sur-este y norte-este, la variación de rosas de los vientos es debido a que la velocidad del viento es baja, en promedio registró 0,23 m/s.

A meso escala en el mes de abril, representativo de la estación de primavera la dirección de mayor frecuencia es del oeste-noroeste, siguiéndole la del norte-noroeste (cuadrante norte-oeste) y la segunda dirección de mayor frecuencia es del sur-sureste (sur-este), lo cual indica que empieza a manifestarse una transición en el flujo direccional en superficie (Figura 2.9)(Pro-Aire 2011).

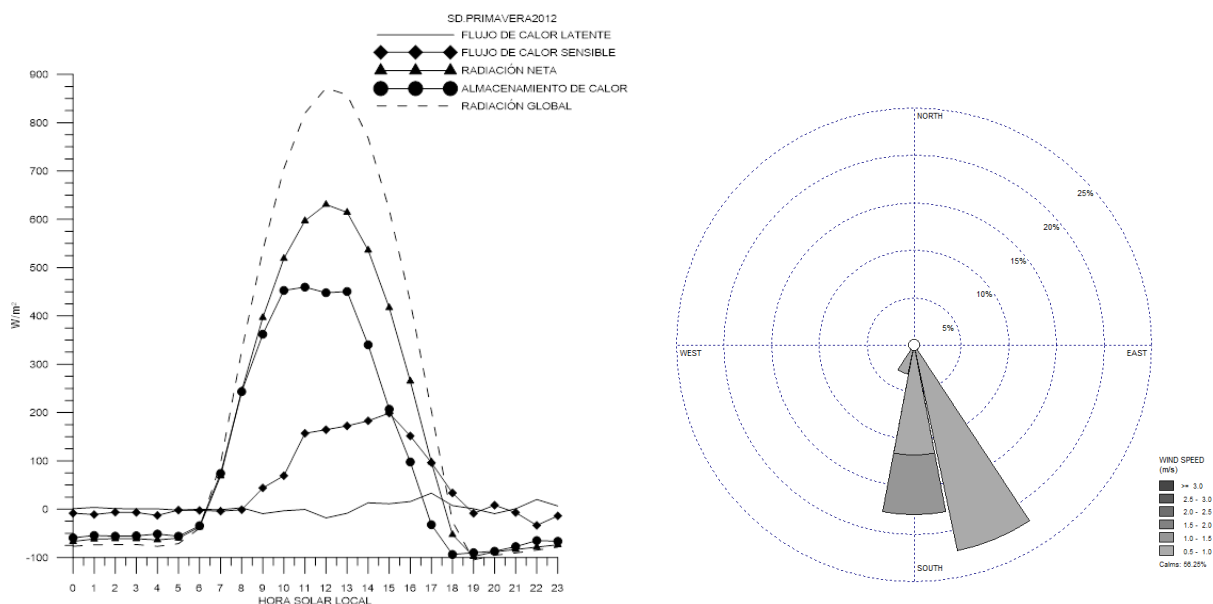


Figura 4. 19: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para suelo desnudo, 16-18 de abril de 2012.

Suelo desnudo. En la figura 4.19 se muestra la repartición de flujos de calor esta superficie, de los 145,9 W/m² disponibles, 49,87 W/m² se disipan en flujo de calor sensible, 2,79 W/m² en flujo de calor latente, y 93,24 W/m² se almacenan, su temperatura superficial registró 27,36 ° C, se midió un albedo de 0,21 y razón de Bowen mayor a la unidad, las velocidades promedio del viento oscilan entre 0,5 y 1,5 m/s, provenientes del sureste.

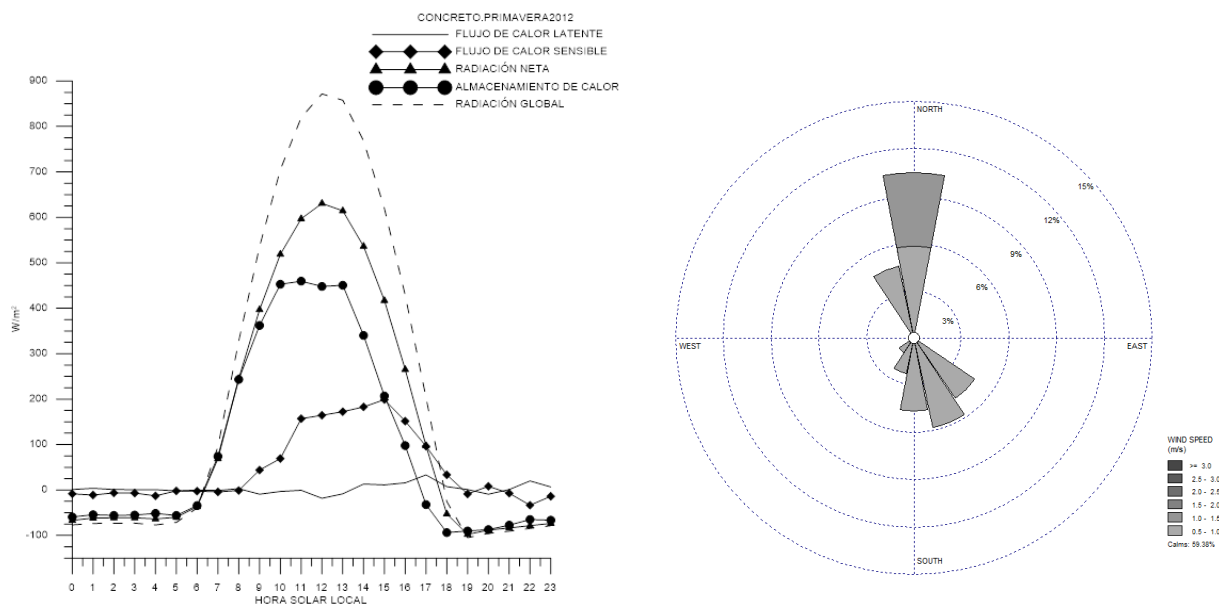


Figura 4. 20: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el concreto, 19 y 23 de abril de 2012.

Concreto. La energía disponible de este material resultó de 109,56 W/m², utilizando 54,53 W/m² para calentar el aire cercano a su superficie, 2,99 W/m² para evaporar su contenido de humedad, y, almacenando la energía restante, 52,04 W/m². Su temperatura superficial fue de 34,15 ° C, con un bajo albedo y razón de Bowen mayor a la unidad, predominan vientos del norte con velocidades promedio entre 0,5 y 1,5 m/s (Figura 4.20).

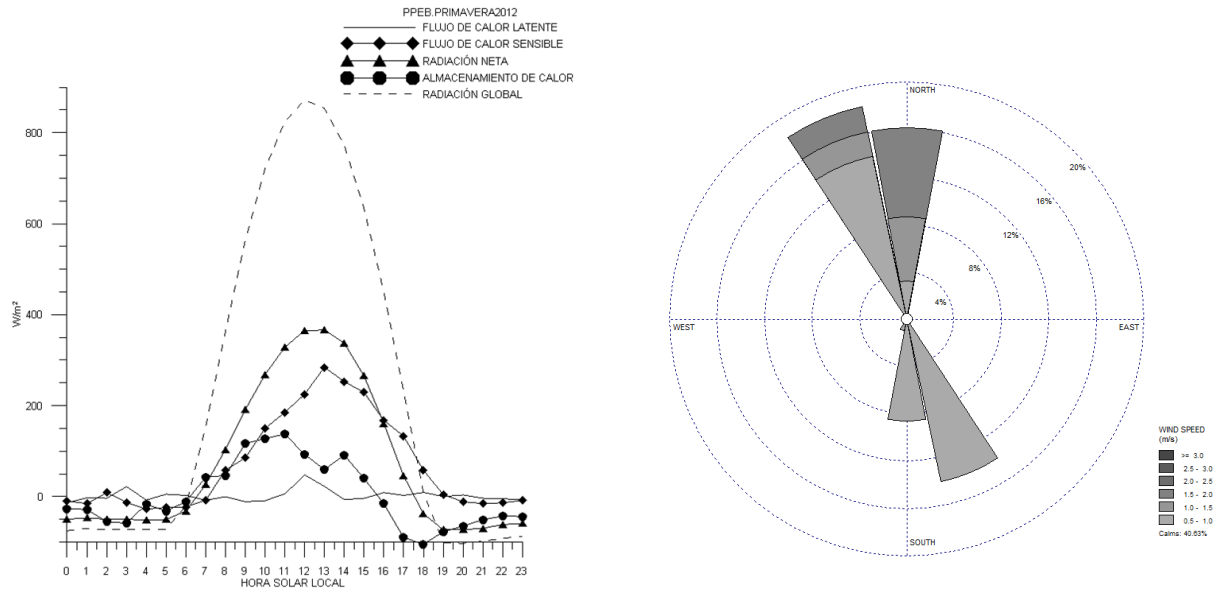


Figura 4. 21: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el poliestireno expandido c/elastomérica blanca, 28-30 de abril de 2012.

PPEB. Esta superficie, disipa la mayor cantidad de su energía para calentar el aire cercano a la superficie 69, 67 W/m^2 , del total de 73,12 W/m^2 , mientras que el flujo de calor latente y almacenamiento de calor no son significativos (Figura 4.21). El sensor infrarrojo midió una temperatura de superficie de 27 ° C, albedo de 0,54, y, razón de Bowen de 35,37, las velocidades promedio durante los días de medición oscilan entre los 0,5 y 2,5 m/s, la mayor parte de estos son provenientes del noroeste.

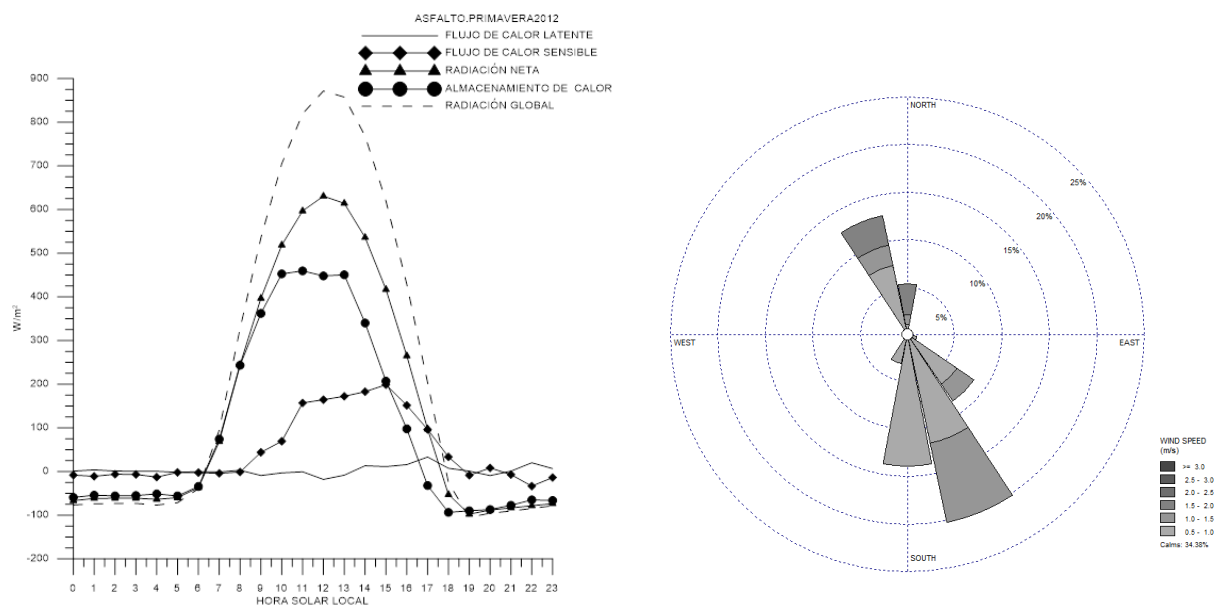


Figura 4. 22: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el asfalto, 9-11 de mayo de 2012.

Asfalto. En la figura 4.22 se presenta el comportamiento de los flujos de calor promediados del asfalto, el flujo de calor latente es despreciable, $2,38 \text{ W/m}^2$, en tanto que el flujo de calor sensible resultó de $55,51 \text{ W/m}^2$ y $87,08 \text{ W/m}^2$ se almacenan, de los $144,97 \text{ W/m}^2$ disponibles. Se registró una temperatura de superficie de $33,98^\circ \text{C}$, un albedo bajo de $0,2$, y razón de Bowen de $23,32$ y vientos predominantes provenientes del sureste con velocidades promedio de entre $0,5$ y 2 m/s .

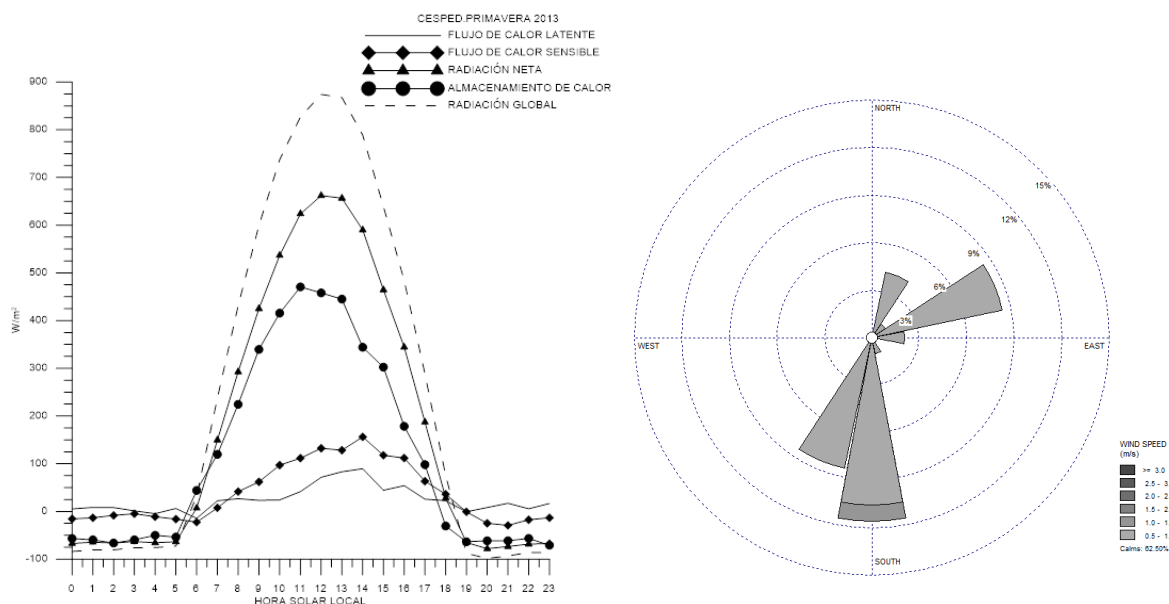


Figura 4. 23: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el césped, 4 -6 junio de 2013.

Césped. La radiación neta de esta cobertura verde, fue de $176,08 \text{ W/m}^2$, de los cuales $32,05 \text{ W/m}^2$ se disipa en forma de flujo de calor sensible, $24,44 \text{ W/m}^2$ en flujo de calor latente y $114,58 \text{ W/m}^2$ en flujo de calor almacenando. Temperatura superficial de $30,49^\circ \text{C}$, albedo de $0,28$ y razón de Bowen muy cercano a la unidad, $1,51$ y velocidades promedio de entre $0,5$ y 2 m/s provenientes del sureste (Figura 4.23).

4.3.1 Comportamiento de Temperatura Superficial

En la figura 4.24 se aprecia el comportamiento de las temperaturas de superficie de cada una de las superficies, la temperatura promedio más alta se registró en el asfalto ($35,98^\circ \text{C}$) y la más baja en el PPEB (27°C).

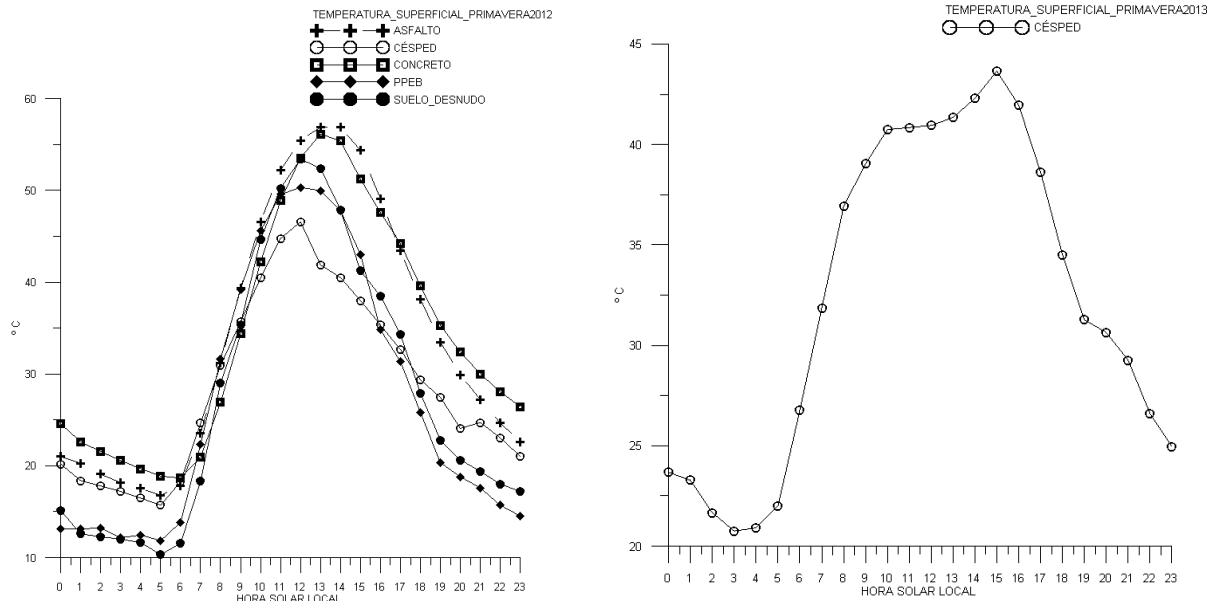


Figura 4. 24: Temperatura superficial promedio (2012, 2013)

4.3.2 Comportamiento de Albedo

El material más reflectivo fue el PPEB (0,54), y los más opacos el asfalto (0,2) y suelo desnudo (0,21)(Figura 4.25).

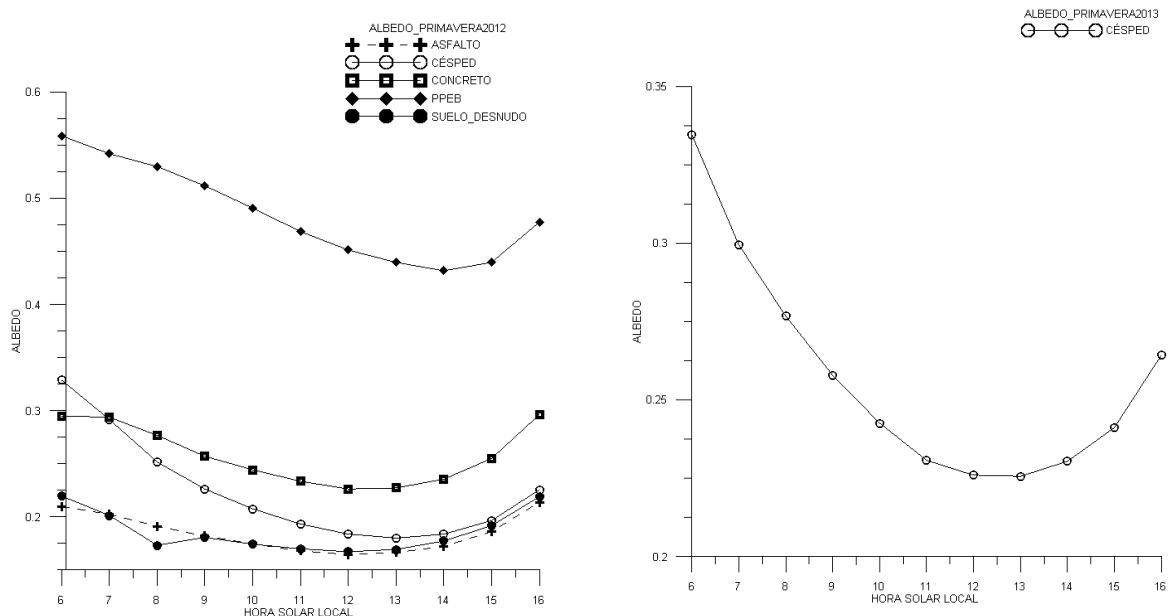


Figura 4. 25: Albedo promedio. Primavera2012, 2013

4.3.3 Resumen de la campaña de primavera 2012,2013

En la campaña primavera 2012, 2013 el asfalto, concreto y suelo desnudo disipan su calor disponible en flujo de calor sensible y almacenado, el flujo de calor latente permanece cercano a 0 W/m²; el césped muestra una repartición equitativa entre flujo de calor sensible, latente y almacenado; el PPEB disipó la mayor cantidad de radiación neta en flujo de calor sensible, pero no la excedió.

Siguiendo el patrón de campañas anteriores el césped mostró una razón de Bowen muy cercana a la unidad; el asfalto, concreto, suelo desnudo y PPEB resultaron mayor a la unidad; el albedo más alto fue el del PPEB, 0,54 ; la temperatura superficial más elevada del concreto, con 34,15° C, y la más baja del PPEB 2012, 27 ° C.

4.4 Resultados de la campaña otoño 2012

La “campaña de otoño” se llevó a cabo en el año 2012, se caracterizaron concreto, suelo desnudo y poliestireno expandido con pintura elastomérica blanca, los días de monitoreo se especifican en las figuras de cada material.

En la tabla 4.4 se muestran los resultados promedio de esta campaña:

Tabla 4. 4: Flujos de calor promedio, temperatura superficial, albedo y razón de Bowen. Otoño.

Variabes	Unidad	Concreto 2012	SD 2012	PPEB 2012
Radiación neta	W/m ²	6,96	31,77	-11,22
Flujo de calor sensible	W/m ²	14,85	9,78	8,98
Flujo de calor latente	W/m ²	-0,55	1,16	-0,04
Almacenamiento de calor	W/m ²	-7,33	20,82	-22,38
Temperatura superficial	°C	29,60	32,69	20,16
Albedo	Adim	0,42	0,30	0,63
Razón de Bowen	Adim	26,77	8,40	221,27

Dirección y velocidad del viento. Durante el mes representativo de la estación de otoño la dirección del viento prevalente es del oeste-noroeste (cuadrante norte-oeste) (Figura 2.10), sin embargo, debido a las baja velocidad promedio de 0,12 m/s y a la escala del estudio, la dirección prevalente en el micro experimento fue del cuadrante norte-este.

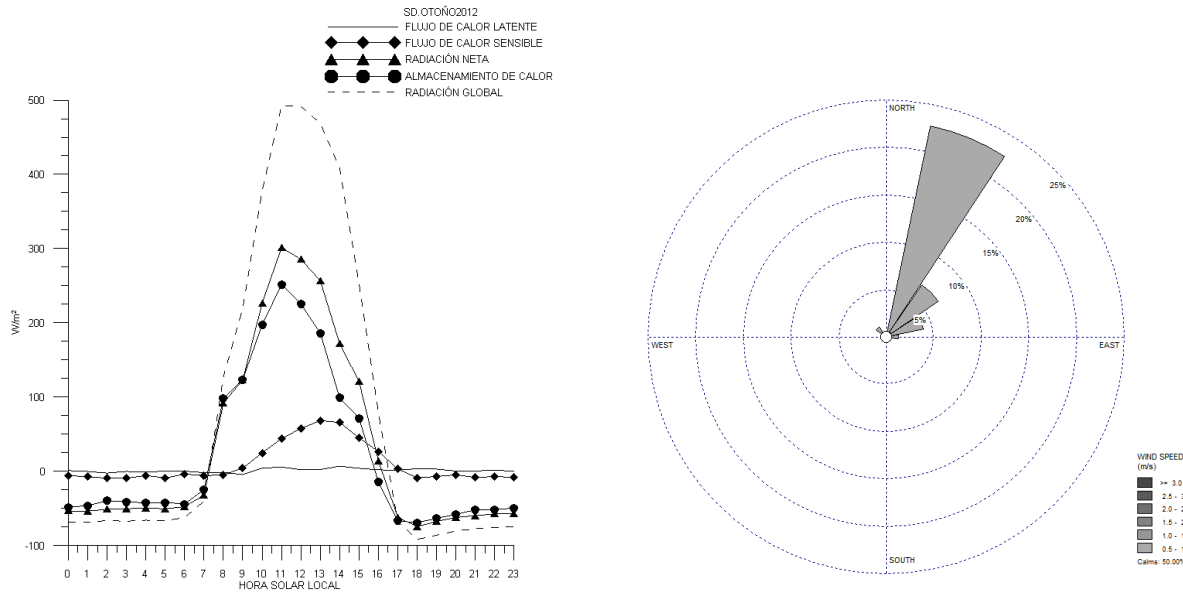


Figura 4. 26: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para el suelo desnudo, 12-14 de noviembre de 2012.

Suelo desnudo. El sensor registró una radiación neta de 31,77 W/m², almacenando la mayor cantidad de energía, 20,82 W/m², 9,78 en flujo de calor sensible y 9,16 W/m² en flujo de calor latente. Su temperatura superficial promedio fue de 32,69 ° C, con albedo bajo y razón de Bowen mayor a la unidad, la velocidad promedio resultó ser de 0,5 m/s proveniente del noreste (Figura 4.26).

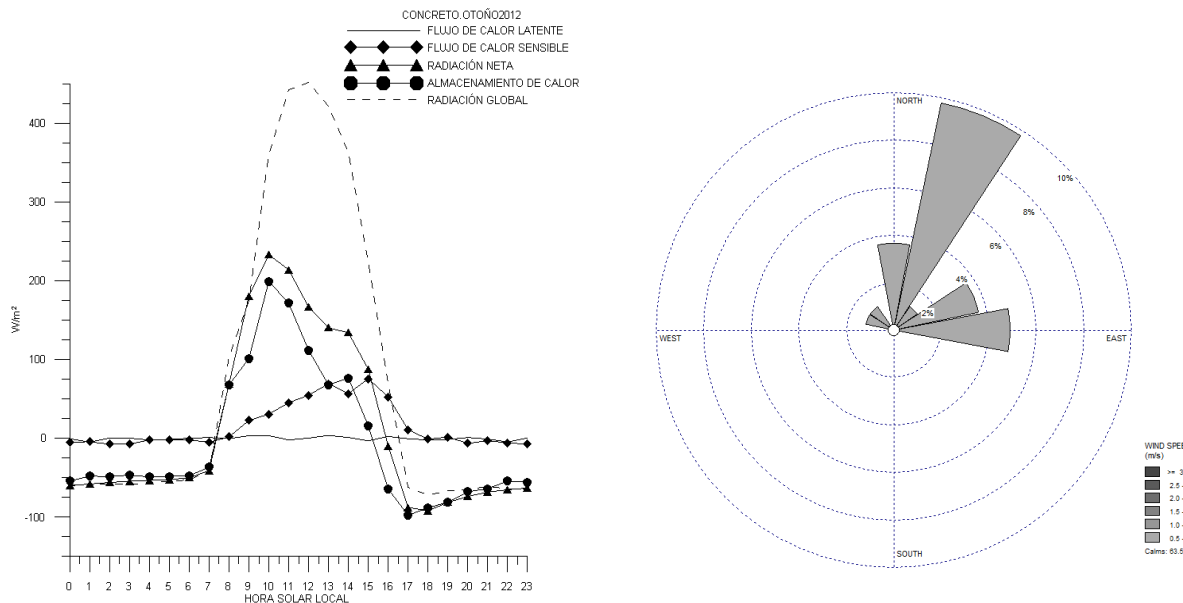


Figura 4. 27: Flujos de calor promedio y rosa de los vientos para concreto, 18-20 de noviembre de 2012.

Concreto. Esta superficie resultó con $6,96 \text{ W/m}^2$ de energía neta, la mayor parte de ella se disipa en flujo de calor sensible $14,85 \text{ W/m}^2$, esto se debe a la histéresis que presentó el material, $0,55 \text{ W/m}^2$ se disipan en flujo de calor latente y $7,33 \text{ W/m}^2$ se almacena. Su temperatura de superficie promedio fue de $29,60^\circ \text{C}$, albedo de $0,42$ y razón de Bowen de $26,77$, la dirección del viento predominante resultó del noreste con velocidad promedio de $0,5 \text{ m/s}$ (Figura 4.27).

PPEB. Esta superficie resultó con un flujo de calor latente despreciable, el flujo de calor sensible mostró un retardo térmico considerable y muy similar a la radiación neta, la velocidad promedio resultó de $0,5 \text{ m/s}$ proveniente del noreste (Figura 4.28).

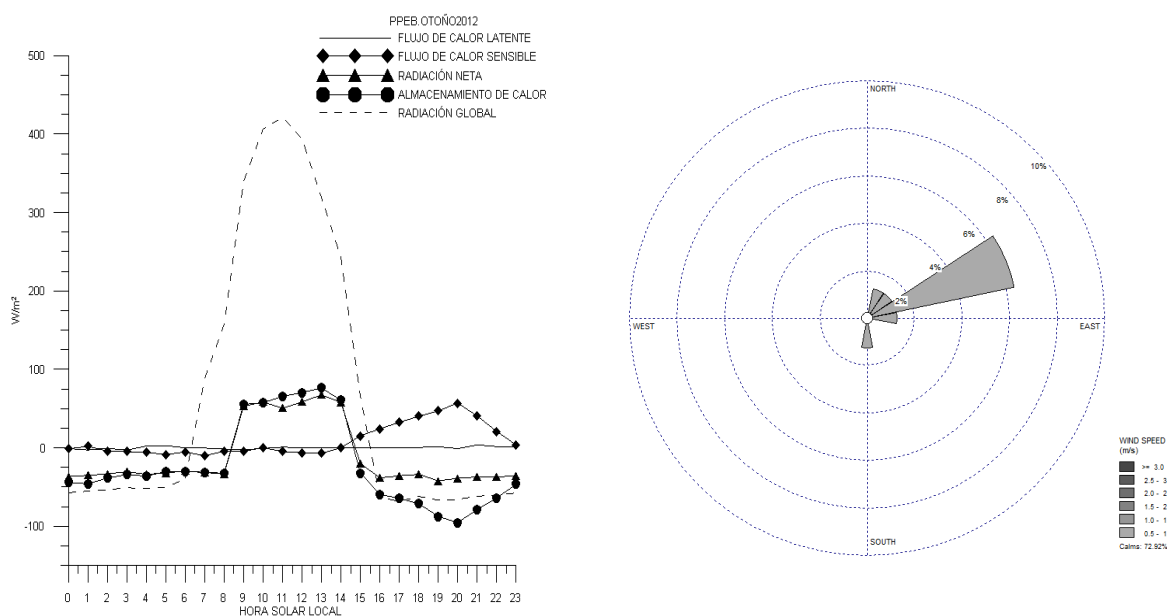


Figura 4. 28: Flujos promedio diarios para el poliestireno expandido c/elastomérica blanca, 20-22 de noviembre de 2012.

4.4.1 Comportamiento de Temperatura Superficial

El sensor midió la temperatura promedio más alta en el suelo desnudo ($32,69^\circ \text{C}$), seguido del concreto ($29,60^\circ \text{C}$) y PPEB ($20,16^\circ \text{C}$) (Figura 4.29).

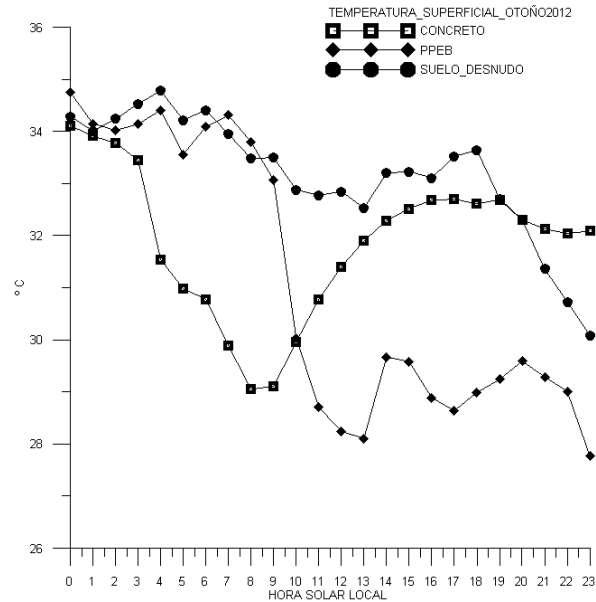


Figura 4. 29: Temperatura superficial promedio. Otoño 2012.

4.4.2 Comportamiento de Albedo

El valor promediomás alto durante la campaña se registró en el PPEB (0,63) y el más bajo el suelo desnudo (0,30) (Figura 4.30).

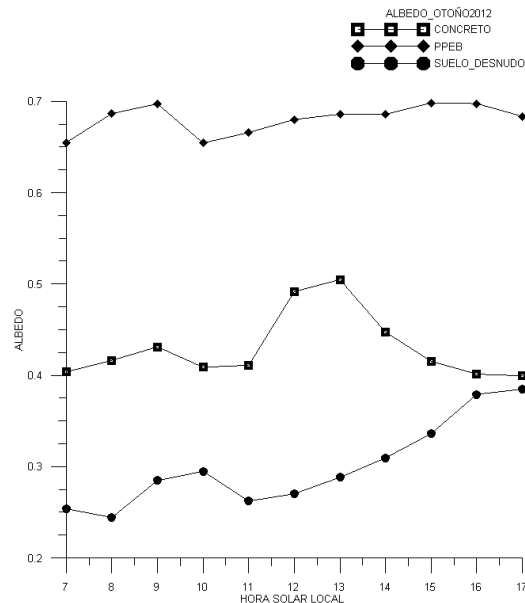


Figura 4. 30: Albedo promedio. Otoño 2012.

4.4.3 Resumen de la campaña de otoño 2012

En la campaña otoño 2012 se caracterizaron concreto, suelo desnudo y PPEB, disipan su calor disponible principalmente en flujo de calor sensible y almacenado, el flujo de calor sensible

permanece cercano a 0 W/m², los tres materiales presentan un retardo térmico después de las 13 horas, disipan el calor almacenado en flujo de calor sensible.

La razón entre el flujo de calor sensible y latente de las tres coberturas resultaron mayor a la unidad; el albedo más alto fue el del PPEB, 0,63; la temperatura superficial más elevada del suelo desnudo, con 32,69° C, y la más baja del PPEB 20,16 ° C.

4.5 Resumen de los resultados

En cada una de las campañas se aprecian comportamientos muy similares en los materiales con diferencias significativas en la cantidad de energía disponible (radiación neta), excepto en el poliestireno expandido con pintura elastomérica blanca y césped, los cuales resultaron con un comportamiento distinto donde el modelo utilizado $Q_n = Q_H + Q_E + Q_G + Q_F + Q_D$ redujo a $Q_n = Q_H + Q_F + Q_D$ (para el PPEB, en verano), atribuible el flujo adicional ($Q_F + Q_D$) a la influencia del calor antropogénico y advectivo de las unidades de aire acondicionado, que se encuentran al noroeste del lugar de experimentación, 18 unidades por un total de 90 t.

CAPITULO 5

DISCUSIÓN

5 Discusión

5.1 Descripción del área fuente

El experimento, como se mencionó anteriormente, se ubicó en la azotea del Instituto de Ingeniería, el lugar se caracteriza por amplias calles con camellones centrales con vegetación. En la zona universitaria se tiene construcciones cuya altura son de 1 a 4 pisos. La mayor parte del uso de suelo de esta zona está destinada al uso educativo, residencial y comercial. El material de las construcciones es de ladrillo o block para paredes, y losa de concreto o madera para techos, la mayoría cubiertos con material aislante e impermeabilizante y pintura clara (García, 2006).

García (2006), siguiendo el método de Tejeda (1996), el cual consiste en tipificar ocho sectores circulares correspondientes a los ocho rumbos del viento: N, NE, SE, S, SW, W y NW, en un radio de 1 km alrededor de la estación, obtuvo los siguientes resultados (Tabla 5.1)

Tabla 5. 1: Tipos de cubierta predominante en 1 km alrededor del Instituto de Ingeniería.

<i>Tipos de cubierta</i>	<i>Símbolo</i>
Habitacional	HAB
Infraestructura (Escolar y oficinas)	INF
Comercial	COM
Mixto (comercial/residencial)	MIX
Avenidas (incluye estacionamientos)	AVE
Área verdes	VER
Suelo desnudo	BAL

Fuente: García, 2006

En la Tabla 5.2 se presenta el porcentaje de aportaciones por cada tipo de cubierta en 1 km alrededor de la estación para cada rumbo del viento dominante, es decir, muestra la aportación de cada tipo de cubierta en cada sector, como se comentó en párrafos anteriores el experimento se ubicó sobre la azotea del edificio, en donde, aparte de las contribuciones mencionadas en la Tabla 5.2, a micro escala se encuentran contribuciones de los equipos de aire acondicionado ubicados en los cuadrantes norte-oeste, norte-este y sur-oeste, en el cuadrante norte-este, sur-este y sur-oeste se encuentra un pretil que forma parte del edificio de 1,50 metros de alto y en dirección del este se encuentra un árbol que rebasa los 8 metros de altura, la cubierta se encuentra aislada con poliestireno expandido con pintura elastomérica, la cual refleja gran cantidad de energía incidente durante las horas sol, siendo esta una aportación de energía y calor importante.

Tabla 5. 2: Porcentajes de aportaciones por cada tipo de cubierta en 1 km alrededor del Instituto de Ingeniería para cada rumbo de viento dominante.

Sector/Tipo	HAB	INF	COM	MIX	AVE	VER	BAL
N	79,9	10,5	4,0	0,0	4,0	1,6	0,0
NE	67,4	12,9	2,9	0,0	4,9	11,9	0,0
E	30,7	18,7	4,3	6,1	5,7	20,1	14,4
SE	17,8	15,0	4,8	56,1	2,4	0,0	3,9
S	53,9	5,6	19,7	16,5	4,3	0,0	0,0
SW	90,6	3,9	3,0	0,0	1,9	0,6	0,0
W	91,8	3,9	1,5	0,0	1,9	0,6	0,3
NW	92,5	2,9	2,9	0,0	1,1	0,4	0,2

Fuente: García, 2006

5.2 Campaña de verano 2011, 2012

A continuación se discute en base a los resultados obtenidos de las tablas de flujos promedio, rosa de los vientos y sus influencias, gráficas y su comportamiento cualitativo, iniciando esta discusión con la campaña de verano 2011 y 2012.

5.2.1 Discusión de los flujos de calor promedio de la campaña verano

En la Tabla 4.1, se muestran los flujos de calor promedio, temperatura superficial promedio, albedo y razón de Bowen, de las coberturas caracterizadas durante el verano 2011 y 2012, cabe mencionar que los resultados que se muestran para el almacenamiento de calor se obtuvieron despejando el modelo $Q_N = Q_H + Q_L + Q_G$

El asfalto, resultó para esta campaña, la cobertura con mayor cantidad de energía disponible ($144,95 \text{ W/m}^2$), debido a que su calor específico es mayor ($0,92 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{X}10^3$) que la de las otras (se le puede atribuir de igual manera al color de su superficie, negro, el cual se asemeja al color de un cuerpo negro, el cual absorbe toda la energía incidente sobre el), en contraste con el PPEB (2011, 2012), fue el material con menor cantidad de energía disponible ($34,41 \text{ W/m}^2$ y $38,07 \text{ W/m}^2$, 2011 y 2012, respectivamente), su capacidad de reflejar la radiación global resultó ser la más alta ($0,67$ y $0,54$, 2011 y 2012), su calor específico es bajo ($0,88 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{X}10^3$) (Tabla 5.3).

Tabla 5. 3: Propiedades térmicas de arcilla y materiales de la construcción urbana

Material (seco)	Estado	Densidad $\text{kgm}^{-3}\text{X}10^3$	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	Denso	2,14	0,88	2,11	1,51	0,72	1785
Aislamiento	Poliestireno	0,02	0,88	0,02	0,03	1,5	25
Arcilla	Seca	1,6	0,89	1,42	0,25	0,18	600

Fuente: Oke, 1987, modificación propia

La cobertura con mayor flujo de calor sensible promedio ($167,20 \text{ W/m}^2$) resultó ser el PPEB (2012) y el concreto ($100,99 \text{ W/m}^2$), se atribuye a sus colores, los cuales reflejan parte de la radiación solar incidente. El césped resultó ser el material que menos energía disipa en forma de flujo de calor sensible ($12,87 \text{ W/m}^2$).

El asfalto, el concreto, suelo desnudo y PPEB (2011, 2012) $6,7 \text{ W/m}^2$; $1,51 \text{ W/m}^2$; $2,15 \text{ W/m}^2$; $9,51 \text{ W/m}^2$; y $7,17 \text{ W/m}^2$, respectivamente no mostraron valor significativo para el flujo de calor latente, resultado de ser superficie carente de humedad en su composición, el césped, por su parte, si mostró una cantidad relevante para este flujo de calor, debido al contenido de humedad.

El PPEB (2011, 2012) no almacena calor debido a su bajo calor específico y su capacidad reflectiva (alto albedo), mientras que las coberturas con alto calor específico y bajo albedo, como el asfalto, concreto, suelo desnudo y césped, si almacenan una cantidad generosa de calor del total de su energía disponible.

Las coberturas con mayor capacidad calorífica resultaron ser el asfalto ($41,47^\circ\text{C}$) y el suelo desnudo ($40,9^\circ\text{C}$), esto se ve reflejado en su temperatura superficial las cuales registraron los valores más altos, seguidas del concreto ($34,46^\circ\text{C}$) y PPEB (2011, 212) ($33,35^\circ\text{C}$ y $35,24^\circ\text{C}$), el PPEB cuenta con un recubrimiento de pintura elastomérica blanca, el cual eleva la temperatura de esta cobertura, el césped resultó el valor de temperatura superficial promedio más bajo ($28,17^\circ\text{C}$) de esta campaña de medición.

La cobertura con mayor albedo resultó ser el PPEB (2011, 2012) ($0,67$ y $0,54$) esto debido a su composición, el recubrimiento de pintura elastomérica y su color blanco, en contraste con el asfalto ($0,168$), que es color negro que resultó ser el más bajo, el concreto ($0,26$), suelo desnudo ($0,264$) y césped ($0,26$) mostraron albedos muy aproximados.

La razón de Bowen, que es la razón entre el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente, muestra valores mayor a la unidad en las superficies secas como el asfalto ($10,11$), concreto ($66,88$), suelo desnudo ($30,07$) y PPEB (2011, 2012) ($7,88$ y $20,95$) y en el césped ($0,23$) resultó menor a la unidad por ser una superficie húmeda.

5.2.2 Discusión de la rosa de vientos y posibles aportaciones de la campaña de verano

En esta sección se discuten los porcentajes de las aportaciones por cada tipo de cubierta en 1 km, suponiendo que la investigación fue realizada a meso escala, alrededor del Instituto de Ingeniería por cada rumbo de viento dominante. Los rumbos del viento dominante para cada estación del año se explican en el capítulo 2, dentro del cuerpo del marco teórico.

Para la campaña de verano 2011 y 2012, suponiendo que se encuentra a meso escala, en los días de medición del asfalto, concreto, PPEB (2011) y césped la dirección dominante del viento fue del noroeste, los porcentajes de las aportaciones por cada tipo de cubierta son 92, 5 habitacional, 2,9 infraestructura, 2,9 comercial, 1,1 avenidas, 0,4 áreas verdes y 0,2 de suelo desnudo; la dirección del viento dominante para el suelo desnudo resultó del sureste, con los siguientes porcentajes, 17,8 habitacional, 15 infraestructura, 4,8 comercial, 56,1 mixto, 2,4 avenidas y 3,9 suelo desnudo; la dirección del viento que dominó en el PPEB (2012) fue proveniente del oeste, los porcentajes de aportaciones son 91,8 habitacional, 3,9 infraestructura, 1,5 comercial, 1,9 avenidas, 0,6 áreas verdes y 0,3 suelo desnudo (Tabla 5.2).

A micro escala se pueden atribuir aportaciones más relevantes por dirección dominante del viento norte-oeste, para el asfalto, concreto, PPEB (2011) y césped son provenientes de los equipos de aire acondicionado, lo que indicaría mayor carga térmica, tal vez en forma de calor sensible, el PPEB, debido al exceso de flujo de calor sensible sobre la radiación neta, su capacidad de aislante y su alto albedo, no permiten que ese flujo de calor extra proveniente de los equipos de aire acondicionado sea almacenado como podría suceder en el resto de los materiales; la influencia significativa para el suelo desnudo es la del pretil y de los árboles, proveniente del cuadrante sureste; y el PPEB (2012) resultó con aportaciones de los equipos de aire acondicionado, la dirección prevalente de esta cobertura resultó del oeste, en esta dirección se ubican la mayor parte de los equipos, lo cual corrobora el comentario anterior del PPEB (2011).

5.2.3 Discusión del comportamiento de los flujos de calor de la campaña de verano

En las gráficas se aprecia la energía total recibida por cada una de las coberturas, la energía disponible en ella, y la repartición de esta en flujo de calor sensible, flujo de calor latente y almacenamiento de calor.

En la Figura 28, se muestran los flujos de calor del asfalto, en la cual se muestra la repartición de la radiación neta, la cual en su mayoría se disipa en flujo de calor sensible y almacenamiento de calor, cuento con alto calor específico por lo tanto almacena flujos importantes de calor, el flujo de calor latente no es significativo.

El PPEB (2011, 2012) resultó con un exceso importante en el flujo de calor sensible, incluso rebasa la energía disponible, este exceso es atribuible a los equipos de aire acondicionado que rodean el experimento, la dirección del viento dominante en días de medición fue del noroeste (2011) y oeste (2012), misma dirección en que estos se ubican, además la azotea está cubierta con este mismo material, el cual refleja la energía incidente y mantiene a alta temperatura el aire cercano a su superficie, dicho exceso puede ser causado por flujo de calor antropogénico y advectivo. Esta cobertura no almacena calor y por ser carente de humedad no muestra flujo de calor latente significativo (Figura 4.4 y 4.5).

En la Figura 4.1 de flujos promedio de suelo desnudo en la cual se muestra que el flujo de calor sensible es despreciables, la radiación neta, se disipa en flujo de calor sensible y calor almacenado, se puede apreciar un comportamiento de histéresis, debido a que durante las primeras horas del día la energía incidente es almacenada, y después de mediodía esta energía almacenada se ocupa en energía para calentar el aire cercano a la superficie.

El concreto resultó con un comportamiento similar al del suelo desnudo, del total de su energía disponible, la gran parte se divide en flujo de calor sensible y calor almacenado, debido a su calor específico, el comportamiento de histéresis se hace notar, durante las primeras horas del día se almacena calor, y después de las 14 horas se disipa en flujo de calor sensible, el flujo de calor latente no es significativo (Figura 4.3).

En la figura 4.6 se muestran resultados de los flujos promedio del césped, almacena parte del total de la radiación neta, sin embargo, por su contenido de humedad, en contraste con las otras coberturas, su flujo de calor latente sobrepasa al flujo de calor sensible, lo cual permite que el aire cercano a la superficie no eleve tanto su temperatura.

Las temperaturas superficiales se muestran en la Figura 4.7, la curva diurna del suelo desnudo está por encima de los otros materiales, a causa de su alta capacidad calorífica, sin embargo, durante el periodo nocturno rebasa por poco al PPEB, debido a su capacidad de disipar el calor. Durante el periodo diurno, después del suelo desnudo, las coberturas con más altas temperaturas son el asfalto y el concreto, siendo estas las más elevadas durante la noche. El PPEB y el césped, muestran las

diferencias mínimas entre el período diurno y nocturno, que por la naturaleza de la estación de verano marcan altas temperaturas durante el día.

La fracción de radiación reflejada por cada cobertura se muestra en la Figura 4.8, la cual se puede asociar directamente con el color de la superficie, el albedo más alto resultó para el PPEB (2011, 2012), seguido del concreto, suelo desnudo y césped, por último el asfalto, por lo cual el albedo más alta para las coberturas blancas, los colores opacos muestran un albedo aproximado entre ellos, y el asfalto, color negro, es el albedo más bajo.

5.3 Campaña invierno 2012, 2013

A continuación se discute en base a los resultados obtenidos de las tablas de flujos promedio, rosa de los vientos y sus influencias, gráficas y su comportamiento, para la campaña de invierno 2012, 2013.

5.3.1 Discusión de los flujos de calor promedio de la campaña de invierno

En la Tabla 4.2, se muestran los flujos de calor promedio, temperatura superficial promedio, albedo y razón de Bowen, de las coberturas caracterizadas durante el invierno 2012 y 2013, al igual que en la campaña de verano 2011 y 2012 los resultados que se muestran para el almacenamiento de calor se obtuvieron del despeje del modelo $Q_N = Q_H + Q_L + Q_S$.

Durante esta campaña la cobertura con mayor cantidad de energía disponibles resultó ser el césped ($118,49 \text{ W/m}^2$) (2013), y en segundo lugar el asfalto (75 W/m^2), se atribuye esta diferencia a que en el año 2013 la radiación global fue mayor que en el año 2012, con 100 W/m^2 de diferencia, a estos materiales les sigue el suelo desnudo ($49,72 \text{ W/m}^2$) y el concreto ($29,27 \text{ W/m}^2$), el PPEB ($26,42 \text{ W/m}^2$ y $23,59 \text{ W/m}^2$) fue el material con menor cantidad de energía disponible en ambos años, consecuencia de su capacidad aislante y reflectiva.

La cobertura con mayor flujo de calor sensible resultó ser el asfalto ($40,52 \text{ W/m}^2$) y el suelo desnudo ($25,45 \text{ W/m}^2$), debido a su capacidad calorífica ($0,92 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\times 10^3$ y $0,89 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\times 10^3$, respectivamente), durante esta campaña las superficies que menos cantidad de energía disiparon en forma de flujo de calor sensible fueron el concreto ($16,72 \text{ W/m}^2$), PPEB (2012, 2013) ($24,53 \text{ W/m}^2$ y $13,26 \text{ W/m}^2$), y el césped ($21,93 \text{ W/m}^2$), es necesario mencionar que durante esta época del año los equipos de aire acondicionado permanecen apagados, para ambos años el PPEB (2012,2013) ($Q^* = 26,42 \text{ W/m}^2$ y $Q_H = 24,53 \text{ W/m}^2$ para el año 2012; $Q^* = 23,59 \text{ W/m}^2$ y $Q_H = 13,26 \text{ W/m}^2$ para el año 2013) no rebasó la cantidad total de energía disponible.

El asfalto ($1,89 \text{ W/m}^2$), el concreto ($1,22 \text{ W/m}^2$), suelo desnudo ($1,94 \text{ W/m}^2$) y PPEB (2012, 2013) ($1,11 \text{ W/m}^2$ y $0,79 \text{ W/m}^2$) no mostraron valor significativo para el flujo de calor latente, debido a la falta de humedad en su composición; el césped si muestra una repartición significativa en flujo de calor latente ($20,39 \text{ W/m}^2$), debido a sus procesos evapotranspiración.

El PPEB (2012, 2013) ($1,4 \text{ W/m}^2$ y $11,12 \text{ W/m}^2$), al igual que en la campaña de verano 2011, 2012 no almacena calor debido a su baja capacidad calorífica ($0,02 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}\text{X}10^3$) y su capacidad reflectiva (alto albedo, 0,5 y 0,47), las coberturas con alta capacidad calorífica (entre 1, 42 y $2,11 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}\text{X}10^3$) y bajo albedo (entre 0,15 y 0,22), como el asfalto ($Q_G = 32,59 \text{ W/m}^2$), concreto ($Q_G = 11,33 \text{ W/m}^2$), suelo desnudo ($Q_G = 22,24 \text{ W/m}^2$) y césped ($Q_G = 20,39 \text{ W/m}^2$), almacenan parte de la radiación neta.

El césped resultó con la temperatura superficial más elevada ($22,26^\circ\text{C}$), seguido del asfalto ($21,33^\circ\text{C}$) y el suelo desnudo ($20,43^\circ\text{C}$), consecuencia de su alta capacidad calorífica y bajo albedo, el concreto ($17,42^\circ\text{C}$) y el PPEB (2012, 2013) ($12,07^\circ\text{C}$ y $18,16^\circ\text{C}$) registraron las temperaturas superficiales más bajas, esto se asocia con el color claro de ambas coberturas.

La cobertura con mayor albedo resultó ser el PPEB (2012, 2013) (0,5 y 0,47) esto debido a su característica aislante, el recubrimiento de pintura elastomérica y el color blanco, el asfalto (0,18), concreto (0,15), suelo desnudo (0,18) y césped (0,22), resultaron con albedos aproximados.

La razón de Bowen, muestra valores mayor a la unidad en las superficies secas como el asfalto (2,44), concreto (13,7), suelo desnudo (13,16) y PPEB (2012, 2013) (22,1 y 16,82) y en el césped (1,08) resultó un poco mayor a la unidad.

5.3.2 Discusión de la rosa de vientos y posibles aportaciones de la campaña de invierno

En esta sección se discuten los porcentajes de las aportaciones por cada tipo de cubierta en 1 km alrededor del Instituto de Ingeniería por cada rumbo de viento dominante, como si el experimento se ubicara a meso escala.

Las aportaciones a meso escala para la campaña de invierno 2012 y 2013, en los días de medición del asfalto la dirección dominante del viento fue del noroeste, los porcentajes de las aportaciones por cada tipo de cubierta son 92, 5 habitacional, 2,9 infraestructura, 2,9 comercial, 1,1 avenidas, 0,4 áreas verdes y 0,2 de suelo desnudo; la dirección del viento dominante para el PPEB (2013) resultó del sureste, con los siguientes porcentajes, 17,8 habitacional, 15 infraestructura, 4,8 comercial, 56,1 mixto, 2,4 avenidas y 3,9 suelo desnudo; para el césped y el suelo desnudo la dirección preferente

del viento fue del suroeste, con aportaciones de 90,6 habitacional, 3,9 infraestructura, 3,0 comercial, 1,9 avenidas y 0,6 áreas verdes; para el suelo desnudo y el PPEB (2012) los porcentajes de las aportaciones por la dirección prevalente del viento del sur fueron 53,9 habitacional, 5,6 infraestructura, 19,7 comercial, 16,5 mixto y 4,3 avenidas (Tabla 5.2).

A micro escala se podrían atribuir influencias por dirección dominante del viento para el asfalto, de los equipos de aire acondicionado del noroeste, sin embargo durante esta época permanecen apagados, por lo tanto el exceso de flujo de calor sensible no se hace presente en invierno, posiblemente porque no están encendidos los equipos; para el PPEB (2013) con viento prevalente del sureste posiblemente influenciado por el pretil; por el suroeste para el césped y el concreto, el pretil y el árbol podrían ser la mayor aportación; y para el suelo desnudo y el PPEB (2012) su principal influencia sería el pretil, con dirección del viento prevalente del sur.

5.3.3 Discusión del comportamiento de los flujos de calor de la campaña de invierno

En las gráficas se aprecia los comportamientos de cada flujo de energía de cada una de las coberturas, la energía disponible en ella, y la repartición de esta en flujo de calor sensible, flujo de calor latente y almacenamiento de calor.

En la Figura 4.14, se muestran los flujos de calor del asfalto, la radiación neta se reparte principalmente en flujo de calor sensible y calor almacena, como consecuencia de su calor específico, el flujo de calor latente no es significativo.

El PPEB (2012) no cuenta con flujo de calor latente ni almacenamiento de calor significativo, en el comportamiento que se aprecia en la Figura 4.12, la radiación neta es igual al flujo de calor sensible, como consecuencia el modelo que se ha estado utilizando $Q_N = Q_H + Q_L + Q_S$, se reduciría a $Q_N = Q_H$, lo cual corrobora que el PPEB por ser una superficie aislante y reflectiva, eleva la temperatura del aire cercano a su superficie, y explica por qué durante esta campaña el flujo de calor sensible no excedió a la radiación neta como resultó en las campañas de verano. Durante el verano posiblemente excede debido al flujo de calor antropogénico (equipos de aire acondicionado) y flujo de calor advectivo (Figuras 4.12 y 4.13).

En la Figura 4.14 de flujos promedio de suelo desnudo el cual reparte su energía disponible en calor almacenado y flujo de calor sensible, principalmente, el flujo de calor latente no es significativo, y durante la campaña de invierno no se marca el comportamiento retardo térmico como en la campaña de verano 2011 y 2012.

Durante esta campaña el concreto almacenó gran cantidad de su energía disponible, siendo este flujo, y el calor necesario para calentar el aire las principales formas de disipar la energía total, el flujo de calor latente no es significativo debido a su carencia de humedad (Figura 4.11).

En la Figura 4.16 se muestran resultados de los flujos promedio del césped, sus flujos de calor se disipan equitativamente entre flujo de calor latente y sensible, sin embargo almacena gran parte del total de la radiación disponible, cabe mencionar el que el calor almacenado es un despeje del modelo que se utilizó.

Las temperaturas superficiales se muestran en la Figura 4.17, se aprecia que el suelo desnudo eleva su temperatura antes que las otras superficies durante las primeras horas del día, perdiendo esa misma ganancia rápidamente y siendo el tercer material más frío durante el periodo nocturno. El asfalto y el concreto, ganan calor después de las 12 horas, y al no disipar ese calor eficientemente resultaron ser las coberturas más calientes durante el periodo nocturno. El césped y el PPEB registraron las temperaturas más bajas durante el periodo completo, por la cantidad de humedad y por su capacidad de reflejar la radiación incidente, respectivamente.

La superficie con más capacidad para reflejar la cantidad de radiación incidente resultó ser el PPEB, seguido del concreto, los cuales son los materiales de colores claro, las coberturas restantes, suelo desnudo, césped y asfalto muestran albedos muy próximos entre ellos, el asfalto se distingue como el material con menos capacidad de reflejar radiación (Figura 4.18).

5.4 Campaña primavera 2012, 2013

A continuación se discute en base a los resultados obtenidos de las tablas de flujos promedio, rosa de los vientos y sus influencias, gráficas y su comportamiento, para la campaña de primavera 2012, 2013.

5.4.1 Discusión de los flujos de calor promedio de la campaña de primavera

Los flujos de calor promedio, temperatura superficial promedio, albedo y razón de Bowen, de las coberturas caracterizadas durante el durante la estación de transición de primavera 2012 y 2013, al igual que en las campañas anteriores los resultados que se muestran para el almacenamiento de calor se obtuvieron despejando el modelo $Q_N = Q_H + Q_L + Q_S$ (Tabla 4.3).

La cobertura con mayor cantidad de radiación neta durante el año 2012 resultó ser el césped (176, 08 W/m²), seguido del suelo desnudo (145,9 W/m²) el cual se caracteriza por rápidas ganancias de calor durante el día, así como su pérdida acelerada del mismo durante la noche, en tercer lugar se

ubica el concreto ($109,56 \text{ W/m}^2$) y el material con menor cantidad de energía resultó ser el PPEB ($73,12 \text{ W/m}^2$), por su capacidad de aislar y reflejar, como en campañas anteriores. El césped registró mayor cantidad de energía disponible, este resultado es debido a que el año 2013 registró mayor cantidad de radiación global, por lo tanto se refleja en sus flujos energéticos.

Durante la estación de transición primaveral la cobertura con mayor Q_H fue el PPEB ($69,67 \text{ W/m}^2$) se atribuye su alto albedo, lo que implica que la radiación incidente reflejada permanece cerca de la superficie calentando el aire circundante; seguido del asfalto ($55,51 \text{ W/m}^2$), concreto ($54,53 \text{ W/m}^2$) y suelo desnudo ($49,87 \text{ W/m}^2$), estas coberturas tienen la capacidad de almacenar calor, que absorben durante las horas sol, y a su vez su conductividad térmica ($0,25 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ suelo desnudo, $0,75 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ asfalto y $1,51 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ concreto) les permite disipar calor en forma de flujo de calor sensible; el césped ($37,05 \text{ W/m}^2$) presentó un flujo de calor sensible un poco por encima de su flujo de calor latente ($24,44 \text{ W/m}^2$).

Tal como se han comportado las coberturas en las campañas de verano e invierno, el flujo de calor latente no es significativo para el PPEB ($1,97 \text{ W/m}^2$), asfalto ($2,38 \text{ W/m}^2$), concreto ($2,99 \text{ W/m}^2$) y suelo desnudo ($2,79 \text{ W/m}^2$); el césped es el único material que se podría caracterizar por mitigar los efectos del flujo de calor sensible, su contenido de humedad es la principal razón para que exista una repartición equitativa entre flujo de calor latente y sensible.

Los materiales que presentan mayor almacenamiento de calor resultaron ser el césped ($114,58 \text{ W/m}^2$), asfalto ($87,08 \text{ W/m}^2$) y suelo desnudo ($93,24 \text{ W/m}^2$), cabe mencionar que este flujo de calor se obtuvo mediante el despeje de la ecuación $Q_N = Q_H + Q_L + Q_S$, los materiales que almacenan menor cantidad de calor fueron el concreto ($52,04 \text{ W/m}^2$) y PPEB ($1,48 \text{ W/m}^2$). Las cantidades altas de calor almacenado se relaciona con su calor específico (Tabla x), albedo (color de la superficie) y textura, los materiales con altos flujos de calor almacenado, tienen alto calor específico, son colores oscuros y textura rugosa, en cambio los materiales con bajo almacenamiento de calor cuentan con menor calor específico, son de color gris y blanco (claros, reflejan radiación solar) y textura más bien lisa.

Las temperaturas superficiales más elevadas se registraron en el asfalto ($33,98^\circ\text{C}$), concreto ($34,15^\circ\text{C}$) y césped ($30,49^\circ\text{C}$), consecuencia de la capacidad calorífica (Tabla x) de cada uno, las temperaturas superficiales más bajas registradas resultaron en el suelo desnudo ($27,39^\circ\text{C}$) y PPEB (27°C), la capacidad de elevar su temperatura es menor que en las demás coberturas.

La cobertura con mayor albedo resultó ser el PPEB ($0,54$), debido a su alta capacidad para reflejar los rayos solares y su color blanco, en contraste con el asfalto ($0,2$) que resultó con el albedo más

bajo, el concreto (0,27), suelo desnudo (0,21) y césped (0,28) mostraron albedos muy aproximados, tal como ha sucedido en campañas anteriores.

La razón entre el flujo sensible y el flujo de calor latente, muestra valores mayor a la unidad en las superficies secas como el asfalto (23,32), concreto (18,24), suelo desnudo (17,87) y PPEB (2011, 2012) (35,37) y en el césped resultó un poco mayor a la unidad (1,51) por ser una superficie húmeda.

5.4.2 Discusión de la rosa de vientos y posibles aportaciones de la campaña de primavera

En esta sección se discuten los porcentajes de las aportaciones por cada tipo de cubierta en 1 km alrededor del Instituto de Ingeniería por cada rumbo de viento dominante, para la campaña de primavera 2012 y 2013, en los días de medición del concreto y PPEB la dirección dominante del viento fue del noroeste, los porcentajes de las aportaciones por cada tipo de cubierta son 92, 5 habitacional, 2,9 infraestructura, 2,9 comercial, 1,1 avenidas, 0,4 áreas verdes y 0,2 de suelo desnudo; la dirección del viento dominante para el asfalto y suelo desnudo resultó del sureste, con los siguientes porcentajes, 17,8 habitacional, 15 infraestructura, 4,8 comercial, 56,1 mixto, 2,4 avenidas y 3,9 suelo desnudo; la dirección del viento prevalente césped es del suroeste, los porcentajes de aportaciones son 90,6 habitacional, 3,9 infraestructura, 1,5 comercial, 3,0 comercial, 1,9 avenidas y 0,6 áreas verdes (Tabla 5.2).

A micro escala se podrían atribuir aportaciones por dirección prevalente del viento para el concreto y PPEB (noroeste) son provenientes de los equipos de aire acondicionado, los cuales se encuentran apagados; una influencia significativa para el asfalto y suelo desnudo podría ser del pretil y de los árboles (sureste); y el césped podría recibir aportaciones de los equipos de aire acondicionado (apagados) y del pretil (suroeste).

5.4.3 Discusión del comportamiento de los flujos de calor de la campaña de primavera

En las gráficas se aprecia el comportamiento de la energía total recibida por cada una de las coberturas, la energía disponible en ella, y la repartición de esta en flujo de calor sensible, flujo de calor latente y almacenamiento de calor.

En la Figura 4.3, se muestran los flujos de calor del asfalto, en la cual se muestra que gran cantidad de la radiación neta se disipa en almacenamiento de calor y flujo de calor sensible su calor

específico y el color oscuro favorecen este comportamiento, el flujo de calor latente no es significativo.

El PPEB por ser un coberturas aislante y carente de humedad, no almacena cantidad relevante de calor, y su flujo de calor latente no es significativo, la radiación neta se disipa principalmente en flujo de calor sensible, se aprecia el comportamiento de histéresis después de que la radiación solar decrece alrededor de las 16 horas, a partir de esta hora el flujo calor sensible rebasa a la energía disponible, en esta época del año los equipos de aire acondicionado se encuentran encendidos, pero la radiación total incidente no es de la misma magnitud que en la estación crítica de verano (Figura 4.21).

En la figura 4.19 de flujos promedio de suelo desnudo en la cual se muestra que el flujo de calor sensible es insignificante, la energía disponible, se disipa en flujo de calor sensible y calor almacenado, se puede apreciar un comportamiento de histéresis, debido a que durante la mayor parte del día entre 7 y 14 horas la energía incidente es almacenada, y después de 15 horas esta energía almacenada la energía se encarga de calentar el aire cercano a su superficie.

Similar a la campaña de verano 2011 y 2013, el concreto resultó con un comportamiento similar al del suelo desnudo, del total de su energía disponible, la gran parte se divide en flujo de calor sensible y calor almacenado, debido a su calor específico, el comportamiento de histéresis se aprecia en la Figura 4.20, durante las primeras horas de la mañana almacena calor entre las 8 y 14 horas, y después de las 15 horas se disipa en flujo de calor sensible, el flujo de calor latente no es significativo.

En la Figura 4.23 se muestran resultados de los flujos promedio del césped, almacena parte del total de la radiación neta, como en las campañas anteriores, debido a su contenido de humedad y contrastando con las demás coberturas, su flujo de calor latente se encuentra muy próximo al flujo de calor sensible, durante el período nocturno es la curva del flujo de calor latente se encuentra por encima del flujo de calor sensible, lo que permite que sea llamado como un material fresco, ideal para mitigar el efecto de la isla de urbano.

Las temperaturas superficiales promedio se muestran en la Figura 4.24, la curva diurna del asfalto está por encima de los otros materiales, a causa de su alta capacidad calorífica. Durante el periodo diurno, después del asfalto, las coberturas con más altas temperaturas son el suelo desnudo y el concreto, siendo la temperatura del concreto la más elevadas durante la noche, en contraste con el

suelo desnudo que durante las 4 y 7 horas resultó ser el material más fresco. El PPEB y el césped, muestran las diferencias mínimas entre el período diurno y nocturno.

El albedo se muestra en la Figura 4.25, la cual se puede asociar directamente con el color de la superficie, el albedo más alto resultó para el PPEB, seguido del concreto y césped, por último se aprecian comportamientos similares entre el asfalto y el suelo desnudo.

5.5 Campaña otoño 2012

A continuación se discute en base a los resultados obtenidos de las tablas de flujos promedio, rosa de los vientos y sus influencias meso y micro escala, gráficas y su comportamiento, para la campaña de otoño 2012.

5.5.1 Discusión de los flujos de calor promedio de la campaña de otoño

Los flujos de calor promedio, temperatura superficial promedio, albedo y razón de Bowen, de las coberturas caracterizadas durante el durante la estación de transición de otoño 2012, al igual que en las campañas anteriores los resultados que se muestran para el almacenamiento de calor se obtuvieron despejando el modelo $Q_N = Q_H + Q_L + Q_S$ (Tabla 4.4).

La cobertura con mayor cantidad de radiación neta durante la campaña de otoño 2012 resultó ser el suelo desnudo ($31,77 \text{ W/m}^2$), seguido del PPEB ($11,22 \text{ W/m}^2$), concreto ($6,96 \text{ W/m}^2$) resultó con la menor cantidad de radiación neta, se atribuyen estos resultados diferentes a los de otras campañas debido a que en esta estación de transición las condiciones atmosféricas se presentaron verdaderamente cambiantes de un día a otro.

Durante la estación de transición de otoño la cobertura que aporta mayor cantidad de energía para en forma de calor sensible fue el concreto ($14,85 \text{ W/m}^2$), su color claro y capacidad calorífica (Tabla x) favorecen esta condición; seguido del suelo desnudo ($9,78 \text{ W/m}^2$) y PPEB ($8,98 \text{ W/m}^2$), durante este estación los equipos de aire acondicionado permanece apagados, por lo tanto en el PPEB no se ven alteraciones como en la campaña de verano.

El flujo de calor latente no es significativo para ninguna de las superficies caracterizadas durante esta campaña, ya que las tres son secas; concreto ($0,55 \text{ W/m}^2$), suelo desnudo ($1,16 \text{ W/m}^2$), PPEB ($0,04 \text{ W/m}^2$).

Los materiales que presentan un alto almacenamiento de calor comparado con su radiación neta, pero esto se debe a que los flujos de calor latente, sensible y radiación neta son muy pequeños y el

calor almacenado es un despeje del modelo utilizado; concreto (7,33 W/m²), suelo desnudo (20,82 W/m²), PPEB (22,38 W/m²).

La temperatura superficial más elevada se registró en el suelo desnudo (32,69 °C), consecuencia de la capacidad calorífica (Tabla 5.3) , en segundo lugar se encuentra el concreto (29,60 °C), seguido del PPEB(20,16°C), si existe un rango de 12 ° C entre las temperaturas mayor y menor, debido a su capacidad calorífica, el color y su textura.

La cobertura con mayor albedo resultó ser el PPEB (0,63), le siguen el concreto (0,42) y el suelo desnudo (0,3), repitiendo el patrón de campañas anteriormente discutidas, esto este resultado es atribuible al color y textura de la superficie.

La razón entre el flujo sensible y el flujo de calor latente, muestra valores mayor a la unidad en las tres superficies, característico en superficies secas, concreto (26,77), suelo desnudo (8,4), PPEB (221,27).

5.5.2 Discusión de la rosa de vientos y posibles aportaciones de la campaña de otoño

En esta sección se discuten los porcentajes de las aportaciones por cada tipo de cubierta en 1 km alrededor del Instituto de Ingeniería por cada rumbo de viento dominante, para la campaña de otoño 2012, durante la campaña completa el viento prevalente es del noreste, los porcentajes de las aportaciones por cada tipo de cubierta son 67,4 habitacional, 12,9 infraestructura, 2,9 comercial, 4,9 avenidas y 11,9 áreas verdes (Tabla 5.2)

A micro escala las aportaciones más relevantes por dirección prevalente del viento (noreste) son del pretil, los equipos de aire acondicionado (apagados durante la campaña) y de los árboles.

5.5.3 Discusión del comportamiento de los flujos de calor de la campaña de otoño

En las gráficas se aprecia el comportamiento de la energía total recibida por cada una de las coberturas, la energía disponible en ella, y la repartición de esta en flujo de calor sensible, flujo de calor latente y almacenamiento de calor.

En la Figura 4.26 de flujos promedio de suelo desnudo en la cual se muestra que el flujo de calor sensible es insignificante, la energía disponible, se disipa en flujo de calor sensible y calor almacenado, se puede apreciar un comportamiento de histéresis, entre las 16 y 17 horas, en donde el calor almacenado se disipa en flujo de calor sensible.

Similar a la campaña de verano 2011 y 2013, el concreto resultó con un comportamiento similar al del suelo desnudo, del total de su energía disponible, la gran parte se divide en flujo de calor sensible y calor almacenado, el comportamiento de histéresis se aprecia en la Figura 4.27, durante las primeras horas de la mañana almacena calor entre las 15 y 19 horas, disipando parte de su calor almacenado en flujo de calor sensible.

El PPEB muestra una posible reducción en el modelo propuesto $Q^* = Q_H + Q_E + Q_G + Q_F + Q_D$, en la Figura 4.28, se aprecia que la radiación neta se disipa casi en su totalidad en flujo de calor sensible, (el comportamiento del almacenamiento de calor se puede atribuir a que es obtenido residualmente del modelo) por lo tanto, el modelo se reduce a $Q^* = Q_H$, durante esta campaña los equipos de aire acondicionados se encuentran fuera de servicio, lo cual permite despreciar al flujo de calor antropogénico y advectivo ($Q_F + Q_D$), estos podrían estar implícitos en las mediciones de verano, en donde el flujo de calor sensible excede a la energía disponible.

5.6 Contraste entre los flujos promedio normalizados de la campaña de verano 2012,2013 e invierno 2012,2013.

Enseguida se muestran y discuten los contrastes entre los flujos promedio normalizados en las estaciones críticas del año (2011, 2012 y 2013) en la ciudad de Mexicali, verano e invierno de las campañas de monitoreo realizadas sobre cada una de las coberturas propuestas para el estudio.

En la Tabla 5.4. se muestran los flujos de calor normalizados del asfalto, el porcentaje disipado en forma de Q_E , resultó de 4% y 2%, en contraste con el Q_H que disipa el 43% y 54% del total de su energía disponible; el 52% de la radiación neta se almacena durante el verano y el 43% durante el invierno; la razón entre el flujo de calor sensible y flujo de calor latente es mayor a la unidad en ambas estaciones (10,11 y 21,44, verano e invierno, respectivamente).

Tabla 5. 4: Flujos de calor promedio normalizados verano 2011 e invierno 2012 del asfalto

<i>Flujo</i>	<i>Promedio Verano 2011</i>	<i>Promedio Invierno 2012</i>
Q_H/Q^*	0,43	0,54
Q_E/Q^*	0,04	0,02
Q_G/Q^*	0,52	0,43
$\beta(Q_H/Q_E)$	10,11	21,44

. $Q^*_{\text{verano}} = 144,95 \text{ W/m}^2$, $Q^*_{\text{invierno}} = 75 \text{ W/m}^2$

Durante las campañas de monitoreo del concreto, resultó en verano que el 80% de su energía disponible se disipó en flujo de calor sensible, en invierno el 57% del total se disipó en este mismo

flujo, el cual es un porcentaje alto tomando en cuenta que la energía total es baja; apenas el 1% y el 4% se utilizan en el flujo de calor latente; el porcentaje de calor almacenado fue de 18% (verano) y 38% (invierno), cabe mencionar este flujo es un residual del modelo propuesto; la razón de Bowen resulta mayor a la unidad (como es de esperarse en superficies secas), de 66,88 (verano) y 13,7 (invierno) (Tabla 5.5).

Tabla 5. 5: Flujos de calor promedio normalizados verano 2011 e invierno 2012 del concreto.

<i>Flujo</i>	<i>Promedio Verano 2011</i>	<i>Promedio Invierno 2012</i>
Q_H/Q^*	0,80	0,57
Q_E/Q^*	0,01	0,04
Q_G/Q^*	0,18	0,38
$\beta(Q_H/Q_E)$	66,88	13,7

$Q^*_{\text{verano}} = 125,46 \text{ W/m}^2$, $Q^*_{\text{invierno}} = 29,27 \text{ W/m}^2$

En la Tabla 5.6, se presentan los flujos normalizados del suelo desnudo; 1% (verano) y 3% (invierno) de la radiación neta se disipa en forma de Q_E ; 57% (verano) y 51% (invierno) se disipa como Q_H ; y 40% (verano) y 44% (invierno) se almacenan dentro del material; razón de Bowen mayor a la unidad 39,97 (verano) y 13,16 (invierno).

Tabla 5. 6: Flujos de calor promedio normalizados verano 2011 e invierno 2012 del suelo desnudo.

<i>Flujo</i>	<i>Promedio Verano 2011</i>	<i>Promedio Invierno 2012</i>
Q_H/Q^*	0,57	0,51
Q_E/Q^*	0,01	0,03
Q_G/Q^*	0,40	0,44
$\beta(Q_H/Q_E)$	30,07	13,16

$Q^*_{\text{verano}} = 111,45 \text{ W/m}^2$, $Q^*_{\text{invierno}} = 49,72 \text{ W/m}^2$

En la siguiente Tabla (5.7), se muestran resultados de las campañas de monitoreo del PPEB (verano2011, 2012; invierno2012, 2013). El Q_G , resultó ser despreciable, con un valor mínimo y de signo negativo (-, dirección del flujo); el flujo de calor sensible excede el 100%, consecuencia de su alto Q_H y bajo Q^* , durante las campañas de invierno, muestra bajo almacenamiento de calor 5 % (2012), y 47% (2013) , resultado del residual del modelo propuesto; del total de radiación neta disipa en forma de Q_E 27% (verano2011), 20%(verano2012), 4%(invierno2012) y 3%(invierno2013), resultado de ser una superficie seca; lo más relevante de estas campañas y esta cobertura, sucedió en el Q_H durante las campañas de verano, en ambas campañas el Q_H excede a la energía disponible en un 217% para el verano 2011 y 439% para el verano 2012, lo cual indica que podría existir un flujo de calor “extra” ($Q_F + Q_D$), tal vez proveniente de los equipos de aire acondicionado (que

permanecen encendidos durante toda la estación de verano, (Figura 5.1), dicho comentario es apoyado con los resultados de las campañas de invierno, en el 2012 el 92% se disipó en flujo de calor sensible, y en el 2013 solo el 58%, que si bien es alto no excede a la radiación neta (durante esta campaña los equipos de aire acondicionado están apagados); la razón entre el flujo de calor sensible y latente resultó mayor a la unidad (Tabla 5.7).

Tabla 5. 7: Flujos de calor promedio normalizados verano 2011,2012 e invierno 2012,2013 del PPEB.

<i>Flujo</i>	<i>Promedio Verano 2011</i>	<i>Promedio Verano 2012</i>	<i>Promedio Invierno 2012</i>	<i>Promedio Invierno 2013</i>
Q_H/Q^*	2,17	4,39	0,92	0,58
Q_E/Q^*	0,27	0,2	0,04	-0,03
Q_G/Q^*	-1,45	-1.1	-0,05	0,47
$\beta(Q_H/Q_E)$	7,88	20,95	22,1	16,82

$Q^*_{\text{verano2011}} = 34,41 \text{ W/m}^2$, $Q^*_{\text{verano2012}} = 38,07 \text{ W/m}^2$, $Q^*_{\text{invierno2012}} = 26,42 \text{ W/m}^2$, $Q^*_{\text{invierno2013}} = 26,42 \text{ W/m}^2$



Figura 5. 1: Ubicación del experimento y equipos de aire acondicionado.

Fuente: Google earth.

El césped resultó con un Q_G del 52% (verano) y 64% (invierno); y una repartición de flujos más equitativa en comparación con el resto de los materiales, el 16% (verano) y 18% (invierno) de la radiación neta se emitió en Q_H ; y el 68% (verano) y 64% (invierno) en Q_E , los porcentajes más altos de todos los materiales, debido a su contenido de humedad; la razón de Bowen resultó de 0,23 para el verano y 1,08 para invierno (Tabla 5.8).

Tabla 5. 8: Flujos de calor promedio normalizados verano 2012 e invierno 2013 del césped.

<i>Flujo</i>	<i>Promedio Verano 2011</i>	<i>Promedio Invierno 2012</i>
Q_H/Q^*	0,16	0,18
Q_E/Q^*	0,68	0,17
Q_G/Q^*	0,52	0,64
$\beta(Q_H/Q_E)$	0,23	1,08

$Q^*_{\text{verano}} = 111,4 \text{ W/m}^2$, $Q^*_{\text{invierno}} = 118,49 \text{ W/m}^2$

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

6 Conclusiones

6.1 De las mediciones

Los estudios de climatología urbana han adquirido gran relevancia en las últimas décadas por la necesidad de comprender los fenómenos atmosféricos urbanos creados de forma inconsciente por el hombre, razón por la cual es importante contar con una planificación ordenada en la cual se apliquen estos conceptos para generar calidad ambiental urbana y reducción de riesgos climáticos de las ciudades.

Las campañas llevadas a cabo entre los años 2011 y 2013 para verano, invierno, primavera y otoño permitieron obtener bases de datos las cuales generan conocimiento del comportamiento y la aportación a micro escala de los flujos de calor del asfalto, concreto, césped, suelo desnudo y poliestireno expandido con pintura elastomérica, los cuales podrían ser un factor presente en el fenómeno de la isla de calor urbano, sin embargo tal como menciona Chicas (2012), la integración del conocimiento de los efectos inadvertidos del clima urbano a los instrumentos de planificación de la ciudad debe ser por medio de un conocimiento más profundo desde una multitud de disciplinas, como la arquitectura, el diseño urbano, la planificación urbana, geografía, climatología, y debido a las tendencias globales de urbanización se hace más necesario el conocimiento de la física urbana por parte de éstas disciplinas.

6.2 Del balance de energía

Los balances energéticos en la baja atmósfera de las coberturas de asfalto, concreto, suelo desnudo y césped se propusieron su modelación mediante la siguiente ecuación: $Q^* = Q_H + Q_E + Q_G$, sobre estas superficies se rigen mediante este modelo, disipando la mayor parte de la energía total disponible en flujo de calor sensible y calor almacenado (asfalto, concreto y suelo desnudo); el césped muestra una repartición equitativa entre los tres flujos de calor, siendo esta la única superficie con flujo de calor latente significativo.

Mientras que el PPEB durante la campaña de verano redujo la ecuación anterior a $Q^* = Q_H + Q_F + Q_D$. Se puede observar que Q_E , por sus valores tan bajos se desprecia su inclusión; el flujo adicional ($Q_F + Q_D$) es atribuible a la influencia del calor antropogénico y advectivo, el primero causado por las toneladas de equipos de aire acondicionado instaladas sobre la azotea del Instituto de Ingeniería, y el segundo a que la dirección del viento preferente durante la campaña de verano provenía precisamente del mismo lugar en el cual se encuentran ubicados los mismos.

6.3 Del contraste verano, invierno

Del contraste que se realizó con flujos normalizados para las estaciones extremas de Mexicali (verano e invierno) se concluye que se cumple lo descrito en la literatura con respecto a la razón entre el flujo de calor sensible y latente (Ohmura, 1982), dado que en las superficies secas se obtuvieron resultados mayores a la unidad, excepto el césped, ya que en superficies húmedas la razón de Bowen es menor a la unidad.

El PPEB mostró en las campañas de verano un exceso en su flujo de calor sensible sobre la radiación neta de un 217% para el verano 2011 y 439% para el verano 2012, lo cual se debe a la presencia de flujo de calor antropogénico y advectivo ($Q_F + Q_D$), dadas las características de los alrededores del experimento y la dirección del viento durante los días de medición, los cuales prevalecieron del cuadrante norte-oeste, misma ubicación de los equipos de aire acondicionado que permanecen encendidos durante todo el verano, en contraste con la campaña de invierno, en donde el flujo de calor sensible no se excedió sobre la energía total disponible.

6.4 Del impacto al clima urbano

Este estudio permitió corroborar la importancia del comportamiento térmico de coberturas urbanas que influyen en la generación de micro climas y en la isla de calor urbano, señalados en la literatura;

- en coincidencia con los resultados obtenidos se puede decir que el fenómeno de modificación del clima natural se produce por la alteración de cuatro mecanismos físicos: balance radiativo perturbado por los cambio en las propiedades de las superficies pues el paisaje natural es reemplazado por cemento y ladrillo; flujo natural y turbulencia del aire modificados por la presencia de áreas construidas, obstáculos para el viento; balance de vapor de agua modificado por el cambio de superficies húmedas a secas; aumento de la emisión de calor, vapor de agua y de contaminantes, efectos que se emiten a la atmósfera y son provocado por las zonas urbanas respecto a las zonas rurales (Papparelli, 2007).
- mediante esta investigación se demuestra que el comportamiento de las superficies urbanas en contextos de alta densidad urbana (Oke, 1987; Santamouris, 2001) específicamente en el lento enfriamiento de éstas y que como se ha señalado, su resultado de manera agregada es el efecto de isla de calor urbano (Oke, 1987; Romero et al, 2010).
- se corrobora el efecto de la vegetación urbana sobre las condiciones microclimáticas y sobre el confort térmico humano (Matzakaris, 2006, 2007, 2008).

6.5 De las propuestas de mitigación

Las estrategias de adaptación y mitigación están interrelacionada; es decir, entre más estrategias de adaptación se apliquen disminuirá la urgencia de implementar medidas de mitigación, y viceversa (Koetse y Rietveld, 2009).

Las propuestas de mitigación deben ser analizadas a detalle, la formulación de mapas climáticos y su traslado a recomendaciones específicas en las distintas escalas espaciales de gestión del territorio deben ser estudiados en la consideración de un futuro urbano más sustentable en el contexto de los riesgo e incertidumbre climática global y sus impactos previsto a escala local (Chicas, 2012).

Se propone en base a los resultados:

- Regulación de uso de materiales, predecir el cambio que el uso excesivo de un material causa al clima urbano, para evitar gastos extras de mitigación, tomando en cuenta las exigencias que esto atrae, como la realización de dichos manuales y su estricto apego.
- Aumentar superficies vegetadas, cuidando que no generen un consumo excesivo de agua, plantas de regiones áridas, por ejemplo xerófilas, resisten condiciones extremas de verano e invierno, creando islas frías dentro de la ciudad que funcionen como sumideros del aire caliente en horas nocturnas.
- Aumentar el albedo del mosaico urbano en futuras renovaciones de materiales de superficies, mediante colores claros y reflectivos.

6.6 De la metodología

La metodología utilizada en esta investigación permitió conocer experimentalmente el comportamiento energético en la baja atmósfera de materiales comunes del área urbana, específicamente del asfalto, concreto, césped, suelo desnudo y poliestireno expandido con pintura elastomérica blanca en la ciudad de Mexicali B. C. durante las cuatro estaciones del año verano, invierno, primavera y otoño, el cual funge es un nuevo antecedente, generando líneas de investigación para propuestas de mitigación a una escala mayor.

El método de obtención de balance energético realizado dentro de la capa límite, propuesto por García (2006), permitió realizar balances de energía a nivel micro experimental dentro de la capa de dosel urbano, sobre materiales existentes en zonas afectadas por la isla de calor urbano (Casillas, 2009), es necesario profundizar en el análisis de las condiciones climáticas de las ciudad y de los efectos creados.

De manera que a la luz de los resultados observados en Mexicali, se puede afirmar que la sustitución de suelo nativo por materiales urbanos está relacionados con la producción de condiciones micro climáticas que condicionan la habitabilidad de los espacios exteriores. Es importante profundizar en el estudio temporal y espacial para obtener mayor solidez, así como, una caracterización de superficies de manera simultánea es recomendable.

6.7 Del trabajo futuro y líneas de generación del conocimiento

En base a los resultados obtenidos en esta micro experimentación nace la inquietud de conocer el comportamiento del asfalto, concreto, suelo desnudo, césped y sobre todo del poliestireno expandido con pintura elastomérica blanca dentro del área urbana.

Para lo cual se debe aumentar la escala, a la de fraccionamiento (barrio, colonia), en los que se encuentren coberturas similares a las caracterizadas en este estudio, las campañas deben realizarse de manera simultánea, para tener igualdad en las condiciones atmosféricas; con el fin de analizar desde otra perspectiva la afectación al confort térmico y clima urbano, así como el aumento del gasto de energía eléctrica, particularmente en la estación de verano, en donde el consumo energético presenta su máximo en la ciudad de Mexicali, B. C.

Referencias

- A. Coutts, J. Beringer, N.J. Tapper, Changing urban climate and CO2 emissions: Implications for the development of policies for sustainable cities, *Urban Policy and Research* 28 (1) (2010) 27-47.
- A.A. Balogun, J.O. Adegoke, S. Vezhapparambu, M. Mauder, J.P. McFadden, K. Gallo, Surface energy balance measurements above an exurban residential Neighborhood of Kansas city, Missouri, *Boundary-Layer Meteorology* 133 (3) (2009) 299-321.
- Ahrens, C. Donald. *Essentials Of Meteorology: an invitation to the atmosphere*. 2nd edition. Wadworth Publishing Company. United States, 1998. ISBN 0-534-53766-9
- A.M. Coutts, J. Beringer, N. Tapper, Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in melbourne, Australia, *Applied Meteorology Climatology* 46 (2007) 477-493.
- A.P. Sturtman, H.A. McGowan, Observations of dry season surface energy exchanges over a desert clay pan, Queensland, Australia, *Arid Environments* 73 (1) (2009) 74-81.
- Alchapar, N., Correa, E., Lesino, G., & Vivienda-INCIHUSA-CCT, M. C. (2012). Estrategias de enfriamiento pasivo urbano. Índice de reflectancia solar y relación costo-beneficio en pinturas para fachadas Vol. 16. ISSN 0329-5184
- Alchapar, N. L., Correa, E. N., & Cantón, M. A. (2013). influencia del envejecimiento de los materiales en su desempeño térmico. El caso de revestimientos texturados para fachadas. *La Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, RLMM*, 33(2).
- Alcoforado, M., Marzarakis, A. (2010). Planing with urban climate in different climatic zones. University of Freiburg, Alemania. *Geographica*, 57, 5-39.
- Álvarez Martha. *Césped: Una guía para el cuidado y renovación del césped de todo tipo de jardines*. ALBATROS Jardinería Práctica. ISBN-10: 950-24-1150-1 ISBN-13: 978-950-24-1150-7
- Ángel, L., Ramírez, A., & Domínguez, E. (2010). Isla de calor y cambios espacio-temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 34(131), 173-183.
- Antoni, P. M., B. E. Law, M. H. Unsworth and R. J. Vong, 2000. Variation of net radiation over heterogeneous surfaces: measurements and simulation in a juniper-sagebrush ecosystem. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 102, 275-286.
- Arya, S. P., (1988). *Introduction to micrometeorology*. Academic Press Inc., San Diego, CA, 11-12 pp.
- Badarinath, K.V.S., Biswadip Gharai and C.B.S. Dutt. 2002: Urban environmental monitoring using satellite data. <http://www.commonwealthknowledge.net/MetCD/Chapter3/C3P08.htm>.
- Bello Fuentes, V. (1994). La isla de calor y los usos del suelo en Guadalajara. *Serie Geográfica*, (4), 83-97.
- Blonquist, J.M., Tanner, B.D., & Bugbee, B. (2009). Evaluation of measurement accuracy and comparison of two new and three traditional net radiometers. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1709–1721.

Bridgman, H. & Oliver, J. (2006). The global climate system: Patterns, Processes, and Teleconnections. United Kingdom: Eds. University Press, Cambridge.

Casillas, Africa (2009). Climatología de la isla de calor urbana de Mexicali B.C., y su relación con el uso del suelo, Tesis de Maestría de la Universidad Autónoma de Baja California.

C.S.B. Grimmond, Coauthors, The international urban energy balance models comparison project: First results from phase 1, Applied Meteorology Climatology 49 (2010) 1268-1292.

Chan A.L.S. 2011. Developing a modified typical meteorological year weather file for Hong Kong taking into account the urban heat island effect. Building and Environment 46 2434-2441.

Chicas M., Juan Carlos. (2012). Tesis Morfología urbana y clima urbano estudio de microclimas urbanos en Santiago de Chile, mediante la aplicación del concepto de cañon urbano e índices de confort térmico. Santiago de Chile. pp26.

Clarke, J. F. (1969). Nocturnal urban boundary layer over Cincinnati, Ohio. Monthly Weather Review, 97(8), 582-589.

Cobos, D.R., & Baker, J.M. (2003). Evaluation and modification of a domeless net radiometer. Agronomy Journal, 95, 177-183.

Comarazamy, D. E., Gonzalez, J. E., & Luvall, J. C. Fenómeno de la Isla de Calor Urbano en una Ciudad Tropical Costera. Cambios Globales en el Ambiente y Desarrollo Sustentable en América Latina, 61.

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

Correa, E. N., Larsen, F., & Lesino, G. (2003). Isla de calor urbana: efecto de los pavimentos. Informe de avance. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 7, 11-25.

De Schiller, S. (2014). Transformación urbana y sustentabilidad. Urbana, 7(31), 13.pp13-30

De Steffens, A. C., Piccolo, M. C., González, J. H., & Navarrette, G. (2001). La isla de calor estival en Temuco, Chile. *Papeles de geografía*, 33, 49-60.

Doménech Xavier / José Peral. Química Ambiental de sistemas terrestres. Editorial Reverté. ISBN: 84- 291- 79906-2

Duarte, M. G., Tello, C. P., Zamora, J. L. B., Gómez, M. D. L. A. S., & Camacho, O. L. (2008). Sistema de protección del aislamiento e impermeabilización de techos evaluación de viviendas del desierto. *Energética*, (40), 5-12.

E. Harmsen Teodoro. Diseño de estructuras de concreto armado. 4ta edición. Pontificia Universidad Católica del Perú Fondo Editorial 2005. ISBN: 9972-42-730-7

Erell E., Pearlmutter D., Williamson, T. (2011). Urban microclimate: designing the spaces between building. London: Eds. Earthscan.

- Evangelina, R. L. (2007). Análisis de parámetros meteorológicos utilizando el modelo de la rosa de los vientos.
- Feyisa, G.L., Dons, K., & Meilby, H. (2014). Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa. *Landscape and Urban Planning*, 123, 87–95.
- Foken T. 2008. *Micrometeorology*. Springer Verlag, Berlín-Heidelberg, 306 p.
- García Codron J.C., Diego Liaño C., Fdez.de Arróyabe H. P., Garmendia Pegraja C., Rasilla Alvarez D. *El Clima entre el Mar y la Montaña*. Asociación Española de Climatología y Universidad De Cantabria, Serie A, No. 4, Santander, 2004.
- García Cueto O. R., Balance de energía y capa límite superficiales sobre distintos usos de suelos en la ciudad de Mexicali, B. C. Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, 2006. 16 pp.
- 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. *ATMOSFERA* 20(2), 111-131.
- García-Cueto O.R., Tejeda Martínez A. Jáuregui Ostos E. Heat waves and heat days in an arid city in the northwest of México: current trend and in climate change scenarios. *International Journal of Biometeorology*, DOI 10.1007/s00484-009-0283-7. Published online: 12 December 2009.
- García-Cueto O.R., Tejeda-Martínez A, Bojórquez-Morales G (2009) Urbanization effects upon in the air temperature in Mexicali, Baja California, México. *Atmosfera* 22:349–365
- García-Cueto O.R., N.S. Santillán-Soto, N., 2012. Modelling extreme climate events: Two cases studies in Mexico, in: L.M. Druyan (Ed.), *Climate Models*, Croatia: INTECH, pp. 132-160.
- García- Cueto O.R., Rivera-Pazos N., Tejeda-Martínez A., 1999. *Bioclimatología de zonas áridas*. Instituto de Ingeniería, UABC. Reporte técnico de proyectos, 108 pp.
- García, F. F. (2007). Impactos del cambio climático en las áreas urbanas y rurales. *Boletín de la Institución Libre de Enseñanza*, (66), 171-182.
- García, M. D. C. M. (1999). *Climatología urbana* (Vol. 160). Edicions Universitat Barcelona. pp. 10
- García, M., & del Carmen, M. (1997). Una propuesta de terminología castellana en climatología urbana. *Investigaciones geográficas*, nº 17, 1997; pp. 89-97.
- García de Miranda, E. (1981). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana, 3a. Edición, *Enriqueta García, México*.
- Geraldo-Ferreira, A., Soria-Olivas, E., Gómez-Sanchis, J., Serrano-López, A.J., Velázquez-Blazquez, A., & López-Baeza, E. (2011). Modelling net radiation at surface using “in situ” netpyrradiometer measurements with artificial neural networks. *Expert Systems with Applications*, 38, 14190–14195.

Grimmond C.S.B., Roth M., Oke T. R., Au Y. C., Best M., Betts R., ... Voogt J. (2010). Climate and more sustainable cities: Climate information for improved planning and management of cities (producers / capabilities perspective). *Procedia environmental sciences*, 1, 247-274.

Grimmond, C. S. B., Cleugh, H. A., & Oke, T. R. (1991). An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 25(3), 311-326.

Grimmond, C. S. B., John Arnfield A. (1997). An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modeling. *Energy and buildings* 27. 61-68

Grimmond, C. S. B., Potter, S. K., Zutter, H. N., & Souch, C. (2001). Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas. *International Journal of Climatology*, 21(7), 903-913.

Groleau, M., & Mestayer, P.G. (2012). Urban morphology influence on urban albedo: a revisit with the solene model. *Boundary-Layer Meteorol*, 147, 301–327.

Hye-Yun, K., & Shunlin, L. (2010). Development of a hybrid method for estimating land surface shortwave net radiation from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2393–2402.

Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Campus Mexicali, Estación Meteorológica Julio, 1995.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México). Anuario estadístico y geográfico de Baja California 2013. ISBN 978-607-494-86-8. pp 33.

IPCC, March 2010. Press Release, Scientific Academy to Conduct Independent Review of the Intergovernmental Panel on Climate Change's Processes and Procedures at Request of United Nations and IPCC. Validación de Reporte 2007.

Järvi, L., Grimmond, C.S.B., & Christen, A. (2011). The Surface Urban Energy and Water Balance Scheme (SUEWS): Evaluation in Los Angeles and Vancouver. *Journal of Hydrology*, 411, 219–237.

Jauregui, E. (1997). Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31(22), 3821-3831.

Kalthoff, N., Fiebig-Wittmaack, M., Meißner, C., Kohler, M., Uriarte, M., Bischoff-Gau, B. I., & Gonzalez, E. (2006). The energy balance, evapo-transpiration and nocturnal dew deposition of an arid valley in the Andes. *Journal of Arid Environments*, 65, 420–443.

Kim, H. H. (1992). Urban heat island. *International Journal of Remote Sensing*, 13(12), 2319-2336.

Koetse, Mark J. y Piet Rietveld (2009), "The impact of Climate Change and Weather on Transport: An Overview of Empirical Findings", *Transportation Research Part D*, Holanda.

Krishnan, P., Meyers, T.P., Scott, R.L., Kennedy, L., & Heuer, M. (2011). Energy exchange and evapotranspiration over two temperate semi-arid grasslands in North America. *Agricultural and Forest Meteorology*, 153, 31–44.

Krüger, E., & Emmanuel, R. (2013). Accounting for atmospheric stability conditions in urban heat island studies: The case of Glasgow, UK. *Landscape and Urban Planning*, 117, 112–121.

L. Barrada Víctor. Instrumentación biometeorológica. Ediciones Científicas Universitarias.1994. ISBN: 968-16-3991-X

L. House-Peters, H. Chang, Modelling the impact of land use and climate change on neighborhood-scale evaporation and nighttime cooling: a surface energy balance approach, *Landscape and Urban Planning* 103 (2) (2011) 189-155.

López Sotillo José Manuel. Construcción de un belén cuadro, paso a paso. CEAC. 2006. ISBN: 84-329-1499-1

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.

M.A. Hart, D.J. Sailor, Quantifying the influence of land use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island, *Theoretical and Applied Climatology* 95 (3-4) (2009) 397-406.

Mackey, C.W., Lee, X., & Smith, R.B. (2012). Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island. *Building and Environment*, 49, 348–358.

Malhi Y., McNaughton K., Von Rindow C., 2005. Low frequency atmospheric transport and surface flux measurements, 101-117. *Handbook of Micrometeorology: A guide for surface flux measurements and analysis*. Kluwer Academic Publishers. New York, p.250.

Manual de Instrucciones NR01 sensor de cuatro componentes de radiación neta. Campbell Scientific 2008-2011. pp. 5-6.

Matzarakis A. & Amelung B. (2008). Physiological Equivalent Temperature as Indicators for Impacts of Climate Change on Thermal Comfort of Humans. M. C. Thomson et al. (eds.), *Seasonal Forecasts, Climatic Change and Human Health*. Geneva, Switzerland: Springer Science + Business Media B.V.

Matzarakis A., Rutz F. & Mayer H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments-application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology* 51, 323-334.

Matzarakis A., & Rutz F. (2006). RayMan: A tool for research and education in applied climatology. Athens, Ed. 8th Conference on Meteorology-Climatology-Atmospheric Physics (161-168). Germany: Meteorological Institute, University of Freiburg.

Mayer, H., Matzarakis, A., & Iziomon, M. G. (2003). Spatio-temporal variability of moisture conditions within the Urban Canopy Layer. *Theoretical and applied climatology*, 76(3-4), 165-179.

McMichael, A.J., Wilkinson, P., Kovats, R.S., Pattenden, S., Hajat, S., Armstrong, B., Vajanapoom, N., Niciu, E.M., Mahomed, H., Kingkeow, C., Kosnik, M., O'Neill, M.S., Romieu, I., Ramirez-Aguilar, M., Barreto, M.L., Gouveia, N., & Nikiforov, B. (2008). International study of temperature, heat and urban mortality: the 'ISOTHUM' project. *International Journal of Epidemiology*, 37, 1121–1131.

Méndez, C. C. M., Uribe, D. M., & Becerril, L. A. G. (2007). Isla de calor en Toluca, México. *CIENCIA ergo sum*, 14(3), 307-316.

Menut, L., Flamant, C., Pelon, J., & Flamant, P. H. (1999). Urban boundary-layer height determination from lidar measurements over the Paris area. *Applied Optics*, 38(6), 945-954.

Mestayer, P. G., Durand, P., Augustin, P., Bastin, S., Bonnefond, J. M., Bénech, B., ... & Voogt, J. (2005). The urban boundary-layer field campaign in Marseille (UBL/CLU-ESCOMPTE): set-up and first results. *Boundary-Layer Meteorology*, 114(2), 315-365.

Mills G., Cleugh H., Emmanuel R., Endlicher W., Erell E., McGranahan G., ..., Steemer K (2010). Climate information for improved planning and management of mega cities (Needs Perspective). *Procedia environmental sciences* 1, 228-246.

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

Muñoz, Ana María Avilés. Atlas de Mexicali: un espacio urbano en la estrategia internacional. UABC, 2001.

Neirotti P., De Marco A., Cagliano A. C., Mangano G., & Scorrano, F. (2014). Current trends in Smart City initiatives: Some stylised facts. *Cities*, 38, 25–36.

O. Khodjet, M. Kamel, A. Hebbouche, Climate change and environmental impact caused by anthropogenic, *Environmental Science and Engineering B* 1 (2012) 668-672.

Offerle, B., Eliasson, I., Grimmond, C. S. B., & Holmer, B. (2007). Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon. *Boundary-layer meteorology*, 122(2), 273-292.

Ohmura, A. (1982). Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. *Journal of Applied Meteorology*, 21(4), 595-598.

Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. (2nd ed.9). London:Routledge.

Oke, T. R. (1995). The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. In *Wind climate in cities* (pp. 81-107). Springer Netherlands.

Oke, T. R., Kalanda, B. D., & Steyn, D. G. (1981). Parameterization of heat storage in urban areas. *Urban Ecology*, 5(1), 45-54.

Oke, T.R., (1987). *Boundary Layer Climates*, 2nd ed. Routledge, London.

Oke, T.R., 1987. *Boundary Layer Climates*. Routledge, 435 pp.

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.

Pajares, G. (2011). Advances in Sensors Applied to Agriculture and Forestry. *Sensors*, 11, 8930–8932.

Papparelli, A., Kurbán, A., & Cúnsulo, M. (2007). *Isla de Calor Urbana en Zona Árida*. AVERMA, ISSN, 0329-5184.

Payá Miguel. Aislamiento térmico y acústico. CEAC técnico Construcción. ISBN: 84-329-3068-7

Programa para Mejorar la Calidad del Aire en Mexicali, 2011-2020, México, en <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/calidaddelaire/Documents/Calidad%20del%20aire/Proaires/Proaires_Vigentes/ProAire%20Mexicali%202011-2020.pdf>

Programa estatal de acción ante el cambio climático de Baja California. SEMARNAT. Secretaría de Protección al Ambiente. Instituto Nacional de Ecología. Diciembre 2012.

Radhi, H., Fikry, F., & Sharples, S. (2013). Impacts of urbanisation on the thermal behaviour of new built up environments: A scoping study of the urban heat island in Bahrain. *Landscape and Urban Planning*, 113, 47–61.

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

Reyes Lizcano, Fredy Alberto. 2003. *Diseño racional de pavimentos*. 1ra edición. Bogotá: CEJA. ISBN: 958-683-622-3

Romero, H., Molina, M., Vásquez, A., & Smith, P. (2008). El clima urbano del Puerto de Valparaíso: construcción social del espacio en ciudades costeras. *Revista da Faculdade de Letras da Universidade do Porto-Geografia*, 20. pp.103-122

Romero, H., Irrarrázaval, F., Opazo, D., Salgado, M., & Smith, P. (2010). Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile. *EURE (Santiago)*, 36(109), 35-62.

Rotach, M. W., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, A., Clappier, A., ... & Voogt, J. A. (2005). BUBBLE—an urban boundary layer meteorology project. *Theoretical and Applied Climatology*, 81(3-4), 231-261.

Roth, T.M. and T.R. Oke. 1989. Satellite derived Urban Heat Islands from three coastal cities and the utilization of such data in Urban Climatology. *Intl. Journal of Remote Sensing*, 10, 1699-1720.

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*, 85(12), 3085-3102.

Santamouris M.; Asimakopoulos...[et al.] (2001). *Energy and Climate in the urban built environment*. London, UK: Eds. James & James (Science Publishers) Ltd..

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. http://www2.ine.gob.mx/sistemas/peacc/descargas/bc_igei_2005_vf.pdf Acceso: 29 abril (2014).

Shahidan, M.F., Shariff, M.K.M., Jones, P., Salleh, E., & Abdullah, A.M. (2010). A comparison of Mesua ferrea L. and Hura crepitans L. for shade creation and radiation modification in improving thermal comfort. *Landscape and Urban Planning*, 97, 168–181.

Sobrino, J. A., Sòria, G., Oltra-Carrió, R., Jiménez-Muñoz, J. C., Cuenca, J., Hidalgo, V. & Gimeno13, L. (2009). DESIREX2008: Estudio de la isla de calor en la ciudad de Madrid.

Steenneveld, G.J., Koopmans, S., Heusinkveld, B.G., & Theeuwes, N.E. (2014). Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect. *Landscape and Urban Planning*, 121, 92–96.

Susca T., Gaffin S.R., Dell’Osso S.R. 2011. Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution* 159, 2119-2126.

Synnefa, A., Santamouris, M., & Livada, I. (2006). A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 80(8), 968-981.

Szokolay, Steven. *Heating and Cooling of Buildings*. Edited by Henry J. Cowan in *Handbook of Architectural Technology* Van Nostrand Reinhold. New York, USA.1991

T.R. Oke, G. Zeuner, E. Jauregui, The surface energy balance in Mexico city, *Atmospheric Environment B* 26 (4) (1992) 433-444.

Taubenböck, H., Wiesner, M., Felbier, A., Marconcini, M., Esch, T., & Dech, S. (2014). New dimensions of urban landscapes: The spatio-temporal evolution from a polynuclei area to a mega-region based on remote sensing data. *Applied Geography*, 47, 137–153.

The meteorological resource center. Software. Copyright 2002. <http://www.webmet.com/software.html> [Consulta: lunes, 26 de septiembre de 2014]

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.

V. Masson, Urban surface modelling and the meso-scale impact in cities, *Theoretical and Applied Climatology* 84 (1-3) (2006) 35-45.

Villanueva-Solis, J., Ranfla, A., & Quintanilla-Montoya, A. L. (2013). Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo. *Información tecnológica*, 24(1), 15-24.

Lakes Environmental Software. WRPlot View. Copyright 1995-2014.
<http://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html> [Consulta: lunes, 26 de septiembre de 2014]

HF Fax Image Communication. Wx Software. Update 2005. http://www.hffax.de/html/hauptteil_wx_software.html
[Consulta: lunes, 26 de septiembre de 2014]

W. Xu, M.J. Wooster, C.S.B. Grimmond, Modelling of urban sensible heat flux at multiple scales: A demonstration using airborne hyperspectral imagery of Shanghai and a temperature-emissivity separation approach, *Remote Sensing of Environment* 112 (9) (2008) 3493-3510.

Wrenn, D.H. & Sam, A.G. (2014). Geographically and temporally weighted likelihood regression: Exploring the spatiotemporal determinants of land use change. *Regional Science and Urban Economics*, 44, 60–74.

Yuan-Fong, S. Foody, G. M., & Ke-Sheng, C. (2012). Spatial non-stationarity in the relationships between land cover and surface temperature in an urban heat island and its impacts on thermally sensitive populations. *Landscape and Urban Planning*, 107, 172–180.

Zhang, N., Wang, X., & Peng, Z., (2013). Large-Eddy simulation of mesoscale circulations forced by inhomogeneous urban Heat Island. *Boundary-Layer Meteorology*, DOI 10.1007/s10546-013-9879-x.

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.