

El balance de radiación para diferentes superficies de suelo: estudio experimental en la ciudad de Mexicali, Baja California, México

O. Rafael García Cueto¹, Néstor Santillán Soto², Zalia Haro Rincón³, Sara Ojeda Benitez⁴

Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California
Blvd. Benito Juárez y C. de la Normal S/N, Col. Insurgentes Este
Mexicali, Baja California, México

¹rafaelcueto@uabc.edu.mx, ²nsantillan@uabc.edu.mx, ³ing.zalia.haro@hotmail.com

RESUMEN

La urbanización, al cambiar las propiedades de la superficie modifica de manera sensible el balance de radiación, y con ello el clima citadino, por lo que en este artículo se propuso cuantificar ese balance en diferentes coberturas superficiales para varios días del mes de agosto de 2011 en la ciudad de Mexicali, B.C., México. Adicionalmente, se estimó el albedo de cada superficie y algunas otras propiedades de la atmósfera local como el índice de claridad atmosférica (K_0) y la emisividad atmosférica (ϵ_{atm}). Las superficies en las que se realizó el experimento fueron asfalto, concreto, poliestireno con pintura elastomérica blanca (PPEB), arcilla y césped. Se encontró que para un ciclo de 24 horas de medición, el mayor valor promedio de radiación neta fue para el asfalto (146.1 W/m^2), y el menor valor promedio para el PPEB (33.6 W/m^2). Los valores estimados de albedo varían dependiendo de la superficie, mientras que los de K_0 y ϵ_{atm} dependen de las condiciones atmosféricas prevalentes. A partir de las mediciones se propusieron modelos estadísticos de la radiación neta en función de la radiación solar entrante y la radiación neta de onda corta, encontrándose en todos los casos coeficientes de determinación superiores a 0.97. Se discuten las probables implicaciones de los resultados encontrados hacia el medio urbanizado.

1. INTRODUCCIÓN

La radiación neta es un parámetro fundamental que gobierna el clima de las capas bajas de la atmósfera; depende críticamente de la estructura y la composición de la atmósfera y la presencia de nubes, además de las características superficiales tales como albedo, emisividad, temperatura, humedad y propiedades térmicas del suelo subyacente. Es además la fuerza impulsora de varios procesos físicos, dinámicos y biológicos, tales como el calentamiento del suelo y el aire, la fotosíntesis y la evapotranspiración, siendo esta última utilizada para optimizar la calidad y rendimiento de los cultivos y la planificación de los recursos hídricos (Geraldo-Ferreira et al., 2011; Bennie et al., 2008; Ji et al., 2009; Li et al., 2009). Es también importante para estudios de balance de energía superficial, donde su magnitud está principalmente relacionada a los flujos de calor sensible y latente (Kalthoff et al., 2006). Respecto a su utilización en estudios de clima urbano es un parámetro clave en la relación entre el tipo de superficie urbana subyacente y el balance de energía de radiación (Arnfield, 2003), por lo que un análisis de ese balance en varias superficies subyacentes es esencial para los estudios de balance de energía urbanos, y es también importante para tratar de entender el clima urbano (o microclimas urbanos), que causan las diferentes superficies causados por la expansión urbana.

La característica básica del paisaje urbano es la heterogeneidad espacial de sus superficies, horizontales y verticales, y esas diferencias conducen a la no uniformidad de

transmisión y distribución de radiación y energía. Siendo la superficie urbana una interfase física compleja, las propiedades termodinámicas y cinéticas de las superficies subyacentes pueden cambiar sustancialmente al cambiar las características físicas de esa superficie (Wang y Gong, 2010; Yaoping et al., 2012). Todos estos factores propician que las características climáticas sean específicas de la ciudad analizada. Muchos estudios previos han analizado las diferencias de radiación urbano-rurales usando modelos climáticos, modelos de ecosistemas terrestres, o modelos computacionales de dinámica de fluidos. Sin embargo en esos estudios se han combinado las diferencias de radiación producidas por la heterogeneidad del paisaje urbano, así que ha sido difícil explicar los procesos de transformación de energía de diferentes superficies (Zhang et al., 2006), y las características micro-climáticas locales al interior de la ciudad no se han podido simular con precisión (Tong et al., 2004). Además, debido a la variedad de factores que intervienen, las observaciones de estaciones meteorológicas no pueden distinguir efectivamente los efectos de superficies subyacentes sobre las componentes del balance de radiación, y hay resultados de las observaciones, incluso contradictorios (White et al., 1978; Christen y Vogt, 2004; Peng et al, 2008). A pesar de su importancia, la radiación neta se mide en un limitado número de estaciones meteorológicas estándar porque los radiómetros netos son instrumentos caros y requieren un cuidado constante en el campo. Por lo anterior, para tener una mejor comprensión y claridad de los efectos que diferentes superficies horizontales tienen en el balance de radiación y el probable impacto que ese balance tiene hacia el medio ambiente circundante se realizó una campaña experimental en cinco diferentes materiales en la ciudad de Mexicali, B.C., México. La propuesta fue medir las componentes de tal balance y la utilización parcial del esquema NARP (Net All-Wave Radiation Parameterization) en cada cobertura superficial, y analizar el comportamiento medido y simulado en cada una de ellas. Adicionalmente se estimaron las siguientes características biofísicas: albedo, índice de claridad atmosférica y emisividad atmosférica. En particular, el índice de claridad atmosférica es un indicador de la condición media de la cubierta nubosa (Wright, 1999); este índice permite estimar el valor de la cantidad de energía que se disipa y se transforma en diferentes procesos por el paso de la radiación solar, y está físicamente relacionado con el camino de la radiación a través de la atmósfera hasta incidir sobre una superficie a nivel terrestre o del mar.

2. METODOLOGÍA

2.1. Campaña experimental

Los datos del balance de radiación y los meteorológicos fueron colectados por el Grupo de climatología aplicada del Instituto de Ingeniería de la UABC. Los equipos de observación fueron instalados en el techo del mismo Instituto ubicado en el campus universitario. Alrededor de la zona hay usos mixtos de suelo, pero el diseño experimental permitió medir lo pertinente de cada superficie. En una plataforma a metro y medio del techo del edificio se colocó un cajón de 2m x 2m x 0.55m, el cual fue relleno previamente con tierra nativa, y sobre ella se colocaron las superficies a medir, a saber: asfalto, concreto, poliestireno pintado con pintura elastomérica blanca (PPEB), césped y arcilla. A una altura de 20 cm. de cada superficie se instaló el radiómetro NR01, que mide las cuatro componentes del balance radiativo. Cada superficie se midió en un ciclo completo de 24 horas en varios días del mes de agosto de 2011. Las variables meteorológicas que estuvieron midiéndose durante esa campaña experimental fueron temperatura de superficie, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica y precipitación pluvial. Estas mediciones fueron muy útiles para discutir el balance de radiación de cada superficie y sus probables implicaciones hacia el medio urbanizado.

2.2. Balance de radiación

El balance de radiación neta cercano a la superficie terrestre está representado por la suma algebraica de las componentes entrante y saliente de la radiación de onda corta y de onda larga, que se formula en la ecuación 1.

$$Q^* = K_{\downarrow} - K_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} \quad (1)$$

Donde Q^* = Radiación Neta, K_{\downarrow} = Radiación entrante de onda corta, K_{\uparrow} = Radiación saliente de onda corta, L_{\downarrow} = Radiación entrante de onda larga, y L_{\uparrow} = Radiación saliente de onda larga. Las componentes radiativas fueron medidas con el radiómetro NR01 que realiza medidas separadas de la radiación solar (de onda corta), y de lejano infrarrojo (de onda larga). La respuesta espectral del radiómetro de onda corta (piranómetro) es de 300 a 2800 nm, y tiene un campo de vista de 180°. Es un piranómetro de segunda clase de acuerdo al sistema de clasificación de la WMO (Organización Meteorológica Mundial, por sus siglas en inglés) e ISO (ISO 9060). El radiómetro de onda larga (pirgeómetro) tiene una respuesta espectral de 4500 a 50000 nm, también en un campo de vista de 180°. Se tomaron precauciones en la instalación del instrumento para evitar que sombras de árboles, edificios y otras instalaciones provocaran interferencias.

2.3. Estimación de propiedades biofísicas

2.3.1. Albedo (α)

El albedo (α) se obtuvo como un cociente de la radiación reflejada y la radiación entrante, ambas de onda corta:

$$\alpha = K_{\uparrow} / K_{\downarrow} \quad (2)$$

2.3.2. Emisividad atmosférica (ϵ_{atm})

La emisividad atmosférica (ϵ_{atm}) se obtuvo a partir de las mediciones de L_{\downarrow} y la temperatura del aire (T) en grados Kelvin, empleando la ley de Stefan-Boltzman:

$$\epsilon_{atm} = L_{\downarrow} / [(5.67 \cdot 10^{-8}) \cdot T^4] \quad (3)$$

2.3.3. Índice de claridad atmosférica (K_0)

El índice de claridad atmosférica (K_0) se obtuvo mediante (Colliber, 1991):

$$K_0 = K_{\downarrow} / Q_0 \quad (4)$$

Q_0 es la radiación solar extraterrestre diaria (Iqbal, 1983), que se obtuvo mediante:

$$Q_0 = (24/\pi) I_{sc} \xi_0 [(\pi/180) \omega_s (\sin \delta \sin \varphi) + (\cos \delta \cos \varphi \sin \omega_s)] \quad (5)$$

Donde I_{sc} es la constante solar = 1367 W/m², ξ_0 es el factor correctivo de excentricidad para la distancia media tierra-sol, δ es la declinación del sol en grados, φ es la latitud geográfica en grados de la ciudad de Mexicali, B.C. = 32.55°, y ω_s es el ángulo horario del orto. Las expresiones para calcular δ , ξ_0 y ω_s son las siguientes:

$$\delta = (23.45 \cdot \pi / 180) \cdot (\sin(2\pi \cdot (dj+284)/365)); \text{ dj es el día juliano} \quad (6)$$

$$\xi_0 = 1 + 0.033 \cdot \cos(2\pi \cdot dj/365) \quad (7)$$

$$\omega_s = -\cos^{-1}(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \quad (8)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

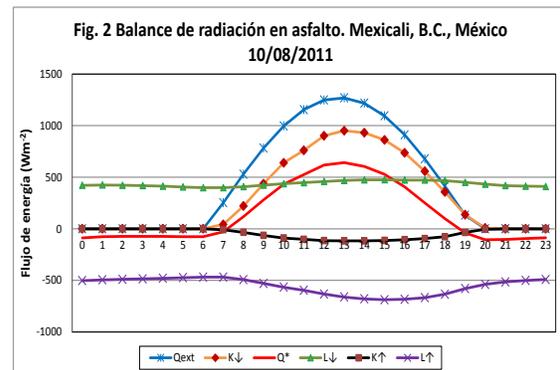
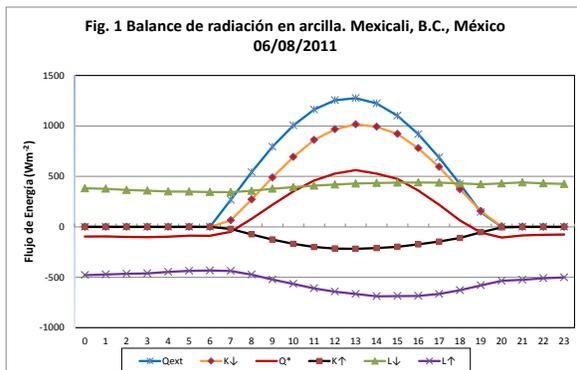
3.1. Balance de radiación

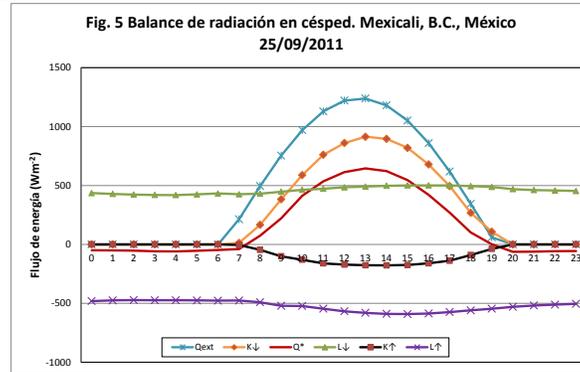
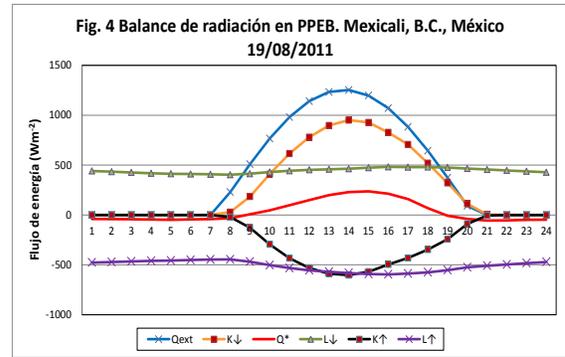
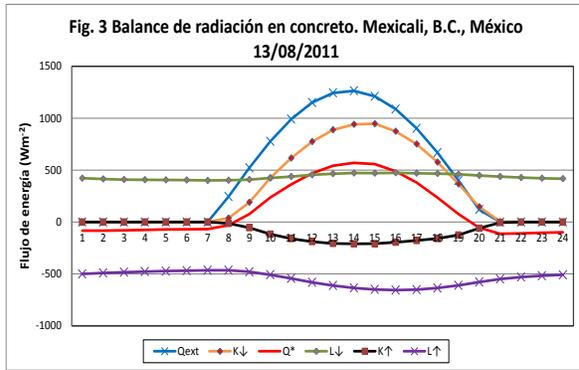
Los valores promedio de las componentes del balance de radiación para las coberturas se muestran en la tabla 1. Dado que las mediciones se realizaron en diferentes días, los valores de Q_0 , K_{\downarrow} y L_{\downarrow} tienen de inicio valores dispares. Sin embargo, al realizar una prueba t de diferencia de medias, con un nivel de significancia de 0.05 entre los valores de Q_0 y K_{\downarrow} indican que no hay diferencia. Respecto a L_{\downarrow} no hubo diferencia significativa en los días que se tuvieron mediciones de asfalto, concreto y PPEB, pero sí la hubo cuando se midió en césped y arcilla. Dado que los días estuvieron despejados, parece que factores como el contenido de vapor de agua y aerosoles atmosféricos tuvieron que ver con esa diferencia mostrada.

Tabla 1. Valores promedio de las componentes del balance de radiación en las diferentes coberturas. Se presenta también el valor de Q_0 . Todos los valores están en W/m^2 .

Fecha	06/08/2011	10/08/2011	13/08/2011	19/08/2011	25/09/2011
	Arcilla	Asfalto	Concreto	PPEB	Césped
Q_0	449.9	445.0	441.0	432.2	422.3
K_{\downarrow}	340.6	314.1	314.0	303.2	289.5
K_{\uparrow}	-79.9	-44.9	-78.3	-199.4	-65.5
L_{\downarrow}	399.3	434.7	434.3	443.1	459.3
L_{\uparrow}	-546.5	-554.8	-544.1	-512.0	-522.6
Q^*	113.6	146.1	123.4	33.6	159.0

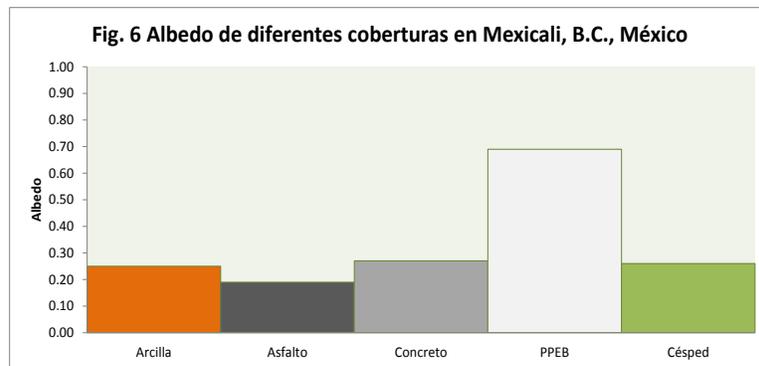
El balance de radiación de cada cobertura se presenta en las gráficas 1 a 5. Se muestra que el patrón diario de Q_0 , K_{\downarrow} , y Q^* tienen un comportamiento parecido con los mayores valores al mediodía solar local en la mayoría de las coberturas, sin embargo, el PPEB destaca, respecto a los otros materiales en cuanto a la Q^* , por la magnitud reducida y el retraso temporal en su valor máximo. La radiación de onda corta saliente, K_{\uparrow} , al ser función del albedo, muestra un comportamiento diurno dependiente de la superficie subyacente y del ángulo de inclinación de los rayos solares. Respecto a la radiación de onda larga entrante y saliente, L_{\downarrow} y L_{\uparrow} , respectivamente, no muestran esa característica ondulatoria de los otros flujos, y con una variación ligeramente mayor en la L_{\uparrow} .





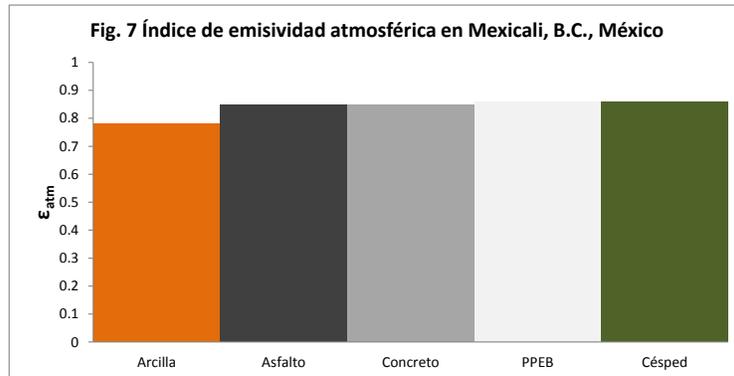
3.2. Propiedades biofísicas

En las figuras 6, 7 y 8 se presentan para cada cobertura estudiada los valores de albedo (α), índice de claridad atmosférica (K_0) y emisividad atmosférica (ϵ_{atm}), respectivamente. La figura 6 muestra el albedo medio de las coberturas. Como se observa, el asfalto con el valor promedio de 0.19 es el más bajo, mientras que el valor promedio más alto lo tiene el PPEB con 0.69. Así, el asfalto es uno de los principales factores responsable de un ambiente térmico más caliente, porque almacena más radiación solar entrante y refleja menos, mientras que el PPEB ayuda a que el ambiente tenga un calentamiento menor, porque refleja más radiación de onda corta. En los casos de la arcilla, el concreto y el césped, fueron materiales con albedos parecidos, 0.25, 0.27 y 0.26, respectivamente.

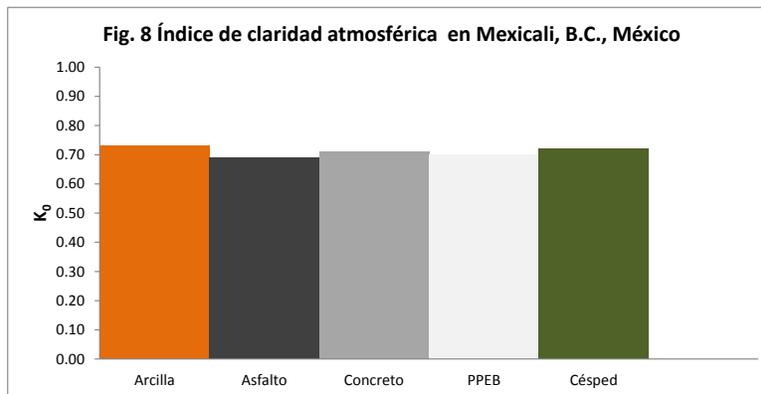


Respecto a la emisividad atmosférica se observa en la figura 7 que el valor más bajo estimado fue de 0.78, en el día que la arcilla era la cobertura experimental, mientras que

en las demás coberturas, la emisividad estuvo muy estable, entre 0.85 y 0.86. Siendo la emisividad dependiente de la radiación de onda larga entrante de la atmósfera y de la temperatura del aire, que a su vez son dependientes del vapor de agua y aerosoles presentes, se observa días muy parecidos en esas propiedades atmosféricas.



En cuanto al índice de claridad atmosférica, su rango estuvo entre 0.69 y 0.73, con el valor más bajo para asfalto, y el más alto para arcilla (Fig. 8). Los valores encontrados no dependen de la cobertura superficial, sino más bien indican que en promedio un 30% de la energía que llega al tope de la atmósfera es disipada antes de llegar a la superficie medida. Un valor comparativo con un estudio realizado en Bogotá muestra que Mexicali tiene una atmósfera más transparente para días claros ya que en aquella ciudad se obtuvo un índice de claridad atmosférico promedio de 0.663 (Forero et al., 2008).



3.3. Modelos para la radiación neta

Se propusieron dos tipos de modelos, los primeros en función de la radiación solar entrante para cada tipo de cobertura experimental; este tipo de modelación consiste en una regresión lineal como la que se expone a continuación:

$$Q^* = b_0 + b_1 \cdot K_{\downarrow} \quad (9)$$

En donde b_0 y b_1 son los estimadores de las constantes de regresión. Este modelo empírico ha demostrado excelente linealidad en todos los estudios que se han realizado, y solidez estadística de la relación expresada por la ecuación 9, particularmente para cielo despejado. La evidencia presentada en esos estudios ha contribuido a una aceptación

general de la conveniencia de usar este modelo. Los modelos encontrados a partir de las mediciones realizadas se muestran en la tabla 2, en donde R^2 se refiere al coeficiente de determinación asociado al modelo, los cuales indican que en el peor de los casos, la radiación entrante de onda corta, explica arriba del 97% a la radiación neta.

Tabla 2. Modelos lineales para estimar la radiación neta (Q^*) en función de la radiación solar entrante (K_{\downarrow}). R^2 es el coeficiente de determinación.

Superficie medida	Modelo lineal	R^2
Arcilla	$Q^* = 0.63 \cdot K_{\downarrow} - 101.3$	0.99
Asfalto	$Q^* = 0.75 \cdot K_{\downarrow} - 88.8$	0.99
Concreto	$Q^* = 0.68 \cdot K_{\downarrow} - 90.8$	0.99
PPEB	$Q^* = 0.28 \cdot K_{\downarrow} - 52.3$	0.972
Césped	$Q^* = 0.76 \cdot K_{\downarrow} - 60.0$	0.99

Sin embargo, tal como Gay (1971) comenta, hay una confusión aparente en la naturaleza estadística del modelo reportado arriba, y también una falla aparente para reconocer claramente la relación entre el modelo empírico y el proceso real de intercambio de radiación, por lo que se propone la modelación de la radiación neta en función del coeficiente de intercambio de onda larga (λ), que está basado en la dependencia de L^* (flujo neto de onda larga) sobre K_{\downarrow} . En el nuevo modelo propuesto (mejorado) se identifica a L^* como la variable dependiente, que consiste de dos componentes, L_{\downarrow} y L_{\uparrow} . Tal modelo es el que a continuación se propone.

$$Q^* = (1 + \lambda) K^* + L^*_0 \quad (10)$$

En la que $K^* = K_{\downarrow} - K_{\uparrow}$, y L^*_0 es el estimador estadístico de L^* en $K_{\downarrow} = 0$. El caso de λ queda definido por la siguiente ecuación:

$$\lambda = (L^* - b_1)/K^* \quad (11)$$

Las características del intercambio de radiación de una superficie natural quedan descritos por un solo modelo de regresión, solamente si la radiación de onda larga emitida por la superficie (L_{\uparrow}) tiene una relación definible a la regresada por la atmósfera (L_{\downarrow}). Los modelos propuestos, que tienen un significado físico importante de acuerdo a la superficie de medición, y a las condiciones atmosféricas prevalentes se presentan en la tabla 3.

Los R^2 encontrados en estos modelos no son significativamente diferentes de la primera propuesta, a excepción del PPEB en el que la radiación neta es explicada ahora en un 99.4%, en lugar del 97.2%.

En la propuesta de esta modelación se asume que existe equilibrio radiativo entre la superficie y la atmósfera, es decir, que no se presentó advección en el período de las observaciones. Hay que tener en cuenta que las propiedades y los antecedentes atmosféricos previos por encima de la superficie tienen algún efecto en la L_{\downarrow} y en consecuencia en L^* . Debido a que L_{\downarrow} es generalmente más estable que L_{\uparrow} , lo que puede verificarse al observar las figuras del balance radiativo, se enfatizan los efectos de la superficie, y por tanto de las diferentes coberturas analizadas en este estudio.

Tabla 3. Modelos lineales para estimar la radiación neta (Q^*) en función de la radiación neta de onda corta (K^*). R^2 es el coeficiente de determinación, λ es el coeficiente de intercambio de onda larga, α el albedo de superficie, T_{SUP} es la temperatura media de la superficie y T_{MXSUP} es la temperatura máxima de la superficie.

Superficie	Modelo	R^2	λ	α	T_{SUP}	T_{MXSUP}
Arcilla	$Q^* = 0.81K^* - 102.0$	0.99	-0.19	0.25	39.9	65.2
Asfalto	$Q^* = 0.86K^* - 85.2$	0.99	-0.14	0.19	42.2	63.5
Concreto	$Q^* = 0.89K^* - 85.4$	0.99	-0.11	0.27	39.7	58.8
PPEB	$Q^* = 0.79K^* - 48.0$	0.99	-0.21	0.69	33.3	46.3
Césped	$Q^* = 0.96K^* - 54.9$	0.99	-0.05	0.26	34.7	44.5

Se observa que todos los valores de λ son negativos, lo que implica que las coberturas medidas convierten la energía solar absorbida mayormente en calor sensible (Gay, 1971). Puede observarse que el valor de λ para césped tiene un valor que está próximo al valor cero, lo que implica que parte de la energía se está utilizando también para evapotranspiración. De los datos experimentales medidos, se observó una relación inversamente proporcional entre la temperatura de superficie (TS) y el albedo (tabla 3). Las temperaturas promedio más altas se observaron en la superficie con el albedo más bajo, y viceversa. En el caso del césped, aun cuando el albedo es muy parecido con la arcilla y el concreto, el calor gastado en la evapotranspiración, hace que la temperatura sea más baja que en aquellos. Se observa una diferencia importante en la propuesta de los dos modelos, principalmente en la pendiente empírica de todas las superficies. Se comentan dos superficies contrastantes, asfalto y césped, las cuales prácticamente tienen el mismo valor de pendiente, 0.75 y 0.76, respectivamente. La diferencia en el balance de radiación se deben a diferencias en el albedo, 0.19 y 0.26, respectivamente, y en la manera en que se gasta el flujo de energía, como se mencionó anteriormente. La diferencia de esa pendiente en los dos modelos es notable, por ejemplo, en el PPEB el modelo empírico indica que si la superficie absorbe 1.0 W/m^2 de radiación solar (K_{\downarrow}), la radiación neta se incrementaría 0.28 W/m^2 , sin embargo en el modelo mejorado se incrementaría 0.79 W/m^2 . Por tanto, este último modelo muestra que la respuesta es afectada tanto por la superficie como por el albedo. Lo importante también de esta modelación es que se ha identificado a la radiación neta de onda larga (L^*) como la variable independiente.

3.4. Implicaciones urbanas

Las implicaciones hacia el medio urbanizado y que son destacables, tanto del balance radiativo, como de las propiedades biofísicas, en particular el albedo, se pueden resumir en los siguientes comentarios. Las coberturas superficiales de las que se compone mayormente la ciudad son en una buena parte asfaltos y concretos, siendo el primero el del albedo menor y el que más contribuye al calentamiento urbano, es decir, es el principal precursor del desarrollo de la isla urbana de calor; el concreto aunque con un albedo menor, pero siendo un material impermeable y carente de evaporación, calienta la superficie, y por ende como calor sensible calienta directamente el aire de los alrededores cercanos. Un material altamente reflectivo resultó ser el PPEB, y por tanto el que menos almacenamiento de calor representa para el medio urbanizado; este material se encuentra en los techos de las construcciones. La radiación de onda larga ascendente (L_{\uparrow}) en estos tres materiales, en orden de importancia numérica (ver tabla 1) son el asfalto, concreto y

PPEB, siendo los dos primeros los que pueden incrementar la carga térmica en los peatones y causar gran incomodidad térmica. Respecto al césped, aunque con un albedo muy parecido al concreto, debido al fenómeno evapotranspirativo, se encontró que las temperaturas de superficie medidas fueron en promedio 5°C más bajas. Este resultado pudiera ser utilizado en la planificación urbana mediante el diseño de un tipo de material que permita el libre intercambio de agua entre ese material y el suelo subyacente, tal vez algún material poroso, menos denso y con menor capacidad calorífica. El material nativo de la región que es la arcilla, tiene un albedo sumamente parecido al concreto y al césped, debido a sus propiedades físicas, alcanza temperaturas sumamente altas, muy parecidas a las del asfalto, pero durante la noche es el que más enfriamiento tiene. Debido a que en los alrededores de la ciudad se cuenta parcialmente con esta cobertura se ha visto en otros estudios (García-Cueto et al., 2009) que en la ciudad de Mexicali se desarrolla la isla urbana de calor, un fenómeno típicamente nocturno. Las propiedades de la atmósfera, como la emisividad y el índice de claridad, permiten visualizar que Mexicali posee condiciones óptimas de transparencia atmosférica por lo que la ganancia neta de radiación solar es alta, así que el manejo de coberturas superficiales, como superficies de alto albedo y evapotranspirativas, serían las superficies ideales para disminuir la carga térmica de la población expuesta.

Dado que el análisis realizado es de solamente condiciones despejadas en un ciclo de 24 horas por cada cobertura superficial en un mes típico del verano en la ciudad de Mexicali, se pretende seguir monitoreando el comportamiento del balance radiativo en una secuencia de tiempo mayor, y con diversas condiciones atmosféricas, para concluir con más elementos que corroboren lo encontrado hasta el momento.

También, esta investigación adolece de no saber el porcentaje de cada cobertura superficial analizada a nivel ciudad, por lo que una tarea pendiente es realizar su estimación mediante un sistema de información geográfica, para inferir a una mayor escala espacial lo planteado hasta ahora.

Respecto a los modelos para la estimación de la radiación neta es obvio que cualquiera de las dos propuestas da muy buenos resultados, sin embargo es la segunda propuesta, tanto por la física involucrada como por la mejora en la explicación en función del coeficiente de determinación que se recomienda su utilización.

4. CONCLUSIONES

En el balance radiativo realizado se observó que la radiación neta es diferente dependiendo de la cobertura superficial en la que se realizó la medición. Para un ciclo de 24 horas de medición en agosto de 2011, el mayor valor promedio de radiación neta fue para el asfalto con 146.1 W/m², y el menor valor promedio fue para el PPEB con 33.6 W/m². Esta diferencia tiene que ver principalmente con el albedo de cada superficie, pues la emisividad atmosférica y el índice de claridad atmosférica tuvieron básicamente los mismos valores en los diferentes días del experimento. El mayor albedo lo tuvo el PPEB, con 0.69, y el menor valor el asfalto con 0.19. Así, el asfalto es uno de los principales factores responsable de un ambiente térmico más caliente, porque almacena más radiación solar entrante y refleja menos, mientras que el PPEB ayuda a que el ambiente tenga un calentamiento menor, porque refleja más radiación de onda corta. En cuanto al césped, que tiene un albedo parecido al concreto y a la arcilla, por la partición de su energía a un flujo evapotranspirativo, es el que tuvo la temperatura máxima más baja de los cinco materiales estudiados. En cuanto a los modelos para estimar la radiación neta en función de la radiación solar entrante y la radiación neta de onda corta, se encontró en todos los casos coeficientes de determinación superiores a 0.97, pero se recomienda su

estimación con el modelo mejorado por la física involucrada en la propuesta. Se recomienda continuar las mediciones para lograr inferencias válidas para toda la ciudad y lograr propuestas de planeación biourbanísticas viables desde el punto de vista económico.

5. BIBLIOGRAFÍA

Arnfield A.J., (2003). Two decades of urban climate research, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.* 23: 1-26.

Bennie B. H. J., Wiltshire A., Hill M. O., & Baxter R., (2008). Slope, aspect and climate: Spatially explicit and implicit models of topographic microclimate in chalk grassland. *Ecological Modelling*, 216(1), 47–59.

Colliber D.G., (1991). Techniques of estimating incident solar radiation. In B.F. Parker (ed.). *Solar energy in agricultura*. Elsevier, Amsterdam, pp. 1-66.

Christen A. & Voogt R., (2004). Energy and radiation balance of a central European city. *Int. J. Climatol.* 24: 1395-1421.

Forero N. L., Meza W., Martínez M. A., Caicedo L. M., Gordillo G., (2008). Estimación del Valor Medio Mensual del Índice de Claridad Atmosférico (Kt) Para Bogotá, a Partir de Datos de Radiación Solar Global. *Revista Colombiana de Física* 40: 167-169.

García-Cueto O.R., Tejeda-Martínez A. & Bojórquez-Morales G., (2009). Urbanization effects upon the air temperatura in Mexicali, B.C., México. *Atmósfera* 22: 349-365.

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.

Gay W.L., (1971). The regression of net radiation upon solar radiation. *Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B* 19: 1-14.

Iqbal M., (1983). *An introduction to solar radiation*. Academic Press.

Ji, X., Kang, E., Zhao, W., Zhang, Z., & Jin, B., (2009). Simulation of heat and wáter transfer in a surface irrigated, cropped sandy soil. *Agricultural Water Management*, 96(6), 1010–1020.

Kalthoff N., Fiebig-Wittmaack M., Meißner C., Kohler M., Uriarte M., Bischoff-Gauß 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.

Li, S., Tong, L., Li, F., Zhang, L., Zhang, B., & Kang, S. (2009). Variability in energy partitioning and resistance parameters for a vineyard in northwest china. *Agricultural Water Management*, 96(6), 955–962.

Peng J.L., Wu X. & Jiang Z.H., (2008). Characteristics analysis of energy Budget over urban and suburban underlying surfaces in Nanjing (in Chinese). *Sci. Meteorol. Sin.* 28: 21-29.

Tong H., Chan J.C.L. & Sang J.G. (2004). A study of the urban boundary layer model and its application in the Hong Kong área (in Chinese). *Chin. J. Atm. Sci.* 28: 957-978.

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

White J.M., Eaton F.D. & Auer A.H., (1978). The net radiation budeget of the St. Louis metropolitan área. *J. Appl. Meteorol.* 17: 593-599.

Wright J., (1999). Emisividad infrarroja de la atmósfera medida en Heredia, Costa Rica. *Top. Meteor. Oceanog.* 61: 44-51.

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

Zhang H.Y., Rao S., Chi Y.Y., (2004). Advances in the impacts of urban landscape pattern on urban air environment (in Chinese). *Adv. Earth Sci.* 21: 1025-1032.